

Анатолій ДРУЖИНІН, Роман КОРЕЦЬКИЙ, Степан НІЧКАЛО, Данило ТАЛАНЧУК

Україна, Національний університет «Львівська політехніка»

E-mail: anatolii.o.druzhynin@lpnu.ua

## БЕЗПРОВІДНА СИСТЕМА МОНІТОРИНГУ ДЕФОРМАЦІЙ З ВИКОРИСТАННЯМ ТЕНЗОРЕЗИСТОРІВ НА ОСНОВІ НИТКОПОДІБНИХ КРИСТАЛІВ КРЕМНІЮ

*Спроектовано інтелектуальну бездротову систему, призначену для моніторингу деформацій конструкцій у реальному часі. Основним її чутливим елементом є тензорезистор на основі ниткоподібного кремнію, що демонструє високу стабільність та чутливість у широкому інтервалі температури. Система побудована на мікроконтролері Arduino Uno з під'єднаним модулем підсилення сигналу HX711 та Wi-Fi модулем ESP8266. Описано апаратну та програмну частини системи.*

**Ключові слова:** ниткоподібний кремній, тензорезистор, Wi-Fi, Arduino Uno, HX711, ESP8266, моніторинг, трубопровід.

Проблема своєчасного виявлення пластичних деформацій і накопичених механічних напружень у металевих та композитних конструкціях є однією з базових у сучасній техногенній безпеці [1]. У нафтогазових магістралях, теплотрасах, хімічних реакторах і мостових спорудах повільні зміщення точок кріплення або нерівномірне розтягування стінок часто залишаються непоміченими на ранньому етапі, що призводить до розгерметизацій або крихких руйнувань. Згідно зі зведеними даними «European Pipeline Incident Study 2024», понад третини аварійного простою трубопровідних систем у країнах ЄС була спричинена саме недооціненими деформаціями, які не контролювалися належним чином [2].

Класичний підхід до контролю напружено-деформованого стану конструкцій базується на використанні дешевих фольгових тензорезисторів, які залишаються масовим рішенням завдяки невеликій вартості, однак їхня температурна нестабільність, низький ресурс циклічної роботи й необхідність герметизації обмежують їх застосування у критичних об'єктах інфраструктури [3, 4]. Альтернативою їм стали волоконно-оптичні датчики та акустичні емісійні системи, що демонструють високу лінійність і відсутність електромагнітної чутливості [5], проте потребують вартісного оптичного або фотодетекторного устаткування й складного монтажу [6, 7].

Описані проблеми точного вимірювання деформацій у широкому температурному та частотному діапазонах актуалізували пошук сенсорних структур, здатних поєднати в собі високу чутливість із довговічністю та технологічною простотою (див., наприклад, [5]). Одним із таких рішень можуть стати тензорезистори на основі ниткоподібного кремнію — монокристалічна кремнієва нитка завдовжки кілька мі-

ліметрів і діаметром десятки мікрометрів завдяки відсутності зернових меж зберігає електричну та механічну однорідність у широкому інтервалі температури, а високий коефіцієнт тензочутливості дозволяє точно реєструвати малі подовження.

Мета цієї роботи полягала у розробленні та валідації прототипу бездротової системи, що використовує ниткоподібний кремнієвий сенсор, для довготривалого моніторингу деформацій сталевих трубопроводів.

### Технологія отримання досліджуваних зразків

У напівпровідниках, зокрема в легованому кремнії, окрім геометричного чинника домінує зміна рухливості носіїв заряду, що підсилює чутливість приблизно на порядок. За даними роботи [8, с. 57–59], коефіцієнт тензочутливості таких структур може досягати значних величин, тоді як у фольгового манганінового елемента він рідко перевищує значення 2. На відміну від методів зонного плавлення, що часто згадуються в літературі, ниткоподібні кристали кремнію, які відіграють роль тензочутливих елементів, вирощують у закритій кварцовій ампулі методом хімічних газотранспортних реакцій [8, с. 40–44]. Це забезпечує чисте середовище та однорідне легування бором до концентрацій  $(1-5) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  — саме в околі переходу «метал – діелектрик». Така технологія формує однорідний віскер діаметром 15–25 мкм та довжиною до 5 мм без домішкових скупчень, що суттєво підвищує тензочутливість і зменшує температурний дрейф.

### Результати випробувань

Експериментальна перевірка була проведена на ділянці водопроводу за величини імітованого тиску до 12 бар. Випробування показали, що одержані тензорезистори витримують понад  $10^7$  циклів навантажен-

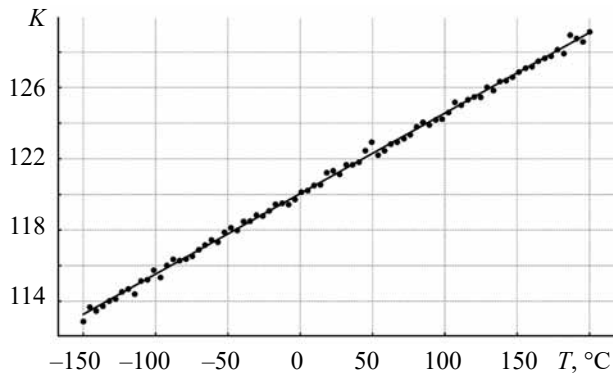


Рис. 1. Залежність коефіцієнта тензочутливості від температури

ня/розвантаження при амплітуді деформації  $\pm 1 \cdot 10^{-3}$  без руйнування та утворення тріщин. Гранична одно-разова деформація розтягу/стиску становить  $\pm 5 \cdot 10^{-3}$  (0,5%), що повністю задовольняє потреби моніторингу сталевих трубопроводів при робочому тиску до 12 бар. За кімнатної температури коефіцієнт тензочутливості  $K$  стабільно утримується в межах  $120 \pm 10\%$  (рис. 1), а температурний коефіцієнт опору не перевищує  $+(0,1 \pm 0,02) \%/^{\circ}\text{C}$  у робочому температурному інтервалі від  $-150$  до  $+200^{\circ}\text{C}$ .

Для оцінювання температурного запасу проводилося розширене температурне тестування системи. Результати показали, що при нагріванні до  $350^{\circ}\text{C}$  похибка вимірювання, пов'язана з температурним коефіцієнтом опору, не перевищує 1,2% після цифрової корекції. Тому для практичної системи було застосовано термокомпенсаційну схему «міст у мості», де одне із плечей виконує функцію еталонної терморегулювальної ланки. Це робить сенсор придатним для точного вимірювання напружень у складних температурних умовах. Завдяки своїй малій масі та розмірам сенсор може монтуватися на гнучких елементах або у важкодоступних місцях конструкцій. У сукупності ці параметри роблять ниткоподібний кремній оптимальним компромісом між точністю, ресурсом та вартістю сенсора.

### Вимірювальна система

Пропонована вимірювальна система складається з трьох функціональних підрівнів: первинний перетворювач, блок оцифрування, бездротовий комунікаційний модуль. Первинний перетворювач утворює повний міст Уїтстона, в одне з плечей якого увімкнено ниткоподібний кремнієвий тензорезистор, а у протилежне — еталонний резистор з температурним коефіцієнтом, підібраним для грубої термокомпенсації. Два інші плеча формуються високостабільними танталовими резисторами на 350 Ом, що забезпечує вихідну напругу моста не більше 40 мВ за граничної деформації  $\pm 0,5\%$  (рис. 2). Така амплітуда потребує високого підсилення, яке реалізовано спеціалізованою мікросхемою HX711. Чіп підсилює сиг-

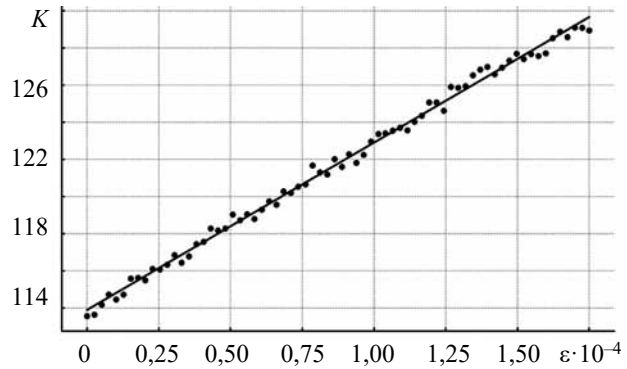
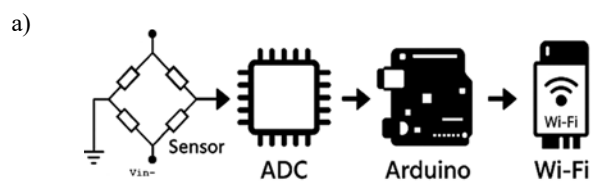


Рис. 2. Залежність вихідного сигналу сенсора від відносної деформації при  $T = 300\text{ K}$



б)



Рис. 3. Блок-схема системи з сенсором на основі ниткоподібних кристалів кремнію (а) та фотографія готового пристрою (б)

нал зі сталюю у 128 разів і одночасно виконує 24-бітове оцифрування, завдяки чому квант виходу становить приблизно 0,3 мкВ.

Оцифрований код передається на мікроконтролер Atmega328P, встановлений на платі Arduino Uno (рис. 3). Система Arduino Uno проводить усі обчислення: розраховує середнє значення, коригує покази за допомогою коефіцієнта температурної похибки, який визначається під час калібрування, та переводить результат у величину відносної деформації. Для забезпечення часової мітки мікроконтролер періодично синхронізується із внутрішнім годинником ESP8266 через простий послідовний протокол. Фізичний обмін між платами здійснюється по UART 9600 бод із двоступеневим узгодженням напруги: вихід TX Arduino через дільник 2 кОм / 1 кОм подається на RX ESP8266, тоді як рівень 3,3 В від TX Wi-Fi-модуля безпосередньо приймається Arduino.

Комунікаційним ядром системи є ESP8266, налаштований у режимі клієнта. Після підімкнення до маршрутизатора модуль відкриває HTTP-сервер на порті 8080 та, використовуючи енергозберігальний режим Light Sleep, “прокидається” кожні п’ять секунд, аби прийняти пакет даних від Arduino. Кожен такий пакет упаковується у JSON-об’єкт, що містить унікальний ідентифікатор вузла, часову позначку формату ISO 8601, відносно деформацію, температуру та напругу живлення. У локальній мережі дані автоматично приймаються брокером, архівуються у базі та відображаються на дашборді, доступному з будь-якого браузера підприємства.

Живлення всієї системи здійснюється від стабілізатора напруги 5 В. У робочому циклі, коли Wi-Fi-модуль перебуває в активному стані (рівно 250 мс), споживання сягає 120 мА, у решту часу воно падає до 25 мА. Випробування з акумуляторним павербанком ємністю 10 000 мА·год засвідчили автономність роботи протягом 72 години без підзарядки. Для забезпечення електромагнітної сумісності тензоміст розташовано на окремій екранованій платі, а силові та сигнальні лінії розділено по різних шарах друкованої плати.

Архітектура прошивки передбачає резервування даних: якщо ESP8266 не відповідає, Arduino переходить у локальний режим, зберігаючи 256 останніх вимірів у EEPROM. Під час тестування на майданчику підприємства після відновлення зв’язку дані з буферу передавали партіями, що дозволило уникнути втрати інформації.

### Висновки

Запропонована система з використанням тензорезисторів на основі ниткоподібних кремнієвих кристалів у поєднанні з підсилювачем HX711, мікроконтролером Arduino Uno та модулем ESP8266 дозволяє створити портативний вимірювальний вузол, який легко розгортається у польових умовах і взаємодіє з оператором у реальному часі через звичайну Wi-Fi-мережу. Чутливий елемент зберігає стабільність сигналу у широкому температурному інтерва-

лі, а апаратно-програмна реалізація забезпечує точність та енергетичну автономність у складному промисловому середовищі. Розроблена методика дозволяє адаптувати систему до різних об’єктів контролю завдяки модульній архітектурі та відкритим протоколам передачі даних, забезпечуючи ефективний бездротовий моніторинг деформацій у реальному часі. Практична значущість системи підтверджена натурними випробуваннями на об’єкті трубопровідної інфраструктури. Подальші дослідження доцільно спрямувати на розширення функціоналу системи завдяки інтеграції з візуалізацією карт напружень та аналізу частотних характеристик у режимі реального часу.

### ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. 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, vol. 20, no. 3, article 826. <https://doi.org/10.3390/s20030826>
2. *European Pipeline Incident Study 2024*. EPRS, Brussels, 2025, 112 p.
3. HBM GmbH. *Drift in Bonded Foil Strain Gauge-Based Sensors*. Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH; 2025. Available at: <https://www.hbm.com/tw/6218/drift-in-bonded-foil-strain-gauge-based-sensors>
4. Fan Y., Shen Z., Zhou X. et al. Highly sensitive strain sensor from topological-structure modulated dielectric elastic nanocomposites. *Advanced Electronic Materials*, 2022, vol. 7, iss. 1, article 2101190. <https://doi.org/10.1002/admt.202101190>
5. Wu T., Liu G., Fu Sh., Xing F. Recent progress of fiber-optic sensors for the structural health monitoring of civil infrastructure, *Sensors*, 2020, vol. 20, iss.16, article 4517. <https://doi.org/10.3390/s20164517>.
6. HBM GmbH. An analysis of the cost-effectiveness of optical-technology systems. *Hottinger Brüel & Kjaer*, 2024. Available: <https://www.hbm.com/en/9280/cost-effectiveness-of-optical-technology/>
7. Flores-Bravo J.A., Madrigal J., Zubia J. et al. Coupled-core fiber Bragg gratings for low-cost sensing. *Scientific Reports*, 2022, vol. 12, article 1280. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-05313-9>
9. Дружинін А.О., Мар’ямова І.Й., Кутраков О.П. *Датчики механічних величин на основі ниткоподібних кристалів кремнію, германію та сполук  $A_3B_5$* . Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2015. 232 с.

Дата надходження рукопису  
до редакції 30.05 2025 р.

WIRELESS DEFORMATION MONITORING SYSTEM USING STRAIN SENSOR  
BASED ON SILICON WHISKERS

Structural health monitoring of steel pipelines in industrial environments remains a critical challenge due to mechanical loads, pressure variations, temperature fluctuations, and external degradation. Traditional foil strain gauges, though widely used and inexpensive, suffer from thermal instability, limited operational life under cyclic loading, and the need for hermetic protection, restricting their application in infrastructure monitoring. Optical fiber sensors offer high precision, but are costly and difficult to integrate. This paper presents a wireless deformation monitoring system based on silicon whiskers used as strain-sensitive elements embedded into a Wheatstone bridge. One of the bridge's four arms includes a silicon whisker sensor, while the others use 350  $\Omega$  precision tantalum resistors, ensuring thermal stability. The analogue output of the bridge is amplified and digitized by an HX711 ADC and processed by an Arduino-compatible microcontroller, which transmits the data via Wi-Fi. For thermal compensation, a "bridge within a bridge" configuration is used, allowing real-time correction of temperature-induced drift.

Experimental validation was carried out on a water pipeline segment under simulated pressures of up to 12 bar. The silicon whisker-based sensors demonstrated a stable gauge factor of  $\sim 120 \pm 10\%$  and a thermal resistance drift within  $+(0.1 \pm 0.02)\%/^{\circ}\text{C}$  over the temperature range  $-150$  to  $+200$   $^{\circ}\text{C}$ . The system reliably measured strain up to  $\pm 5 \cdot 10^{-3}$  (0.5%), matching expected deformations in steel pipeline applications. The results of the extended temperature test showed that when heated to  $+350^{\circ}\text{C}$ , the measurement error caused by the temperature coefficient of resistance does not exceed 1.2% after digital correction. Therefore, for the practical system, a "bridge-in-a-bridge" thermal compensation scheme was used, where one of the arms acts as a reference thermal control link.

The proposed system offers a compact solution for real-time strain monitoring in industrial settings. Its wireless functionality, thermal resilience, and measurement precision make it highly suitable for continuous diagnostics and early fault detection.

Keywords: silicon whisker, strain sensor, Wi-Fi, Arduino Uno, HX711, ESP8266, pipeline monitoring.

## REFERENCES

1. 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, vol. 20, no. 3, article 826. <https://doi.org/10.3390/s20030826>
2. *European Pipeline Incident Study 2024*. EPRS, Brussels, 2025, 112 p.
3. HBM GmbH. *Drift in Bonded Foil Strain Gauge-Based Sensors*. Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH; 2025. Available at: <https://www.hbm.com/tw/6218/drift-in-bonded-foil-strain-gauge-based-sensors>
4. Fan Y., Shen Z., Zhou X. et al. Highly sensitive strain sensor from topological-structure modulated dielectric elastic nanocomposites. *Advanced Electronic Materials*, 2022, vol. 7, iss. 1, article 2101190. <https://doi.org/10.1002/admt.202101190>
5. Wu T., Liu G., Fu Sh., Xing F. Recent progress of fiber-optic sensors for the structural health monitoring of civil infrastructure, *Sensors*, 2020, vol. 20, iss.16, article 4517. <https://doi.org/10.3390/s20164517>.
6. HBM GmbH. An analysis of the cost-effectiveness of optical-technology systems. *Hottinger Brüel & Kjær*, 2024. Available: <https://www.hbm.com/en/9280/cost-effectiveness-of-optical-technology/>
7. Flores-Bravo J.A., Madrigal J., Zubia J., Sales S., Villatoro J. Coupled-core fiber Bragg gratings for low-cost sensing. *Scientific Reports*, 2022, vol. 12, article 1280. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-05313-9>
8. Druzhynin A.O., Maryamova I.I., Kutakov O.P. [Sensors of mechanical quantities based on filamentary crystals of silicon, germanium and  $A_3B_5$  compounds]. Lviv: Publishing House of Lviv Polytechnic National University, 2015. 232 p. (Ukr)



Copyright: © 2025 by the authors. Licensee: Politekhperiodika, Odesa, Ukraine. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).