

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:
**«АВТОГЕНЕРАТОРНИЙ СЕНСОР ТИСКУ ДЛЯ БЕЗДРОТОВИХ
СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ»**

Виконав: студент 2-го курсу, групи РТ-24м
спеціальності 172 Електронні комунікації
та радіотехніка

(цифра і назва напрямку підготовки, спеціальності)

Панасюк Т.Ю.
(прізвище та ініціали)

Керівник: д.т.н., доцент, доц. каф. ІРТС

Осадчук Я.О.
(прізвище та ініціали)

« 12 » 12 2025 р.

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

Семенова О.О.
(прізвище та ініціали)

« 15 » 12 2025 р.

Допущено до захисту
Завідувач кафедри ІРТС
д.т.н., проф. Осадчук О.В.
(прізвище та ініціали)
« 16 » 12 2025 р.

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 – 172 Електронні комунікації та радіотехніка
Освітньо-професійна програма – Радіотехніка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ІРТС

д.т.н., проф. Осадчук О.В.

«16» вересня 2025 року

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

Панасюку Тарасу Юрійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи. «Автогенераторний сенсор тиску для бездротових сенсорних мереж»

керівник роботи д.т.н., доц., доцент кафедри ІРТС Осадчук Я.О.

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

затверджені наказом вищого навчального закладу від 24.09.2025 р. №313.

2. Строк подання студентом роботи 12.12.2025р.

3. Вихідні дані до роботи: Напруга живлення 5В; тривісне вимірювання прискорення, що дозволяє здійснювати комплексний аналіз руху та вібрації конструкції; діапазон вимірювання ± 2 г, ± 4 г, ± 8 г та ± 16 г; 12-бітна цифрова роздільна здатність, що забезпечує точні вимірювання прискорення, необхідні для аналізу ударів та вібрації; регульована частота вихідних даних до 800 Гц.

4. Зміст текстової частини: Вступ. Інноваційні гнучкі провідні полімерні композити для носимих електродів електрокардіограми та гнучких датчиків деформації. Багатосенсорна система на основі бездротової сенсорної мережі (WSN) для моніторингу стану конструкцій. Експериментальні дослідження та визначення продуктивності системи MSS. Економічна частина. Висновки. Список використаних джерел. Додатки.

5. Перелік ілюстративного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): Схема процесу виготовлення електродів ЕКГ та гнучких датчиків деформації. Елементне картування EDS. Графіки напруги, що показують згинання та розгинання для шести різних зразків. Концептуальна блок-схема мініатюризованого MSS для SHM. Вихідна напруга в залежності від опору тензодатчика. Етапи збору сигналу PZT. Багатосенсорна система SHM на композитній панелі. Події компаратора з пороговим аспектом. Експериментальна установка для вимірювання деформації з алюмінієвим зразком.

6. Консультанти розділів роботи

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

7. Дата видачі завдання 16.09.2025 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Вибір, узгодження та затвердження тем МКР на випусковій кафедрі.	02.09.2025-07.09.2025	
2.	Огляд та аналіз літературних джерел.	08.09.2025-16.09.2025	
3.	Затвердження тем по ВНТУ. Розробка індивідуального завдання на МКР.	17.09.2025-24.09.2025	
4.	Попередня розробка основних розділів. Аналіз вирішення поставленої задачі. Розробка структурної схеми та технічних рішень.	01.10.2025-20.10.2025	
5.	Математичне моделювання та електричні розрахунки. Експериментальне дослідження.	21.10.2025-04.11.2025	
6.	Розробка ілюстративної частини МКР.	05.11.2025-12.11.2025	
7.	Економічна частина.	13.11.2025-23.11.2025	
8.	Оформлення пояснювальної записки та ілюстративної частини.	24.11.2025-28.11.2025	
9.	Нормоконтроль.	29.11.2025-03.12.2025	
10.	Попередній захист МКР, доопрацювання, рецензування МКР.	04.12.2025-15.12.2025	
11.	Захист МКР ЕК.	17.12.2025-18.12.2025	

Студент


(підпис)

Панасюк Т.Ю.

Керівник роботи


(підпи

Осадчук Я.О.

АНОТАЦІЯ

УДК 621.397

Панасюк Т.Ю. Автогенераторний сенсор тиску для бездротових сенсорних мереж. Магістерська кваліфікаційна робота. – Вінниця: ВНТУ, 2025. – 108с. На українській мові. Бібліогр.: 59 назв; табл.:12; Рис. 39.

У магістерській кваліфікаційній роботі проведено аналіз основних тенденцій розвитку та принципів роботи гнучких провідних полімерних композитів (FCPC) на основі CuPc, вбудовані в полімерні матриці PPy та PEDOT:PSS які були використані для виготовлення ЕКГ-електродів та датчиків деформації на гнучких підкладках, таких як PET, папір Xuan та EVA.

У другому розділі представлено мініатюрну багатосенсорну систему на базі бездротової сенсорної мережі (WSN), призначену для бортового моніторингу герметичності (SHM) аерокосмічних конструкцій. Основною метою було створення сенсорної платформи, яка включає різні типи датчиків, має низьке енергоспоживання та бездротове підключення. Розроблена система має компактну та гнучку друковану плату розміром 3 см×3 см та вагою приблизно 0,5 г. Вона інтегрує PZT, тензодатчик, акселерометр та датчики навколишнього середовища для комплексного моніторингу конструкцій. Така схема дозволяє системі збирати як механічні, так і екологічні дані. Конструкція апаратного забезпечення забезпечує мінімальну вагу та компактні розміри, таким чином задовольняючи вимоги аерокосмічної галузі, де додаткова маса або розмір можуть погіршити продуктивність або обмежити кількість можливих сенсорних вузлів.

У третьому розділі представлені експериментальні дослідження багатосенсорної системи SHM розробленої для універсального розгортання. Експериментальні оцінки продемонстрували надійність розробленої платформи. Результати підтверджують, що система добре підходить для тривалого застосування SHM з мінімальними вимогами до живлення. Крім того, було проведено тестування дальності для перевірки зв'язку Bluetooth LE системи за різних швидкостей передачі потужності та схем модуляції (CODED, 1M та 2M PHY). Результати підтверджують, що MSS забезпечує надійне бездротове покриття, придатне для застосування в літаках та конструкціях.

Ключові слова: сенсор тиску, тензометричний перетворювач, гнучкий провідний полімерний композит, п'єзорезистивний ефект, бездротова сенсорна мережа.

ANNOTATION

Panasyuk T.Yu. Self-generative pressure sensor for wireless sensor networks. Master's qualification work. – Vinnytsia: VNTU, 2025. – 108p. In Ukrainian. Bibliography: 59 titles; Table.: 12; Fig.39.

The master's qualification work analyzes the main trends in the development and principles of operation of flexible conductive polymer composites (FCPC) based on CuPc, embedded in polymer matrices PPy and PEDOT:PSS, which were used to manufacture ECG electrodes and strain sensors on flexible substrates such as PET, Xuan paper and EVA.

The second section presents a miniature multi-sensor system based on a wireless sensor network (WSN), designed for on-board tightness monitoring (SHM) of aerospace structures. The main goal was to create a sensor platform that includes various types of sensors, has low power consumption and wireless connectivity. The developed system has a compact and flexible printed circuit board with a size of 3 cm × 3 cm and a weight of approximately 0.5 g. It integrates PZT, strain gauge, accelerometer and environmental sensors for comprehensive monitoring of structures. Such a scheme allows the system to collect both mechanical and environmental data. The hardware design ensures minimal weight and compact dimensions, thus meeting the requirements of the aerospace industry, where additional weight or size may degrade performance or limit the number of possible sensor nodes.

In the third section, experimental studies of a multi-sensor SHM system designed for universal deployment are presented. Experimental evaluations demonstrated the robustness of the developed platform. The results confirm that the system is well suited for long-term SHM applications with minimal power requirements. In addition, range testing was conducted to verify the Bluetooth LE communication of the system at different power transfer rates and modulation schemes (CODED, 1M and 2M PHY). The results confirm that MSS provides reliable wireless coverage suitable for aircraft and structural applications.

Keywords: pressure sensor, strain gauge, flexible conductive polymer composite, piezoresistive effect, wireless sensor network.

ЗМІСТ

ВСТУП	8
1 ІННОВАЦІЙНІ ГНУЧКІ ПРОВІДНІ ПОЛІМЕРНІ КОМПОЗИТИ ДЛЯ НОСИМИХ ЕЛЕКТРОДІВ ЕЛЕКТРОКАРДИОГРАМИ ТА ГНУЧКИХ ДАТЧИКІВ ДЕФОРМАЦІЇ	12
1.1 Принципи застосування полімерних композитів для гнучких сенсорів деформації	12
1.2 Гнучкі електроди для датчиків деформації. Матеріали та методи.....	16
1.3 Морфологічна та композиційна характеристика FCPC	21
1.4 Поведінка FCPC під час напруження та деформації	26
1.5 Оцінювання оптичних параметрів у FCPC	30
1.6 Електрична оцінка електродів ЕКГ та гнучких датчиків деформації	32
1.7 Висновки до розділу.....	36
2 БАГАТОСЕНСОРНА СИСТЕМА НА ОСНОВІ БЕЗДРОВОЇ СЕНСОРНОЇ МЕРЕЖІ (WSN) ДЛЯ МОНІТОРИНГУ СТАНУ КОНСТРУКЦІЙ	38
2.1 Основні принципи застосування інтегрованих сенсорних систем	38
2.2 Розробка багатосенсорної системи для SHM	43
2.3 Багатосенсорна система SHM	45
2.4 Датчики та DAQ	47
2.5 Реалізація системи MSS	51
2.6 Експериментальні установки для різних застосувань SHM	57
2.7 Висновки до розділу.....	61
3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ПРОДУКТИВНІСТЬ СИСТЕМИ MSS	63
3.1 Експериментальні дослідження багатосенсорної система SHM	63
3.2 Порівняння вимірювань тензодатчиків	69
3.3 Порівняння вимірювань прискорення	71
3.4 Вимірювання струму.....	74
3.5 Оцінка дальності бездротового зв'язку.....	75
3.6 Висновки до розділу.....	76
4 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА	78
4.1 Технологічний аудит розробленого автогенераторного сенсора тиску для бездротових сенсорних мереж (далі – розробки).....	78
4.2 Розрахунок витрат на розроблення автогенераторного сенсора тиску для бездротових сенсорних мереж	83
4.3 Розрахунок економічного ефекту від можливої комерціалізації нашої розробки.....	87

ВИСНОВКИ	91
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	93
Додаток А (обов`язковий) Ілюстративний матеріал.....	99
Додаток Б (обов`язковий) Протокол перевірки навчальної (магістерської) кваліфікаційної роботи.....	107

ВСТУП

Актуальність. З розвитком технології матеріалів, бурхливо розвивається галузь інтелектуальних носимих пристроїв, що стає критично важливою галуззю досліджень, що зумовлює потребу в удосконаленні сенсорних технологій [1], особливо в медичних застосуваннях [2]. Електрокардіографічний (ЕКГ) моніторинг є найпоширенішою областю застосування оригінальних та інноваційних матеріалів для виготовлення нових датчиків [2]. Електрокардіографія – це метод, за якого електрична активність серця реєструється за допомогою електродів, розміщених на шкірі, що відображає зміну напруги з часом [3]. ЕКГ-електроди – це датчики, що використовуються для перетворення іонного струму від тіла до електричного струму через ланцюг [4]. ЕКГ-електрод по суті складається з підкладки, опори, матриці та провідних частин [5]. Прогрес у розробці матеріалів був зосереджений на трьох основних типах електродів. (i) Щодо сухих композитних електродів, кілька досліджень повідомляють про електроди на основі полідиметилсилоксану (PDMS), такі як системи цеоліт/PDMS, срібні наностержні – відновлений оксид графену (RGO) – PDMS та срібні наностержні –PDMS, які пропонують змінний імпеданс [6] від $93,9 \pm 0,7$ кОм до $6,2 \pm 3,7$ кОм (40 Гц–1 кГц) та співвідношення сигнал/шум (SNR) близько 12 дБ [7]. (ii) Електроди на текстильній основі – будь то посріблений нейлон, бавовна з пряжею з наночастинок срібла/нержавіючої сталі або бавовняна/поліестерова тканина зі срібним друком – захоплюють сигнали безпосередньо через свої провідні структури, досягаючи значень імпедансу нижче 2 кОм та SNR у діапазоні 30–54,4 дБ [8]. Нарешті, (iii) гібридні композитні електроди з гідрогелю та вуглецевих нанотрубок функціонують як волога система та мають імпеданс близько 294,5 Ом зі співвідношенням сигнал/шум (SNR) 54,4 дБ, що забезпечує низький імпеданс та надійне захоплення сигналу [4]. Важливо зазначити, що, незважаючи на ці досягнення, гелеві срібно-хлоридні (Ag/AgCl) електроди, які використовують електроліт (гель) між шкірою та електродом, все ще є найбільш широко використовуваними в клінічних умовах [3-5].

Ще однією поширеною сферою застосування матеріалознавства в охороні здоров'я є виявлення руху людини [9]. Гнучкі датчики деформації нещодавно привернули широку увагу як основний член сімейства носимої електроніки [10]. Це тип резистивних датчиків, які в першу чергу виявляють зміни опору внаслідок механічного розтягування або деформації [1-11], що може перетворювати сигнали фізичної активності на

різні візуальні електричні сигнали [9]. Архітектура датчиків деформації зазвичай є багатошаровою, включаючи підкладку, композитну сенсорну плівку та верхній електрод/буфер [12]. Такі датчики повинні бути здатні генерувати високоякісні сигнали, маючи такі характеристики, як низька жорсткість на вигин, низький модуль та чітко пружна реакція на деформацію [13]. Отже, існує два основних підходи до виробництва гнучких електронних пристроїв. Перший підхід передбачає використання неорганічних матеріалів, таких як нанорозмірні метали [14]. Ці внутрішньо розтяжні провідні електроди створюються шляхом вбудовування перколяційних мереж з одновимірних провідних матеріалів, таких як металеві нанодропи та вуглецеві нанотрубки, в еластомерну матрицю для витримування великих зовнішніх деформацій без виникнення великих напружень вздовж одновимірних матеріалів [15].

Метою роботи є покращення метрологічних характеристик та розробка автогенераторного сенсора тиску.

Об'єктом дослідження є фізико-математичні моделі та структури автогенераторного сенсора тиску.

Предметом дослідження – статичні і динамічні характеристики автогенераторного сенсора тиску.

Для досягнення поставленої мети у магістерській кваліфікаційній роботі розв'язуються наступні задачі:

- провести аналіз основних тенденцій розвитку та принципів роботи механічних датчиків на основі гнучких провідних полімерних композитів.
- розробити багатосенсорну систему на базі бездротової сенсорної мережі.
- провести експериментальні дослідження багатосенсорної системи SHM.
- провести оцінювання споживання струму в різних режимах роботи, включаючи режим сну, синхронізації часу та активний режим..

Методи дослідження ґрунтуються на використанні: основних положень теорії функції комплексної змінної; рівнянь математичної фізики під час розробки математичних моделей; диференціального та інтегрального числення для створення математичної моделі.

Наукова новизна одержаних результатів:

Проведено аналіз матеріалів на основі гнучких провідних полімерних композитів (FCPC) на основі CuPc, вбудовані в полімерні матриці PPy та PEDOT:PSS, були використані для виготовлення ЕКГ-

електродів та датчиків деформації на гнучких підкладках, таких як PET, папір Xuan та EVA.

Розроблено багатосенсорну систему на базі бездротової сенсорної мережі (WSN), призначену для бортового моніторингу герметичності (SHM) аерокосмічних конструкцій. Основною метою було створення сенсорної платформи, яка включає різні типи датчиків, має низьке енергоспоживання та бездротове підключення. Розроблена система має компактну та гнучку друковану плату розміром 3 см×3 см та вагою приблизно 0,5 г. Вона інтегрує PZT, тензодатчик, акселерометр та датчики навколишнього середовища для комплексного моніторингу конструкцій. Така схема дозволяє системі збирати як механічні, так і екологічні дані. Конструкція апаратного забезпечення забезпечує мінімальну вагу та компактні розміри, таким чином задовольняючи вимоги аерокосмічної галузі, де додаткова маса або розмір можуть погіршити продуктивність або обмежити кількість можливих сенсорних вузлів.

Використання одного радіочастотного мікроконтролера з Bluetooth LE дозволяє створити малопотужну, просторово розподілену сенсорну мережу, що зменшує потребу в проводці та спрощує розміщення датчиків. Завдяки зіркоподібній топології кілька сенсорних модулів зв'язуються з центральним вузлом, який потім передає дані на базову станцію для запису та аналізу.

Практичне значення одержаних результатів:

Проведені експериментальні дослідження багатосенсорної системи SHM розробленої для універсального розгортання. Експериментальні оцінки продемонстрували надійність розробленої платформи. Спочатку чотири MSS були розміщені в різних положеннях на композитній панелі для вимірювання даних про PZT, прискорення, температуру, тиск і вологість. Система оперативно реагувала на удари, а потім передавала всі отримані дані, отримані з датчиків, на центральний пристрій.

MSS продемонстрував свою універсальність у вимірюванні деформації та прискорення в реальному часі, застосувавши його до тензодатчика, встановленого на алюмінієвому зразку. Процедури калібрування ефективно усунули зміщення від мосту Уїтстона, забезпечуючи точні вимірювання деформації. Порівняльні випробування з комерційною системою збору даних показали, що MSS фіксує структурні реакції з точно відповідними шаблонами сигналів та піковими значеннями. Незначні розбіжності в кількості зразків, спричинені затримками бездротової передачі, не мали суттєвого впливу на точність вимірювання.

Ці результати підтверджують, що MSS здатний до надійного безперервного моніторингу.

Споживання струму оцінювалося шляхом вимірювання струму в різних режимах роботи, включаючи режим сну, синхронізації часу та активний режим. Результати підтверджують, що система добре підходить для тривалого застосування SHM з мінімальними вимогами до живлення. Крім того, було проведено тестування дальності для перевірки зв'язку Bluetooth LE системи за різних швидкостей передачі потужності (0 та +8 дБм) та схем модуляції (CODED, 1M та 2M PHY). Результати підтверджують, що MSS забезпечує надійне бездротове покриття, придатне для застосування в літаках та конструкціях.

Особистий внесок здобувача. Основні положення і результати магістерської кваліфікаційної роботи отримані автором практично самостійно.

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

1 ІННОВАЦІЙНІ ГНУЧКІ ПРОВІДНІ ПОЛІМЕРНІ КОМПОЗИТИ ДЛЯ НОСИМИХ ЕЛЕКТРОДІВ ЕЛЕКТРОКАРДІОГРАМИ ТА ГНУЧКИХ ДАТЧИКІВ ДЕФОРМАЦІЇ

1.1 Принципи застосування полімерних композитів для гнучких сенсорів деформації

З розвитком технології матеріалів, бурхливо розвивається галузь інтелектуальних носимих пристроїв, що стає критично важливою галуззю досліджень, що зумовлює потребу в удосконаленні сенсорних технологій [1], особливо в медичних застосуваннях [2]. Електрокардіографічний (ЕКГ) моніторинг є найпоширенішою областю застосування оригінальних та інноваційних матеріалів для виготовлення нових датчиків [2]. Електрокардіографія – це метод, за якого електрична активність серця реєструється за допомогою електродів, розміщених на шкірі, що відображає зміну напруги з часом [3]. ЕКГ-електроди – це датчики, що використовуються для перетворення іонного струму від тіла до електричного струму через ланцюг [4]. ЕКГ-електрод по суті складається з підкладки, опори, матриці та провідних частин [5]. Прогрес у розробці матеріалів був зосереджений на трьох основних типах електродів. (i) Щодо сухих композитних електродів, кілька досліджень повідомляють про електроди на основі полідиметилсилоксану (PDMS), такі як системи цеоліт/PDMS, срібні наностержні – відновлений оксид графену (RGO) – PDMS та срібні наностержні –PDMS, які пропонують змінний імпеданс [6] від $93,9 \pm 0,7$ кОм до $6,2 \pm 3,7$ кОм (40 Гц–1 кГц) та співвідношення сигнал/шум (SNR) близько 12 дБ [7]. (ii) Електроди на текстильній основі – будь то посріблений нейлон, бавовна з пряжею з наночастинок срібла/нержавіючої сталі або бавовняна/поліестерова тканина зі срібним друком – захоплюють сигнали безпосередньо через свої провідні структури, досягаючи значень імпедансу нижче 2 кОм та SNR у діапазоні 30–54,4 дБ [8]. Нарешті, (iii) гібридні композитні електроди з гідрогелю та вуглецевих нанотрубок функціонують як волога система та мають імпеданс близько 294,5 Ом зі співвідношенням сигнал/шум (SNR) 54,4 дБ, що забезпечує низький імпеданс та надійне захоплення сигналу [4]. Важливо зазначити, що, незважаючи на ці досягнення, гелеві срібно-хлоридні (Ag/AgCl) електроди, які використовують електроліт (гель) між шкірою та електродом, все ще є найбільш широко використовуваними в клінічних умовах [3-5].

Ще однією поширеною сферою застосування матеріалознавства в охороні здоров'я є виявлення руху людини [9]. Гнучкі датчики деформації нещодавно привернули широку увагу як основний член сімейства носимої електроніки [10]. Це тип резистивних датчиків, які в першу чергу виявляють зміни опору внаслідок механічного розтягування або деформації [1-11], що може перетворювати сигнали фізичної активності на різні візуальні електричні сигнали [9]. Архітектура датчиків деформації зазвичай є багатошаровою, включаючи підкладку, композитну сенсорну плівку та верхній електрод/буфер [12]. Такі датчики повинні бути здатні генерувати високоякісні сигнали, маючи такі характеристики, як низька жорсткість на вигин, низький модуль та чітко пружна реакція на деформацію [13]. Отже, існує два основних підходи до виробництва гнучких електронних пристроїв. Перший підхід передбачає використання неорганічних матеріалів, таких як нанорозмірні метали [14]. Ці внутрішньо розтяжні провідні електроди створюються шляхом вбудовування перколяційних мереж з одновимірних провідних матеріалів, таких як металеві нанодропи та вуглецеві нанотрубки, в еластомерну матрицю для витримування великих зовнішніх деформацій без виникнення великих напружень вздовж одновимірних матеріалів [15]. Срібні нанодропи або наночастинки Au зазвичай використовуються як чутливі елементи для гнучких сенсорів [16]. Порівняно з органічними матеріалами, нанорозмірні неорганічні матеріали зазвичай демонструють набагато кращі електронні або оптоелектронні властивості, що робить неорганічні матеріали ще однією групою кандидатів для гнучкої електроніки [16]. Другий підхід зосереджений на дослідженні нових органічних матеріалів, здатних витримувати великі деформації. Фактично, органічні матеріали, такі як полімери, є внутрішньо гнучкими, і їхні електронні та оптоелектронні властивості можна налаштувати шляхом включення різних функціональних добавок або наноструктур до полімерної основи. Наприклад, гнучкі тонкоплівкові транзистори та гнучкі фотодетектори були виготовлені з багатьма органічними напівпровідниками та показали дуже добру реакцію на зовнішні фізичні сигнали [14]. В останні роки багато зусиль було докладено до розробки органічних напівпровідників з внутрішньою розтяжністю для органічних сонячних елементів (OSC), органічних світлодіодів (OLEC), органічних світлодіодів (OLED) та органічних польових транзисторів (OFET) [15]. Також докладаються зусилля для поєднання різних типів органічних матеріалів, включаючи полімери та біомолекули, з наноматеріалами, такими як графен, для створення різноманітних нанокомпозитів з більшою розтяжністю та

здатністю до загоєння, вищою жорсткістю, електропровідністю та винятковою термостабільністю для гнучких освітлювальних та дисплейних технологій [16].

Серед органічних напівпровідників фталоціаніни мають багато видатних властивостей, таких як планарність, симетрія та локалізація електронів, що робить їх ідеальним вибором для використання в оптоелектронних пристроях, таких як сонячні елементи, світлодіоди або сенсори [18], а також хімічні сенсори, рідкі кристали, плівки Ленгмюра-Блоджетт, каталізатори, нелінійні оптичні матеріали та матеріали для оптичного зберігання даних [19]. Зокрема, фталоціанін міді (CuPC) описується як планарна, чотирикратно симетрична молекула з центральним атомом міді, координованим атомами азоту в макроциклічному кільці (див. Рисунок 1.1а) [20]. Його граничні орбіталі розташовані таким чином, що найвища зайнята молекулярна орбіталь (НОМО) локалізується на пірольних кільцях (з подвійно зайнятою a_{1u}), мідно-центрована b_{1g} орбіталь зайнята один раз, а найнижчі незайняті орбіталі (LUMO та LUMO+1) знаходяться на внутрішніх пірольних та бензольних кільцях відповідно [20]. Кристалічний CuPc найчастіше зустрічається у двох фазах: альфа та бета, які кристалізуються відповідно в орторомбічній та моноклінній кристалічних системах. Він демонструє унікальні структурні та оптичні властивості, включаючи сильне поглинання світла та високу стабільність із шириною забороненої зони 1,62–2,90 еВ залежно від енергії падаючого фотона. CuPc має потенціал в електронних пристроях, демонструючи напівпровідникові властивості в органічних польових транзисторах з рухливістю носіїв заряду $\sim 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{Vs}$ [21].

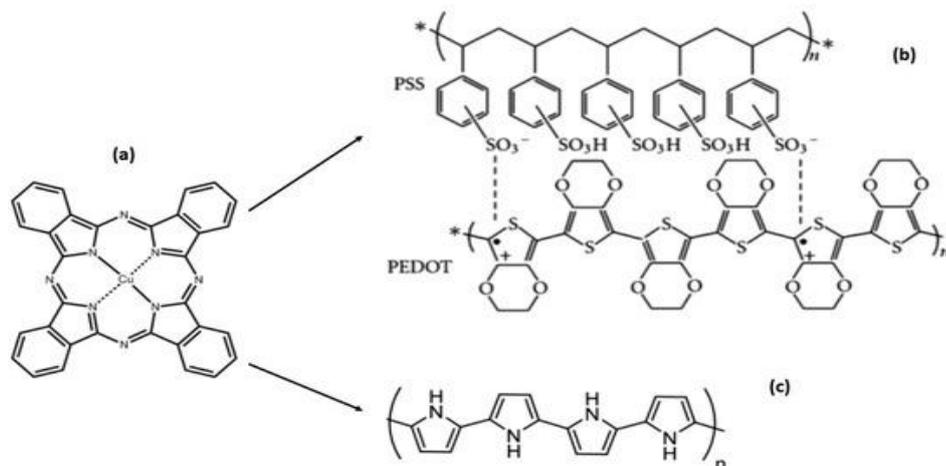


Рисунок 1.1 – Молекулярна структура (а) фталоціаніну міді (II), (б) PEDOT:PSS та (с) PPy. * вказує на те, що ланцюг простягається з подібними мономерами з обох боків

З іншого боку, провідні полімери стали значно привабливими для широкого спектру електронних застосувань завдяки своїм ключовим перевагам, таким як легкість обробки, оброблюваність у розчинах та низька вартість, хімічна різноманітність, можливість налаштування та біосумісність, а також унікальне поєднання механічних та оптоелектронних властивостей [22]. Серед провідних полімерів полі (3,4-етилендіокситіофен) полістиролсульфонат (PEDOT:PSS) виділяється як найуспішніший і той, який був найбільш широко вивчений практично та комерційно. Це провідний полімер (див. Рисунок 1.1b), який широко використовується в органічній електроніці завдяки своїй стабільності, гнучкості та постійно високій електропровідності. Ці властивості призвели до його використання як матеріалу для діркового транспорту в органічних електронних пристроях протягом понад 20 років. Отже, ці характеристики роблять його привабливим кандидатом для недорогих, низькотемпературних та оброблених у розчині електродних матеріалів, які можуть забезпечити високопродуктивні, гнучкі та розтяжні тонкоплівкові пристрої. На відміну від більшості органічних матеріалів, цей водорозчинний кон'югований полімер є дуже стійким до хімічного та фізичного впливу. Він демонструє механічну гнучкість, оптичну прозорість та електропровідність, властивості, які є важливими для застосування в біоелектроніці (датчики, виконавчі механізми), пристроях накопичення заряду та електрохромних дисплеях [23].

Кілька досліджень показали, що поліпірол (PPy) суттєво впливає на електропровідність та перенесення заряду в органічних електронних пристроях. PPy відіграє ключову роль в органічній електроніці, оскільки його π -спряжений каркас (див. Рисунок 1.1 c) може окислюватися для утворення делокалізованих поляронів/біполяронів. Включення контраніонів («легування») забезпечує провідність до 10 Scm^{-1} , зберігаючи при цьому механічну податливість. Цей полімер поєднує в собі суттєві переваги – високу екологічну стабільність, оборотну окисно-відновну активність та простий низькотемпературний синтез – із зовнішньою універсальністю дизайну, що дозволяє створювати гомополімери, кополімери та наноккомпозити, які ефективно взаємодіють з електродами, діелектриками та біологічними середовищами. Сучасні архітектури пристроїв використовують полімеризацію PPy *in situ* на нановолокнистих або текстильних каркасах, утворюючи безперервні, перкольовані шляхи, які забезпечують металоподібну провідність (72 Scm^{-1}) разом з міцністю на розрив $> 27 \text{ МПа}$, що є важливими показниками для розтяжних суперконденсаторів, біоелектродів та носимих сенсорів. Завдяки своїй

хімічній стабільності, високій провідності при легуванні, високій щільності носіїв заряду, легкій оброблюваності, сумісності з м'якими підкладками та нелінійним оптичним властивостям, PPy є одним з найбільш широко експериментально вивчених спряжених органічних полімерів [24].

Наразі існує потреба в гнучких та розтяжних носимих пристроях для покращення моніторингу людського тіла. Метою цієї роботи є розробка нових гнучких провідних полімерних композитів (FCPC) на основі органічного напівпровідника CuPc, вбудованих у полімерні матриці PPy та PEDOT:PSS. Новизна цієї роботи полягає у простому та низькому впливі на навколишнє середовище виробництві FCPC для електродів ЕКГ, а також у виробництві гнучких датчиків деформації на гнучких підкладках, таких як поліетилентерефталат (PET), папір Хуан та етиленвінілацетат (EVA) на основі CuPc, який не вивчався як основний компонент цього типу пристроїв.

1.2 Гнучкі електроди для датчиків деформації. Матеріали та методи

Усі розчинники, гліцерин, полівініловий спирт гідролізований на 99+% (PVA), фталоціанін міді (II) $\geq 98\%$ (CuPc; C₃₂H₁₆CuN₈), водна дисперсія полі (2,3-дигідротієно-1,4-діоксин)-полі (стиролсульфонату) 1,3 мас. % (PEDOT:PSS) та пресовані гранули поліпіролу (PPy; [C₄H₃N₁]_n) (див. Рисунок 1.1) були отримані від комерційних постачальників (Sigma-Aldrich, Сент-Луїс, Міссурі, США). Ксантанову камедь ([C₃₅H₄₉O₂₉]_n) було отримано з комерційного джерела (Verdessence™ Xanthan, Cosmopolita, Мехіко, Мексика). Усі полімери та сполуки використовувалися так, як вони були придбані з комерційних джерел, і не були очищені перед використанням. Весь процес виробництва матеріалів, електродів та сенсорів зведено на схемі на Рисунку 1.2. Кількість кожного компонента FCPC, за винятком CuPc, було додано відповідно до рекомендацій для матеріалів на основі PEDOT:PSS та пулулану, запропонованих М.-Х. Лі та ін. [25]. Натомість, наскільки нам відомо, це перший випадок, коли FCPC виготовляються з CuPc. В результаті, додані кількості для матеріалів на основі PPy та PEDOT:PSS були визначені експериментально. Були приготовані насичені розчини CuPc у цих полімерах, а потім перевірено, що вони генерують електропровідність у твердому стані при нанесенні на підкладки.

Приготування провідних чорнил PPy-CuPc та PEDOT:PSS-CuPc. Для приготування провідних чорнил PPy для електродів ЕКГ та гнучких

датчиків деформації 9 г полімеру розводили у 35 мл диметилсульфоксиду (ДМСО). Цю суміш перемішували та нагрівали при 70 °С протягом 4 годин. Після цього до суміші додавали 8 мг CuPc разом із 4,5 г гліцерину та перемішували протягом 15 хвилин до отримання однорідної суміші. Гібридні чорнила PEDOT:PSS готували шляхом диспергування 10 мл PEDOT:PSS з 2,5 мг CuPc та 4,5 г гліцерину. Як і у випадку з чорнилами PPy-CuPc, суміш PEDOT:PSS перемішували протягом 15 хвилин. Однак нагрівання не було потрібним через властивість PEDOT:PSS бути рідкого стану, що полегшувало процес змішування. Обидві суміші потім диспергували та гомогенізували за допомогою шейкера G560 (Bohemia, Нью-Йорк, штат Нью-Йорк, США).

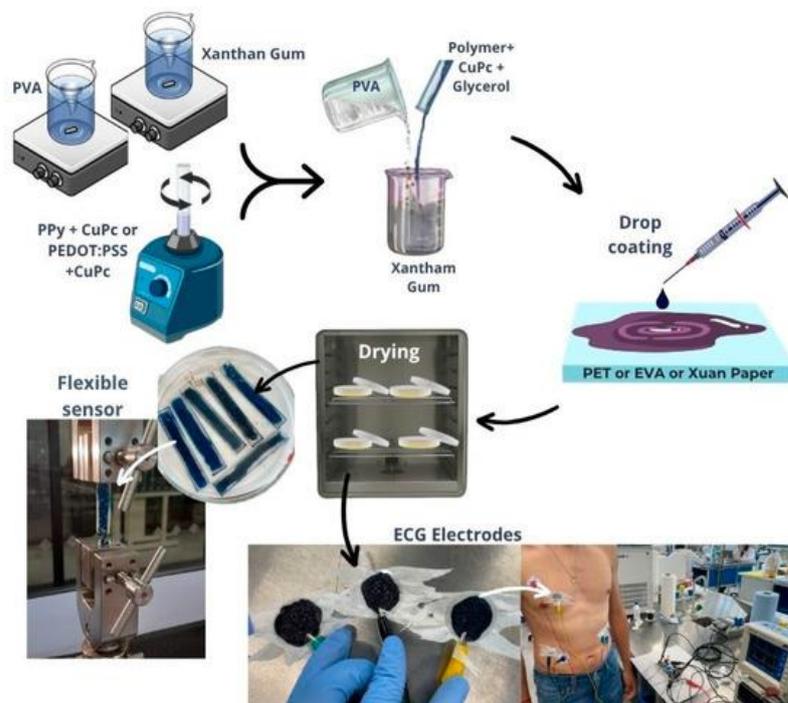


Рисунок 1.2 – Схема процесу виготовлення електродів ЕКГ та гнучких датчиків деформації

Приготування композитів (FCPC) на основі ПВА-ксантану/PPy-CuPc та ПВА-ксантану/PEDOT:PSS-CuPc з провідним полімером. Як видно на рисунку 1.2, FCPC були виготовлені з використанням звичайного розчину ПВА та ксантанової камеді (ПВА-ксантан) для покращення міцності зчеплення провідного чорнила з матеріалом підкладки та шкірою [35, 36]. Для приготування розчину ПВА 0,2 г порошку ПВА розчинили у 9 мл дистильованої води для створення 10% водного розчину за масою. Суміш перемішували при 90 °С протягом 5 хвилин, доки ПВА повністю не розчинився, а розчин не став однорідним. Аналогічно, розчин ксантанової

камеді був приготований шляхом розчинення 0,2 г біополімеру у воді та нагрівання його при 100 °С протягом 4 хвилин. Обидві суміші об'єднали та перемішували при 90 °С протягом 4 хвилин, а потім розчини PPy-CuPc та PEDOT:PSS-CuPc включили до відповідних сумішей PVA-ксантанова камедь.

Осадження та характеристика FCPC. Всі електроди та сенсори були виготовлені методом лиття краплями, використовуючи приблизно 2,2 мл композитів PVA-ксантан/PPy-CuPc та PVA-ксантан/PEDOT:PSS-CuPc. Після осадження методом лиття краплями плівки сушили при температурі 90–100 °С протягом 6 годин для видалення залишків води. Згодом сенсори затверділи при температурі 70 °С протягом 12 годин у сушильній печі Briteg SC-92898 (Instrumentos Científicos, SA de CV, Мехіко, Мексика). Плівки були нанесені на три різні підкладки: папір Хуан, листи пінополіетилентерефталату (PET) $[C_{10}H_8O_4]_n$ та листи етиленвінілацетату (EVA; $C_2H_4]_n [C_4H_6O_2]_m$) (див. рисунок 1.2). Морфологічні особливості аналізували за допомогою скануючого електронного мікроскопа (SEM) Hitachi SU3500 (Hitachi, Токіо, Японія). Випробування на розтяг проводили за допомогою універсальної випробувальної машини Shimadzu AGS-X з номінальною вантажопідйомністю 10 кН. Для запису кривих напруження-деформації, керування випробуваннями та активації автоматичних функцій використовувалося програмне забезпечення TRAPEZIUM LITE X (SHIMADZU Corporation, Sanjo, Kyoto, Японія). Зразки FCPC для випробувань на розтяг наносили на прямокутні підкладки з листів EVA, PET та паперу Хуан. Кожну підкладку розрізали заввишки 10 см та завширшки 2 см. Оскільки на кожному кінці зразка було потрібно 0,5 см для розміщення викидних щелеп обладнання, 9 см було залишено як ефективну площу випробувань. Товщину кожного зразка вимірювали за допомогою мікрометра SW-81390301 (Fumetax, Ханчжоу, Китай) з діапазоном 0–25 мм. Результати для кожного з FCPC на різних підкладках, а також товщини підкладок без FCPC представлені в Таблиці 1.1. Зміни товщини є результатом різниці в силах адгезії та поверхневому натягу між FCPC та підкладкою. Для визначення ширини оптичної забороненої зони плівок, нанесених на кожную підкладку, було проаналізовано функції відбиття та Кубелки-Мунка. Ці вимірювання проводилися за допомогою УФ-спектрофотометра Unicam 300 (Thermo Fisher Scientific Inc., Волтем, Массачусетс, США) у діапазоні довжин хвиль 200–1100 нм.

Таблиця 1.1 - Товщина FCPC на різних підкладках та для кожної окремої підкладки без FCPC

Sample	Thickness (mm)
EVA	2.00
PET	0.64
Xuan paper	0.12
PVA-xanthan/PPy-CuPc on EVA	0.12
PVA-xanthan/PPy-CuPc on PET	0.23
PVA-xanthan/PPy-CuPc on Xuan paper	0.049
PVA-xanthan/PEDOT:PSS-CuPc on EVA	0.31
PVA-xanthan/PEDOT:PSS-CuPc on PET	0.24
PVA-xanthan/PEDOT:PSS-CuPc on Xuan paper	0.053

Електрична оцінка електродів ЕКГ та гнучких датчиків деформації. Для перевірки роботи електродів ЕКГ було побудовано просту схему ЕКГ з двома каналами збору даних. Обидва канали були ідентичними та склалися з інструментального підсилювача з коефіцієнтом підсилення 100, фільтра високих частот 4-го порядку з частотою зрізу 0,5 Гц та фільтра низьких частот 4-го порядку з частотою зрізу 50 Гц. Метою використання двох каналів було одночасне вимірювання сигналу ЕКГ як за допомогою комерційно доступних електродів, так і за допомогою виготовлених електродів для порівняння якості отриманих сигналів.

Випробуваного було підключено до схеми ЕКГ, як показано на рисунку 1.2. Виготовлені електроди були з'єднані поруч із комерційно доступними електродами для порівняння (серія Kendall Medi-trace 200, Covidien, Дублін, Ірландія). Для отримання кожного сигналу використовувалося три електроди. Електрод, підключений до нижньої правої частини живота, використовувався як опорний, тоді як сигнал отримувався з різниці напруг між нижньою лівою частиною живота та верхньою правою частиною живота. Для кожного з виготовлених електродів сигнал тривалістю від 2 до 4 секунд отримували за допомогою осцилографа (TBS1102B-EDU, Tektronix, Бівертон, Орегон, США).

Сигнал ЕКГ дуже чутливий до шуму. Щоб забезпечити його використання як діагностичного інструменту, дослідники розробили серію індексів якості сигналу (SQI), які допомагають виявляти шум [26]. Три з цих SQI були використані для оцінки якості сигналу ЕКГ, отриманого за допомогою електродів: (1) порівняння кількох детекторів серцевих

скорочень в одному сигналі (**bSQI**), (2) оцінка ексцесу сигналу (**kSQI**) та (3) обчислення спектральної щільності сигналу в межах певної фізіологічної смуги пропускання (**sSQI**) [26].

bSQI. Одним з основних застосувань ЕКГ є виявлення комплексу QRS для оцінки частоти серцевих скорочень. Для цієї мети використовуються різні алгоритми, і кожен з них чутливий до різних типів шуму. Порівняння точності кожного алгоритму для виявлення комплексу QRS може бути використано як міра якості сигналу ЕКГ. Для цієї оцінки було використано два добре відомі алгоритми виявлення QRS з відкритим кодом (доступні за адресою <https://physionet.org/> (дата звернення: 10 серпня 2025 р.)): один заснований на цифровій фільтрації та інтеграції для виділення комплексу QRS [26], а інший – на перетворенні довжини після фільтрації. **bSQI** розраховується на основі виявлення цих двох алгоритмів як

$$\text{bSQI}(k) = \frac{N_{\text{matched}}(k)}{N_{\text{all}}(k)}, \quad (1.1)$$

де N_{matched} – це кількість серцевих скорочень, виявлених обома алгоритмами протягом часового вікна 150 мс, а N_{all} – це кількість усіх серцевих скорочень, виявлених принаймні одним з алгоритмів. ЕКГ хорошої якості матиме значення, близьке до 1, що вказує на те, що всі серцеві скорочення були виявлені обома алгоритмами.

kSQI. Ексцес – це статистичний показник, який описує розподіл даних відносно їхнього середнього значення. Це міра того, наскільки сигнал є гаусівським. Чистий ЕКГ-сигнал із синусовим ритмом зазвичай має ексцес більше 5 і може бути використаний як показник якості сигналу. **kSQI** розраховується як

$$\text{kSQI} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left[\frac{x_i - \bar{x}}{\sigma} \right]^4, \quad (1.2)$$

де x_i позначає ЕКГ-сигнал, що має N точок, \bar{x} – середнє значення сигналу, а σ – стандартне відхилення.

sSQI. Спектральна енергія комплексу QRS зосереджена близько 10 Гц у смузі частот 10 Гц. Спектральна щільність потужності (PSD) у цій смузі, порівняно з PSD у повному сигналі ЕКГ, використовується як міра

якості сигналу. Для його розрахунку було отримано коефіцієнт спектрального розподілу (SDR). SDR сегмента ЕКГ розраховується як відношення суми потужності (P) комплексу QRS (між 5 Гц і 14 Гц) до суми потужності всього сигналу ЕКГ (між 5 Гц і 50 Гц):

$$sSQI(k) = \frac{\int_{f=5}^{f=14} P(k) df}{\int_{f=5}^{f=50} P(k) df} \quad (1.3)$$

Низькі значення sSQI (<0,5) вказують на наявність високочастотного шуму, тоді як високі значення (>0,8) вказують на наявність артефактів, таких як рух електродів. Якщо значення sSQI знаходиться між цими двома діапазонами (>0,5 та <0,8), ЕКГ-сигнал вважається таким, що має добру якість.

Ці три показники якості повітря (SQI) були виміряні в сигналах, отриманих як від комерційних, так і від виготовлених електродів, з очікуванням отримання подібних результатів.

Для оцінки гнучких тензодатчиків було виміряно зміну вихідної напруги, спричинену механічною деформацією. Оскільки ці датчики мають високий опір, їхню чутливість було підвищено шляхом підключення до схеми, що містить міст Вітстона та інструментальний підсилювач. Міст Вітстона був збалансований, щоб усунути вплив опору базової лінії, що дозволило схемі зосередитися виключно на зміні опору. Після балансування мосту датчики кілька разів згинали та розтягували, спостерігаючи за відповідною зміною напруги за допомогою осцилографа (TBS1102B-EDU, Tektronix, Бівертон, Орегон, США).

1.3 Морфологічна та композиційна характеристика FCPC

На основі виготовленого FCPC для використання як електроди для моніторингу ЕКГ та як гнучкі датчики деформації. Хоча деякі компоненти, що використовуються в цій роботі, відрізняються, функція кожного з компонентів у FCPC базується на роботі, виконаній М.-Х. Лі та ін. [27]: (i) PPy та PEDOT:PSS як електропровідні середовища, (ii) CuPc використовувався як напівпровідник, що відповідає за оптичну поведінку матеріалу, (iii) гліцерин використовувався як пластифікатор та вторинна легуюча домішка для покращення електропровідності PPy та PEDOT:PSS, (iv) ксантанова камедь використовувалася як сполучна речовина та (v)

PVA як добавка для покращення пластичності та стабільності дисперсії, утвореної попередніми компонентами.

Морфологію та склад отриманих FCPC на основі PVA-ксантан/PPy-CuPc та PVA-ксантан/PEDOT:PSS-CuPc досліджували за допомогою SEM та EDS відповідно. На рисунку 1.3 представлена отримана морфологія поверхні композитної плівки PPy-CuPc, нанесеної на три різні підкладки: EVA, PET та папір Xuan. Мікрофотографії розташовані в матриці, що дозволяє пряме порівняння кожної підкладки (стовпці) на трьох зростаючих рівнях збільшення (рядки: масштаби 20 мкм, 5 мкм та 2 мкм).

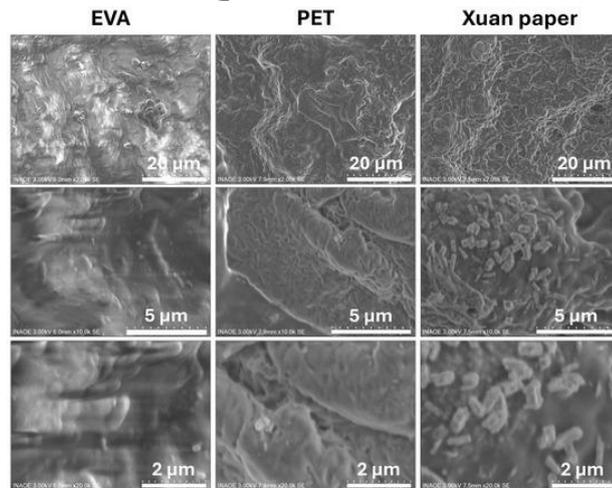


Рисунок 1.3 – Порівняльний аналіз морфології композиту PPy, нанесеного на три різні підкладки, за допомогою SEM (стовпці). Рядки показують поверхню при поступовому збільшенні з масштабними шкалами 20 мкм, 5 мкм та 2 мкм

На поверхні EVA (стовпець 1) плівка демонструє класичну ботріюїдну або «цвітну капусту» морфологію, що складається з великих глобулярних структур зі значною пористістю та глибокими щілинами між ними. Помітна яскравість у деяких ділянках цих мікрофотографій пояснюється ефектом заряджання зразка, ймовірно, що виникає через ізолюючу природу підкладки. При більшому збільшенні видно, що ці глобули складаються з менших, зрощених субмікрометричних вузликів з дрібною зернистою текстурою. Покриття на PET (колонка 2) є більш суцільним, але демонструє щільне пакування глобулярних доменів, які виглядають меншими та компактнішими, ніж на підкладці з EVA. При більшому збільшенні поверхня нагадує шар щільно упакованих, округлих вузликів з чітко визначеними межами. На папері Xuan (колонка 3) покриття PPy чітко відповідає нижній волокнистій структурі, прикрашаючи окремі волокна паперу зернистим шаром. При найбільшому

збільшенні це покриття розділяється на окремі, субмікронні сферичні або рисово-подібні наночастинки, що заповнюють поверхню волокон.

На рисунку 1.4 показано порівняльний аналіз морфології поверхні композитної плівки PEDOT:PSS-CuPc на паперових підкладках EVA, PET та Xuan. Зображення організовано у вигляді матриці, де кожен стовпець представляє різну підкладку, а кожен рядок відповідає зростаючому рівню збільшення (зверху вниз: масштаби 20 мкм, 5 мкм та 2 мкм).

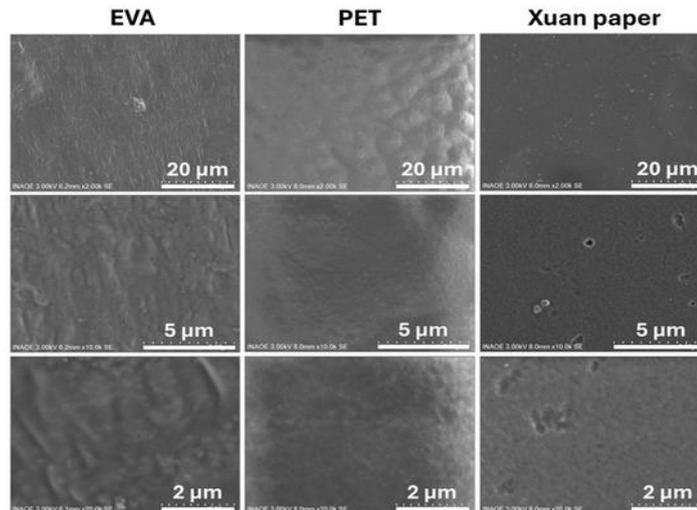


Рисунок 1.4 – Порівняльний аналіз за допомогою SEM морфології композиту PEDOT:PSS, нанесеного на три різні підкладки (стовпці). Рядки показують поверхню при поступовому збільшенні з масштабними шкалами 20 мкм, 5 мкм та 2 мкм

Морфологія плівок PEDOT:PSS-CuPc, показана на рисунку 1.4, помітно гладша та більш безперервна на всіх підкладках порівняно з композитами на основі PPy. На підкладці EVA (колонка 1) плівка відповідає хвилястому рельєфу підкладки, демонструючи тонку, безперервну текстуру з деякими анізотропними смугами, але без видимих відкритих пор. Покриття на PET (колонка 2) також є безперервним та має характерну ізотропну вузлуватий рельєф, що описується як «морфологія апельсинової кірки» з неглибоким рельєфом. Нарешті, на папері Xuan (колонка 3), хоча плівка залишається суцільною, вона демонструє деякі поверхневі дефекти, такі як розсіяні заглиблення та мікропорожнини. При великому збільшенні всі плівки PEDOT:PSS демонструють однорідну текстуру без розтріскування.

Аналіз SEM виявляє різні відмінності між цими двома типами плівок. Композити PEDOT:PSS-CuPc послідовно утворювали гладкі та суцільні покриття на всіх трьох підкладках, лише з незначними особливостями поверхні. На противагу цьому, плівки PPy-CuPc

демонстрували значно шорсткішу, зернисту та глобулярну морфологію, створюючи пористу та кавернозну поверхню на всіх підкладках. Ці різні топографії свідчать про різні механізми росту плівок і, як очікується, впливатимуть на кінцеву продуктивність пристрою. Велика площа поверхні пористої структури PPy може бути перевагою для сенсорних застосувань, тоді як однорідна природа плівки PEDOT:PSS може забезпечити більш стабільний контакт електродів ЕКГ зі шкірою.

Аналіз енергодисперсійної рентгенівської спектроскопії (EDS) підтвердив елементний склад плівок, а кількісні результати зведені в таблиці 1.2. Склад плівок PPy був особливим. Як і очікувалося, вміст азоту (N) був помітно вищим у цих плівках, досягаючи 3,15% на PET, що узгоджується з наявністю атомів азоту як у мономерному кільці піролу, так і у фталоціаніні. Навпаки, вміст N у зразках PEDOT:PSS був значно нижчим ($\leq 0,83\%$), оскільки він походить лише з CuPc. Концентрація міді (Cu) також була значно вищою в плівках PPy, досягаючи піку в 1,70% на PET. Особливим відкриттям стало виявлення натрію (Na) на рівні 1,88% виключно у зразку PPy на EVA, що може бути залишком процесу синтезу полімеру.

Таблиця 1.2 – Порівняння елементарного складу за допомогою EDS (мас. %)

Element	PVA-Xanthan/PPy-CuPc			PVA-Xanthan/PEDOT:PSS-CuPc		
	EVA	PET	Xuan Paper	EVA	PET	Xuan Paper
C	62.92%	64.69%	71.40%	66.48%	72.69%	62.90%
N	2.27%	3.15%	0.58%	0.81%	0.33%	0.83%
O	32.65%	30.45%	27.84%	32.70%	26.71%	36.27%
Cu	0.28%	1.70%	0.18%	-	0.27%	-
Na	1.88%	-	-	-	-	-

Для візуального підтвердження успішної інтеграції CuPc, на рисунку 1.5 представлені карти елементів EDS для двох зразків з найвищими виявленими концентраціями міді: PVA-ксантан/PPy-CuPc на PET (рисунок 1.5a) та PVA-ксантан/PEDOT:PSS-CuPc на папері Xuan (рисунок 1.5b). Сильна просторова кореляція між азотом (N) та міддю (Cu) підтверджує однорідну інтеграцію CuPc.

Карти розподілу вуглецю (C) та кисню (O) підтверджують їхній очікуваний розподіл як основних компонентів полімерів та субстратів. Що ще важливіше, карти розподілу азоту (N) та міді (Cu) демонструють сильну просторову кореляцію для обох композитів. У зразку PPy (Рисунок 1.5a) сигнали N та Cu відповідають глобулярній морфології полімеру, тоді як у зразку PEDOT:PSS (Рисунок 1.5b) вони однорідно розподілені по всій суцільній плівці. Слабка та іноді невизначена концентрація Cu в деяких

зразках, наведених у Таблиці 1.2, є очікуваним результатом і не суперечить успішному включенню CuPc. Це головним чином тому, що елементарна концентрація Cu в макроциклі фталоціаніну настільки низька, що її сигнал близький до межі виявлення обладнання. Найбільш переконливим доказом інтеграції фталоціаніну є просторова колокалізація сигналів N та Cu, візуально підтверджена на Рисунку 1.5. Це послідовне зіставлення шаблонів є певним доказом того, що CuPc однорідно інтегрований на молекулярному рівні, оскільки як N, так і Cu походять з однієї молекули. Невиявлення Cu в інших зразках (таблиця 1.2) можна пояснити розсіюванням сигналу на шорсткіших підкладках або концентраціями, що падають нижче порогу виявлення приладу.

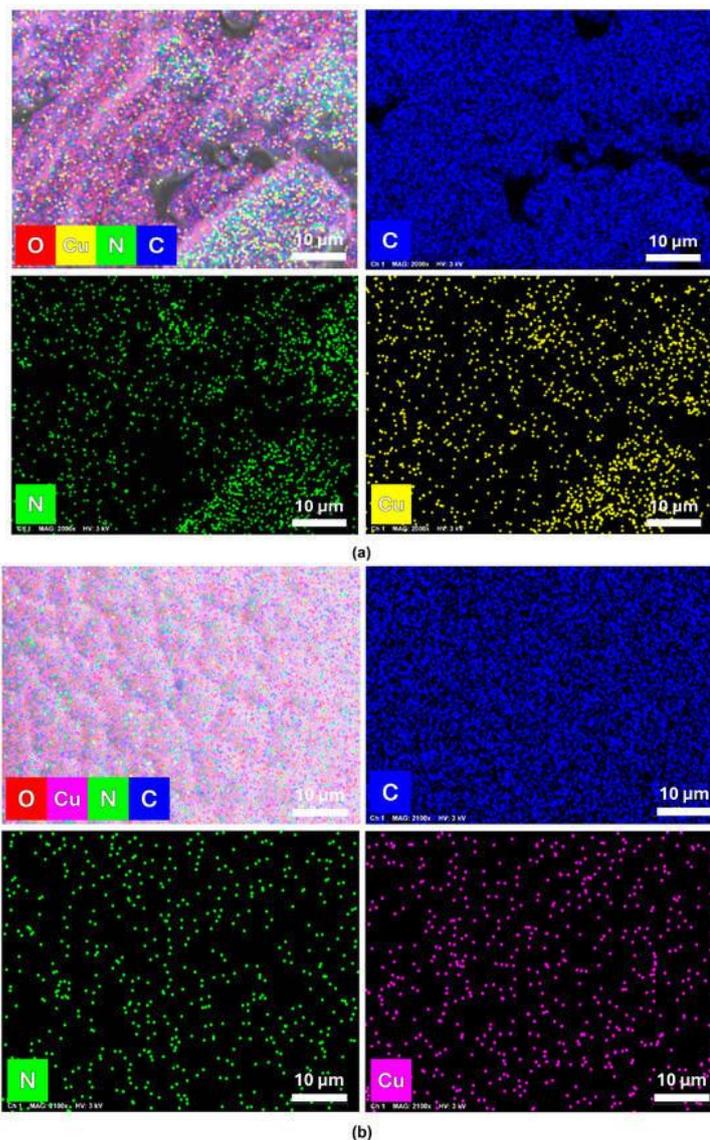


Рисунок 1.5 – Елементне картування EDS (а) PVA-ксантану/PPy-CuPc на PET та (б) PVA-ксантану/PEDOT:PSS-CuPc на папері Xuan

1.4 Поведінка FCPC під час напруження та деформації

ФПК на основі PVA-ксантану/PPy-CuPc та PVA-ксантану/PEDOT:PSS-CuPc були виготовлені для використання як електроди ЕКГ та гнучкі датчики деформації. Для досягнення цієї мети матеріали повинні бути гнучкими, оскільки вони повинні адаптуватися до поверхні шкіри, а також біологічно сумісними зі шкірою людини. Також перевага надається безгелевій адгезії, і, що найважливіше, вони повинні проводити електричні сигнали від шкіри до вимірювальних пристроїв з низьким рівнем електричного шуму та стабільною реакцією з часом. Для досягнення бажаної гнучкості, сумісності та адгезії до шкіри була використана ксантанова камедь. Цей біорозкладний, нетоксичний та екологічний полісахарид раніше використовувався разом з PEDOT:PSS деякими авторами цієї роботи [31], оскільки він модифікує реологічні властивості PEDOT:PSS та покращує його осадження на гідрофобних поверхнях. Щоб забезпечити механічну стабільність гнучких електродів та датчиків, були проведені дослідження напруження-деформації. Криві, отримані для двох матеріалів на різних підкладках, представлені на рисунку 1.6, а основні механічні параметри зведені в таблиці 1.3. Розміри зразків були раніше представлені в розділі «Методологія». Як видно на графіках, і це узгоджується з висновками Liu, X. та ін. [32], продуктивність електродів та сенсорів головним чином залежить від механічних властивостей матеріалів підкладки. Що стосується PVA-ксантану/PPy-CuPc FCPC, то спостерігаються значні відмінності в кривих через тип використаної підкладки. Крім того, цікаво, що хоча PPy є більш жорстким і крихким полімером, ніж інші провідні полімери, присутність підкладки сприяє як пружній, так і пластичній поведінці. На кривій напруження-деформації для підкладки на PET (рис. 1.6b) чітко спостерігаються пружна зона та пластична зона, розділені зоною плинності матеріалу. Щодо кривої напруження-деформації на папері Juan (рис. 6c), зона текучості не показана, хоча пружна та пластична зони видно. Нарешті, матеріал EVA має криву з дуже малою пружною зоною (рис. 1.6a). Зокрема, у гнучких датчиках деформації зона пружності та відповідна їй межа пропорційності мають велике значення, оскільки коли розтягування датчика перевищує межі пружності, можуть виникнути незворотні пошкодження. Межа виявлення датчика – це діапазон деформації, в якому датчик випромінює стабільний сигнал зворотного зв'язку [33].

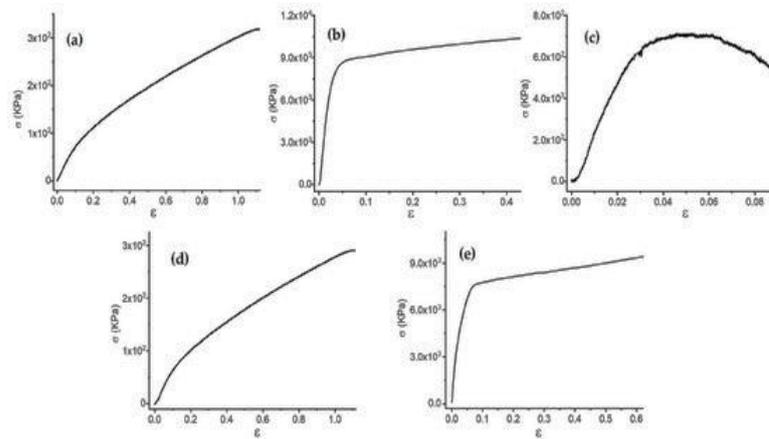


Рисунок 1.6 – Крива залежності напруження від деформації (σ - ϵ) для PVA-ксантану/PPy-CuPc на (а) EVA, (б) PET, (с) папері Xuan та PVA-ксантану/PEDOT:PSS-CuPc FCPC на (д) EVA та (е) PET

Якщо напруга на датчику перевищує його межу пружності, виникає залишкова деформація, і датчик більше не реагує пропорційно на прикладене до нього навантаження. Відповідно до значень межі пропорційності, наведених у таблиці 1.3. Очевидно, що FCPC, який матиме найкращі характеристики в умовах експлуатації, це той, що на ПЕТ, далі йдуть папір Xuan і, нарешті, EVA. Ці результати пов'язані з морфологією, дослідженою за допомогою SEM (див. Рисунок 1.3): FCPC на ПЕТ є більш безперервним, представляючи щільну та компактну упаковку, утворену округлими вузликами, які рівномірніше розподіляють напруження. На папері Xuan FCPC включений в окремі волокна паперу з зернистим шаром, утвореним окремими наночастинками, сферичної або рисоподібної форми, які також адекватно розподіляють напруження. Нарешті, в морфології FCPC на EVA спостерігається утворення ботріїдної морфології з великими кулястими структурами з пористістю та тріщинами, що знижує міцність матеріалу.

Таблиця 1.3 - Механічні параметри двох FCPC на трьох різних підкладках, а також на окремих підкладках

Sample	Young's Modulus (KPa)	Limit of Proportionality (KPa)	Rupture Strength (KPa)	Strain Range (%)
EVA	917	40	320	6.6
PET	331,982	7792	12,344	2.4
Xuan paper	648,849	584	431	0.02
PVA-xanthan/PPy-CuPc on EVA	796	46	320	9.9
PVA-xanthan/PPy-CuPc on PET	310,744	6240	10,400	42
PVA-xanthan/PPy-CuPc on Xuan paper	28,832	446	447	1.5
PVA-xanthan/PEDOT:PSS-CuPc on EVA	640	44	290	8.0
PVA-xanthan/PEDOT:PSS-CuPc on PET	159,648	4074	9300	34
PVA-xanthan/PEDOT:PSS-CuPc on Xuan paper	-	-	-	-

Механічна поведінка FCPC на основі PVA-ксантану/PEDOT:PSS-CuPC на різних підкладках також відрізняється, хоча форма кривих напруження-деформації характерна для присутності PEDOT:PSS. Ці результати подібні до тих, що представлені Chen, Y. та ін. [34] для тату-електрода на основі PEDOT:PSS для тривалого вимірювання ЕКГ, а також Zhang, L. та ін. [35] для розтяжного сухого електрода з PEDOT:PSS, водорозчинним поліуретаном (WPU) та D-сорбітолом. Важливо зазначити, що характеристики матеріалу на папері Xuan були нульовими; матеріал мав тріщини та дуже низьку механічну міцність. Однак використання паперу Xuan у FCPC поки що не можна виключати, оскільки, хоча тріщин як дефектів слід уникати, чутливість датчиків деформації на основі тріщин можна покращити. Wang та ін. [36] виготовили датчики деформації на основі тріщин, і зі збільшенням деформації в розумному діапазоні поширення тріщин відбувалося регулярно, що покращувало розтяжність їхнього датчика деформації. З іншого боку, на рисунку 1.6e показано криву для матеріалу PVA-ксантанова кам'яна фарба/PEDOT:PSS-CuPC на PET, в якій можна спостерігати наявність пружних та пластичних зон, розділених одна від одної зоною текучості. Крива для матеріалу EVA (рисунк 1.6d) демонструє дуже малу пружну зону, як у випадку полімеру PPy. Як і FCPC на основі PPy, FCPC на основі PEDOT:PSS демонструє найвищий пружний опір при нанесенні на PET. Однак матеріал EVA також демонструє адекватні механічні характеристики, враховуючи, що в умовах експлуатації параметри напруження, які підтримує цей FCPC, не будуть досягнуті. Ці полімери характеризуються слабкими міжмолекулярними взаємодіями, що зумовлює їхню в'язкопружну поведінку. Як результат, вони демонструють велику пластичну зону. Якщо порівняти механічну поведінку матеріалів з їхньою морфологією (див. Рисунок 1.4), то спостерігається, що FCPC на PET є безперервним та має ізотропну вузлуватий рельєф, що сприяє високій механічній міцності. У випадку EVA, FCPC адаптується до цієї підкладки, створюючи тонку та безперервну текстуру, яка також забезпечує достатню механічну міцність. Нарешті, для FCPC на папері Xuan низькі механічні властивості, ймовірно, зумовлені поверхневими дефектами, такими як заглиблення та мікропорожнини в морфології. Однак, у майбутньому можна було б дослідити використання ультраармованого паперу Xuan з наддовгими нанодротоми гідроксиапатиту (НАР), як повідомляли L.-Y. Dong та ін. [37]. Хоча дослідження цього ультраармованого паперу Xuan було зосереджено на його високій вогнестійкості, нанодроти НАР, що його складають, є формою неорганічного нановолокнистого матеріалу, який також може

покращити механічні властивості паперу Xuan, не впливаючи на характеристики FCPC. Крім того, НАР є основним неорганічним мінералом кісток і зубів людини і має чудову біосумісність [38]. Простим варіантом підвищення стійкості паперу Xuan є запропонований Дж. Лі та ін. [38], де папір армується шляхом занурення його в полівініламін (PVAm). Цю процедуру можна використовувати в майбутніх роботах, також намагаючись використовувати PVA, оскільки введення такого полімеру у волокна паперу Xuan може покращити його механічні властивості.

У таблиці 1.3 порівнюються механічні параметри, отримані для двох FCPC на різних підкладках з PET, паперу Xuan та EVA, з параметрами, отриманими на підкладках без композитного матеріалу. Механічні властивості підкладок найвищі, коли вони не покриті, особливо у випадку PVA-ксантану/PEDOT:PSS-CuPc. За даними Kang, TW та ін. [39], PEDOT:PSS може мати деякі обмеження щодо подовження при використанні в композитних матеріалах. Однак, хоча EVA є підкладкою з найнижчими механічними параметрами, вони все ще знаходяться в межах кПа. Ці значення значно перевищують вимоги для FCPC, що використовуються в гнучких датчиках деформації за нормальних умов експлуатації [40]. Крім того, діапазон деформації є одним з основних факторів, які слід враховувати при виборі гнучких датчиків, що використовуються в суглобових зонах, таких як пальці та лікті. Діапазон деформації - це максимальна деформація, при якій датчик може підтримувати стабільну чутливість при багаторазовому навантаженні та розвантаженні, і вона залежить від матеріалів та структури датчика. У таблиці 1.3 представлено діапазон деформацій кривих напруження-деформації, оскільки, як згадувалося вище, ефективне виявлення є важливим для сенсорів. Це досягається лише тоді, коли сенсор залишається в межах своєї пружної зони, що гарантує його можливість повернення до початкових розмірів після зняття навантаження, якому він піддається. Присутність PVA та ксантанової камеді у FCPC на основі PVA-ксантан/PPy-CuPc та PVA-ксантан/PEDOT:PSS-CuPc значно підвищує стійкість сенсорів до деформації. Більшість причин відмови сенсорів деформації пов'язані з втомою, пластичною деформацією або руйнуванням підкладки під впливом великих деформацій, тоді як сенсори на основі графену мають високу міцність. Однак, сенсори, отримані в цій роботі, мають вищий діапазон деформацій, ніж сенсори з графеном, такі як виготовлені з G/PNMS/PVA/Cu. Щодо поломки сенсорів, спостерігається, що найбільша механічна стійкість досягається з PET як підкладкою та

матрицею PPy. Тим не менш, значення міцності на розрив для всіх зразків знаходяться в межах кПа, що робить їх придатними для використання як гнучкі сенсори.

1.5 Оцінювання оптичних параметрів у FCPC

ФПК на основі PVA-ксантану/PPy-CuPc та PVA-ксантану/PEDOT:PSS-CuPc були оцінені за допомогою УФ-видимої спектроскопії для отримання дифузного відбиття (R) кожного з них на різних підкладках. Оптичні властивості, такі як відбиття, не є релевантними в традиційних ЕКГ, оскільки це повністю електричні системи. Однак у цій роботі пропонується розробка електродів для біомедичних технологій, в яких використовуються оптоелектронні або фотоактивні датчики, такі як системи ЕКГ, інтегровані з оптичними датчиками, такими як оксиметри або смарт-годинники. Ці системи вимагають низьких значень R для PVA-ксантану/PPy-CuPc та PVA-ксантану/PEDOT:PSS-CuPc для покращення поглинання світла. CuPc є фотоактивним, і в поєднанні з провідними полімерами, такими як PEDOT:PSS або PPy, його фотоелектродні властивості можуть бути значно покращені. На рисунку 1.7 показано спектри R для двох матеріалів, нанесених на різні підкладки. Незалежно від типу використаної підкладки, R нижче 15% і досягає свого максимального значення при $\lambda > 780$ нм для PVA-ксантану/PPy-CuPc та $350 < \lambda < 600$ нм для PVA-ксантану/PEDOT:PSS-CuPc. Підкладка EVA мала найнижче значення R , далі йшов папір Xuan і, нарешті, PET. Це може бути пов'язано з непрозорою природою EVA, напівпрозорістю паперу Xuan та прозорістю PET. Крім того, Q-смуга CuPc може спостерігатися в спектрах між 750 та 900 нм, навіть за наявності всіх полімерних матеріалів, з яких складаються композитні плівки. Ця смуга пов'язана з електронними переходами $\pi \rightarrow \pi^*$ 18 спряжених π -електронів структури фталоціаніну. У спектрах також можна спостерігати B-смугу в області між 300 та 530 нм, яка являє собою асоціацію d-смуги з атомом Cu, що призводить до π -d переходів через частково заповнені d-орбіталі металу в CuPc. Результати, отримані в обох R-спектрах, вказують на те, що CuPc зберігає своє оптичне поглинання (Q- та Core-смуги) навіть у присутності ксантанової камеди, PVA та PPy або PEDOT:PSS. Така поведінка сприяє селективному поглинанню електродів, особливо в червоному та ультрафіолетовому світлі. Присутність CuPc вже була виявлена за допомогою EDS-досліджень, і його оптична поведінка зберігається в FCPC. З іншого боку, низький R , отриманий у всіх випадках,

підтверджує попередні результати, демонструючи, що PVA-ксантан/PPy-CuPc та PVA-ксантан/PEDOT:PSS-CuPc можуть бути використані як фотоелектроди.

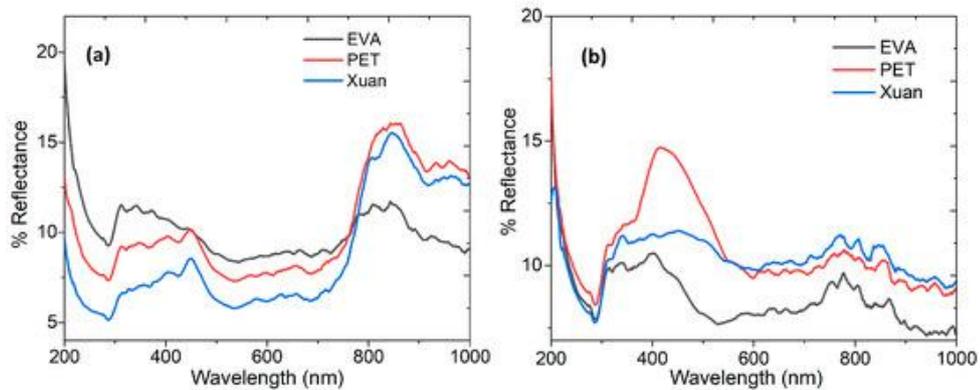


Рисунок 1.7 – Спектри відбиття для (а) PVA-ксантан/PPy-CuPc та (б) PVA-ксантан/PEDOT:PSS-CuPc FCPC на різних підкладках

Продуктивність електродів ЕКГ та гнучких датчиків деформації головним чином залежить від електричних властивостей напівпровідникових або провідникових матеріалів. Для оцінки здатності до переносу заряду кожного FCPC оптичну заборонену зону визначали за допомогою функції Кубелки-Мунка (К–М або $F(R)$), отриманої за допомогою R :

$$F(K - M) = \frac{(1 - R)^2}{2R} \quad (1.4)$$

Це рівняння застосовується до матеріалів з високим розсіюванням світла та поглинаючими частинками в матриці, як у випадку з CuPc, вбудованим у матриці на основі PPy, та PEDOT:PSS у PVA-ксантані [36].

Для визначення ширини забороненої зони (E_g) було використано рівняння Таука [37]:

$$\alpha(h\nu) \approx B(h\nu - E_g)^n \quad (1.5)$$

де α – коефіцієнт поглинання; $h\nu$ – енергія фотона (h – стала Планка та $\nu = 1/\lambda$); B – коефіцієнт пропорційності; а показник степеня n залежить від типу електронних переходів. У цьому випадку $n = 2$ для непрямих дозволених переходів, пов'язаних з аморфним характером PVA-ксантану/PPy-CuPc та PVA-ксантану/PEDOT:PSS-CuPc. Коефіцієнт α

прямо пропорційний $F(K - M)$, і в рівнянні Таука його можна замінити на $F(K - M)$:

$$(h\nu \times F(K - M)) \approx B(h\nu - E_g)^n. \quad (1.6)$$

Шляхом побудови графіка $(h\nu \times F(K - M))^{1/2}$ як функції $h\nu$, лінійна частина цієї кривої апроксимується прямою лінією, а потім перетин цієї лінії з віссю енергії фотонів дає E_g [30, 56, 57, 58]. У таблиці 1.4 наведено розрахунки ширини забороненої зони, отримані для кожного FCPC на різних підкладках. Для матеріалів PPy найнижче значення E_g було отримано при нанесенні на папір Xuan, а для матеріалів PEDOT:PSS найнижче значення було отримано з PET. Однак отримані значення дуже близькі одне до одного, і всі вони знаходяться в діапазоні органічних напівпровідників. Це вказує на те, що FCPC придатні як провідні активні матеріали в електродах ЕКГ та гнучких датчиках деформації. Очевидно, що присутність CuPc у поєднанні з провідними полімерами PPy та PEDOT:PSS зможе захоплювати біоелектричні сигнали, зменшуючи опір та підвищуючи точність сигналу, що слід перевірити за допомогою оцінки роботи як електродів, так і датчиків.

Таблиця 1.4 - Оптична заборонена зона для FCPC

Sample	Optical Band Gap (eV)
PVA-xanthan/PPy-CuPc on EVA	3.4
PVA-xanthan/PPy-CuPc on PET	3.4
PVA-xanthan/PPy-CuPc on Xuan paper	3.1
PVA-xanthan/PEDOT:PSS-CuPc on EVA	3.2
PVA-xanthan/PEDOT:PSS-CuPc on PET	3.0
PVA-xanthan/PEDOT:PSS-CuPc on Xuan paper	3.2

1.6 Електрична оцінка електродів ЕКГ та гнучких датчиків деформації

Порівнюючи сигнал, отриманий від виготовлених електродів, із сигналом від комерційних електродів, можна помітити, що обидва сигнали демонструють повну морфологію сигналу ЕКГ. Важливо зазначити, що комерційні електроди виготовлені з використанням Ag/AgCl разом із провідним гелем, що вважається стандартом для вимірювання ЕКГ, тоді як виготовлені електроди не використовували жодного провідного гелю та кріпилися до шкіри за допомогою стрічки. Сигнали з обох наборів

електродів отримувалися одночасно, щоб гарантувати, що аналіз проводився для одного й того ж сигналу. На рисунку 1.8 показано зразок цих сигналів, отриманих з використанням комерційних електродів та електродів, виготовлених з PVA-ксантану/PPy-CuPc на ПЕТ. Цей приклад був обраний, оскільки він показав найкращі показники серед усіх виготовлених електродів. Два сигнали дуже схожі як за амплітудою, так і за морфологією. Таким чином, шляхом візуального огляду можна зробити висновок, що виготовлені електроди можна використовувати замість комерційних. Щоб переконатися, що сигнали, отримані від виготовлених електродів, є достовірними, були отримані три показники індексу якості (SQI), описані в методології, та порівняні в таблиці 1.5. Значення індексу якості (SQI) виготовлених електродів повинні бути такими ж або кращими за ті, що отримані комерційними електродами, щоб вважати їх життєздатним варіантом для отримання ЕКГ.

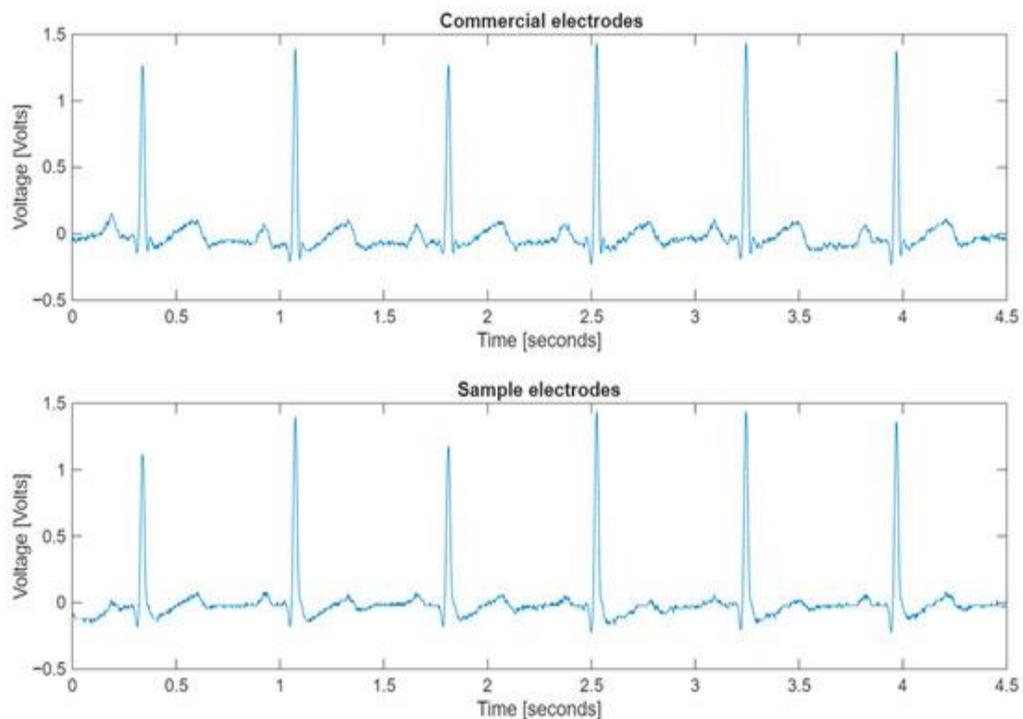


Рисунок 1.8 – ЕКГ-сигнал, отриманий одночасно з комерційними електродами (угорі) та з електродами, виготовленими з використанням PVA-ксантану/PPy-CuPc на ПЕТ (унизу). Морфологія та амплітуда ЕКГ-сигналу подібні для обох графіків

Таблиця 1.5 - Індокси якості сигналу, що порівнюють одночасні сигнали, отримані від комерційних електродів та виготовлених електродів для кожного зразка. Всі комерційні електроди виготовлені з Ag/AgCl та провідного гелю

	Commercial Electrode			Electrode from Sample		
	kSQI	bSQI	sSQI	kSQI	bSQI	sSQI
PVA-xanthan/PPy-CuPc on EVA	27.023	1	0.539	23.425	1	0.653
PVA-xanthan/PPy-CuPc on PET	30.411	1	0.521	32.202	1	0.557

Однією з головних проблем використання виготовлених електродів є наявність шуму в сигналі ЕКГ, що може обмежити правильну ідентифікацію різних хвиль ЕКГ. kSQI використовується як індикатор шумних сигналів, тоді як для сигналу ЕКГ з низьким рівнем шуму очікується значення kSQI більше 5 [35]. Як видно з Таблиці 1.5, значення kSQI у всіх випадках значно перевищує 5, що підтверджує низький рівень шуму сигналів ЕКГ. Оскільки одним з основних застосувань сигналів ЕКГ є виявлення комплексу QRS для вимірювання частоти серцевих скорочень та варіабельності серцевого ритму, необхідно використовувати SQI на основі виявлення серцевих скорочень. Для цієї мети використовується bSQI, який перевіряє здатність двох детекторів QRS виявляти однакову кількість серцевих скорочень. Сигнал ЕКГ з гарною якістю повинен мати значення bSQI 1 або якомога ближче до 1, що вказує на те, що всі або більшість серцевих скорочень були виявлені двома детекторами QRS. Як видно з таблиці 1.5, усі сигнали досягли значення bSQI, що дорівнює 1, що означає ідеальне виявлення QRS у всіх випадках.

Зрештою, спектральний розподіл ЕКГ було розраховано та проаналізовано за допомогою sSQI. Оскільки комплекс QRS містить приблизно 99% енергії сигналу ЕКГ, хорошим показником якості є порівняння розподілу потужності комплексу QRS з рештою сигналу [37]. Цей SQI також є цінним, оскільки дозволяє виявляти рух електродів, що є очікуваною проблемою для виготовлених електродів. Значення, отримані для виготовлених електродів, коливаються від 0,557 до 0,651, тоді як комерційні електроди мали значення від 0,521 до 0,596. Всі ці значення знаходяться в очікуваному діапазоні для частоти серцевих скорочень у стані спокою, що вказує на хорошу якість сигналів. Виходячи з об'єднаних результатів та того факту, що значення для виготовлених електродів дуже схожі на значення, отримані з комерційними електродами, можна з упевненістю сказати, що різні зразки можна використовувати для

впевненого отримання сигналів ЕКГ для постановки медичного діагнозу, підтверджуючи те, що було визначено візуальним оглядом сигналів ЕКГ.

Під час тестування виготовлених гнучких тензодатчиків були отримані графіки напруги, що показують, як змінювалася напруга у відповідь на деформацію датчиків. У всіх випадках напруга збільшувалася при згинанні датчика та зменшувалася при розтягуванні. Цю поведінку можна спостерігати на рисунку 1.9 для всіх 6 датчиків. Одним з основних обмежень, які можуть виникати в цих типах датчиків, є їхній високий опір (порядку мегаом), що призводить до дуже малих коливань напруги. Цю поведінку можна особливо спостерігати в датчиках, нанесених на ПЕТ, де коливання напруги менше 0,1 В (рисунком 1.9 b,e). Ця невелика зміна може призвести до проблеми з вимірюванням, оскільки коливання напруги може залишитися непоміченим стандартним вимірювальним обладнанням. Незважаючи на те, що датчики, нанесені на папір Сюаня, продемонстрували вищі коливання напруги (рисунком 1.9 c,f), ці датчики мали ще одну поширену проблему з малими коливаннями напруги: схильність до руху. Ця проблема спостерігалася головним чином на зразку PEDOT:PSS-CuPc (рисунком 1.9 c), де рух викликає пік при згинанні датчика. Щоб уникнути такої поведінки, необхідно розробити надійний затискний механізм, який гарантує, що датчики залишатимуться на місці та деформуватимуться лише під дією руху, який необхідно дослідити. Для порівняння, обидва датчики, які використовували EVA як підкладку (Рисунком 1.9 a, d), показали найбільшу варіацію напруги через згинання та розгинання. Це свідчить про те, що EVA є більш придатною підкладкою для використання в гнучкому датчику деформації, що робить бажаним використання цих датчиків для подальших випробувань, оскільки рух можна легше виміряти.

Незважаючи на те, що різні зразки показали різні результати, всі вони продемонстрували п'єзорезистивну природу, що робить їх життєздатним варіантом для використання як датчиків деформації, підкреслюючи потенціал зразків, осаджених у EVA, завдяки їхній покращеній продуктивності. Ці результати узгоджуються з результатами, продемонстрованими Х. Ну та ін. [43], де графеновий носимий датчик міг виявляти рух сигналів, пов'язаних з тілом. Гнучкі датчики деформації можуть виявитися дуже корисними в медичних застосуваннях, таких як вимірювання діапазону руху різних суглобів тіла. Крім того, датчики можна налаштувати для кращої адаптації до анатомії тіла, що призведе до більш точного вимірювання, зосередженого на певній частині тіла.

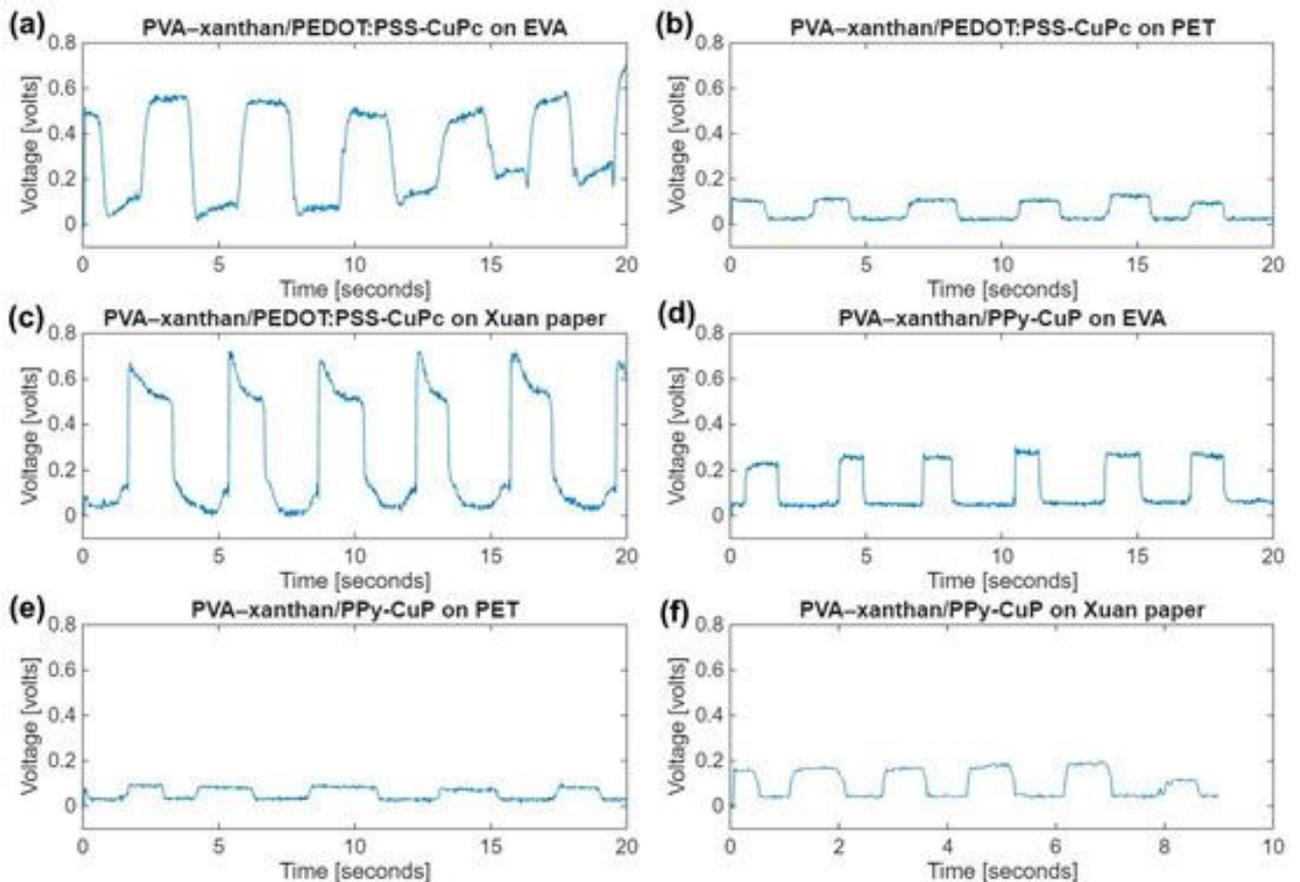


Рисунок 1.9 – Графіки напруги, що показують згинання та розгинання для шести різних зразків. Згинання показано як рух вгору, тоді як розгинання представлено поверненням до базової лінії. Шість різних зразків виглядають наступним чином: (а) PVA–ксантан/PEDOT:PSS-CuPc на EVA, (б) PVA–ксантан/PEDOT:PSS-CuPc на PET, (с) PVA–ксантан/PEDOT:PSS-CuPc на папері Xuan, (д) PVA–ксантан/PPy-CuPc на EVA, (е) PVA–ксантан/PPy-CuPc на PET та (ф) PVA–ксантан/PPy-CuPc на папері Xuan

1.7 Висновки до розділу

У даному розділі представлено огляд матеріалів на основі гнучких провідних полімерних композитів (FCPC) на основі CuPc, вбудовані в полімерні матриці PPy та PEDOT:PSS, були використані для виготовлення ЕКГ-електродів та датчиків деформації на гнучких підкладках, таких як PET, папір Xuan та EVA. Морфологічна та хімічна характеристика виявила значні відмінності між композитними плівками. SEM-аналіз показав різкий контраст між гладкими та безперервними покриттями PEDOT:PSS та шорсткою, глобулярною та пористою структурою PPy FCPC. На кінцеву топографію також сильно вплинула нижча підкладка. Крім того, EDS-

аналіз підтвердив успішне та однорідне включення CuPc в обидві полімерні матриці. Остаточним доказом була сильна просторова кореляція між сигналами N та Cu на елементних картах, що доводить їх спільне молекулярне походження та успішну інтеграцію. Щодо механічної поведінки, найвищий опір, з наявністю як пружних, так і пластичних зон на кривих напруження-деформації, був присутній у FCPC на PET. FCPC, які використовували EVA як підкладку, отримали найкращі результати, працюючи як гнучкі датчики деформації.

2 БАГАТОСЕНСОРНА СИСТЕМА НА ОСНОВІ БЕЗДРОВОЇ СЕНСОРНОЇ МЕРЕЖІ (WSN) ДЛЯ МОНІТОРИНГУ СТАНУ КОНСТРУКЦІЙ

Моніторинг стану конструкцій (SHM) є важливим методом для безперервної оцінки стану конструкцій за допомогою інтегрованих сенсорних систем під час експлуатації. Технології SHM розвинулися, щоб задовольнити зростаючий попит на ефективні стратегії технічного обслуговування в передових інженерних галузях, таких як цивільна інфраструктура, аерокосмічна галузь та транспорт. Однак розробка мініатюрного, економічно ефективного та мультисенсорного рішення на основі бездротових сенсорних мереж (WSN) залишається значною проблемою, особливо для застосувань SHM в чутливих до ваги аерокосмічних конструкціях. Для вирішення цієї проблеми в цьому дослідженні представлена нова мультисенсорна система (MSS) на основі WSN, яка інтегрує численні сенсорні можливості на гнучкій друкованій платі (PCB) розміром 3×3 см. Запропонована система поєднує в собі п'єзоелектричний перетворювач (PZT) для виявлення ударів; тензодатчик для моніторингу механічної деформації; акселерометр для захоплення динамічних відгуків; та датчик навколишнього середовища, що вимірює температуру, тиск та вологість. Цей високий рівень функціональної інтеграції в поєднанні зі збором даних у реальному часі (DAQ) та точною синхронізацією часу через Bluetooth Low Energy (LE) відрізняє запропоновану MSS від традиційних систем SHM, які зазвичай обмежені громіздким обладнанням, одним способом вимірювання або залежністю від дротового зв'язку. Експериментальні оцінки композитних панелей та алюмінієвих зразків демонструють надійний високоточний запис сигналів PZT, змін деформації та реакцій прискорення, що відповідає продуктивності комерційних приладів. Запропонована система пропонує низькоенергетичну, легку та масштабовану платформу, що демонструє значний потенціал для бортових SHM у літаках.

2.1 Основні принципи застосування інтегрованих сенсорних систем

Моніторинг стану конструкцій (SHM) стосується безперервного спостереження та оцінки стану конструкції за допомогою інтегрованих сенсорних систем під час експлуатації. SHM відповідає на зростаючу потребу в ефективних стратегіях технічного обслуговування в сучасних інженерних галузях, таких як аерокосмічна галузь, цивільна

інфраструктура та транспорт. Основними цілями SHM є підвищення безпеки конструкцій, мінімізація простою, пов'язаного з технічним обслуговуванням, та зменшення непотрібної маси, пов'язаної з надмірно спроектованими компонентами [41]. Ці цілі стають дедалі важливішими, враховуючи економічний та екологічний тиск, з яким стикаються галузі промисловості, щоб оптимізувати використання ресурсів, зберігаючи при цьому високі стандарти надійності. Легкі конструкції, особливо в аерокосмічній галузі та транспорті, потребують точного моніторингу через невизначеність умов навантаження, впливу навколишнього середовища та властивостей матеріалів, що може призвести до надмірності конструкції та дорогих перевірок [42]. SHM забезпечує шлях до стратегій прогнозного технічного обслуговування, зменшуючи кількість перевірок, пов'язаних з безпекою, та дозволяючи проводити ремонт на основі стану, що забезпечує надійність конструкції та дотримання нормативних стандартів [43].

З огляду на ці зростаючі вимоги до систем SHM, зростає потреба в технологіях, що пропонують покращену масштабованість, зменшення складності встановлення та можливості моніторингу в режимі реального часу. Отже, інтеграція Інтернету речей (IoT) у SHM є перспективним підходом до вирішення деяких давніх обмежень, пов'язаних з традиційними методами SHM. Традиційні дротові системи SHM, хоча й надійні, вимагають розгалуженої інфраструктури, стаціонарних установок та спричиняють високі витрати на встановлення та обслуговування, що обмежує їхню застосовність до критичних конструкцій та довгострокових сценаріїв моніторингу [44]. Технології бездротового зв'язку, і зокрема бездротові сенсорні мережі (WSN), з'явилися як альтернатива для зниження цих витрат, дозволяючи сенсорним вузлам передавати дані бездротовим способом в середовищах без інфраструктури [45]. Системи SHM на основі IoT використовують передові протоколи бездротового зв'язку, периферійні обчислення та хмарне сховище для збору, передачі та обробки різноманітних структурних параметрів, таких як деформація, вібрація, зміщення, температура та вологість, з розподілених сенсорних вузлів [8]. Таке підключення дозволяє виявляти пошкодження та приймати рішення в режимі реального часу, підтримуючи стратегії прогнозного обслуговування та підвищуючи безпеку інфраструктури [10]. Крім того, зменшення розмірів сенсорних вузлів, низьке енергоспоживання та досягнення в аналізі даних ще більше підвищують придатність Інтернету речей (IoT) для застосувань SHM [11]. Тому впровадження IoT у SHM вважається перспективним та масштабованим рішенням для продовження

терміну служби контрольованих конструкцій, мінімізуючи витрати на обслуговування та експлуатаційні ризики [1-12].

Хоча метод SHM (гіпохібіологічний аналіз на основі деформацій) має значний потенціал для покращення надійності конструкцій та стратегій технічного обслуговування, не існує унікального рішення для SHM, яке може виявляти всі типи пошкоджень у металах та композитах. Їх часто доводиться адаптувати до типу та ступеня потенційного пошкодження конструкції (наприклад, розшарування в композитах або тріщини в металах) [11]. Наприклад, динамічні методи, такі як спрямовані ультразвукові хвилі, чутливі до змін жорсткості, але на них можуть сильно впливати фактори навколишнього середовища, такі як температура та вологість, які вносять шум та знижують точність [48]. Статичні методи, такі як моніторинг на основі деформацій за допомогою волоконно-оптичних датчиків, менш чутливі до змін навколишнього середовища, але не мають здатності виявляти глобальні структурні зміни [49].

Серед цих проблем, чутливість багатьох методів SHM до навколишнього середовища залишається критичним обмеженням їхньої ефективності. Наприклад, методи спрямованих хвиль та електромеханічного імпедансу сильно залежать від змін температури, які змінюють властивості матеріалу та поширення сигналу, що призводить до хибних тривог або зниження можливостей виявлення [50]. Шум від робочого середовища, такий як механічні коливання або електромагнітні перешкоди, ще більше ускладнює інтерпретацію сигналів і часто вимагає ретельної обробки сигналів для вилучення змістовних даних [51].

Щоб подолати ці обмеження, мультисенсорні системи стали трансформаційним підходом у галузі SHM (гіпохібіологічної обробки поверхонь). На відміну від традиційних однометодових систем, мультисенсорні системи поєднують кілька методів SHM, реалізуючи різні фізичні принципи для отримання додаткових даних, що підвищують точність і надійність виявлення та оцінки пошкоджень [52]. Інтегруючи ці методи, мультисенсорні системи дозволяють одночасно оцінювати глобальні та локалізовані структурні зміни, що призводить до більш детальної оцінки пошкоджень [53].

Інтеграція кількох типів датчиків не лише покращує виявлення ударів, але й дозволяє здійснювати моніторинг використання шляхом реконструкції навантаження та визначення форми, враховуючи вплив навколишнього середовища. Поєднуючи дані з датчиків PZT, тензодатчиків та акселерометрів, можна оцінити прикладені навантаження та відстежити структурні деформації, що сприяє більш комплексній оцінці

композитних конструкцій [54]. Крім того, використання додаткових датчиків навколишнього середовища для моніторингу температури та вологості дозволяє системі компенсувати зовнішні впливи, підвищуючи надійність аналізу [55].

Більше інформації про багатосенсорні системи SHM можна знайти в [11]. У цій оглядовій статті підкреслюється потенціал багатосенсорних систем SHM для комплексної оцінки пошкоджень металевих та композитних конструкцій. Завдяки інтеграції статичних методів, таких як зондування деформації, з динамічними методами та спрямованими хвилями, ці системи ефективно виявляють, локалізують та кількісно оцінюють пошкодження за різних умов навколишнього середовища. Об'єднання даних на рівні необроблених даних, характеристик та рішень забезпечує надійну оцінку різноманітних вхідних даних датчиків, долаючи обмеження однометоду SHM. Важливість та необхідність об'єднання даних для багатосенсорних систем розглядаються в цих дослідженнях [20].

В останні роки було запропоновано різні мультисенсорні системи для SHM, кожна з яких пропонує унікальні функції, що підходять для різних структурних та екологічних умов. Деякі системи надають пріоритет інерційним вимірюванням та виявленню нахилу для моніторингу великих цивільних споруд, включаючи акселерометри та інклінометри на основі MEMS із вбудованими контролерами для обробки та управління даними в режимі реального часу [54]. Інші поєднують кілька способів вимірювання, такі як хвильові інспекції, волоконно-оптичні датчики та п'єзоелектричні перетворювачі, для досягнення ширших діагностичних можливостей в одній платформі [44]. З'явилися передові методології, які мінімізують вимоги до базових ліній шляхом інтеграції символічного аналізу даних та алгоритмів кластеризації, покращуючи адаптивність та можливості виявлення в режимі реального часу фреймворків SHM [12]. Енергоефективність та масштабованість також є ключовими міркуваннями, причому деякі системи використовують модульні архітектури, компоненти з низьким енергоспоживанням та зв'язок із розширеним спектром зі стрибкоподібною перебудовою частоти для забезпечення надійного та довгострокового DAQ навіть у складних середовищах [56]. Багатопараметричні сенсорні входи, такі як волоконно-оптичні датчики деформації, датчики хлоридів та зонди опору, розширили сферу застосування SHM, включивши до неї процеси деградації матеріалів та корозії [57], а використання методів стиснутого зондування дозволило реконструювати високоточні сигнали з недостатньо дискретизованих вимірювань [5]. Крім того, нові підходи інтегрували напівпасивні датчики

на основі RFID для зменшення споживання енергії, забезпечуючи при цьому динамічні вимірювання деформації та прискорення [58].

Незважаючи на ці досягнення, сучасні багатосенсорні системи SHM зазвичай стикаються з кількома обмеженнями. Багато рішень використовують односенсорну модальність або виключають важливі параметри навколишнього середовища, які є вирішальними для комплексної діагностики. Наприклад, хоча дана система може добре виявляти інерційні коливання [23], їй можуть бракувати датчиків навколишнього середовища, необхідних для врахування впливу температури або вологості, що потенційно знижує точність виявлення пошкоджень. Аналогічно, інтегровані рішення, що використовують кілька типів датчиків, часто не досягають достатньо компактного форм-фактора або можуть покладатися на комбінацію кількох жорстких друкованих плат, що обмежує їхню застосовність на платформах, чутливих до ваги, таких як літаки [55].

Споживання енергії та обмеження зв'язку ще більше ускладнюють масштабне розгортання. Можливості бездротового зв'язку можуть споживати значну кількість енергії через старі модулі Bluetooth з живленням від 5 В і можуть не підходити для створення розгалужених сенсорних мереж, що охоплюють великі споруди, через їхню топологію бездротового зв'язку. Ці недоліки бездротового зв'язку призводять до обмеженої масштабованості та безперервного довгострокового моніторингу.

Більше того, хоча деякі системи інтегрують кілька датчиків, вони все ще можуть не досягти справжньої багатосенсорної здатності через використання одного типу датчика, а не різних типів датчиків, які надають більше інформації про структуру та її робоче середовище.

Впровадження багатосенсорних систем SHM пов'язане з кількома проблемами, які в першу чергу пов'язані зі складністю інтеграції різноманітних датчиків, управлінням величезними обсягами даних та забезпеченням надійності системи. Бездротові сенсорні мережі (WSN) для SHM повинні вирішувати такі питання, як розгортання датчиків та децентралізована обробка даних для підтримки зв'язку та точності за обмежених ресурсів. Крім того, синхронізація даних зондування в розподілених мережах створює значні труднощі через дрейф годинника та затримки, спричинені апаратним забезпеченням, що вимагає передових алгоритмів синхронізації [51]. Обмеження енергії також обмежують розгортання бездротових датчиків, що робить методи збору енергії з кількох джерел життєво важливими для продовження терміну служби [52].

Ці сукупні недоліки, такі як великі розміри, більш важкі конфігурації, відсутність датчиків навколишнього середовища для компенсації, підвищене енергоспоживання та обмежена різноманітність датчиків, підкреслюють потребу в більш інтегрованому та вдосконаленому рішенні. Ця робота вирішує ці проблеми, представляючи повністю інтегровану, мініатюризовану та на основі бездротової сенсорної мережі (WSN) багатосенсорну платформу, спеціально розроблену для бортових застосувань SHM в аерокосмічній промисловості. Система оснащена гнучкою друкованою платою (3 см × 3 см), яка включає PZT, тензодатчик, акселерометр та датчик навколишнього середовища, пропонуючи комплексну структурну оцінку, мінімізуючи як розмір, так і вагу. Включення низькоенергетичного зв'язку Bluetooth LE додатково дозволяє масштабоване бездротове розгортання, уникаючи додаткових кабелів та підвищуючи придатність для застосування в літаках, де вага та складність проводки є критичними проблемами.

Окрім розробки апаратного забезпечення, у цій роботі також представлено спеціалізований графічний інтерфейс користувача для керування всім процесом збору даних та зв'язку. Графічний інтерфейс користувача спрощує збір даних з центрального вузла в межах бездротової сенсорної мережі (WSN), надаючи можливості для візуалізації, аналізу та зберігання даних. Це забезпечує оптимізоване та зручне середовище для моніторингу та аналізу даних SHM.

2.2 Розробка багатосенсорної системи для SHM

Запропонована система базується на ідеї інтеграції кількох різних сенсорних елементів в одну компактну платформу. Побудована на гнучкій друкованій платі розміром лише 3 см на 3 см, система поєднує в собі PZT, тензодатчик, акселерометр та датчик навколишнього середовища, здатний вимірювати температуру повітря, вологість та тиск. Інтеграція цих датчиків дозволяє спостерігати як механічні, так і навколишні фактори, що впливають на структурну цілісність та довгострокову експлуатацію.

Згідно з запропонованою конструкцією, кожен чутливий елемент відіграє окрему роль у моніторингу критичних структурних та екологічних параметрів для застосувань SHM (механізмів вирівнювання, обробки та обробки даних). Елемент PZT реєструє структурну вібрацію, що виникає під навантаженнями та динамічними подіями. Тензодатчик контролює зміни розподілу деформації, що може свідчити про потенційну втому або накопичення пошкоджень з часом. Акселерометр кількісно визначає

структурні реакції на зовнішні сили, такі як аеродинамічні ефекти або турбулентність, тим самим допомагаючи ідентифікувати зміни динамічних характеристик. Доповнюють ці вимірювання параметри навколишнього середовища, що реєструються комбінованим датчиком температури, вологості та тиску, які впливають на властивості матеріалу та поведінку конструкції за різних умов експлуатації.

Для забезпечення ефективного збору даних та аналізу дані з кожного датчика збираються компактним бортовим електронним блоком, який обробляє сигнали для подальшої бездротової передачі. Включення зв'язку Bluetooth LE усуває необхідність у великій проводці, що дозволяє безпосередньо розміщувати вузол датчика на ключових структурних ділянках. Таку конфігурацію можна відтворити в кількох місцях, формуючи бездротову сенсорну мережу, що забезпечує просторово розподілені дані, критично важливі для розуміння та прогнозування стану літака з часом.

Ця бездротова можливість доповнюється конструкцією, яка надає пріоритет низькому енергоспоживанню та довговічності. Отже, ця мініатюрна система розроблена для роботи з низькими вимогами до енергоспоживання та витримує складні умови польотів. Завдяки досягненню балансу між функціональністю, масою та форм-фактором, платформа підтримує завдання безперервного або періодичного моніторингу.

На практиці ці принципи проектування дозволяють стратегічно розгортати багатосенсорні системи в критичних областях композитних конструкцій, що забезпечує комплексний моніторинг. Усі дані, отримані від датчиків, доступних у MSS, передаються через Bluetooth LE до центрального пристрою в бездротовій мережі. Цей центральний пристрій підключений до базової станції, такої як ПК. Базова станція оснащена графічним інтерфейсом користувача, який може відображати ці вхідні дані датчиків у режимі реального часу та зберігати їх для довгострокового дослідження. Центральний пристрій виконує етапи обробки даних для вилучення значущих параметрів із необроблених сигналів. Наприклад, він перетворює вимірювання напруги зі схеми тензодатчика на значення деформації та витягує пікове значення напруги з сигналу PZT. Потім графічний інтерфейс перетворює ці оброблені результати на графіки та діаграми, що дозволяють досліджувати зміни структурної поведінки з часом. Принципи проектування та роботи запропонованої мініатюрної MSS для SHM представлені на рисунку 2.1.

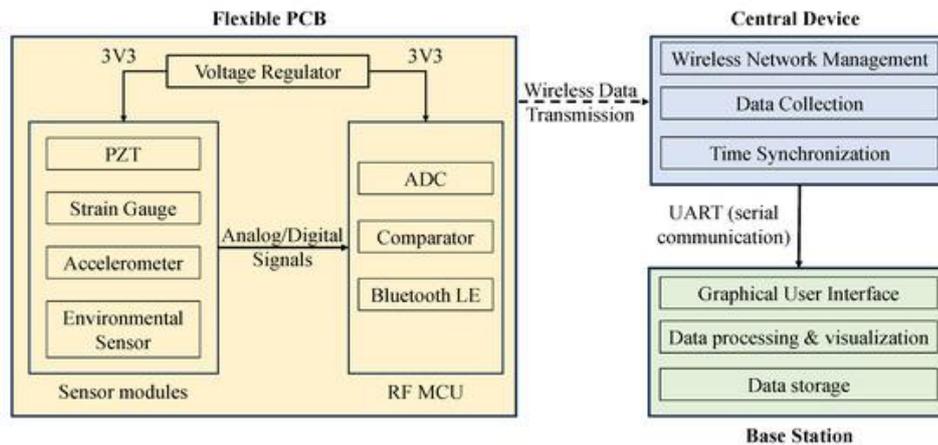


Рисунок 2.1 – Концептуальна блок-схема мініятуризованого MSS для SHM

2.3 Багатосенсорна система SHM

У цьому розділі представлено архітектуру та ключові характеристики багатосенсорної системи SHM, яка призначена для бездротового, енергоспоживаючого та мініатюрного моніторингу стану конструкцій. Він охоплює радіочастотний мікроконтролер, який інтегрує Bluetooth LE для ефективної передачі даних, забезпечуючи безперебійний зв'язок між сенсорними вузлами. Обговорюється стратегія управління живленням, з акцентом на низькоенергетичну роботу, енергоефективну конструкцію та вибір батарей для тривалої роботи. У підрозділі «Датчики та DAQ» описано інтегровані сенсорні елементи, включаючи PZT-датчики, тензодатчики, акселерометр та датчик навколишнього середовища, а також їхню роль у моніторингу конструкцій. Крім того, у підрозділі «Бездротовий зв'язок» описано конструкцію антени та топологію мережі, що забезпечує надійну передачу даних для застосувань SHM.

Вибір радіочастотного мікроконтролеру

MSS використовує зв'язок Bluetooth LE, що усуває потребу в зовнішніх бездротових модулях. Ця інтегрована функція Bluetooth LE дозволяє бездротову передачу даних між сенсорними вузлами та центральним блоком збору даних, що дозволяє здійснювати моніторинг у режимі реального часу без фізичного підключення. Зв'язок Bluetooth LE підтримує енергоефективний протокол з низьким споживанням енергії, що робить його придатним для тривалої роботи в системах SHM.

Ядром системи є модуль ANNA-B402 від uBlox, побудований на мікросхемі Nordic Semiconductor nRF52833. Цей модуль інтегрує

високопродуктивний процесор Arm Cortex-M4, що забезпечує ефективну обробку сигналів, фільтрацію та аналіз даних у режимі реального часу [34]. Модуль ANNA-B402 — це автономне рішення Bluetooth 5.1 Low Energy, що пропонує надкомпактний форм-фактор ($6,5 \times 6,5 \times 1,2$ мм), що робить його ідеальним для мініатюрних систем.

Поєднуючи обробку даних та бездротовий зв'язок в одному компактному модулі, MSS досягає оптимізованого балансу між продуктивністю, енергоефективністю та мініатюризацією.

Управління живленням

Для забезпечення надійної та ефективної роботи MSS використовує регулятор напруги постійного струму типу "понижуюче-підвищуюче", який забезпечує стабільне живлення від батарейки типу "таблетка" або літій-іонного/полімерного акумулятора. Цей регулятор забезпечує стабільний рівень напруги, що дозволяє системі ефективно функціонувати за різних умов живлення.

Система розроблена з використанням стратегій роботи з низьким енергоспоживанням для подовження терміну служби акумулятора. Ці стратегії включають наступне:

- **Реалізація режиму сну :** MSS переходить у стан низького енергоспоживання в періоди без виявлення ударів, що ефективно знижує загальне споживання енергії.
- **Активація системи на основі порогового значення:** Коли сигнал, викликаний ударом, перевищує заздалегідь визначене порогове значення, вся система активується вбудованим компаратором у радіочастотному мікроконтролері. АЦП починає вибірку сигналів PZT та тензодатчиків, тоді як акселерометр вимірює прискорення, а датчик навколишнього середовища реєструє температуру, тиск та вологість повітря.

Вибір батарейки-таблетки CR-2032 особливо вигідний для мініатюрних застосувань SHM. Ця батарейка має ємність 240 мАг при 3 В, чого достатньо для підтримки завдань DAQ та бездротового зв'язку в запропонованій системі. Крім того, її невеликий розмір ($20 \times 3,2$ мм) робить її ідеальним джерелом живлення для компактних вбудованих систем. Хоча CR-2032 не перезаряджається, вона є економічно ефективною альтернативою літій-іонним батареям, які зазвичай більші, важчі та дорожчі.

Завдяки інтеграції енергоефективних апаратних компонентів та програмно-керованих методів оптимізації енергії, MSS досягає тривалої

роботи без частого технічного обслуговування, що робить її добре придатною для застосувань SHM.

2.4 Датчики та DAQ

Вибір тензодатчика

MSS містить модуль вимірювання деформації на основі конфігурації чверть-Уїтстоунського мосту, призначений для виявлення невеликих механічних деформацій у композитних конструкціях. Тензодатчик (120 Ом) підключений як один із чотирьох резистивних елементів у мосту, тоді як решта три є фіксованими прецизійними резисторами (120 Ом).

Для точного вимірювання диференціальної напруги, що виникає внаслідок змін опору, викликаних деформацією, система використовує інструментальний підсилювач (INA333 від Texas Instruments).

Прецизійний джерело опорної напруги (REF35160 від Texas Instruments) подає стабільну малощумну опорну напругу як на міст Уїтстона, так і на інструментальний підсилювач, гарантуючи, що будь-які коливання вихідного сигналу будуть зумовлені переважно механічним напруженням, а не коливаннями живлення.

Після посилення сигнал деформації оцифровується за допомогою АЦП мікроконтролера, що дозволяє здійснювати моніторинг у режимі реального часу та подальшу обробку. Поєднуючи прецизійне джерело опорної напруги, стабільну мостову конфігурацію та малощумний підсилювач, MSS досягає високоточних вимірювань деформації, що робить його добре придатним для застосувань SHM. На основі конфігурації схеми, очікувана вихідна напруга відображається відповідно до значення резистора тензодатчика, як показано на рисунку 2.2.

Датчик PZT

Модуль датчика PZT призначений для виявлення сигналів, викликаних ударом, та перетворення їх на вимірювану напругу. Для досягнення цієї мети система використовує схему підсилювача заряду на основі операційного підсилювача (LTC6087 від Analog Devices).

Необроблений сигнал PZT проходить кілька етапів кондиціонування:

- **Ослаблення:** Сигнал спочатку ослаблюється вдвічі за допомогою схеми дільника напруги, щоб запобігти насиченню та зберегти лінійність.

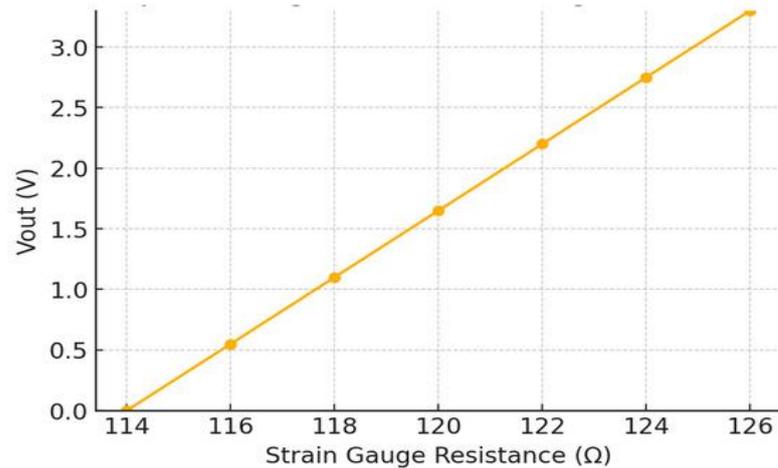


Рисунок 2.2 – Вихідна напруга в залежності від опору тензодатчика

• **Фільтрація:** Низькочастотний фільтр застосовується з резистором (51 Ом) та конденсатором (4,7 нФ), що призводить до частоти зрізу 664 кГц для видалення високочастотного шуму та покращення чіткості сигналу. Якщо сигнали PZT переважно менше 100 кГц, прийнятним є граничний діапазон близько 500–700 кГц. Для проектування схеми фільтра та значень конденсатор-резистор було розглянуто еталонний проект, наданий Analog Devices.

Після цих налаштувань оброблений аналоговий сигнал перетворюється в цифрову форму за допомогою АЦП мікроконтролера, що дозволяє виявляти удари в режимі реального часу та проводити подальший аналіз. Це забезпечує надійне виявлення ударів та підвищує точність вимірювання SHM. Етапи збору сигналу PZT візуалізовано на рисунку 2.3.

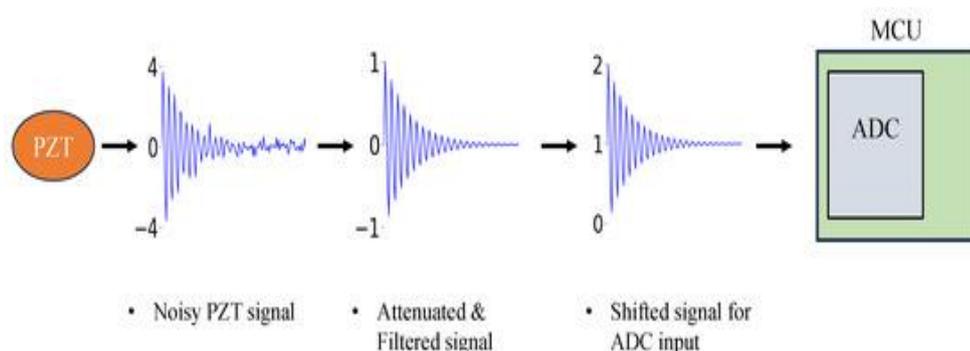


Рисунок 2.3 – Етапи збору сигналу PZT

Акселерометр

MSS інтегрує акселерометр BMA400 від Bosch Sensortec, розроблений для застосувань датчиків руху з низьким енергоспоживанням. Акселерометр забезпечує цифровий вихід через протокол послідовного

периферійного інтерфейсу (SPI), забезпечуючи ефективний зв'язок з мікроконтролером. Використання інтерфейсу SPI забезпечує швидку та надійну передачу даних, зменшуючи затримку під час виявлення ударів та аналізу руху.

Акселерометр BMA400 підтримує наступне [56]:

- Тривісне вимірювання прискорення, що дозволяє здійснювати комплексний аналіз руху та вібрації конструкції;
- Налаштовувані діапазони вимірювання ± 2 г, ± 4 г, ± 8 г та ± 16 г, що дозволяє адаптувати їх до різних застосувань SHM;
- 12-бітна цифрова роздільна здатність, що забезпечує точні вимірювання прискорення, необхідні для аналізу ударів та вібрації;
- Регульована частота вихідних даних до 800 Гц, що оптимізує баланс між споживанням енергії та часом відгуку.

Інтегруючи дані про прискорення з вимірюваннями PZT та тензодатчиками, MSS забезпечує комплексну оцінку структурної цілісності, що дозволяє використовувати SHM-застосунки в режимі реального часу. Акселерометр зв'язується з MCU через інтерфейс SPI, забезпечуючи швидку та ефективну передачу даних. Акселерометр надає дані про прискорення в режимі реального часу, які використовуються для аналізу ударів, моніторингу вібрації та оцінки структурної реакції.

Датчик навколишнього середовища

MSS містить датчик навколишнього середовища BME280 від Bosch Sensortec, який дозволяє вимірювати температуру повітря, атмосферний тиск та вологість. На відміну від PZT-датчиків та тензодатчиків, які мають аналогові виходи, датчик BME280 має повністю цифровий вихід, що усуває необхідність додаткового формування сигналу.

Цей датчик також зв'язується з мікроконтролером через інтерфейс SPI, забезпечуючи швидку та ефективну передачу даних. Він підтримує такі функції:

- **Три параметри навколишнього середовища:** температура, тиск і вологість;
- **Цифровий вихід високої роздільної здатності:** 20-бітна роздільна здатність для температури та тиску та 16-бітна роздільна здатність для вологості;
- **Споживання енергії:** Низьке енергоспоживання, що робить його ідеальним для довгострокового моніторингу.

Завдяки інтеграції датчика BME280, MSS розширює свою здатність співвідносити структурні реакції з умовами навколишнього середовища, надаючи цінну інформацію для застосувань SHM (механізмів управління

грунтом). Збір даних про навколишнє середовище гарантує, що коливання температури, тиску та вологості можуть бути враховані в структурних оцінках, підвищуючи точність та надійність виявлення ударів та оцінки пошкоджень.

Мікроконтролер налаштовує ці датчики та зчитує ці вимірювання через SPI, який є протоколом послідовного зв'язку. Цей протокол встановлює певний набір сигналів, включаючи лінії тактової частоти, вхідні, вихідні та лінії вибору мікросхеми, щоб забезпечити ефективну передачу даних між мікроконтролером та окремими датчиками, як показано на рисунку 2.4. Такий підхід усуває необхідність додаткового аналогового формування для цих входів.

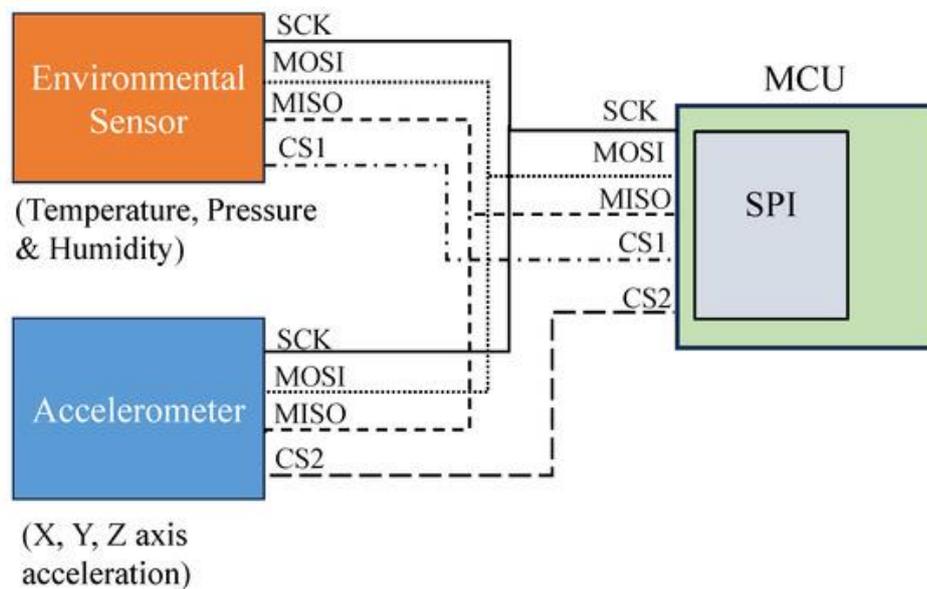


Рисунок 2.4 – Послідовний зв'язок (SPI) між мікроконтролером та датчиками з цифровим виходом (BMA400 та BME280)

Бездротовий зв'язок у МСС

MSS використовує вбудовану антену в модулі ANNA-B402, що забезпечує бездротовий зв'язок Bluetooth LE для SHM у режимі реального часу. Бездротова мережа має зіркову топологію, де кілька сенсорних вузлів взаємодіють з центральним блоком. Така структура забезпечує ефективний збір даних, мінімізує перешкоди та оптимізує споживання енергії, забезпечуючи при цьому надійну роботу для SHM-застосунків.

Для досягнення стабільної та безперешкодної бездротової передачі було розроблено спеціальну діаграму спрямованості антени на основі інтеграційних рекомендацій системи uVloх. Одним із критичних міркувань проектування є реалізація непровідної зони блокування навколо антени. Ця зона підтримується як на верхньому, так і на нижньому шарах друкованої

плати, запобігаючи відбиттям сигналу від сусідніх провідних компонентів. Без цієї ізоляції металеві доріжки або заземлюючі площини можуть перешкоджати діаграмі спрямованості, значно знижуючи силу сигналу та збільшуючи втрату даних.

Ключові міркування щодо оптимізації продуктивності антени включають наступне:

- **Безперешкодний шлях передачі:** Забезпечення того, щоб антена не була закрита металевими компонентами, що може спричинити небажане ослаблення сигналу;
- **Оптимізація компоновання друкованої плати:** правильне прокладання доріжок для мінімізації перешкод та електромагнітного зв'язку між антеною та іншими компонентами схеми;
- **Конструкція заземлювальної площини:** Реалізація відповідної області заземлення для підвищення ефективності антени та характеристик поширення сигналу.

Завдяки впровадженню цих принципів проектування антени, MSS забезпечує надійну бездротову передачу даних, розширюючи її застосовність для застосувань SHM, де надійний та ефективний зв'язок є критично важливим.

2.5 Реалізація системи MSS

Запропонована система була реалізована на гнучкій двошаровій друкованій платі для задоволення вимоги мініатюризації, що є ключовим завданням проектування. Компоненти малого розміру були ретельно відібрані, щоб забезпечити необхідну продуктивність, мінімізуючи загальну займану площу. Розмір прототипу друкованої плати становить лише 3 см на 3 см. Розроблена система легка, важить лише близько 0,5 г. Крім того, загальна вартість виробництва кожної MSS становить приблизно 80 євро, що робить її економічно ефективним рішенням. Прототип розробленої системи представлено на рисунку 2.5. Як показано на рисунку, всі компоненти були розміщені на верхньому шарі гнучкої друкованої плати.

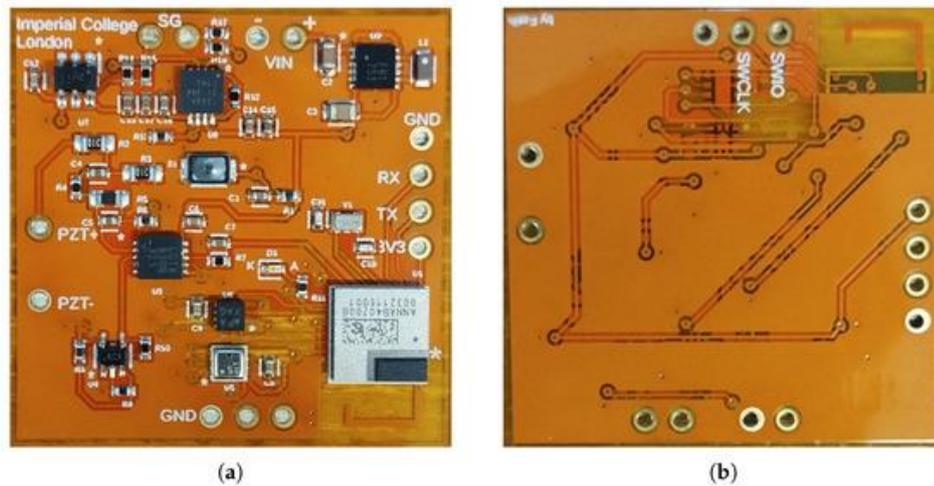


Рисунок 2.5 – Багатосенсорна система SHM на двошаровій гнучкій друкованій платі: (а) вигляд зверху, (б) вигляд знизу. Символ «*» позначає положення виводу 1 на кожному компоненті

Функціональні модулі в MSS

У запропонованій MSS існує шість функціональних модулів для виконання процесу вимірювання SHM (гібридизації з тензодатчиком). Перший модуль у системі - це модуль тензодатчика, який перетворює механічну деформацію на електричні сигнали. Для отримання даних про деформацію від структури була реалізована схема чверть моста Вітстона з інструментальним підсилювачем. Другий - це модуль PZT, який включає схему підсилювача заряду, що забезпечує вихідні напруги, корельовані з коливальною енергією. Сигнал PZT повністю зміщується в позитивний бік за допомогою опорної напруги, яка пізніше обробляється мікроконтролером. Діапазон вихідної напруги як тензодатчика, так і модулів PZT регулювався від 0 до 3,3 В, що дозволяє АЦП правильно дискретизувати та перетворювати свої електричні сигнали на цифрові значення. В іншому випадку висока вхідна напруга може безповоротно пошкодити АЦП.

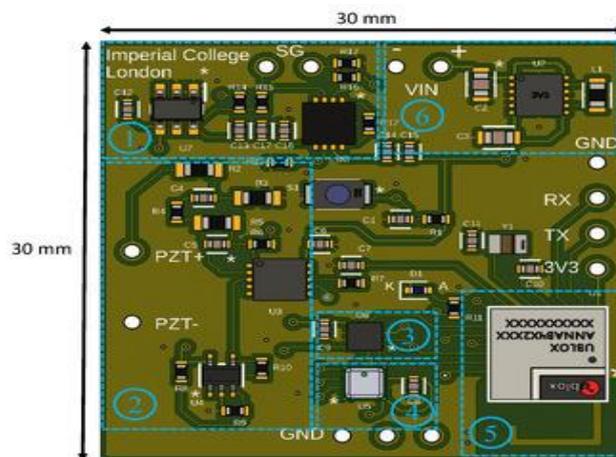
На відміну від модулів тензодатчика та PZT, як акселерометр, так і модулі датчиків навколишнього середовища мають цифровий вихід для вимірювань датчиків. Ці сенсорні пристрої можна налаштовувати, а їхні вимірювання зчитуються через послідовний інтерфейс SPI. Використовуючи один інтерфейс SPI, мікроконтролер взаємодіє лише з одним пристроєм одночасно. Для успішного зчитування даних з різних пристроїв, контакти вибору мікросхеми використовуються для вибору датчика, необхідного для зв'язку. У той час як датчик навколишнього середовища вимірює температуру повітря, тиск і вологість для підтримки постійного моніторингу параметрів навколишнього середовища, які

можуть впливати на характеристики конструкції, акселерометр відповідає за вимірювання прискорення за трьома осями.

Ще одним критично важливим модулем є радіочастотний мікроконтролер, включаючи необхідні периферійні пристрої в цьому дослідженні, такі як АЦП та компаратор. АЦП відповідає за вибірку сигналів, що надходять від модулів тензодатчика та PZT, тоді як компаратор використовується для активації механізму, що спрацьовує за подіями, у запропонованій системі. Цей модуль також керує протоколами послідовного та бездротового зв'язку. Модуль підтримує Bluetooth LE для бездротової передачі даних до центрального пристрою, який встановлює бездротову мережу. Хоча інтерфейс SPI використовується для зв'язку з акселерометром та датчиками навколишнього середовища, UART також реалізовано для обміну даними між модулем та будь-яким пристроєм, що підтримує цей послідовний інтерфейс.

Модуль керування живленням складається з понижувально-підвищувального перетворювача постійного струму для регулювання напруги, щоб підтримувати стабільні електричні умови на всіх компонентах. На систему подається фіксована вхідна напруга (3,3 В).

Усі згадані вище функціональні модулі в багатосенсорній системі SHM представлені на рисунку 2.6.



① strain gauge module ② PZT module ③ accelerometer module ④ environmental sensor module ⑤ RF MCU module ⑥ power management module

Рисунок 2.6 – Функціональні модулі мультисенсорної системи SHM.

Символ «*» позначає положення контакту 1 на кожному компоненті

Реалізація бездротової мережі в MSS

Bluetooth LE використовувався для створення мережі з топологією «зірка», що характеризується простотою, компактністю та адаптивністю. Ця конфігурація базується на двох основних ролях пристроїв: центральному та периферійному. Центральний пристрій функціонує як

концентратор, забезпечуючи підключення до кількох периферійних пристроїв та підтримуючи передачу даних зі швидкістю до 2 Мбіт/с, що робить його придатним для застосувань з високими вимогами до даних. Для реалізації цієї топології було використано Nordic UART Service (NUS), який розширює центральну роль NUS для розміщення до 20 периферійних пристроїв. Подальша масштабованість була досягнута за рахунок додаткових периферійних пристроїв, що отримало назву «рішення Multi-NUS». Це розширення було полегшено програмними бібліотеками, такими як Connection Context Library, які спростили процеси конфігурації та оцінки.

Спираючись на цю структуру, було розроблено бездротову сенсорну мережу (WSN) з використанням мережі з топологією «зірка» та рішення Multi-NUS. Для забезпечення безпечного бездротового зв'язку було використано метод списку фільтрації прийнятих пристроїв, який обмежує доступ до мережі пристроями, явно включеними до списку. Такий підхід гарантує, що лише авторизовані та пов'язані пристрої можуть встановлювати з'єднання, підвищуючи безпеку та надійність мережі.

Синхронізація часу в MSS

У цьому дослідженні синхронізацію часу також було реалізовано в бездротовій мережі. Запропонована система забезпечує точний час та синхронізацію в бездротових сенсорних мережах (WSN) для SHM. Центральний вузол, який діє як головний вузол синхронізації, передає пакети синхронізації периферійним вузлам (ведомим вузлам синхронізації), які оновлюють свої локальні таймери для досягнення спільного тактового сигналу. Синхронізація реалізована за допомогою Bluetooth LE на одному радіочастотному каналі (2480 МГц), причому кожен вузол працює з 16-мегагерцевим вільно працюючим таймером. Головний вузол синхронізації керує двома таймерами — безперервно працюючим таймером синхронізації та лічильником для відстеження переповнень, — тоді як ведені вузли синхронізації коригують свої таймери після отримання пакетів синхронізації.

Структури пакетів для обробки даних датчиків

У бездротовій сенсорній мережі (WSN), розробленій для цього дослідження, MSS слугує фундаментальним вузлом. Кожна MSS інтегрує кілька датчиків для моніторингу різних параметрів, таких як сигнал PZT, деформація, прискорення, умови навколишнього середовища та часові позначки. Мережа може містити кілька вузлів MSS, всі з яких передають

дані бездротовим способом на центральний пристрій. Ефективна комунікація в цій мережі вимагає можливості ідентифікувати, яка MSS передала певний пакет даних та тип даних, які він містить. Ця ідентифікація є важливою для забезпечення точної категоризації, обробки та інтерпретації даних, особливо в системі, де кілька сенсорних вузлів працюють одночасно.

Для задоволення цієї вимоги було розроблено формат структурованого пакета даних. Кожен пакет починається з байта, що ідентифікує MSS, з якої він походить. Наприклад, значення байта 1 у рядковому форматі вказує на те, що дані надходять з MSS 1. Другий байт у рядковому форматі визначає тип даних, що містяться в пакеті. Значення 1 відповідає даним АЦП, які можуть включати показники PZT або тензодатчика; значення 2 вказує на дані мітки часу; 3 представляє дані датчиків навколишнього середовища, такі як температура, тиск і вологість; а 4 відповідає даним акселерометра. Кожен пакет закінчується символом нового рядка (\n), щоб позначити завершення пакета даних і забезпечити правильну обробку центральним пристроєм.

Включення символу нового рядка є критично важливим для забезпечення того, щоб центральний пристрій міг ефективно ідентифікувати кінець кожного пакета та розділяти вхідні потоки даних. Таке розмежування дозволяє центральному пристрою перевірити, чи всі дані в пакеті отримані, перш ніж готувати пакет до передачі на базову станцію. Хоча лише пакет даних АЦП має фіксовану довжину, інші можуть щоразу містити різний обсяг даних у пакеті.

Поєднуючи чітко визначену структуру пакетів та унікальні ідентифікатори для кожного типу даних, ця система гарантує, що як джерело, так і вміст кожного пакета чітко ідентифіковані в межах бездротової сенсорної мережі (WSN). Такий підхід мінімізує ризик неправильної інтерпретації та підвищує загальну надійність і продуктивність системи.

Спираючись на описаний вище структурований формат пакета, нижче наведено конкретний формат та вміст кожного типу пакета даних. Кожен тип пакета був налаштований відповідно до конкретних даних датчика, які він містив, що забезпечувало ефективну передачу та точну інтерпретацію центральним пристроєм.

- **Пакет АЦП:** Він починається з байта, що ідентифікує MSS, за яким йде байт, що вказує тип пакета (значення 1 для даних АЦП). Наступний блок даних містить цифрові значення, які представляють показники PZT або тензодатчика. Кожен пакет АЦП містить дані датчика

обсягом 200 байт у цілочисельному форматі. Формат пакета представлено на рисунку 2.7.

- **Пакет з міткою часу:** Він починається аналогічно, з байта, що ідентифікує MSS, та іншого байта, що вказує тип даних (значення 2 для даних мітки часу). Решта пакета містить мітку часу впливу в мікросекундах та у форматі рядка. Формат пакета представлено на рисунку 2.8.

- **Пакет даних про навколишнє середовище:** Після байта ідентифікатора MSS, за яким йде байт, що вказує тип пакета (значення 3 для даних про навколишнє середовище), пакет складається відповідно з температури (°C), тиску (Па) та вологості (% відносної вологості). Кома (,) використовується як роздільник для розділення різних типів вимірювань у пакеті. Це дозволяє базовій станції легко розрізняти та витягувати дані датчиків з пакета для їх належної обробки. Формат пакета представлено на рисунку 2.9.

- **Пакет акселерометра:** Аналогічно, пакет починається з байта ідентифікатора для MSS, а другий байт визначає тип пакета (значення 4 для даних акселерометра). Після цього дані осей X, Y та Z відповідно представлені в цілочисельному форматі з 12-бітною роздільною здатністю та розділені комами аналогічно пакету даних про навколишнє середовище. Формат пакета представлено на рисунку 2.10.

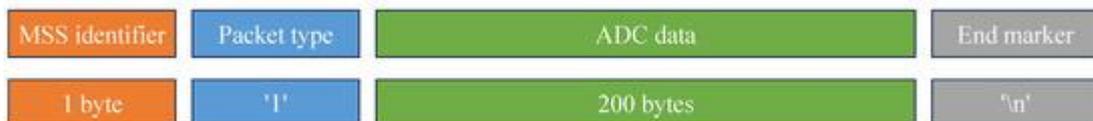


Рисунок 2.7 – Формат пакета даних АЦП

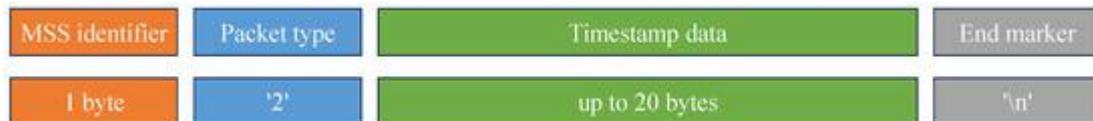


Рисунок 2.8 – Формат пакета даних з міткою часу



Рисунок 2.9 – Формат пакета даних про навколишнє середовище



Рисунок 2.10 – Формат пакета даних акселерометра

2.6 Експериментальні установки для різних застосувань SHM

Для інтеграції багатосенсорної системи SHM у конструкцію, клеми PZT, доступні на гнучкій друкованій платі, були припаяні безпосередньо до датчика PZT, як показано на рисунку 2.11a, а датчик PZT був розміщений під гнучкою друкованою платою, щоб зменшити кількість проводів, як показано на рисунку 2.11b. Окрім датчика PZT, тензодатчик, встановлений на конструкції, також був припаяний з використанням призначених клем на друкованій платі. На відміну від інших датчиків, акселерометр і датчик навколишнього середовища були встановлені так, щоб бути доступними безпосередньо на друкованій платі, що усуває необхідність додаткових з'єднань. Нарешті, для живлення системи, шини живлення були припаяні до корпусу батареї, в якому знаходилася батарейка-таблетка CR-2032. Розроблена нами MSS повністю функціональна для моніторингу стану конструкції, як показано на рисунку 2.11.

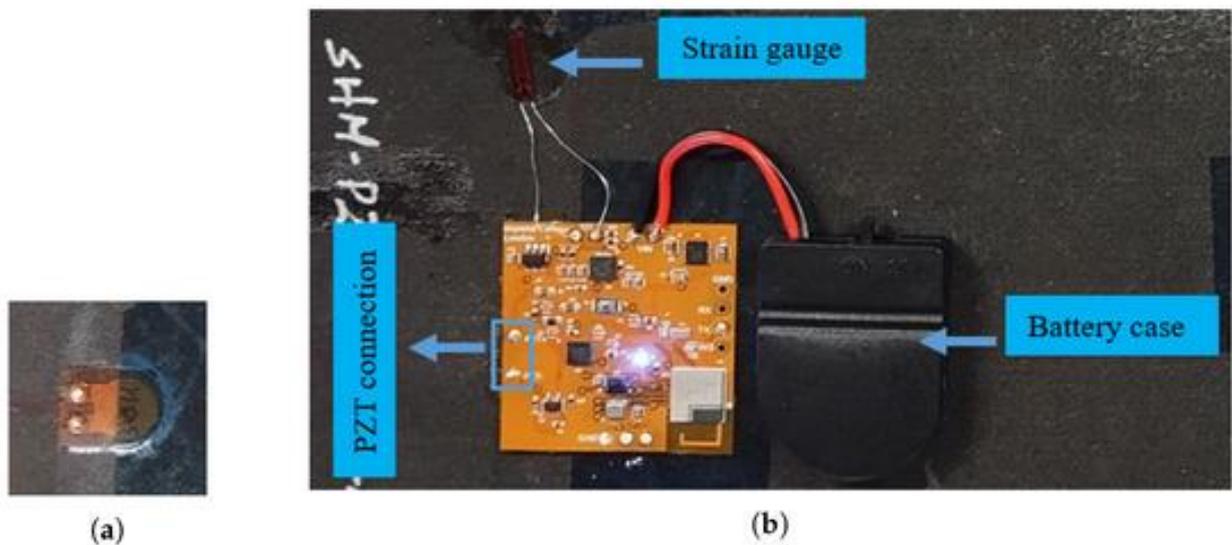


Рисунок 2.11 – Багатосенсорна система SHM на композитній панелі: (а) датчик PZT, (б) інтеграція MSS

Перша експериментальна установка

Перша експериментальна установка складалася з композитної панелі розміром 22 см на 15 см, оснащеної чотирма мультисенсорними системами SHM, як показано на рисунку 2.12. У цьому прикладі MSS включали стратегічно розміщені датчики PZT, акселерометр та датчик навколишнього середовища для збору комплексних даних для застосувань SHM. MSS діяли як бездротові сенсорні вузли в WSN, сформованій за

допомогою Bluetooth LE. Вони відповідали за збір та передачу даних про структурну реакцію разом з інформацією про навколишнє середовище.

Метою установки було оцінити ефективність багатосенсорної системи SHM у виявленні змін структурних властивостей композитного матеріалу за різних умов. Для дистанційного моніторингу та збору даних без фізичних з'єднань використовувався бездротовий зв'язок, що зменшило складність підключення.

У разі перевищення критичним ударом заздалегідь визначених порогових значень, кожен MSS спрацьовує та негайно виходить з режиму сну. Реакція конструкції потім реєструється датчиком PZT. Тим часом, позначка часу удару також фіксується зі спільного годинника в бездротовій мережі. Крім того, збирається прискорення за трьома осями разом з вимірюваннями умов навколишнього середовища, а саме температури, тиску та вологості.

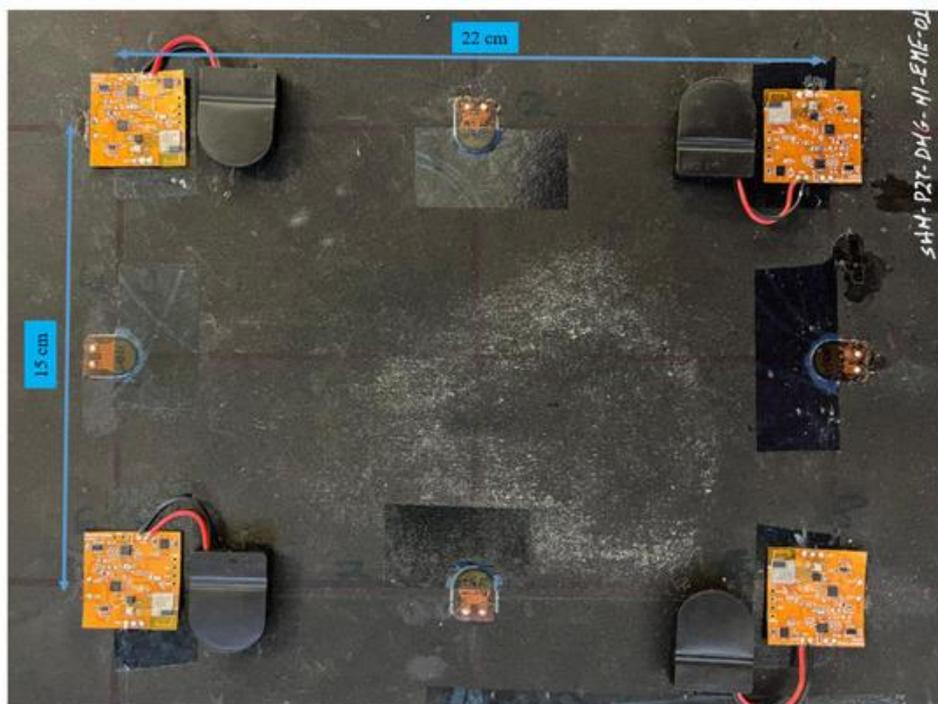


Рисунок 2.12 – Встановлення кількох MSS на композитній панелі

Існує критична точка, де компаратор у мікроконтролері використовується для виявлення переходів напруги на виході датчика PZT. Його конфігурація включає 64-рівневу опорну сходику для встановлення порогової напруги та генерує переривання у високошвидкісному режимі для негайної активації системи. Оскільки сигнал PZT зміщений у позитивний бік, система використовує 1,65 В як опорний рівень, навколо якого коливається сигнал.

На основі прикладів графіків, показаних на рисунку 2.13, компаратор можна налаштувати для генерації або події "Вгору", або події "Вниз", кожна з яких спрацьовує, коли вхідний сигнал перетинає один пороговий рівень у напрямку вгору або вниз відповідно. Однак, спираючись лише на один поріг, ви не можете врахувати обидва можливі напрямки сигналу PZT, коли він вперше перетинає опорний рівень. Це може призвести до затримки спрацьовування системи та пропуску певної частини початкового сигналу. Натомість потрібен перехресний сигнал події з двома попередньо визначеними пороговими рівнями. У цьому підході контролювалися як висхідний, так і низхідний тренди сигналу PZT. В результаті, вихід компаратора міг точно відобразити початкову подію перетину, незалежно від того, чи переміщувався сигнал PZT вище чи нижче опорного рівня на початку.

Усі дані, отримані після зіткнення, були передані бездротовим способом на центральний пристрій у бездротовій мережі кожною MSS. Центральний пристрій надсилав усі зібрані пакети даних на базову станцію, в цьому випадку на ПК, через послідовний зв'язок. Ці пакети даних оброблялися на основі їх типів за допомогою графічного інтерфейсу, що працює на базовій станції.

Друга експериментальна установка

Багатосенсорна система SHM була налаштована та запрограмована відповідно до вимог застосування, що забезпечувало гнучкість. У другому експерименті використовувалися лише датчики тензодатчика та акселерометра, а вимірювання деформації та прискорення безперервно записувалися в конструкції одночасно. Алюмінієвий зразок був використаний, як показано на рисунку 2.14, для великої деформації та спостереження за ширшим діапазоном значень деформації, оскільки композитні панелі набагато жорсткіші. Тому алюмінієвий зразок був більш придатним для оцінки роботи модулів тензодатчика та акселерометра в MSS.

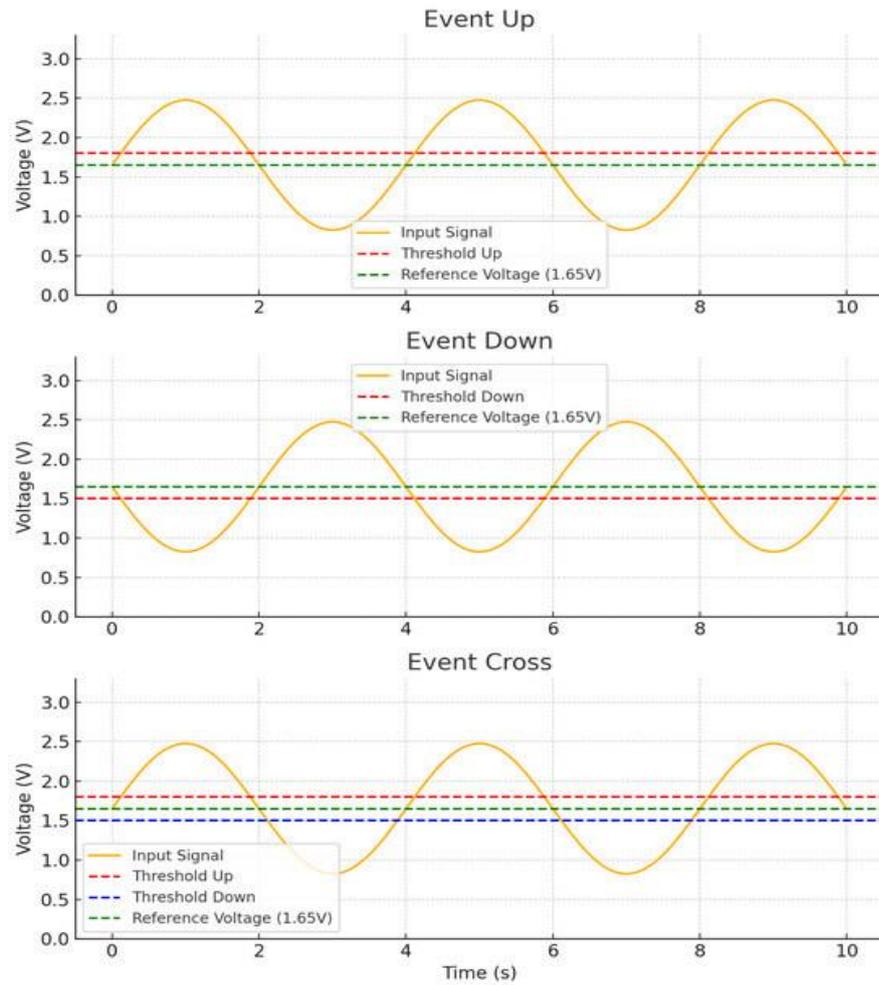


Рисунок 2.13 – Події компаратора з пороговим аспектом

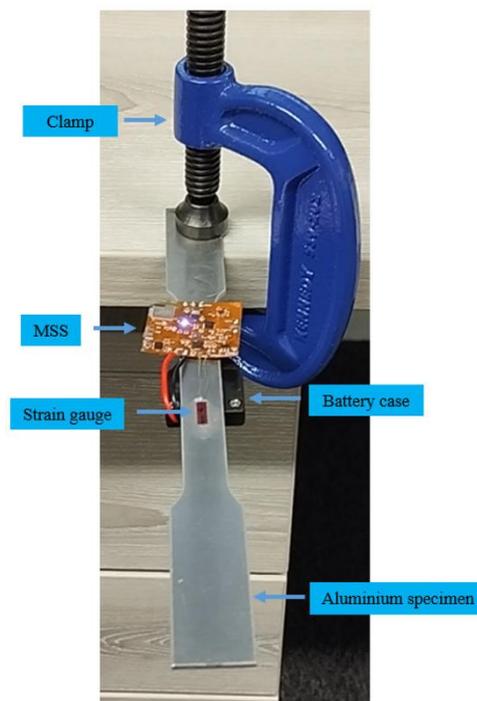


Рисунок 2.14 – Експериментальна установка для вимірювання деформації з алюмінієвим зразком

У цьому експерименті тензодатчик було розміщено посередині алюмінієвого зразка. Одна сторона зразка була затиснута на столі, а до іншої сторони прикладалася сила вгору та вниз, щоб спостерігати зміни деформації. Акселерометр також був інтегрований на гнучкій друкованій платі та готовий до запису.

Перед початком експерименту необхідно було врахувати одну проблему. Зміщення вимірювань тензодатчиків є поширеною проблемою, яка вимагає калібрування для забезпечення точних і надійних даних. Це зміщення може бути викликане різними факторами, включаючи початкові дисбаланси в мосту Уїтстона через допуски резисторів або невідповідності в з'єднанні тензодатчиків з конструкцією. Зміни температури також можуть впливати на опір тензодатчиків і компонентів мосту, що призводить до зміщення за відсутності будь-якої прикладеної сили. Крім того, схема формування сигналу, зокрема підсилювачі, може створювати власні напруги зміщення. Залишкові напруження в конструкції або коливання живлення мосту Уїтстона можуть додатково сприяти відхиленням у базовому вимірюванні. Шум навколишнього середовища, такий як електромагнітні перешкоди, також може впливати на спостережуване зміщення.

Щоб вирішити ці проблеми, процедура калібрування в системі включала визначення зміщення, коли конструкція перебувала в стаціонарному стані без будь-якої прикладеної сили. Під час цього етапу було зібрано та усереднено 1000 початкових зразків. Розраховане середнє значення було використано для представлення зміщення. Це зміщення потім було віднято від наступних вимірювань для корекції будь-якої базової помилки. Такий підхід забезпечив точне калібрування виходів тензодатчиків, покращуючи загальну точність вимірювань.

Графічний інтерфейс було модифіковано для цього експерименту з новими функціями для калібрування системи та відображення потоків даних у режимі реального часу, що надходять із послідовного порту. Графічний інтерфейс забезпечував безперервну візуалізацію даних, дозволяючи користувачам контролювати стан системи в режимі реального часу.

2.7 Висновки до розділу

У цьому розділі представлено мініатюрну багатосенсорну систему на базі бездротової сенсорної мережі (WSN), призначену для бортового моніторингу герметичності (SHM) аерокосмічних конструкцій. Основною

метою було створення сенсорної платформи, яка включає різні типи датчиків, має низьке енергоспоживання та бездротове підключення. Розроблена система має компактну та гнучку друковану плату розміром 3 см × 3 см та вагою приблизно 0,5 г. Вона інтегрує PZT, тензодатчик, акселерометр та датчики навколишнього середовища для комплексного моніторингу конструкцій. Така схема дозволяє системі збирати як механічні, так і екологічні дані, що впливають на цілісність конструкції. Конструкція апаратного забезпечення забезпечує мінімальну вагу та компактні розміри, таким чином задовольняючи вимоги аерокосмічної галузі, де додаткова маса або розмір можуть погіршити продуктивність або обмежити кількість можливих сенсорних вузлів.

Використання одного радіочастотного мікроконтролера з Bluetooth LE дозволяє створити малопотужну, просторово розподілену сенсорну мережу, що зменшує потребу в проводці та спрощує розміщення датчиків. Завдяки зіркоподібній топології кілька сенсорних модулів зв'язуються з центральним вузлом, який потім передає дані на базову станцію для запису та аналізу.

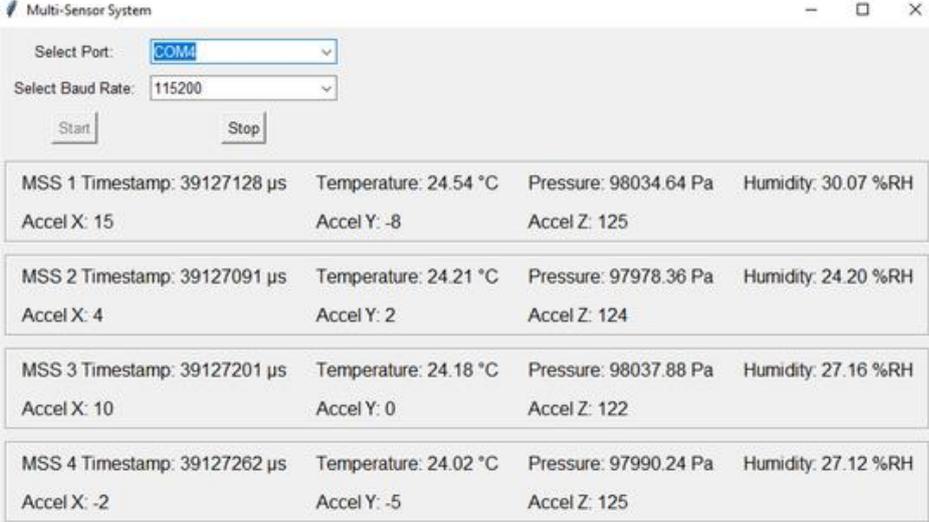
Ключовим елементом запропонованої конфігурації є налаштований графічний інтерфейс, розроблений для обробки та візуалізації даних. Цей інтерфейс спрощує взаємодію з системою, підвищуючи зручність використання та забезпечуючи ефективний аналіз даних. Крім того, різні конфігурації графічного інтерфейсу були налаштовані для проведення різних експериментів, що забезпечує універсальність у зборі даних та обробці даних.

3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ПРОДУКТИВНІСТЬ СИСТЕМИ MSS

3.1 Експериментальні дослідження багатосенсорної система SHM

Запропонована багатосенсорна система SHM розроблена для універсального розгортання. Наприклад, вона підтримує як DAQ, керований подіями, де композитні панелі піддаються впливу для отримання мультимодальних даних датчиків, так і безперервний моніторинг деформації та прискорення в режимі реального часу. Її точна синхронізація часу додатково забезпечує точну кореляцію виходів датчиків. Верифікація та валідація системи були проведені для різних сценаріїв.

У першому експерименті удари, що перевищували заздалегідь визначені порогові значення, здійснювалися за допомогою молотка по композитній панелі, як показано на рисунку 3.1. Після цього кожен MSS бездротовим способом передавав часову позначку, сигнал PZT, дані акселерометра та датчика навколишнього середовища на центральний пристрій. Графічний інтерфейс обробляв усі пакети, що надходили від центрального пристрою, і кожен модуль був позначений (наприклад, «MSS 1», «MSS 2» тощо). Відображалися одночасні виходи кількох сенсорних модулів, такі як часова позначка в мікросекундах та набір вимірювань температури (°C), тиску (Па), вологості (% відносної вологості) та прискорення по осях X, Y та Z (12-бітний цифровий формат), як показано на рисунку 3.1.



The screenshot shows a software window titled "Multi-Sensor System". At the top, there are two dropdown menus: "Select Port:" set to "COM1" and "Select Baud Rate:" set to "115200". Below these are "Start" and "Stop" buttons. The main area displays a table of sensor data for four MSS units. Each row contains a timestamp, temperature, pressure, humidity, and three acceleration values (X, Y, Z).

MSS 1 Timestamp: 39127128 μ s	Temperature: 24.54 °C	Pressure: 98034.64 Pa	Humidity: 30.07 %RH	Accel X: 15	Accel Y: -8	Accel Z: 125
MSS 2 Timestamp: 39127091 μ s	Temperature: 24.21 °C	Pressure: 97978.36 Pa	Humidity: 24.20 %RH	Accel X: 4	Accel Y: 2	Accel Z: 124
MSS 3 Timestamp: 39127201 μ s	Temperature: 24.18 °C	Pressure: 98037.88 Pa	Humidity: 27.16 %RH	Accel X: 10	Accel Y: 0	Accel Z: 122
MSS 4 Timestamp: 39127262 μ s	Temperature: 24.02 °C	Pressure: 97990.24 Pa	Humidity: 27.12 %RH	Accel X: -2	Accel Y: -5	Accel Z: 125

Рисунок 3.1 – Мітки часу та дані датчиків з чотирьох MSS у бездротовій мережі

Крім того, сигнали PZT, що генеруються внаслідок удару, були нанесені на графік та відображені в окремому вікні, як показано на рисунку 3.2. Ці сигнали PZT були нанесені на графік після набору апаратної обробки сигналу, такої як фільтрація, ослаблення та зсув. Таким чином, діапазон напруги сигналу становив від 0 до 3,3 В та коливався близько 1,65 В, як налаштовано в схемі. Для вікна збору даних 10 мс у кожному MSS було взято 1000 вибірок завдяки частоті дискретизації 100 кГц в АЦП.

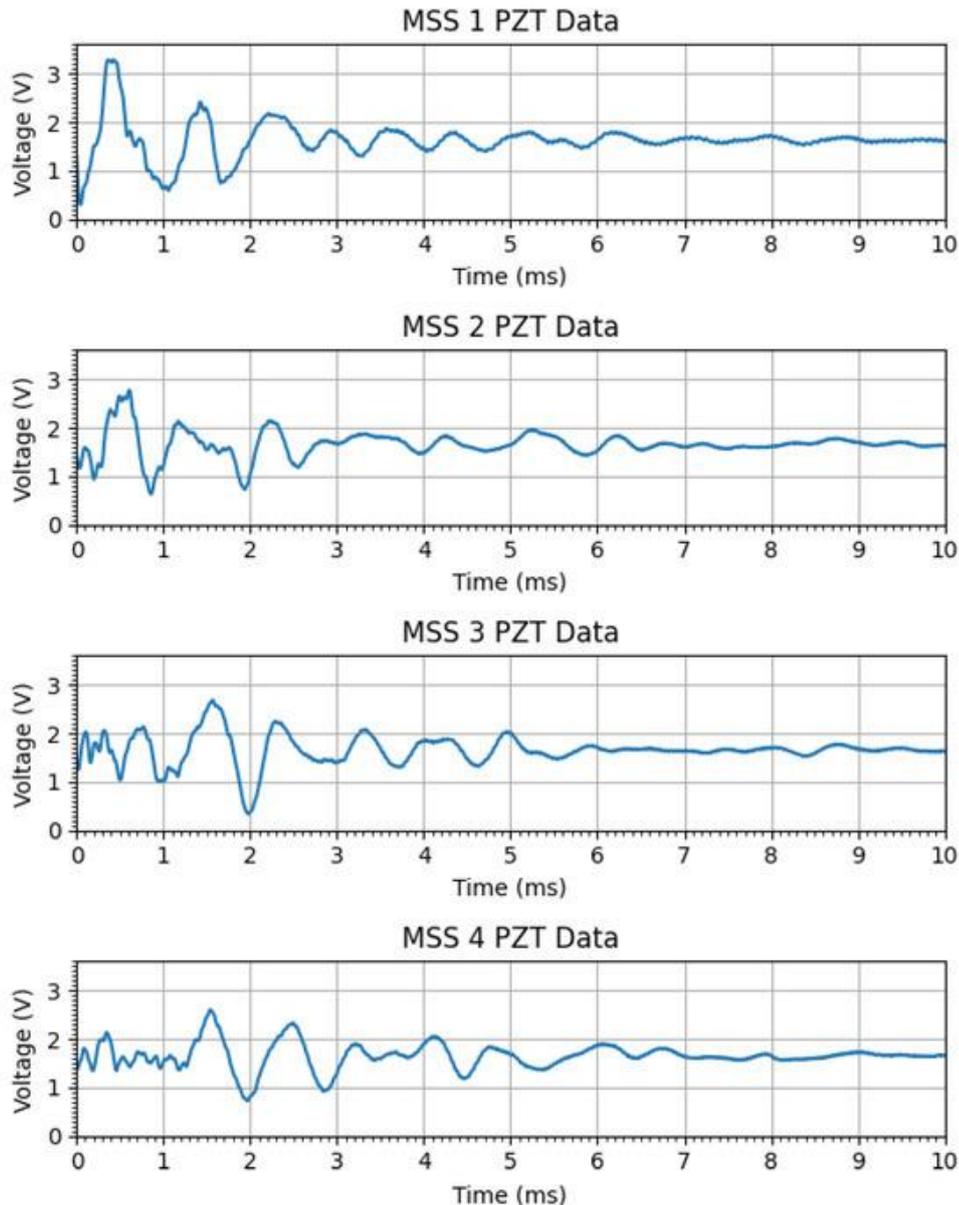


Рисунок 3.2 – Сигнали PZT від чотирьох MSS у бездротовій мережі DAQ для безперервного вимірювання деформації та прискорення в режимі реального часу

У другому експерименті відображалися та записувалися лише вимірювання деформації та прискорення алюмінієвого зразка в режимі

реального часу. Приклад потоку даних вимірювання деформації в режимі реального часу показано на рисунку 3.3.

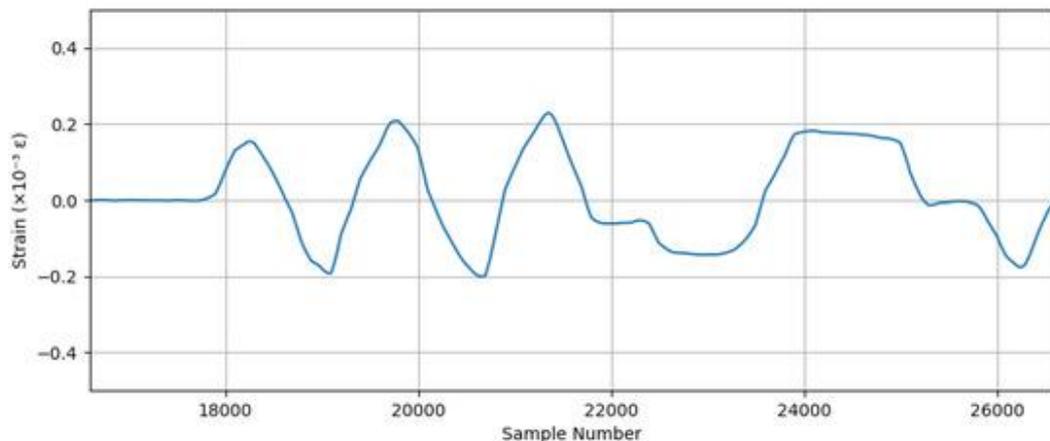


Рисунок 3.3 – Відображення даних про деформацію в режимі реального часу

Коли до зразка прикладається сила, результуюча деформація залежить від напрямку сили відносно конструкції. Деформація – це безрозмірна міра деформації, що відображає відносну зміну довжини матеріалу під дією напруги. Її можна розділити на деформацію розтягу (позитивна деформація) та деформацію стиску (негативна деформація).

Крім того, вимірювання датчика акселерометра також показано на рисунку 3.4 окремо для трьох осей. Результати виражені в метрах на квадратну секунду (m/s^2).

Окрім можливостей застосування, продуктивність запропонованої системи оцінювалася шляхом порівняння результатів вимірювань з результатами, отриманими за допомогою комерційно доступних приладів. Зокрема, отримання сигналу PZT оцінювалося шляхом порівняння його з даними, записаними за допомогою цифрового осцилографа, налаштованого з відповідною роздільною здатністю та частотою дискретизації. Аналогічно, вимірювання деформації та прискорення в реальному часі були перевірені за допомогою приладів еталонного класу. Спостережувана висока відповідність між виходом системи та даними комерційних приладів демонструє її надійність у точному захопленні та передачі даних датчиків.

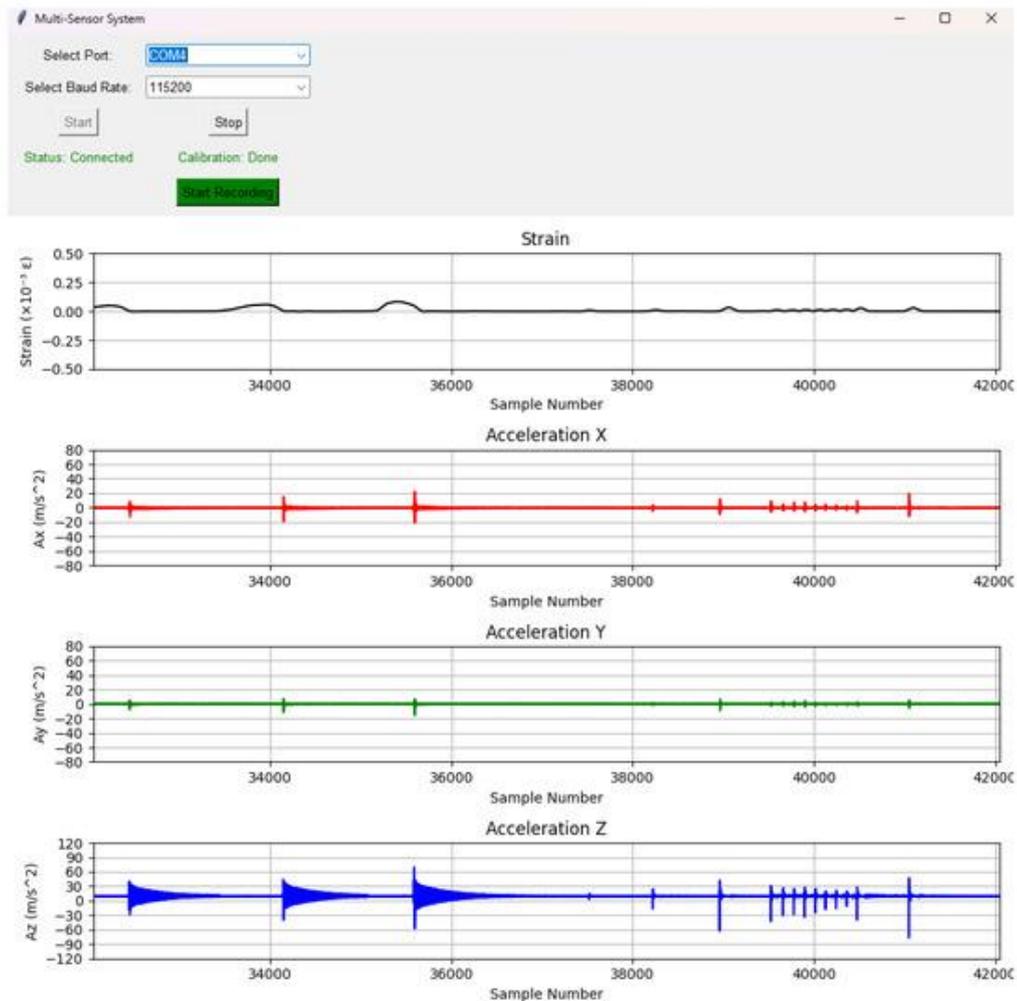


Рисунок 3.4 – Відображення даних прискорення в режимі реального часу для трьох осей

Продуктивність збору сигналів PZT

Точність запропонованої системи під час збору сигналів PZT була підтверджена шляхом порівняльної оцінки з комерційним цифровим осцилографом (TiePie Handyscope HS5). Для забезпечення узгодженості на обох платформах параметри осцилографа були налаштовані відповідно до специфікацій MSS, зокрема, працюючи з 12-бітною роздільною здатністю та частотою дискретизації 100 кГц.

Крім того, пороги спрацьовування осцилографа були відкалібровані відповідно до параметрів детектування MSS. Враховуючи, що схема формування сигналу MSS вводить коефіцієнт ослаблення 2 та зміщення 1,65 В, пороги осцилографа були встановлені на рівні -0,3 В та 0,3 В. Ці значення відповідають рівням детектування MSS 1,5 В та 1,8 В, що забезпечує узгоджену основу для порівняння між двома системами.

Для отримання сигналу датчик PZT був підключений паралельно до MSS та осцилографа, що дозволяло одночасно записувати ту саму подію

удару за однакових умов. Збудження вводилося ударом молотка, і обидві системи одночасно записували результуючу форму хвилі.

Дані осцилографа реєструвалися за допомогою його програмного інтерфейсу, специфічного для виробника, тоді як дані MSS передавались бездротовим способом до центрального блоку та фіксувалися за допомогою спеціально розробленого графічного інтерфейсу. Форма сигналу, отримана за допомогою осцилографа, представлена на рисунку 3.5, а відповідний сигнал MSS показано на рисунку 3.6, що дозволяє здійснювати пряме візуальне порівняння.

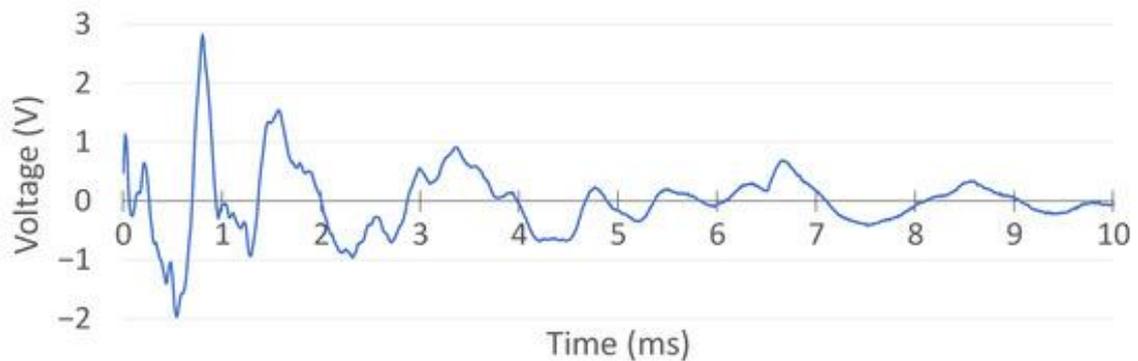


Рисунок 3.5 – Вимірювання сигналу PZT за допомогою цифрового осцилографа

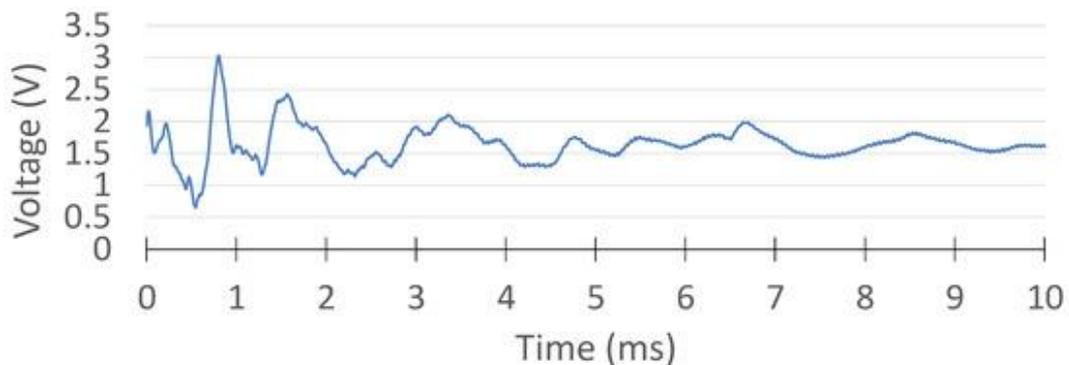


Рисунок 3.6 – Результат MSS PZT

Перед порівнянням вихідний сигнал MSS був пост-оброблений для видалення зміщення 1,65 В та масштабований для компенсації ослаблення в 2 рази. Отримані вирівняні сигнали відображені на рисунку 3.7. Накладені сигнали демонструють чудову відповідність як за амплітудною, так і за часовою характеристикою, що підтверджує, що система MSS здатна отримувати та передавати сигнали PZT з точністю, еквівалентною комерційному осцилографу.

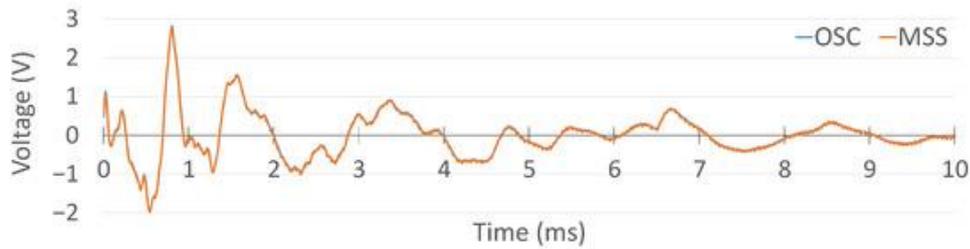


Рисунок 3.7 – Порівняння результатів осцилографа та MSS

Характеристики збору даних про безперервну деформацію та прискорення.

Можливості запропонованої MSS для вимірювання деформації та прискорення в режимі реального часу були оцінені порівняно з комерційною системою збору даних (апаратне забезпечення Genesis HighSpeed DAQ та програмне забезпечення Perception від HBK, раніше НВМ). Метою цієї оцінки була оцінка здатності системи безперервно контролювати та записувати реакції на деформацію та прискорення в конструкції під механічними навантаженнями. На відміну від виявлення удару, ініційованого подією, цей експеримент був зосереджений на безперервному отриманні даних тензодатчиків та акселерометрів, що дозволяло спостерігати за деформаціями конструкції та динамічними реакціями в режимі реального часу.

Для перевірки працездатності системи MSS було інтегровано з алюмінієвим зразком для вимірювання деформації та прискорення. Алюміній було обрано через його відносно меншу жорсткість порівняно з композитними матеріалами, що дозволяє більші деформації та ширший діапазон деформацій. Зразок було затиснуто з одного боку, як показано на рисунку 3.8, а до іншого кінця було прикладено зовнішню силу для викликання змін деформації та прискорення.

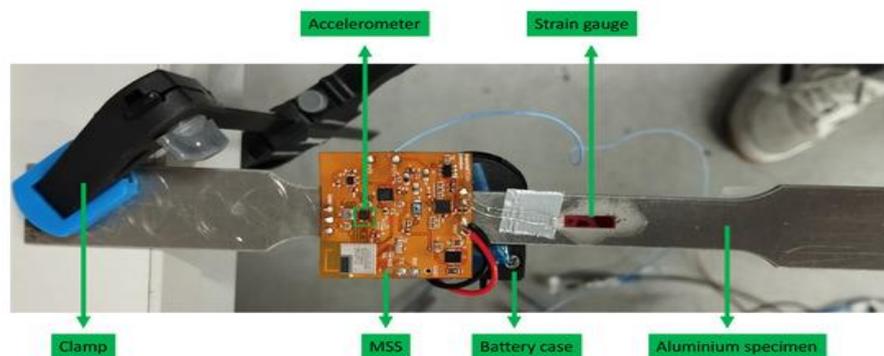


Рисунок 3.8 – Експериментальна установка для порівняння вимірювань прискорення та тензодатчиків між запропонованою MSS та системою збору даних; на рисунку показано вигляд зверху

Як показано на рисунку 3.8, тензOMETричний датчик був прикріплений до зразка та підключений до MSS. Крім того, MSS був оснащений вбудованим акселерометром (BMA400 від Bosch Sensortec), як було представлено раніше. Для порівняння результатів, інший тензOMETричний датчик та акселерометр (модель 352A24 від PCB Piezotronics) були прикріплені до нижньої частини, як показано на рисунку 3.9, та підключені до комерційної системи збору даних.

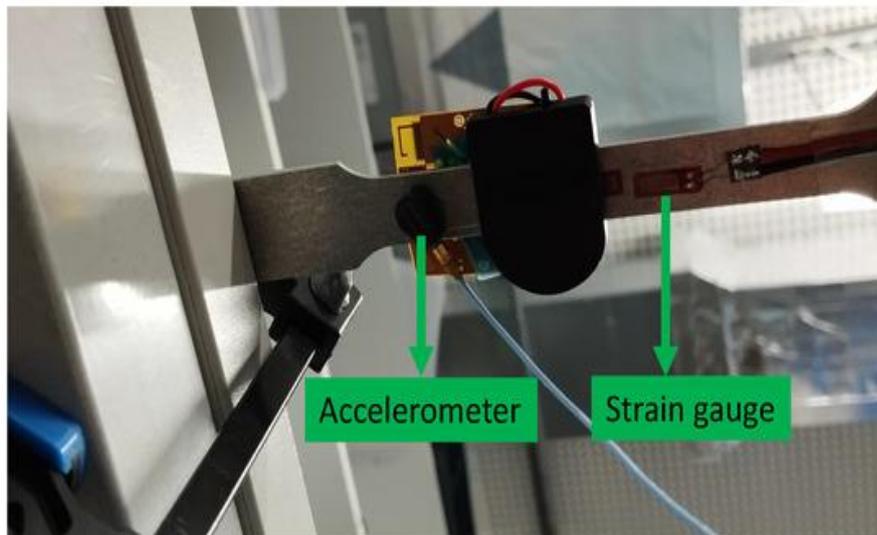


Рисунок 3.9 – Експериментальна установка для порівняння вимірювань прискорення та тензодатчиків між запропонованою MSS та системою збору даних; на рисунках показано вигляд знизу

Згодом до зразка прикладали зовнішні змінні сили, а вимірювання записували з тензодатчика та акселерометра, використовуючи одночасно як MSS, так і комерційну систему збору даних.

У наступних розділах представлено експериментальні результати, обговорюючи точність та надійність вимірювань деформації та прискорення, отриманих за допомогою MSS.

3.2 Порівняння вимірювань тензодатчиків

Для вимірювань тензодатчиками частоту дискретизації було встановлено на рівні 1 кГц як для MSS, так і для комерційної системи збору даних. Результат комерційної системи збору даних представлено на рисунку 3.10.

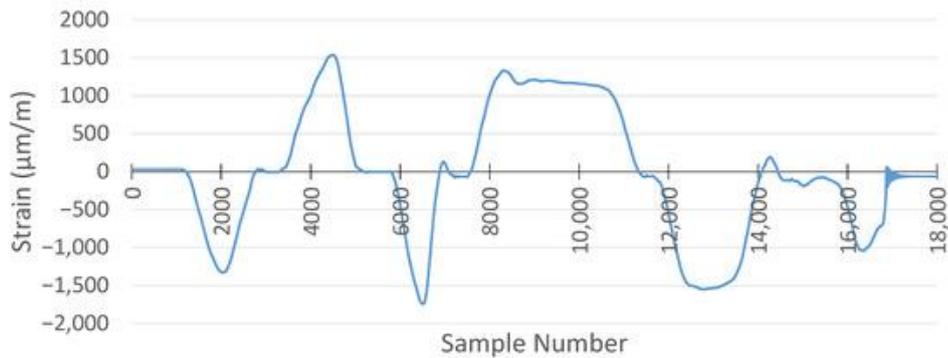


Рисунок 3.10 – Вимірювання тензодатчиком за допомогою системи збору даних НВК

Для тих самих прикладених сил вимірювання деформації за допомогою MSS наведено на рисунку 3.11. Через розташування тензодатчиків, один з них був прикріплений на верхній стороні, а інший - на нижній стороні зразка, і вимірювання деформації, отримане за допомогою MSS, було оберненим відносно тих, що були записані комерційним DAQ, як і очікувалося. Це пояснюється тим, що один тензодатчик вимірював деформацію розтягу, а інший - деформацію стиску під тим самим навантаженням, і навпаки. Тому, коли вимірювання деформації MSS було проведено у зворотному напрямку, картина та пікові значення вимірювання були майже такими ж, як і для комерційного DAQ.

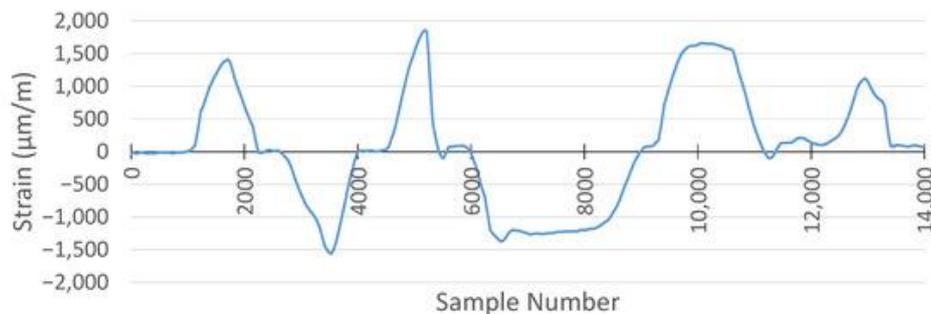


Рисунок 3.11 – Вимірювання тензодатчиком за допомогою запропонованої системи MSS

Під час порівняння результатів MSS та комерційної системи збору даних (DAQ) ще одним критичним моментом було те, що кількість взятих зразків була різною для одного й того ж періоду вимірювання, хоча обидві системи мали однакову частоту дискретизації 1 кГц. У той час як комерційна система DAQ записала 18 000 зразків, MSS отримала 14 000 зразків у проведеному експерименті.

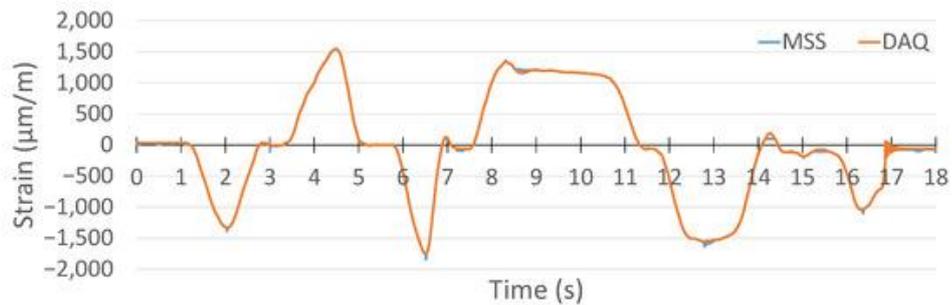


Рисунок 3.12 – Порівняння вимірювань тензодатчиками між запропонованою системою збору даних MSS та HBK

Причина полягає в тому, що MSS записує значення деформації, доки її попередньо визначений буфер не заповниться, а потім дані передаються бездротовим способом для обробки. У цей період бездротової передачі даних існує дуже коротка затримка в обробці значень деформації. Тому MSS мала меншу кількість вибірок за той самий період вимірювання, ніж комерційна система збору даних. Однак, як видно з вимірювань на рисунках 3.10 та 3.11, загальні картини деформації та пікові значення майже ідентичні. Ці короткі затримки, спричинені передачею кожного пакета даних бездротовим способом, призвели до зменшення частоти дискретизації для MSS.

Для порівняння результатів вимірювання, отримане за допомогою MSS, було обернено та розтягнуто в тій самій часовій області, що й у комерційній системі збору даних. Порівняння показано на рисунку 3.12. Два сигнали демонструють близькі форми хвиль з подібними амплітудами та піковими значеннями деформації.

3.3 Порівняння вимірювань прискорення

Для порівняння результатів прискорення між MSS та комерційними системами збору даних (DAQ) до зразків застосовувалися зовнішні сили, щоб спостерігати за їх закономірностями спаду. Порівняння було досягнуто по осі Z, оскільки модель 352A24 від PCB Piezotronics вимірює лише прискорення по осі Z, тоді як вбудований акселерометр у MSS може вимірювати прискорення по трьох осях (X, Y та Z).

Крім того, частота дискретизації комерційної системи збору даних для вимірювання прискорення становила 1 кГц, тоді як швидкість виведення даних бортового акселерометра була встановлена на рівні 800 Гц, що є допустимою максимальною частотою.

Вимірювання прискорення, зібрані з комерційної системи збору даних, показано на рисунку 3.13.

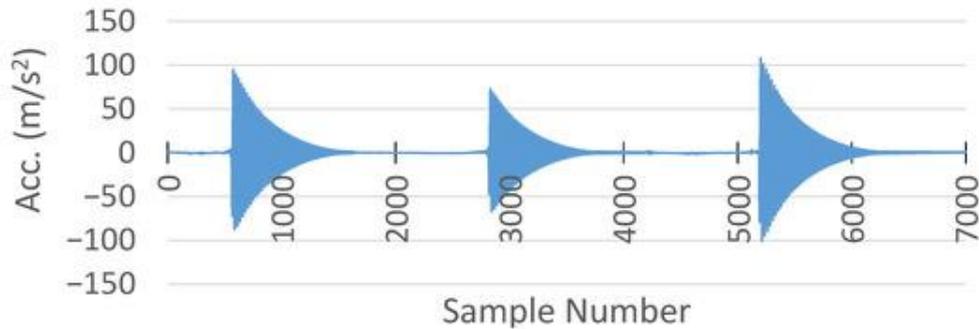


Рисунок 3.13 – Вимірювання прискорення за допомогою системи збору даних НВК

Тим часом, прискорення, зафіксоване MSS вздовж осі Z, зображено на рисунку 3.14. Подібно до порівняння вимірювань деформації, MSS мала меншу кількість вибірок, ніж комерційна система збору даних. Першою причиною була коротка затримка, спричинена бездротовим зв'язком, як обговорювалося раніше при порівнянні вимірювань деформації. По-друге, швидкість виведення даних вбудованого акселерометра в MSS вже була нижчою, ніж у комерційної системи збору даних.

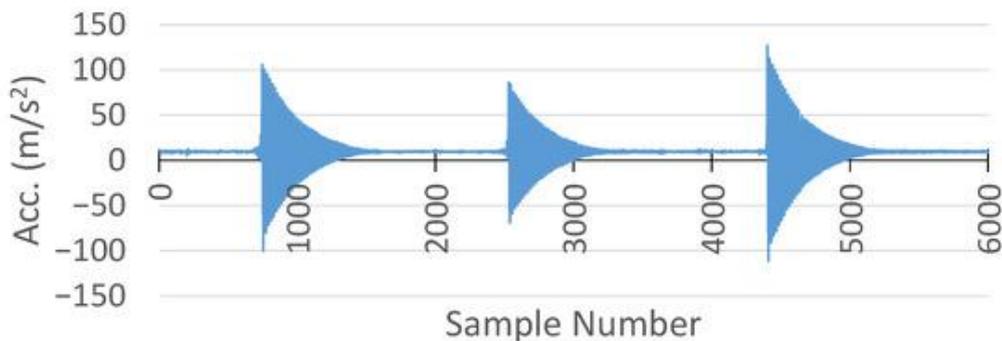


Рисунок 3.14 – Вимірювання прискорення за допомогою запропонованої системи MSS

Ще одним критичним моментом є те, що у вимірюванні прискорення за допомогою MSS було зміщення, як показано на рисунку 3.14. Це зміщення становило $+1\text{ g}$ на осі Z, оскільки датчик відчував гравітаційне прискорення Землі.

Тому, для порівняння результатів, зміщення у вимірюванні прискорення MSS було видалено та розтягнуто в тій самій часовій області з комерційною системою збору даних. Їхнє порівняння в тій самій часовій

області показано на рисунку 3.15. Крім того, на рисунку 3.16 також наведено детальне порівняння.

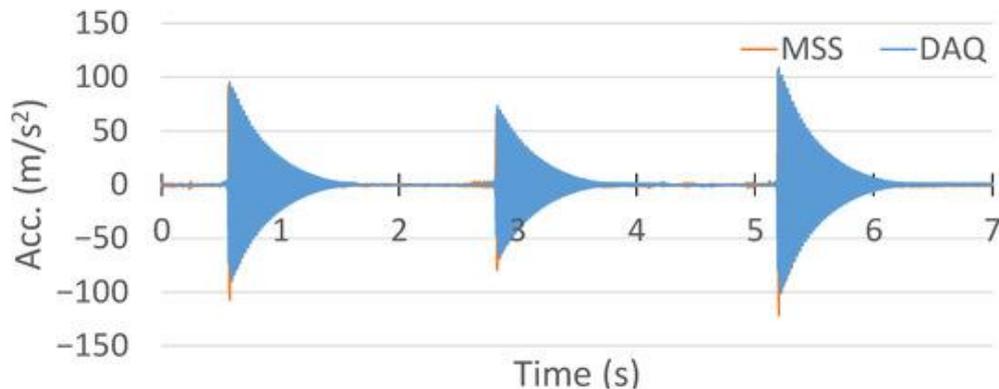


Рисунок 3.15 – Порівняння вимірювання прискорення між запропонованою системою збору даних MSS та НБК

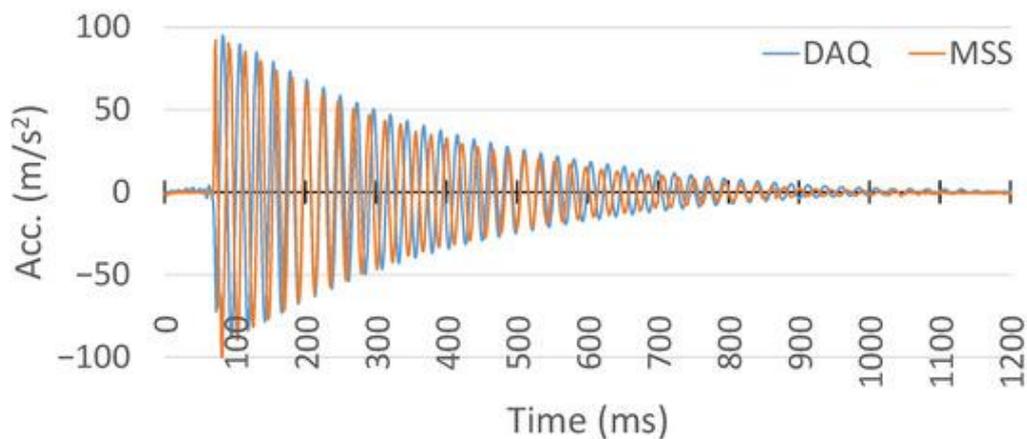


Рисунок 3.16 – Порівняння вимірювання прискорення між запропонованою системою збору даних MSS та НБК

Хоча MSS демонстрував вищі амплітуди початкових піків у негативному напрямку, сигнали як MSS, так і комерційних DAQ мали подібний коливальний профіль та картину затухання, що підтверджує вихідний сигнал прискорення MSS. Цю різницю в амплітудах піків можна пояснити варіаціями в місцях кріплення акселерометра та властивостях підкладки, що може впливати на характеристику сигналу.

Підсумовуючи, запропонована MSS продемонструвала надійну та точну роботу в отриманні вимірювань як деформації, так і прискорення порівняно з комерційною системою збору даних. Спостерігалися незначні коливання частоти дискретизації через короткі затримки бездротової передачі. MSS послідовно відтворювала основні форми хвиль, закономірності затухання та пікові значення, виміряні комерційною системою збору даних. Загалом, MSS демонструє надійний DAQ у

реальному часі та служить придатним та економічно ефективним варіантом для безперервного SHM.

3.4 Вимірювання струму

Досягнення високої енергоефективності має вирішальне значення для продовження терміну служби запропонованої сенсорної системи. Для кількісної оцінки енергоспоживання MSS за різних сценаріїв використання споживання струму вимірювалося за допомогою цифрового мультиметра Keysight 34465A у трьох різних режимах роботи, що відображають типову поведінку вузла, як детально описано нижче:

1. **Режим сну:** Вузол датчика постійно перебуває в стані низького енергоспоживання, модулі бездротового зв'язку неактивні, а функції датчиків призупинені. Цей режим відображає базове споживання енергії протягом періодів простою без зовнішніх подій.
2. **Синхронізація часу:** Під час ініціалізації мережі або періодичної ресинхронізації MSS вмикає бездротовий зв'язок для узгодження зі спільним годинником. Процеси зв'язку та синхронізації призводять до помірного споживання енергії порівняно з режимом сну.
3. **Активний режим:** Коли виявляється зовнішній вплив, вузол датчика переходить у повністю активний режим, отримуючи інформацію про часові позначки, вибірку всіх даних датчика та передаючи їх бездротовим способом. Хоча цей режим споживає найбільший струм, він підтримується лише короткочасно — близько кількох мілісекунд.

У таблиці 3.1 представлено виміряне споживання струму для кожного з цих робочих станів, що дає уявлення про профіль потужності MSS та підкреслює її придатність для сценаріїв розгортання з низьким енергоспоживанням та тривалою перспективою.

Таблиця 3.1 - Характеристики споживання струму в різних робочих станах

Operational Mode	Current Consumption
Sleep Mode	55 μ A
Time Synchronization	1.3 mA
Active Mode	7.5 mA

3.5 Оцінка дальності бездротового зв'язку

Надійна передача даних у бездротовій сенсорній мережі вимагає достатньої дальності зв'язку між периферійними вузлами та центральним

вузлом. Ефективна дальність залежить від кількох параметрів, включаючи обрану схему модуляції (наприклад, стандартна 1М РНУ або кодована РНУ великого радіусу дії), потужність передачі та характеристики поширення в навколишньому середовищі. Такі фактори, як ослаблення сигналу, відбиття та поглинання, особливо поширені в умовах обмеженого простору або в приміщенні, можуть значно погіршити силу сигналу. Крім того, характеристики та орієнтація антени відіграють вирішальну роль у визначенні досяжної дальності.

Беручи до уваги ці параметри, комунікаційні характеристики запропонованої системи були оцінені експериментально. Усі випробування дальності проводилися у відкритому просторі з прямими лініями видимості між вузлами, щоб мінімізувати перешкоди від багатопробеневого поширення або структурних перешкод.

Для визначення максимальної відстані зв'язку спочатку було встановлено стабільне бездротове з'єднання між центральним та периферійними вузлами. Потім вузли поступово розсувалися, водночас постійно контролюючи стан з'єднання. Тестування завершувалося, коли з'єднання не вдавалося відновити, про що свідчив вбудований світлодіод на вузлі MSS.

Цю оцінку дальності було проведено за різних конфігурацій, включаючи два рівні потужності передачі (0 дБмВт та +8 дБмВт) та три схеми модуляції РНУ: кодова РНУ, 1М РНУ та 2М РНУ. Нижча потужність передачі слугувала базовою точкою для оцінки чутливості приймача, тоді як підвищений рівень потужності допоміг кількісно визначити розширення дальності, досягне за умов вищої вихідної потужності. Порівняння між схемами РНУ надало додаткову інформацію про компроміси між швидкістю передачі даних та дальністю зв'язку.

У таблиці 3.2 представлено виміряні дальності зв'язку для кожної комбінації потужності передачі та схеми модуляції.

Таблиця 3.2 - Досягнута дальність зв'язку за різних рівнів потужності передавача та схем модуляції

TX Power	Coded PHY	1M PHY	2M PHY
0 dBm	60 m	28 m	15 m
+8 dBm	160 m	75 m	40 m

3.6 Висновки до розділу

У даному розділі представлені експериментальні дослідження багатосенсорної системи SHM розробленої для універсального розгортання. Експериментальні оцінки продемонстрували надійність розробленої платформи. Спочатку чотири MSS були розміщені в різних положеннях на композитній панелі для вимірювання даних про PZT, прискорення, температуру, тиск і вологість. Система оперативно реагувала на удари, а потім передавала всі отримані дані, отримані з датчиків, на центральний пристрій.

По-друге, MSS продемонстрував свою універсальність у вимірюванні деформації та прискорення в реальному часі, застосувавши його до тензодатчика, встановленого на алюмінієвому зразку. Процедури калібрування ефективно усунули зміщення від мосту Уїтстона, забезпечуючи точні вимірювання деформації. Порівняльні випробування з комерційною системою збору даних показали, що MSS фіксує структурні реакції з точно відповідними шаблонами сигналів та піковими значеннями. Незначні розбіжності в кількості зразків, спричинені затримками бездротової передачі, не мали суттєвого впливу на точність вимірювання. Ці результати підтверджують, що MSS здатний до надійного безперервного моніторингу.

Споживання струму оцінювалося шляхом вимірювання струму в різних режимах роботи, включаючи режим сну, синхронізації часу та активний режим. Результати підтверджують, що система добре підходить для тривалого застосування SHM з мінімальними вимогами до живлення. Крім того, було проведено тестування дальності для перевірки зв'язку Bluetooth LE системи за різних швидкостей передачі потужності (0 та +8 дБм) та схем модуляції (CODED, 1M та 2M PHY). Результати підтверджують, що MSS забезпечує надійне бездротове покриття, придатне для застосування в літаках та конструкціях.

Ці результати підтверджують, що запропонована багатосенсорна платформа вже вийшла за межі стадії концептуальної та лабораторної моделі та повністю прототипована на мініатюрній, гнучкій друкованій платі. Поточна версія системи пройшла функціональну перевірку за допомогою серії лабораторних експериментів, продемонструвавши її можливості збору даних від кількох датчиків у режимі реального часу, бездротового зв'язку та точної обробки сигналів. На наступному етапі розроблена MSS готова до випробувань у реальних застосуваннях, включаючи бортові SHM для літаків.

Мініатюрна гнучка друкована плата, описана в цій роботі, є особливо перспективною для впровадження «розумної шкіри». Завдяки гнучкій підкладці та компактній інтеграції датчиків, платформа розроблена для роботи зі складними або вигнутими поверхнями аероконструкцій. Ця функція підтримує розподілене зондування на великих площах, забезпечуючи детальні вимірювання вібрації, деформації та змінних навколишнього середовища.

Ще одним корисним розширенням є включення до платформи модулів збору енергії, таких як рішення на основі вібрації або сонячної енергії. Ці модулі можуть доповнювати або навіть замінювати звичайні батареї, що підвищує довговічність системи та зменшує потреби в обслуговуванні для масштабних розгортань датчиків. У поєднанні з гнучкою сенсорною платою такі підходи до збору енергії дозволяють створювати самопідтримуючі системи «розумної шкіри», здатні до безперервного SHM.

4 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

4.1 Технологічний аудит розробленого автогенераторного сенсора тиску для бездротових сенсорних мереж (далі – розробки)

Як відомо, з розвитком науки, бурхливо розвивається галузь інтелектуальних переносних пристроїв, які стають критично важливою галуззю досліджень, зумовлюючи потребу в удосконаленні сенсорних технологій, особливо в медичних застосуваннях. Однією із таких основних технологій є електрокардіографічний (ЕКГ) моніторинг.

Тому метою виконаної магістерської кваліфікаційної роботи стало покращення метрологічних характеристик та розроблення автогенераторного сенсора тиску для бездротових сенсорних мереж. Об'єктом дослідження стали фізико-математичні моделі та структури автогенераторного сенсора тиску, а предметом – статичні і динамічні характеристики автогенераторного сенсора тиску.

Для досягнення поставленої мети було розв'язано такі задачі: а) проведено аналіз основних тенденцій розвитку та принципів роботи механічних датчиків на основі гнучких провідних полімерних композитів; б) розроблено багатосенсорну систему на базі бездротової сенсорної мережі; в) проведено експериментальні дослідження багатосенсорної системи SHM; г) проведено оцінювання споживання струму в різних режимах роботи, включаючи режим сну, синхронізації часу та активний режим.

В результаті було розроблено багатосенсорну систему на базі бездротової сенсорної мережі (WSN), призначеної для бортового моніторингу герметичності (SHM) аерокосмічних конструкцій.

Для проведення технологічного аудиту розробленої багатосенсорної системи на базі бездротової сенсорної мережі та встановлення можливості її комерційного використання було запрошено 3-х дуже відомих і шанованих у ВНТУ експертів: д.т.н., професора Семенова А.О., д.т.н. професора Воловика А.Ю. та к.т.н., доцента Притулу М.О.

Проведення технологічного аудиту та встановлення комерційного потенціалу розробки було зроблено за критеріями, які наведено в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Рекомендовані критерії технологічного аудиту і оцінювання комерційного потенціалу будь-якої розробки та їх бальна оцінка

Критерії оцінювання та бали (за 5-ти бальною шкалою: 0-1-2-3-4)					
	0	1	2	3	4
Технічна здійсненність концепції:					
1	Достовірність концепції не підтверджена	Концепція підтверджена експертними висновками	Концепція підтверджена розрахунками	Концепція перевірена на практиці	Перевірено роботоздатність продукту в реальних умовах
Ринкові переваги (недоліки):					
2	Багато аналогів на малому ринку	Мало аналогів на малому ринку	Кілька аналогів на великому ринку	Один аналог на великому ринку	Продукт не має аналогів на великому ринку
3	Ціна продукту значно вища за ціни аналогів	Ціна продукту дещо вища за ціни аналогів	Ціна продукту приблизно дорівнює цінам аналогів	Ціна продукту дещо нижче за ціни аналогів	Ціна продукту значно нижче за ціни аналогів
4	Технічні та споживчі властивості продукту значно гірші, ніж в аналогів	Технічні та споживчі властивості продукту трохи гірші, ніж в аналогів	Технічні та споживчі властивості продукту на рівні аналогів	Технічні та споживчі властивості продукту трохи кращі, ніж в аналогів	Технічні та споживчі властивості продукту значно кращі, ніж в аналогів
Ринкові перспективи					
5	Експлуатаційні витрати значно вищі, ніж в аналогів	Експлуатаційні витрати дещо вищі, ніж в аналогів	Експлуатаційні витрати на рівні експлуатаційних витрат аналогів	Експлуатаційні витрати трохи нижчі, ніж в аналогів	Експлуатаційні витрати значно нижчі, ніж в аналогів
6	Ринок малий і не має позитивної динаміки	Ринок малий, але має позитивну динаміку	Середній ринок з позитивною динамікою	Великий стабільний ринок	Великий ринок з позитивною динамікою
7	Активна конкуренція великих компаній на ринку	Активна конкуренція	Помірна конкуренція	Незначна конкуренція	Конкуренція немає

Продовження таблиці 4.1 – Рекомендовані критерії технологічного аудиту і оцінювання комерційного потенціалу будь-якої розробки та їх бальна оцінка

	0	1	2	3	4
Практична здійсненність					
8	Відсутні фахівці як з технічної, так і з комерційної реалізації ідеї	Необхідно наймати фахівців або витратити значні кошти та час на навчання наявних фахівців	Необхідне незначне навчання фахівців та збільшення їх штату	Необхідне незначне навчання фахівців	Є фахівці з питань як з технічної, так і з комерційної реалізації ідеї
9	Потрібні значні фінансові ресурси, які відсутні. Джерела фінансування ідеї відсутні	Потрібні незначні фінансові ресурси. Джерела фінансування відсутні	Потрібні значні фінансові ресурси. Джерела фінансування є	Потрібні незначні фінансові ресурси. Джерела фінансування є	Не потребує додаткового фінансування
10	Необхідна розробка нових матеріалів	Потрібні матеріали, що використовуються у військово-промисловому комплексі	Потрібні дорогі матеріали	Потрібні досяжні та дешеві матеріали	Всі матеріали для реалізації ідеї відомі та давно використовуються у виробництві
11	Термін реалізації ідеї більший за 10 років	Термін реалізації ідеї більший за 5 років. Термін окупності інвестицій більше 10-ти років	Термін реалізації ідеї від 3-х до 5-ти років. Термін окупності інвестицій більше 5-ти років	Термін реалізації ідеї менше 3-х років. Термін окупності інвестицій від 3-х до 5-ти років	Термін реалізації ідеї менше 3-х років. Термін окупності інвестицій менше 3-х років

Продовження таблиці 4.1 – Рекомендовані критерії технологічного аудиту і оцінювання комерційного потенціалу будь-якої розробки та їх бальна оцінка

	0	1	2	3	4
12	Необхідна розробка регламентних документів та отримання великої кількості дозвільних документів на виробництво та реалізацію продукту	Необхідно отримання великої кількості дозвільних документів на виробництво та реалізацію продукту, що вимагає значних коштів та часу	Процедура отримання дозвільних документів для виробництва та реалізації продукту вимагає незначних коштів та часу	Необхідно тільки повідомлення відповідним органам про виробництво та реалізацію продукту	Відсутні будь-які регламентні обмеження на виробництво та реалізацію продукту

При проведенні технологічного аудиту запрошені експерти виставили бальні оцінки за 12-ю критеріями, які зведені в таблицю 4.2.

Таблиця 4.2 – Результати технологічного аудиту нашої розробки

Критерії	Прізвище, ініціали експерта		
	Семенов А.О.	Воловик А.Ю.	Притула М.О.
	Бали, виставлені експертами:		
1	4	3	4
2	3	4	3
3	4	4	4
4	4	3	4
5	4	3	3
6	3	4	3
7	3	4	3
8	3	4	3
9	4	3	4
10	4	4	3
11	4	4	4
12	4	4	3
Сума балів	СБ ₁ = 44	СБ ₂ = 45	СБ ₃ = 41

Середньоарифметична сума балів, що їх виставили експерти, становить:

Середньоарифметична сума балів $\overline{СБ}$	$\overline{СБ} = \frac{\sum_{i=1}^3 СБ_i}{3} = \frac{44+45+41}{3} = \frac{130}{3} = 43,33$
---	--

Керуючись рекомендаціями, наведеними в таблиці 4.3, визначимо технічний рівень та комерційний потенціал нашої розробки.

Таблиця 4.3 – Потенційні технічні рівні та комерційний потенціал розробки

Середньоарифметична сума балів $\overline{СБ}$, розрахована на основі висновків експертів	Технічний рівень та комерційний потенціал розробки
0 – 10	Низький
11 – 20	Нижче середнього
21 – 30	Середній
31 – 40	Вище середнього
41 – 48	Високий

Оскільки середньоарифметична сума балів, що їх виставили запрошені експерти, дорівнює 43,33 балів (із 48-ми балів), то можна зробити висновок, що розроблена багатосенсорна система на базі бездротової сенсорної мережі має *високий* технічний рівень і високу вірогідність її комерційного використання.

Це пояснюється тим, що створена сенсорна платформа включає різні типи датчиків, має низьке енергоспоживання та бездротове підключення. Вона інтегрує PZT, тензодатчик, акселерометр та датчики навколишнього середовища для комплексного моніторингу конструкцій. Така схема дозволяє системі збирати як механічні, так і екологічні дані, забезпечує мінімальну вагу та компактні розміри, задовольняючи вимоги аерокосмічної галузі, де додаткова маса або розмір можуть погіршити продуктивність або обмежити кількість можливих сенсорних вузлів. Завдяки зіркоподібній топології кілька сенсорних модулів зв'язуються з центральним вузлом, який потім передає дані на базову станцію для запису та аналізування.

Отже, розроблена нами багатосенсорна система на базі бездротової сенсорної мережі є технічно вдосконалою та економічно вигідною, придатною для комерційного використання на противагу альтернативним існуючим системам.

4.2 Розрахунок витрат на розроблення автогенераторного сенсора тиску для бездротових сенсорних мереж

При виконанні магістерської кваліфікаційної роботи були зроблені такі основні витрати [59]:

4.2.1 Основна заробітна плата Z_o розробників (дослідників), інших фахівців тощо, яку можна розрахувати за формулою (4.1):

$$Z_o = \frac{M}{T_p} \cdot t \text{ (грн.)}, \quad (4.1)$$

де M – місячний посадовий оклад конкретного розробника, грн. У 2025 році величини окладів розробників коливалися в межах (8000...50000) грн/місяць;

T_p – число робочих днів в місяці; прийmemo $T_p = 20$ днів;

t – число робочих днів роботи розробників, дослідників, фахівців тощо.

Зроблені розрахунки основної заробітної плати розробників, дослідників, фахівців тощо зведено в таблицю 4.4.

Таблиця 4.4 – Основна заробітна плата розробників (округлено)

Найменування посади виконавця	Місячний посадовий оклад, (грн.)	Оплата за робочий день, (грн.)	Число днів роботи	Витрати на оплату праці, (грн.)	Примітка
1. Науковий керівник магістерської кваліфікаційної роботи	45000	= 2250	20 годин	2250/6×20 = = 7500	При 6-ти годинному робочому дні дня керівника та консультанта з економічної частини
2. Здобувач-магістрант	8000	= 400	79 днів	= 31600	
3. Технічний консультант	42000	=2100	1,5 днів	= 3150	
4. Консультант з економічної частини	22000	= 1100	1,5 години	1100/6×1,5 = 274,99 ≈ ≈ 275 грн	
Всього				$Z_o = 42525$ (грн.)	

Примітка. За заробітну плату магістранта прийmemo мінімальну заробітну плату в країні

4.2.2 Додаткова заробітна плата Z_d розробників розраховується за формулою:

$$Z_d = (0,1...0,12) \cdot Z_o. \quad (4.2)$$

Для нашого випадку отримаємо:

$$Z_d = 0,118 \times 42525 = 5017,95 \approx 5018 \text{ (грн.)}$$

4.2.3 Нарахування на заробітну плату $НАР_{зп}$ розробників, дослідників, інших фахівців тощо розраховуються за формулою:

$$НАР_{зп} = (Z_o + Z_d) \cdot \frac{\beta}{100}, \quad (4.3)$$

де $\beta = 22\%$ – ставка єдиного внеску на загальнообов'язкове державне соціальне страхування. В Україні в 2025 році $\beta = 22\%$.

Для нашого випадку отримаємо:

$$НАР_{зп} = (42525 + 5018) \times 0,22 = 10459,46 \approx 10460 \text{ (грн.)}$$

4.2.4 Амортизація A основних засобів, обладнання, комп'ютерів тощо, які були використані під час виконання роботи, розраховується за формулою:

$$A = \frac{Ц \cdot H_a}{100} \cdot \frac{T}{12} \text{ (грн.)}, \quad (4.4)$$

де $Ц$ – загальна балансова вартість основних засобів, обладнання, комп'ютерів

тощо, які використовувалися під час виконання роботи, (грн.);

H_a – річна норма амортизаційних відрахувань, %; $H_a = (2,5...25)\%$;

T – термін, використання кожного виду основних засобів, місяці.

Зроблені нами розрахунки зведемо у таблицю 4.5.

Таблиця 4.5 – Розрахунок амортизаційних відрахувань (округлено)

Найменування основних засобів	Балансова вартість, (грн.)	Норма амортизації, %	Термін використання, місяці	Величина амортизаційних відрахувань, (грн.)
1. Основні засоби, обладнання, комп'ютери тощо	150000	23,0	3,4 (при 75% використанні)	7331,25 ≈ 7332
2. Приміщення кафедри, факультету, університету	125000	2,65	3,4 (при 75% використанні)	703,91 ≈ 704
3. Додаткові спеціалізовані лабораторії	100000	2,55	3,4 (при 10% використанні)	72,52 ≈ 73
Всього				A = 8109

4.2.5 Витрати на матеріали M розраховуються за формулою:

$$M = \sum_1^n H_i \cdot C_i \cdot K_i - \sum_1^n V_i \cdot C_v \quad (\text{грн.}), \quad (4.5)$$

де H_i – витрати матеріалу i -го найменування, кг; C_i – вартість матеріалу i -го найменування, грн/кг; K_i – коефіцієнт транспортних витрат, $K_i = (1,1 \dots 1,15)$; V_i – маса відходів матеріалу i -го найменування, кг; C_v – ціна відходів матеріалу i -го найменування, грн/кг; n – кількість видів матеріалів.

4.2.6 Витрати на комплектуючі K розраховуються за формулою:

$$K = \sum_1^n H_i \cdot C_i \cdot K_i \quad (\text{грн.}), \quad (4.6)$$

де H_i – кількість комплектуючих i -го виду, шт.; C_i – ціна комплектуючих i -го виду, грн; K_i – коефіцієнт транспортних витрат, $K_i = (1,1 \dots 1,15)$; n – кількість видів комплектуючих.

Загальна вартість основних матеріалів та комплектуючих, які були використані під час виконання цієї роботи, становить приблизно 3000 (грн.).

4.2.7 Витрати на силову електроенергію V_e , що була використана при виконанні цієї магістерської роботи, розраховуються за формулою:

$$V_e = \frac{V \cdot \Pi \cdot \Phi \cdot K_{\Pi}}{K_d}, \quad (4.7)$$

де V – вартість 1 кВт-год. електроенергії, в 2025 р. $V \approx 6,0$ грн/кВт;

Π – установлена потужність обладнання, кВт; $\Pi = 1,80$ кВт;

Φ – фактична кількість годин роботи обладнання, годин.

Прийmemo, що $\Phi = 240$ годин;

K_{Π} – коефіцієнт використання потужності; $K_{\Pi} < 1 = 0,69$.

K_d – коефіцієнт корисної дії, $K_d = 0,6$.

Тоді витрати на силову електроенергію складуть:

$$V_e = \frac{V \cdot \Pi \cdot \Phi \cdot K_{\Pi}}{K_d} = \frac{6,0 \cdot 1,8 \cdot 240 \cdot 0,69}{0,6} = 2980,80 \approx 2981 \text{ (грн.)}$$

4.2.8 Інші витрати $V_{ін}$ (опалення, освітлення, утримання приміщень тощо) розраховуються як (100...300)% від основної заробітної плати розробників, дослідників, інших фахівців тощо, тобто:

$$V_{ін} = K_{ін} \times Z_o = (1..3) \times Z_o. \quad (4.8)$$

Прийнявши $K_{ін} = 1,0$, отримаємо:

$$V_{ін} = 1,0 \times 42525 = 42525 \text{ грн.}$$

4.2.9 Сума всіх попередніх статей витрат дає витрати, що їх зробив безпосередньо магістрант при виконанні цієї магістерської роботи – V .

$$V = 42525 + 5018 + 10460 + 8109 + 3000 + 2981 + 42525 = 114618 \text{ (грн.)}$$

4.2.10 Загальні витрати на остаточне завершення магістерської роботи та оформлення її результатів розраховуються за формулою:

$$3V = \frac{V}{\beta}, \quad (4.9)$$

де β – коефіцієнт, який характеризує етап виконання цієї роботи на шляху до її можливого впровадження.

Для нашого випадку доцільно прийняти, що $\beta \approx 0,88$ [59].

Тоді: $ZB = \frac{114618}{0,88} = 130247,72$ грн або приблизно 131 тисяча (грн.).

Тобто загальні витрати на остаточне завершення нашої роботи та оформлення її результатів становлять приблизно 131 тисячу (грн.).

4.3 Розрахунок економічного ефекту від можливої комерціалізації нашої розробки

Аналіз місткості ринку показує, що потенційний попит на розроблену нами багатосенсорну систему на базі бездротової сенсорної мережі оцінюється в межах внутрішнього ринку України на рівні 20 тисяч одиниць.

Оскільки технічні та економічні показники нашої розробки є значно кращими, ніж у аналогів, то вона буде користуватися підвищеним попитом на ринку принаймні протягом 3-х років після впровадження. Тобто наша розробка може бути впроваджена з 1 січня 2026 року, а її результати будуть виявлятися протягом 2026-го, 2027-го та 2028-го років.

Прогноз зростання попиту на нашу розробку складає по роках:

1-й рік після впровадження (2026 р.) – приблизно на $+\Delta 1000$ шт.;

2-й рік після впровадження (2027 р.) – приблизно на $+\Delta 2000$ шт.;

3-й рік після впровадження (2028 р.) – приблизно на $+\Delta 3000$ шт.

Аналіз ринку також показав, що середня ціна аналогічної системи коштує приблизно 440 (грн.). У зв'язку з тим, що наша розробка має значно кращі технічні і експлуатаційні характеристики, ми можемо реалізувати її на ринку дещо дорожче, наприклад, за 520 (грн.), тобто на $(520-440) = 80$ (грн.) дорожче.

Тоді можливе збільшення чистого прибутку $\Delta\Pi_i$, що його може отримати потенційний інвестор від комерціалізації нашої розробки становитиме [59]:

$$\Delta\Pi_i = \sum_1^n (\Delta C_o \cdot N + C_o \cdot \Delta N)_i \cdot \lambda \cdot \rho \cdot \left(1 - \frac{\nu}{100}\right), \quad (4.10)$$

де ΔC_o – збільшення ціни нової розробки, тобто $\Delta C_o = 520 - 440 = +80$ (грн.);

N – обсяг діяльності (кількість замовників) у році до впровадження результатів розробки; $N \approx 20000$ шт.;

ΔN – покращення основного кількісного показника від впровадження результатів розробки по роках (2026, 2027 та 2028 роки) становитиме, відповідно: +1000, +2500 та +4000 шт.;

Π_0 – нова ціна реалізації розробки після впровадження отриманих результатів; для нашого випадку $\Pi_0 = 520$ (грн.);

n – кількість років, протягом яких очікується отримання позитивних результатів від впровадження розробки; $n = 3$ роки;

λ – коефіцієнт, який враховує сплату податку на додану вартість; $\lambda = 0,8333$;

ρ – коефіцієнт, який враховує рентабельність продукту. Рекомендується приймати $\rho = (0,2 \dots 0,5)$; візьмемо $\rho = 0,5$;

ν – ставка податку на прибуток. У 2025 році $\nu = 18\%$.

Тоді можлива величина зростання чистого прибутку $\Delta \Pi_1$ для потенційного інвестора протягом першого року від можливого впровадження нашої розробки (2026 р.) становитиме:

$$\Delta \Pi_1 = [80 \cdot 20 + 520 \cdot 1] \cdot 0,8333 \cdot 0,5 \cdot \left(1 - \frac{18}{100}\right) \approx 724,304 \approx 725 \text{ тисяч (грн.)}$$

Величина зростання чистого прибутку $\Delta \Pi_2$ для потенційного інвестора від можливого впровадження нашої розробки протягом другого (2027 р.) року становитиме:

$$\Delta \Pi_2 = [80 \cdot 20 + 520 \cdot 2,5] \cdot 0,8333 \cdot 0,5 \cdot \left(1 - \frac{18}{100}\right) \approx 990,79 \approx 991 \text{ тисяча (грн.)}$$

Величина зростання чистого прибутку $\Delta \Pi_3$ для потенційного інвестора від можливого впровадження нашої розробки протягом третього (2028 р.) року становитиме:

$$\Delta \Pi_3 = [80 \cdot 20 + 520 \cdot 4] \cdot 0,8333 \cdot 0,5 \cdot \left(1 - \frac{18}{100}\right) \approx 1257,28 \approx 1258 \text{ тисяч (грн.)}$$

Приведена вартість зростання всіх чистих прибутків ПП, що їх може отримати потенційний інвестор від можливої комерціалізації нашої розробки, буде:

$$\text{ПП} = \sum_{i=1}^t \frac{\Delta \Pi_i}{(1 + \tau)^t}, \quad (4.11)$$

де $\Delta \Pi_i$ – збільшення чистого прибутку у кожному із років, протягом яких виявляються результати виконаної та впровадженої роботи, (грн.);

t – період часу, протягом якого виявляються результати впровадженої роботи, роки. Для нашого випадку $t = 3$ роки;

τ – ставка дисконтування (або рівень інфляції). Керуючись даними статистики за 2025 рік, прийнемо ставку дисконтування $\tau = 0,115$ (11,5%);

t – період часу (в роках) від моменту початку розробки до моменту отримання можливих чистих прибутків (в кожному із років).

Тоді прогнозована приведена вартість зростання всіх чистих прибутків ПП, що їх може отримати потенційний інвестор від можливого впровадження нашої розробки, складе:

$$\begin{aligned} \text{ПП} &= \frac{725}{(1+0,115)^2} + \frac{991}{(1+0,115)^3} + \frac{1258}{(1+0,115)^4} \approx 583 + 715 + 814 = \\ &= 2112 \text{ тисяч (грн.)}. \end{aligned}$$

Теперішня вартість інвестицій PV (або можлива вартість придбання нашої розробки інвестором для її комерціалізації): $PV = K \times V_{\text{заг}} = (1,0\dots5,0) \times V_{\text{заг}}$,

де $V_{\text{заг}} = 131$ тисяча (грн.) (див. підрозділ 4.1).

Для нашого випадку прийнемо, що: $K = 2,5$. Тоді отримаємо:

$$PV = (1,0\dots5,0) \times 131 = 2,5 \times 131 = 327,5 \approx 328 \text{ тисяч (грн.)}.$$

Абсолютний економічний ефект для потенційного інвестора від можливої комерціалізації нашої розробки за три роки (2026, 2027, 2028) складе:

$$E_{\text{абс}} = \text{ПП} - PV = 2112 - 328 = 1784 \text{ тисяч (грн.)}.$$

Тоді внутрішня дохідність E_B вкладених інвестицій (коштів) становитиме:

$$E_B = \sqrt[T_{\text{ж}}]{1 + \frac{E_{\text{абс}}}{PV}} - 1, \quad (4.12)$$

де $E_{\text{абс}}$ – абсолютний ефект вкладених інвестицій; $E_{\text{абс}} = 1784$ тисяч (грн.);

PV –теперішня вартість початкових інвестицій $PV = 328$ тисячі (грн.);

$T_{\text{ж}}$ – життєвий цикл розробки, роки.

$T_{\text{ж}} = 4$ роки (2025-й, 2026-й, 2027-й, 2028-й роки).

Для нашого випадку отримаємо:

$$E_B = \sqrt[4]{1 + \frac{1784}{328}} - 1 = \sqrt[4]{1 + 5,4390} - 1 = \sqrt[4]{6,4390} - 1 = 1,593 - 1 = 0,593 \approx 59,3\%.$$

Мінімальна дохідність можливо вкладних інвестицій $\tau_{\text{мін}}$, яка є допустимою, визначається за формулою:

$$\tau_{\text{мін}} = d + f, \quad (4.13)$$

де d – середньозважена ставка за депозитними операціями в комерційних банках; в 2025 році в Україні $d = (0,10...0,18)$. Прийmemo, що $\tau = 15\%$.

f – показник, що характеризує ризикованість вкладень; $f = (0,05...0,30)$.

Прийmemo, що $f = 30\%$, тобто $f = 0,3$.

Тоді для нашого випадку отримаємо:

$$\tau_{\text{мін}} = 0,15 + 0,30 = 0,45 \text{ або } \tau_{\text{мін}} = 45\%.$$

Оскільки величина $E_B = 59,3\% > \tau_{\text{мін}} = 45\%$, то потенційний інвестор у принципі може бути зацікавлений комерціалізації нашої розробки.

Термін окупності коштів, вкладених потенційним інвестором у можливу комерціалізацію нашої розробки, становитиме:

$$T_{\text{ок}} = \frac{1}{E_B} = \frac{1}{0,593} \approx 1,686 \text{ років} < 3 \text{ років}, \quad (4.14)$$

що також свідчить про потенційну економічну доцільність комерціалізації розробленої нами багатосенсорної системи на базі бездротової сенсорної мережі.

Результати виконаної економічної частини магістерської кваліфікаційної роботи зведено у таблицю:

Показники	Задані у ІЗ	Досягнуті у магістерській роботі	Висновок
1. Витрати на розробку	Не більше 140 тисяч (грн.)	≈ 131 тисяч (грн.)	Досягнуто
2. Абсолютний ефект від впровадження розробки, тисяч грн	В межах 1800 тисяч (грн.) (за три роки)	1784 тисяч грн (при 11,5% інфляції)	Виконано
3. Внутрішня дохідність вкладених інвестицій (коштів), %	не менше 50,0%	59,3%	Виконано
4. Термін окупності інвестицій (коштів), роки	до 3-ти років	1,686 років	Виконано

Таким чином, основні економічні показники, досягнуті нами в розробленому автогенераторному сенсорі тиску для бездротових сенсорних мереж, визначені у індивідуальному завданні, повністю виконані.

ВИСНОВКИ

У першому розділі представлено огляд матеріалів на основі гнучких провідних полімерних композитів (FCPC) на основі CuPc, вбудовані в полімерні матриці PPy та PEDOT:PSS, були використані для виготовлення ЕКГ-електродів та датчиків деформації на гнучких підкладках, таких як PET, папір Xuan та EVA. Морфологічна та хімічна характеристика виявила значні відмінності між композитними плівками. SEM-аналіз показав різкий контраст між гладкими та безперервними покриттями PEDOT:PSS та шорсткою, глобулярною та пористою структурою PPy FCPC. На кінцеву топографію також сильно вплинула нижча підкладка. Крім того, EDS-аналіз підтвердив успішне та однорідне включення CuPc в обидві полімерні матриці. Остаточним доказом була сильна просторова кореляція між сигналами N та Cu на елементних картах, що доводить їх спільне молекулярне походження та успішну інтеграцію. Щодо механічної поведінки, найвищий опір, з наявністю як пружних, так і пластичних зон на кривих напруження-деформації, був присутній у FCPC на PET. FCPC, які використовували EVA як підкладку, отримали найкращі результати, працюючи як гнучкі датчики деформації.

У другому розділі представлено мініатюрну багатосенсорну систему на базі бездротової сенсорної мережі (WSN), призначену для бортового моніторингу герметичності (SHM) аерокосмічних конструкцій. Основною метою було створення сенсорної платформи, яка включає різні типи датчиків, має низьке енергоспоживання та бездротове підключення. Розроблена система має компактну та гнучку друковану плату розміром 3 см×3 см та вагою приблизно 0,5 г. Вона інтегрує PZT, тензодатчик, акселерометр та датчики навколишнього середовища для комплексного моніторингу конструкцій. Така схема дозволяє системі збирати як механічні, так і екологічні дані, що впливають на цілісність конструкції. Конструкція апаратного забезпечення забезпечує мінімальну вагу та компактні розміри, таким чином задовольняючи вимоги аерокосмічної галузі, де додаткова маса або розмір можуть погіршити продуктивність або обмежити кількість можливих сенсорних вузлів.

Використання одного радіочастотного мікроконтролера з Bluetooth LE дозволяє створити малопотужну, просторово розподілену сенсорну мережу, що зменшує потребу в провідці та спрощує розміщення датчиків. Завдяки зіркоподібній топології кілька сенсорних модулів зв'язуються з центральним вузлом, який потім передає дані на базову станцію для запису та аналізу.

Ключовим елементом запропонованої конфігурації є налаштований графічний інтерфейс, розроблений для обробки та візуалізації даних. Цей інтерфейс спрощує взаємодію з системою, підвищуючи зручність використання та забезпечуючи ефективний аналіз даних. Крім того, різні конфігурації графічного інтерфейсу були налаштовані для проведення різних експериментів, що забезпечує універсальність у зборі даних та обробці даних.

У третьому розділі представлені експериментальні дослідження багатосенсорної системи SHM розробленої для універсального розгортання. Експериментальні оцінки продемонстрували надійність розробленої платформи. Спочатку чотири MSS були розміщені в різних положеннях на композитній панелі для вимірювання даних про PZT, прискорення, температуру, тиск і вологість. Система оперативно реагувала на удари, а потім передавала всі отримані дані, отримані з датчиків, на центральний пристрій.

По-друге, MSS продемонстрував свою універсальність у вимірюванні деформації та прискорення в реальному часі, застосувавши його до тензодатчика, встановленого на алюмінієвому зразку. Процедури калібрування ефективно усунули зміщення від мосту Уїтстона, забезпечуючи точні вимірювання деформації. Порівняльні випробування з комерційною системою збору даних показали, що MSS фіксує структурні реакції з точно відповідними шаблонами сигналів та піковими значеннями. Незначні розбіжності в кількості зразків, спричинені затримками бездротової передачі, не мали суттєвого впливу на точність вимірювання. Ці результати підтверджують, що MSS здатний до надійного безперервного моніторингу.

Споживання струму оцінювалося шляхом вимірювання струму в різних режимах роботи, включаючи режим сну, синхронізації часу та активний режим. Результати підтверджують, що система добре підходить для тривалого застосування SHM з мінімальними вимогами до живлення. Крім того, було проведено тестування дальності для перевірки зв'язку Bluetooth LE системи за різних швидкостей передачі потужності (0 та +8 дБм) та схем модуляції (CODED, 1M та 2M PHY). Результати підтверджують, що MSS забезпечує надійне бездротове покриття, придатне для застосування в літаках та конструкціях.

Також в роботі проведено економічні розрахунки.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Andriy Semenov, Olena Semenova, Oleksandr Osadchuk, Iaroslav Osadchuk, Kostyantyn Koval, Serhii Baraban, Mariia Baraban. Pulse and Multifrequency Van der Pol Generators Based on Transistor Structures with Negative Differential Resistance for Infocommunication System Facilities. Data-Centric Business and Applications. Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies. Ageyev D., Radivilova T., Kryvinska N. (eds) Data-Centric Business and Applications. Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies, vol 69. Springer, Cham. 2021. -P.127-158.
2. Andriy Semenov, Olena Semenova, Oleksandr Osadchuk, Iaroslav Osadchuk, Serhii Baraban, Andrii Rudyk, Andrii Safonyk, Oleksandr Voznyak Van der Pol Oscillators Based on Transistor Structures with Negative Differential Resistance for Infocommunication System Facilities. Data-Centric Business and Applications. Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies. Ageyev D., Radivilova T., Kryvinska N. (eds) Data-Centric Business and Applications. Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies, vol 69. Springer, Cham. 2021. –P.43-78.
3. Osadchuk A.V., Osadchuk V.S., Osadchuk I.A., Pritula M.A. Devices for measuring the parameters of the magnetic field. Chapter 1. In Lvovich I.Y., Osadchuk A.V., Preobrazhenskiy A.P. et al. Erbe der europäischen wissenschaft: Ingenieurwissenschaften, Informatik, Physik und Mathematik, Medizin. Monografische Reihe «Europäische Wissenschaft». Buch 9. Teil 1. 2022. P.4-37. ISBN 978-3-949059-50-6
4. Osadchuk A.V., Osadchuk N.I., Osadchuk I.A. Technical research and development: collective monograph. CHAPTER 4. ELECTRONICS. Frequency transducers of gas concentration for the diagnosis of strains of bacteria *Helicobacter pylori*. Technical research and development: collective monograph / Kalafat K., Vakhitova L., Drizhd V., – etc. – International Science Group. – Boston : Primedia eLaunch, 2021. 616 p. Available at : DOI- 10.46299/ISG.2021.MONO.TECH.I . –P.178-194
5. Osadchuk O.V. , Osadchuk V.S., Prytula M.O., Osadchuk I.O. Mathematical modeling of frequency transducers of the radio measuring device of magnetic field induction. Chapter 1. Gogo V.B., Lukin V.V., Osadchuk O.V., Petrenko A., Vorobiov L.Y.et al. Intellectual capital is the foundation of innovative development: Engineering, Computer Science, Agriculture. Monographic series«European Science». –Karlsruhe, Germany. Book 18. Part 3. 2023. – P.8-38.
6. Osadchuk O.V., Osadchuk I.O., Pritula M.O. Highly sensitive radiomeasurement transducer of magnetic field induction. Chapter 2. Osadchuk O.V., Denysiuk S., Romanyuk O.N., Seliutina H.A., Shved O.V. et al. Wissenschaft und Bildung als Basis für die Modernisierung der Weltordnung:

- Innovative Technologien, Informatik, Sicherheitssysteme, Physik und Mathematik. Monografische Reihe «Europäische Wissenschaft». Buch 35. Teil 1. 2024. Karlsruhe, Germany. –195 p. PP.46-71.
7. Osadchuk O.V., Osadchuk I.O., Current state of devices for measuring physical quantities. Chapter 1. Kuklin V.M., Osadchuk O.V., Novoselchuk N., Simakhina G.O., Kosolapov A. et al. Entwicklung des wissenschaftlichen Denkens: Innovative Technologie, Informatik, Architektur und Bauwesen. Monografische Reihe «Europäische Wissenschaft». Buch 41. Teil 7. 2025. ScientificWorld-NetAkhatAV Karlsruhe, Germany 2025. –282 p. PP. 10-58.
 8. Kolodziej, L.; Iwasin' ska-Kowalska, O.; Wroblewski, G.; Giz' ewski, T.; Jakubowska, M.; Lekawa-Raus, A. Hydrogels and Carbon Nanotubes: Composite Electrode Materials for Long-Term Electrocardiography Monitoring. *J. Funct. Biomater.* 2024, 15, 113.
 9. Kumar, G.; Duggal, B.; Singh, J.P.; Shrivastava, Y. Efficacy of Various Dry Electrode-Based ECG Sensors: A Review. *J. Biomed. Mater. Res.* 2025, 113, e37845.
 10. Vidhya, C.M.; Kumar, G.; Maithani, Y.; Duggal, B.; Singh, J.P. A performance evaluation of silver nanorods PDMS flexible dry electrodes for electrocardiogram monitoring. *Sci. Rep.* 2025, 15, 15799.
 11. Maithani, Y.; Choudhuri, B.; Mehta, B.R.; Singh, J.P. Self-adhesive, stretchable, and dry silver nanorods embedded polydimethylsiloxane biopotential electrodes for electrocardiography. *Sens. Actuators A Phys.* 2021, 332, 113068.
 12. Le, K.; Servati, A.; Servati, P.; Ko, F. Signal Quality Analysis of Electrocardiogram Textile Electrodes for Smart Apparel Applications. In Proceedings of the 2019 IEEE International Flexible Electronics Technology Conference (IFETC), Vancouver, BC, Canada, 11–14 August 2019; pp. 1–3.
 13. Duan, L.; D'hooge, D.R.; Cardon, L. Recent Progress on Flexible and Stretchable Piezoresistive Strain Sensors: From Design to Application. *Progress Mater. Sci.* 2020, 114, 100617.
 14. Han, F.; Li, M.; Ye, H.; Zhang, G. Materials, Electrical Performance, Mechanisms, Applications, and Manufacturing Approaches for Flexible Strain Sensors. *Nanomaterials* 2021, 11, 1220.
 15. Ha, H.; Lee, J.; Kim, S. Sensing Mechanism and Application of Mechanical Strain Sensor: A Mini-Review. *Facta Univ. Ser. Mech. Eng.* 2023, 21, 751–772.
 16. Wu, S.; Kim, D.; Tang, X.; King, M.W.; Zhu, Y. Encapsulated Stretchable Amphibious Strain Sensors. *Mater. Horiz.* 2024, 11, 5070–5080.
 17. Hakim, M.; Alfarros, Z.; Herianto, H.; Muflikhun, M. High Sensitivity Flexible Strain Sensor for Motion Monitoring Based on MWCNT@MXene and Silicone Rubber. *Sci. Rep.* 2025, 15, 3741.
 18. Shen, G. Recent advances of flexible sensors for biomedical applications. *Progress Nat. Sci. Mater. Int.* 2021, 31, 872–882.

19. Ma, R.; Chou, S.; Xie, Y.; Pei, Q. Morphological/nanostructural control toward intrinsically stretchable organic electronics. *Chem. Soc. Rev.* 2019, 48, 1741–1786.
20. Castro, H.; Correia, V.; Pereira, N.; Costab, P.; Oliveiraa, J.; Lanceros-Mendez, S. Printed Wheatstone bridge with embedded polymer based piezoresistive sensors for strain sensing applications. *Addit. Manuf.* 2018, 20, 119–125.
21. Diez-Pascual, A.; Rahdar, A. Graphene-Based Polymer Composites for Flexible Electronic Applications. *Micromachines* 2022, 13, 1123.
22. Tran, H.; Nguyen, T.H.; Vu, V. Fabrication of Zinc phthalocyanines: Characterisation and optical properties. *Vietnam J. Sci. Technol.* 2024, 66, 7–11.
23. Gonsel, A.; Bilgicli, A.T.; Pi, skin, H.; Caylak Deliba, s, N.; Yarasir, M.N.; Gunduz, B. Synthesis, characterization, and optical and surface properties of (4-(trifluoromethylthio)phenoxy) copper(II) phthalocyanine. *New J. Chem.* 2018, 42, 6013–6022.
24. Burrello, A.; Marchioni, A.; Brunelli, D.; Benatti, S.; Mangia, M.; Benini, L. Embedded Streaming Principal Components Analysis for Network Load Reduction in Structural Health Monitoring. *IEEE Internet Things J.* 2021, 8, 4433–4447.
25. Ostachowicz, W.; Soman, R.; Malinowski, P. Optimization of sensor placement for structural health monitoring: A review. *Struct. Health Monit.* 2019, 18, 963–988.
26. Tokogonon, C.J.A.; Gao, B.; Tian, G.Y.; Yan, Y. Structural Health Monitoring Framework Based on Internet of Things: A Survey. *IEEE Internet Things J.* 2017, 4, 619–635.
27. Mishra, M.; Lourenco, P.B.; Ramana, G.V. Structural health monitoring of civil engineering structures by using the internet of things: A review. *J. Build. Eng.* 2022, 48, 103954
28. Sofi, A.; Jane Regita, J.; Rane, B.; Lau, H.H. Structural health monitoring using wireless smart sensor network—An overview. *Mech. Syst. Signal Process.* 2022, 163, 108113.
29. Kralovec, C.; Schagerl, M. Review of structural health monitoring methods regarding a multi-sensor approach for damage assessment of metal and composite structures. *Sensors* 2020, 20, 826.
30. Das, S.; Saha, P.; Patro, S.K. Vibration-based damage detection techniques used for health monitoring of structures: A review. *J. Civ. Struct. Health Monit.* 2016, 6, 477–507.
31. Осадчук О.В., Осадчук Я.О., Скощук В.К. Багатоканальний частотомір на програмованій логічній інтегральній схемі для радіовиміральної системи з частотними сенсорами фізичних величин // Вісник Хмельницького національного університету, №6, 2021 (303) – С.186-194.
32. Осадчук О.В., Осадчук В.С., Осадчук Я.О. Математична модель мікроелектронного частотного перетворювача вологості з волого чутливим

- резистивним елементом // Вчені записки ТНУ імені В.І.Вернадського. Серія:Технічні науки. Том 32(71), Ч.2, №1 2021. –С.175-182
33. Осадчук В.С., Осадчук О.В., Осадчук Я.О., Ільчук Д.Р., Пастушенко Г.О. Оптико-частотний витратомір газу // Вісник Хмельницького національного університету, №1, 2021 (293) – С.160-170. DOI 10.31891/2307-5732-2021-293-1-160-170
34. Осадчук О.В., Осадчук В.С., Осадчук Я.О. Дослідження сенсора температури з частотним виходом на основі квантової гетероструктури з від'ємним диференційним опором // Вісник Хмельницького національного університету, №2, 2021 (295) – С.156-164. DOI 10.31891/2307-5732-2021-295-2-156-164
35. Осадчук О.В., Крилик Л.В., Осадчук Я.О. Звягін О.С. Математичне моделювання пристрою з частотним виходом для вимірювання вологості// Вісник Хмельницького національного університету, №2, 2021 (295) – С.282-288. DOI 10.31891/2307-5732-2021-295-2-282-288
36. Осадчук О.В., Осадчук Я.О., Ліхашорський С.В. Дослідження температурної нестабільності в активних НВЧ фільтрах та методи її зменшення // Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2021. № 3, – С.127-133.
37. Осадчук О.В., Крилик Л.В., Осадчук Я.О., Звягін О.С. Математична модель мікроелектронного автогенераторного засобу для вимірювання вологості // Вчені записки ТНУ імені В.І.Вернадського. Серія:Технічні науки. Том 32(71), №4 2021. –С.289-296.
38. Осадчук Я.О., Осадчук О.В., Осадчук В.С. Дослідження автогенераторних параметричних сенсорів температури // Вісник Хмельницького національного університету, №1, 2022 (305) – С.172-180. DOI 10.31891/2307-5732-2022-305-1-172-180
39. Осадчук Я.О., Осадчук О.В., Осадчук В.С. Автогенераторні параметричні сенсори магнітного поля з елементом Холла і двоколекторним біполярним магнітотранзистором // Вісник Хмельницького національного університету, №2, 2022 (307) – С.114-122. DOI 10.31891/2307-5732-2022-307-2-114-122
40. Осадчук О.В., Осадчук В.С., Осадчук Я.О. Дослідження автогенераторних параметричних оптичних сенсорів // Вчені записки ТНУ імені В.І.Вернадського. Серія:Технічні науки. Том 33(72), №3 2022. – С.106-114.
41. Осадчук О.В., Осадчук В.С., Осадчук Я.О. Автогенераторні параметричні сенсори тиску // Вісник Хмельницького національного університету, №3, 2022 (309) – С.125-132. DOI 10.31891/2307-5732-2022-309-3-125-134
42. Осадчук О.В., Осадчук Я.О., Думенко Д.О., Стальченко О.В. Методи вимірювання опору напівпровідникових матеріалів // Інфокомунікаційні та комп'ютерні технології, №1 (03) 2022. –С.199-212 DOI 10.36994/2788-5518
43. Осадчук О.В., Осадчук Я.О., Думенко Д.О. Аналіз доцільності використання негативного зворотнього зв'язку на змінному струмі для

- стабілізації параметрів транзисторних аналогів індуктивності// Інфокомунікаційні та комп'ютерні технології, №2 (04) 2022. –С.83-91. DOI: 10.36994/2788-5518-2022-02-09
- 44.Осадчук О.В., Осадчук Я.О., Думенко Д.О. Стабілізація параметрів транзисторних аналогів індуктивності // Вісник Хмельницького національного університету, №6, Т.2, 2022 (315) – С. 65-68. DOI 10.31891/2307-5732-2022-315-6(2)-65-68
 - 45.Осадчук О.В., Осадчук Я.О., Скощук В.К. Використання ядра NIOSIIU багатоканальному частотомірі на FPGA для радіотехнічної системи з частотними сенсорами фізичних величин // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах.2023, №1. –С.137-148.
 - 46.Осадчук О.В., Осадчук Я.О., Скощук В.К. Удосконалення багатоканальної радіотехнічної системи на FPGA для частотних перетворювачів фізичних величин підтримкою цифрових сенсорів // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах.2023, №2. –С.72-82.
 - 47.Осадчук Я.О. Автвогенераторні мікроелектронні сенсори магнітного поля з біполярним і польовим магніточутливими транзисторами // Вчені записки ТНУ імені В.І.Вернадського. Серія:Технічні науки. Том 34(73), №1 2023. – С.354-363.
 - 48.Keshmiry, A.; Hassani, S.; Mousavi, M.; Dackermann, U. Effects of Environmental and Operational Conditions on Structural Health Monitoring and Non-Destructive Testing: A Systematic Review. Buildings 2023, 13, 918.
 - 49.Hassani, S.; Dackermann, U. A Systematic Review of Optimization Algorithms for Structural Health Monitoring and Optimal Sensor Placement. Sensors 2023, 23, 3293.
 - 50.Salawu, O.S. Detection of structural damage through changes in frequency: A review. Eng. Struct. 1997, 19, 718–723. Azimi, M.; Eslamlou, A.D.; Pekcan, G. Data-driven structural health monitoring and damage detection through deep learning: State-of-the-art review. Sensors 2020, 20, 2778.
 - 51.Mustapha, S.; Lu, Y.; Ng, C.T.; Malinowski, P. Sensor Networks for Structures Health Monitoring: Placement, Implementations, and Challenges— A Review. Vibration 2021, 4, 551–585.
 - 52.Abdulkarem, M.; Samsudin, K.; Rokhani, F.Z.; A Rasid, M.F. Wireless sensor network for structural health monitoring: A contemporary review of technologies, challenges, and future direction. Struct. Health Monit. 2020, 19, 693–735.
 - 53.Gorgin, R.; Luo, Y.;Wu, Z. Environmental and operational conditions effects on Lamb wave based structural health monitoring systems: A review. Ultrasonics 2020, 105, 106114.
 - 54.Broer, A.A.; Benedictus, R.; Zarouchas, D. The Need for Multi-Sensor Data Fusion in Structural Health Monitoring of Composite Aircraft Structures. Aerospace 2022, 9, 183.

55. Ay, A.M.; Wang, Y. Structural damage identification based on self-fitting ARMAX model and multi-sensor data fusion. *Struct. Health Monit.* 2014, 13, 445–460.
56. Ando, B.; Castorina, S.; Graziani, S.; Greco, D.; Manenti, M.; Pistorio, A. An Embedded Multi-Sensor Architecture for Applications in Structural Health Monitoring. In *Proceedings of the IEEE Sensors Applications Symposium, SAS, Ottawa, ON, Canada, 18–20 July 2023*; pp. 1–5.
57. Smithard, J.; Rajic, N.; van der Velden, S.; Norman, P.; Rosalie, C.; Galea, S.; Mei, H.; Lin, B.; Giurgiutiu, V. An advanced multi-sensor acousto-ultrasonic structural health monitoring system Development and aerospace demonstration. *Materials* 2017, 10, 832.
58. Santos, J.P.; Orcesi, A.D.; Cremona, C.; Silveira, P. Baseline-free real-time assessment of structural changes. *Struct. Infrastruct. Eng.* 2015, 11, 145–161.
59. Методичні вказівки до виконання економічної частини магістерських кваліфікаційних робіт. / Укладачі В.О. Козловський, О.Й. Лесько, В.В. Кавецький. Вінниця : ВНТУ, 2021. 42 с.

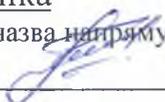
Додаток А
(обов'язковий)

ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА

АВТОГЕНЕРАТОРНИЙ СЕНСОР ТИСКУ ДЛЯ БЕЗДРОТОВИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ

Виконав: студент 2-го курсу, групи РТ-24м
спеціальності 172 Електронні комунікації та
радіотехніка

(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)


Панасюк Т.Ю.

(прізвище та ініціали)

Керівник: д.т.н., доц., доцент кафедри ІРТС


Осадчук Я.О.

(прізвище та ініціали)

« 12 » 12 2025 р.

Вінниця ВНТУ - 2025 рік



Рисунок 1 – Схема процесу виготовлення електродів ЕКГ та гнучких датчиків деформації

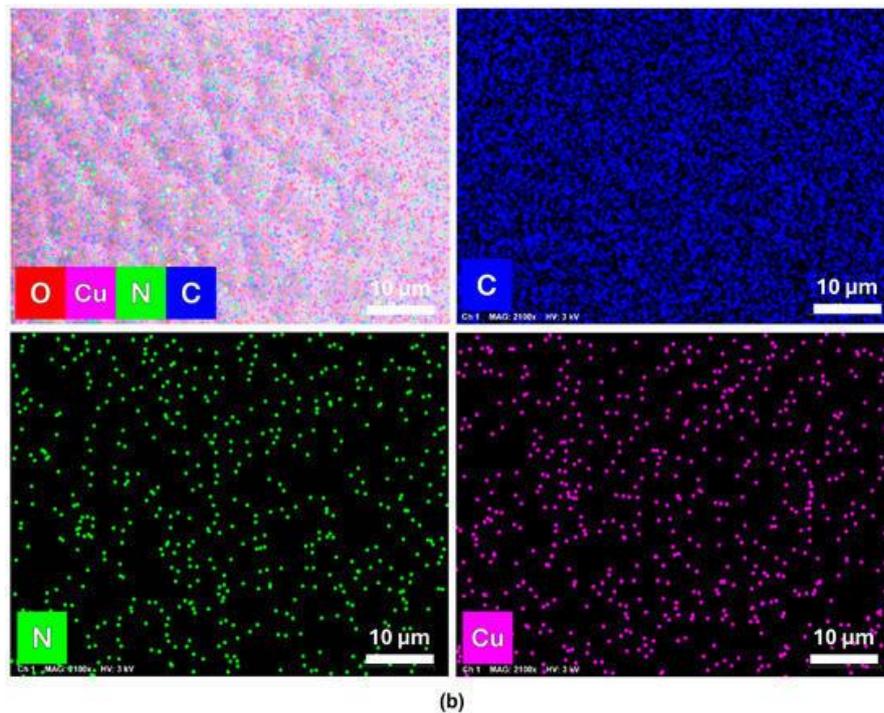


Рисунок 2 – Елементне картування EDS (а) PVA-ксантану/PPy-CuPc на PET та (б) PVA-ксантану/PEDOT:PSS-CuPc на папері Хуан

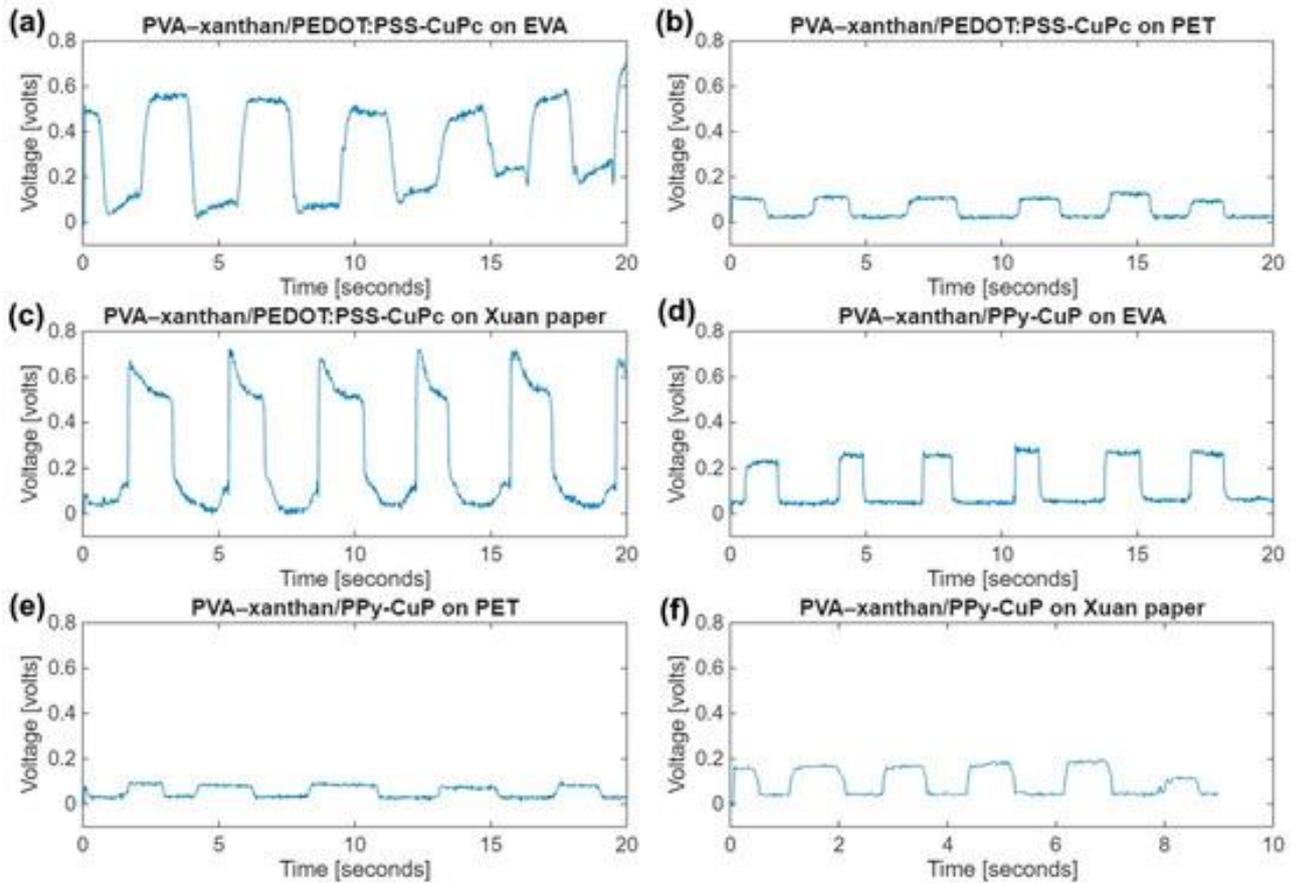


Рисунок 3 – Графіки напруги, що показують згинання та розгинання для шести різних зразків. Згинання показано як рух вгору, тоді як розгинання представлено поверненням до базової лінії. Шість різних зразків виглядають наступним чином: (а) PVA–ксантан/PEDOT:PSS-CuPc на EVA, (б) PVA–ксантан/PEDOT:PSS-CuPc на PET, (с) PVA–ксантан/PEDOT:PSS-CuPc на папері Xuan, (д) PVA–ксантан/PPy-CuPc на EVA, (е) PVA–ксантан/PPy-CuPc на PET та (ф) PVA–ксантан/PPy-CuPc на папері Xuan

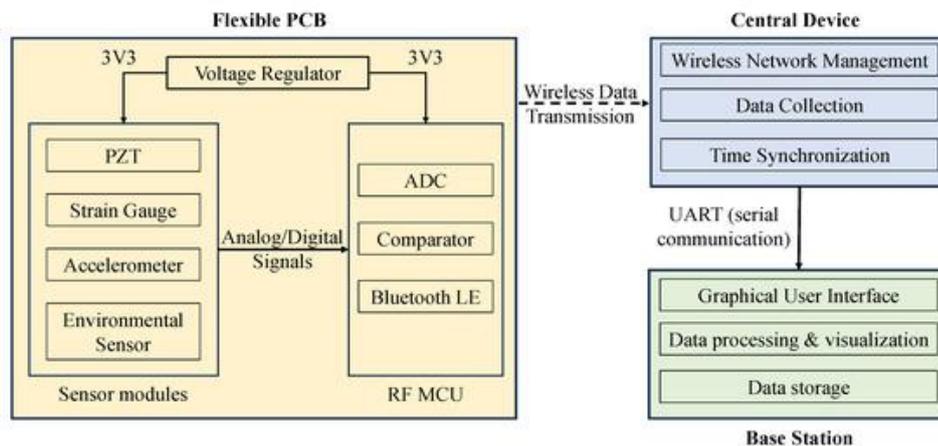


Рисунок 4 – Концептуальна блок-схема мініятуризованого MSS для SHM

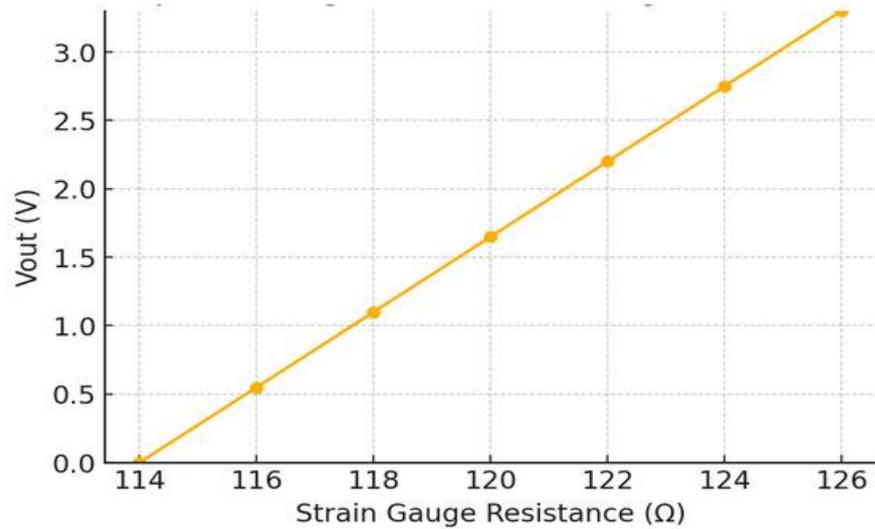


Рисунок 5 – Вихідна напруга в залежності від опору тензодатчика

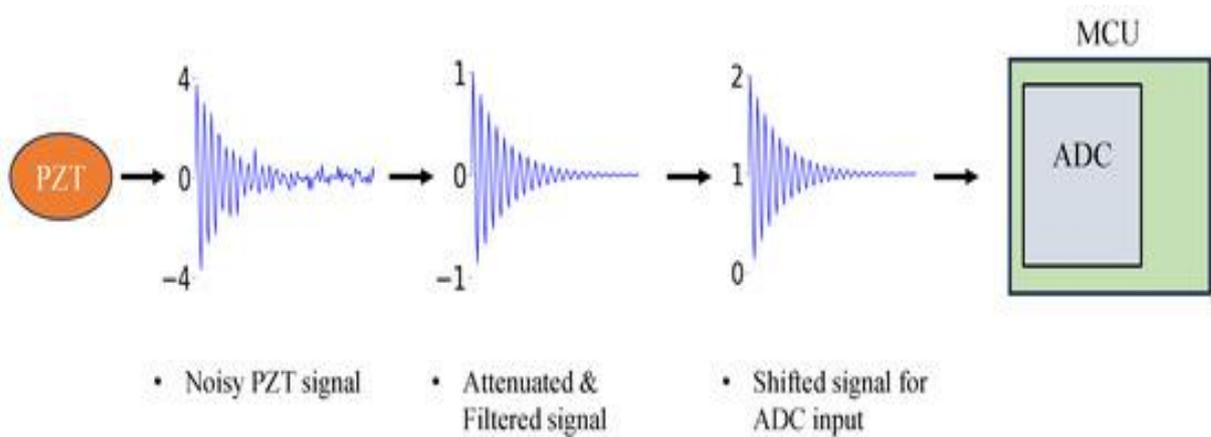


Рисунок 6 – Етапи збору сигналу PZT

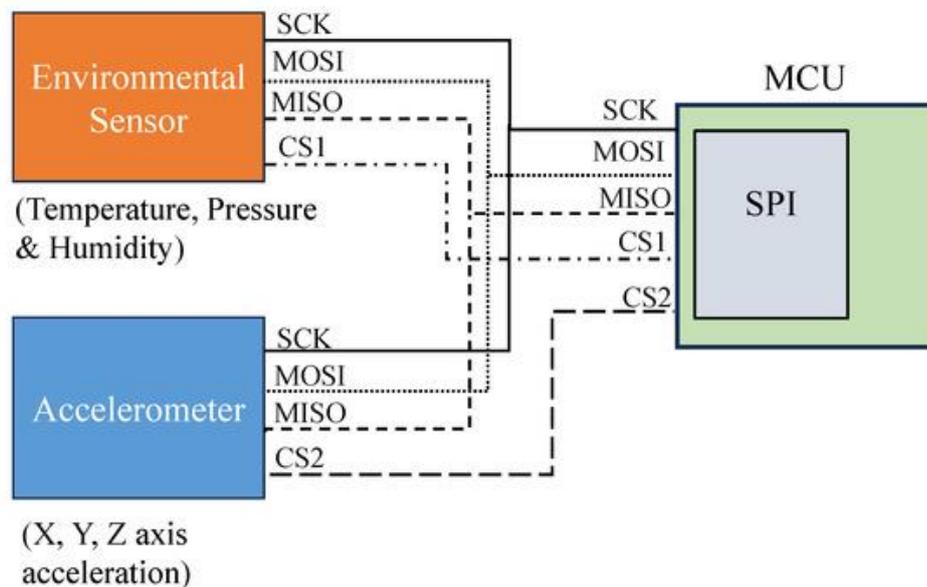


Рисунок 7 – Послідовний зв'язок (SPI) між мікроконтролером та датчиками з цифровим виходом (BMA400 та BME280)

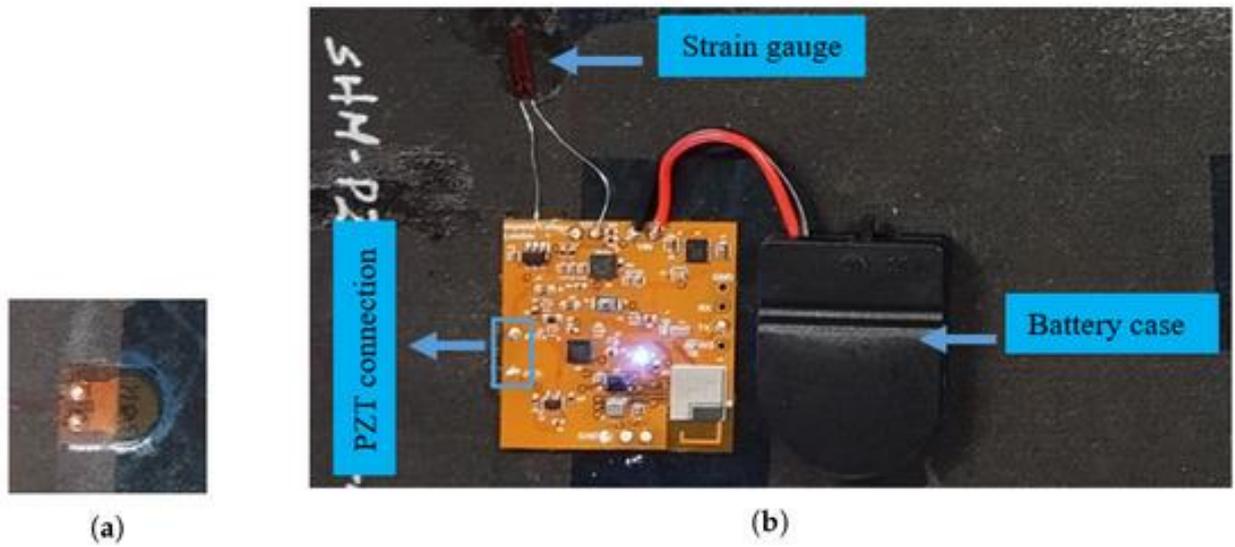


Рисунок 8 – Багатосенсорна система SHM на композитній панелі: (а) датчик PZT, (б) інтеграція MSS

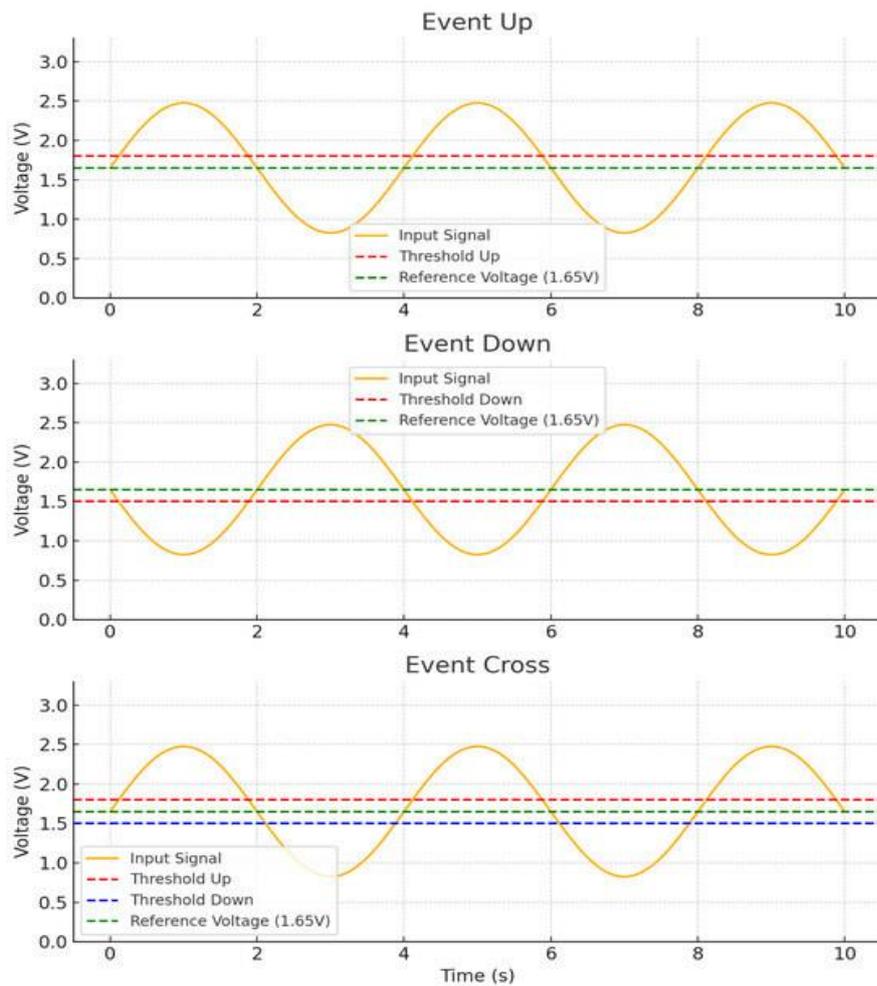


Рисунок 9 – Події компаратора з пороговим аспектом

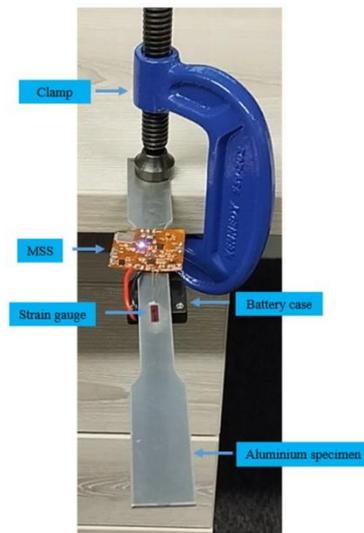


Рисунок 10 – Експериментальна установка для вимірювання деформації з алюмінієвим зразком

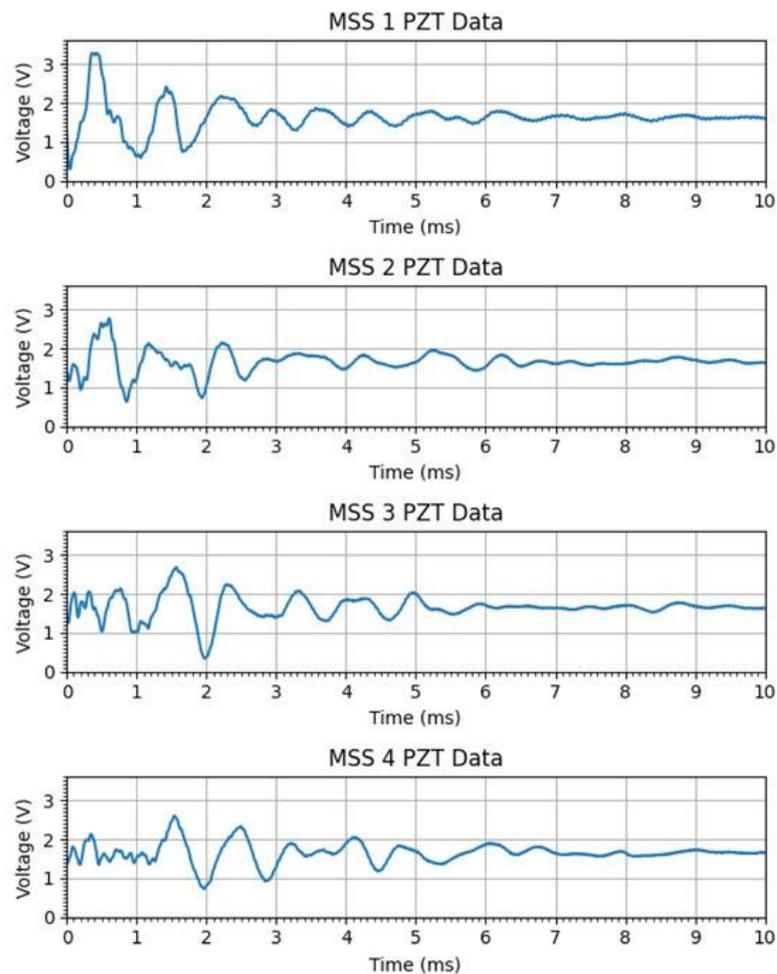


Рисунок 11 – Сигнали PZT від чотирьох MSS у бездротовій мережі DAQ для безперервного вимірювання деформації та прискорення в режимі реального часу

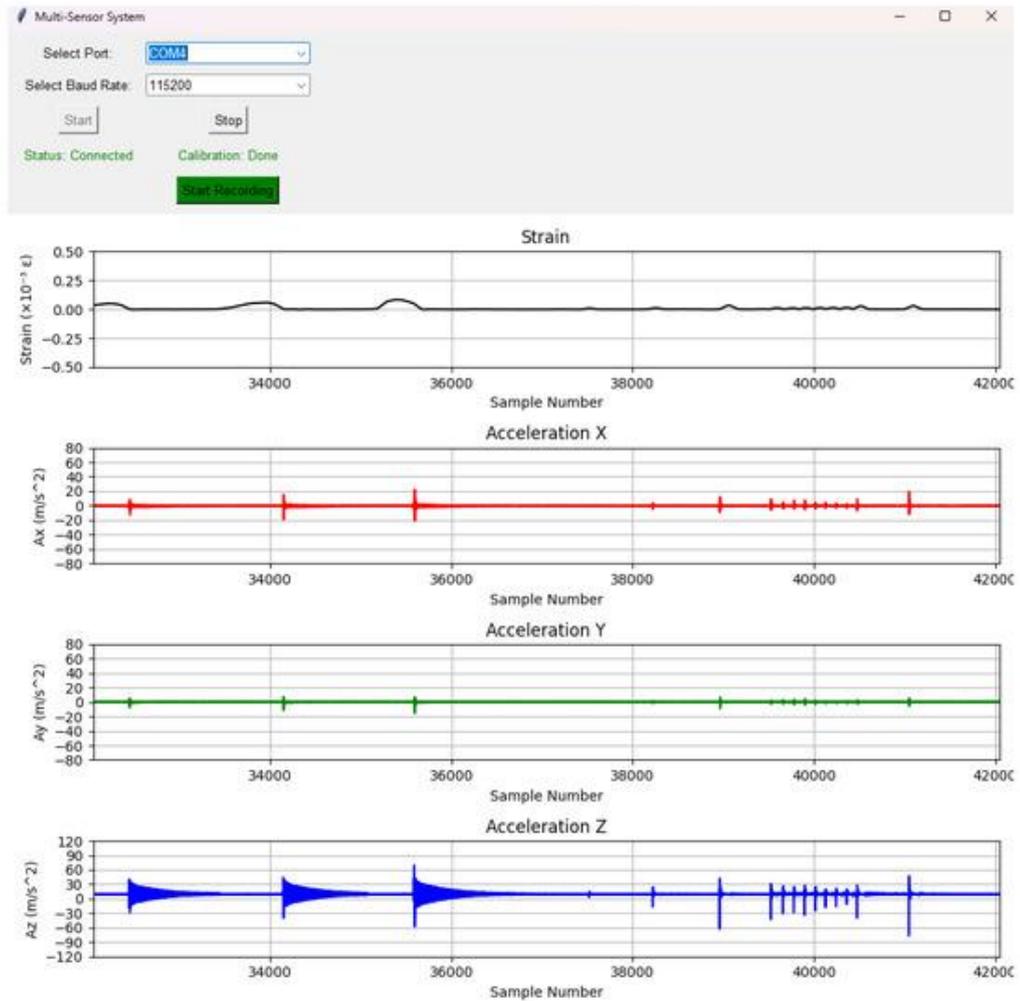


Рисунок 12 – Відображення даних прискорення в режимі реального часу для трьох осей

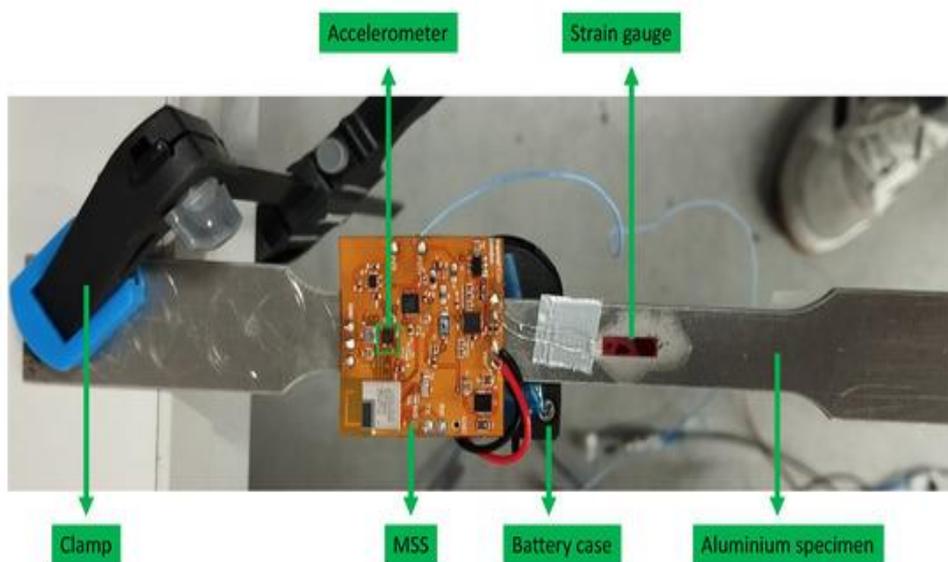


Рисунок 13 – Експериментальна установка для порівняння вимірювань прискорення та тензодатчиків між запропонованою MSS та системою збору даних; на малюнку показано вигляд зверху

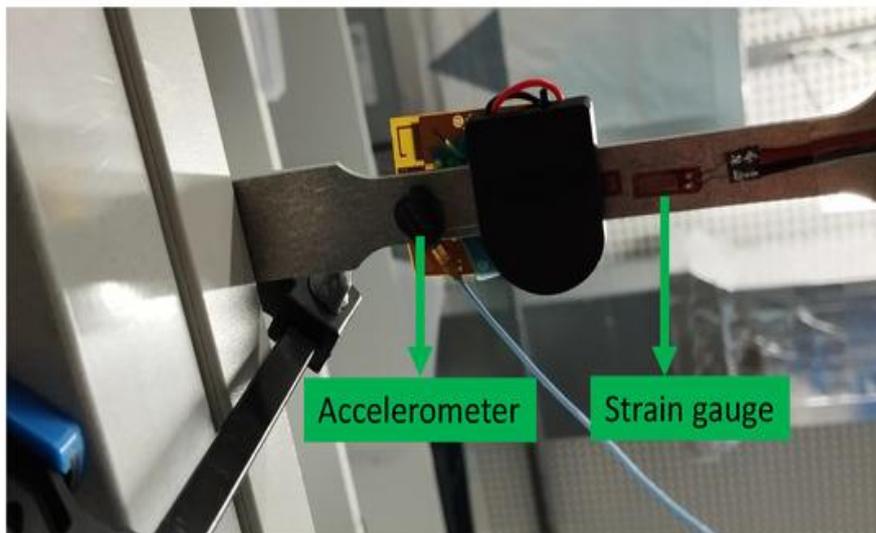


Рисунок 14 – Експериментальна установка для порівняння вимірювань прискорення та тензодатчиків між запропонованою MSS та системою збору даних; на рисунках показано вигляд знизу

Додаток Б
(обов'язковий)

ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ РОБОТИ

**АВТОГЕНЕРАТОРНИЙ СЕНСОР ТИСКУ ДЛЯ БЕЗДРОТОВИХ
СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ**

ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Назва роботи: «Автогенераторний сенсор тиску для бездротових сенсорних мереж»

Тип роботи: _____ Магістерська кваліфікаційна робота _____
 (бакалаврська кваліфікаційна робота / магістерська кваліфікаційна робота)
 Підрозділ _____ Кафедра ІРТС _____
 (кафедра, факультет, навчальна група)

Коефіцієнт подібності текстових запозичень, виявлених у роботі системою StrikePlagiarism _____ 0,46% _____

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:

_____ Семенов А.О. – д.т.н., професор каф. ІРТС _____
 (прізвище, ініціали, посада)

_____  _____
 (підпис)

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

Особа, відповідальна за перевірку _____  _____
 (підпис)

_____ Семенов А.О. _____
 (прізвище, ініціали)

З висновком експертної комісії ознайомлений(-на)

Керівник _____  _____ Осадчук Я.О. – д.т.н., доцент каф. ІРТС ІРТС _____
 (підпис) (прізвище, ініціали, посада)

Здобувач _____  _____ Панасюк Т.Ю. _____
 (підпис) (прізвище, ініціали)