

Р. Б. Нікітін¹, – ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-6454-0005>,
Д. І. Конотоп², – ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6989-5277>

СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ МОНІТОРИНГУ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ КОНСТРУКЦІЙ

Ua

Автоматизовані системи моніторингу технічного стану конструкцій набули поширення в галузях, де забезпечення експлуатаційної надійності є критично важливим. Контроль напружено-деформованого стану (НДС) дозволяє своєчасно виявляти відхилення у роботі конструктивних елементів та прогнозувати їх подальший стан. Проблематика полягає у складності розробки та впровадження таких систем у навчальному процесі й прикладних дослідженнях унаслідок високих вимог до технічного рівня компонентів і методів обробки даних. Метою роботи є узагальнення сучасних підходів до побудови автоматизованих систем моніторингу НДС, що ґрунтуються на тензометричних і оптичних принципах вимірювання. У межах огляду проаналізовано типові архітектури систем моніторингу, наведено класифікацію, охарактеризовано сенсорні елементи, засоби збору й обробки сигналів, а також способи реєстрації та інтерпретації результатів вимірювання. У результаті визначено загальні риси сучасних підходів, окреслено можливості їх адаптації до навчальних та дослідницьких задач, а також сформовано основу для подальших прикладних розробок у сфері діагностики технічного стану конструкцій.

En

Automated systems for monitoring the technical condition of structures have become widespread in engineering domains where operational reliability is of critical importance. Monitoring the stress–strain state (SSS) enables timely detection of deviations in the performance of structural elements and supports forecasting of their future behavior. The main challenge lies in the complexity of developing and implementing such systems in educational and applied research settings due to high requirements for hardware components and data processing methods. The aim of this work is to generalize current approaches to the development of automated systems for SSS monitoring based on strain gauge and optical measurement principles. The review analyzes typical system architectures, provides a classification, describes sensor elements, signal acquisition and processing methods, as well as techniques for data recording and interpretation. As a result, the common features of modern approaches are identified, the potential for adaptation to educational and research tasks is outlined, and a foundation is established for further applied developments in the field of structural diagnostics.

Вступ

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

² КПІ ім. Ігоря Сікорського

Сучасні системи моніторингу напружено-деформованого стану (НДС) зазвичай реалізуються із використанням закритих апаратно-програмних рішень та дороговартісного обладнання, що робить їх недоступними для широкого впровадження в умовах обмеженого бюджету. Така ситуація особливо актуальна для освітніх, дослідницьких і прикладних інженерних проєктів, які потребують відкритих платформ для апробації нових підходів. Крім того, у науковій літературі бракує систематизованих оглядів, присвячених порівнянню технологій систем моніторингу технічного стану у контексті можливості побудови недорогих, адаптивних систем на базі мікроконтролерів із відкритою архітектурою та програмним забезпеченням (*ESP32, Arduino*), доступних сенсорів і цифрової обробки сигналів.

Системи моніторингу технічного стану конструкцій призначені для виявлення змін напружено-деформованого стану елементів під дією експлуатаційних навантажень. Одним з найпоширеніших методів вимірювання деформацій є тензометрія, що ґрунтується на реєстрації зміни електричного опору провідника внаслідок його пружної деформації.

Архітектура сучасних систем моніторингу охоплює кілька функціональних рівнів: сенсорний, вимірювальний, обчислювальний, комунікаційний і візуалізаційний. Сенсорні елементи забезпечують отримання первинної інформації про стан об'єкта. Найчастіше використовуються тензометричні або оптоволоконні датчики, кожен з яких має власні переваги щодо точності, стабільності та умов експлуатації.

Обробка даних передбачає підсилення слабких сигналів, їх перетворення у цифрову форму, попередню фільтрацію та передачу для подальшого аналізу. Для візуалізації й архівування використовуються локальні або мережеві програмні засоби, які забезпечують збереження результатів і підтримують інтерактивний інтерфейс взаємодії з користувачем.

Класифікація систем моніторингу технічного стану конструкцій ґрунтується на низці параметрів, що відображають архітектуру, функціональні можливості та умови експлуатації. Серед основних ознак виділяють: тип об'єкта (авіаційні, будівельні, інфраструктурні тощо), режим роботи (періодичний або безперервний), спосіб встановлення сенсорів (вбудовані чи накладні), структуру сенсорної мережі (локальна або розподілена), тип обробки даних (автономна, централізована, гібридна), а також рівень функціональної інтеграції (пасивна або активна система)

Застосування тієї чи іншої конфігурації зумовлюється технічними вимогами до точності, швидкості реагування, можливості автономної роботи та адаптивності до змінних умов. У дослідницькому та освітньому середовищі найбільш доцільними є гнучкі, модульні рішення з можливістю безперервного моніторингу та масштабування сенсорної мережі.

Постановка задачі

Провести огляд сучасних підходів до побудови систем моніторингу напружено-деформованого стану конструкцій, сенсорних технологій і факторів, що впливають на ефективність роботи таких систем.

Технічні засади побудови систем моніторингу

Зміни опору провідника внаслідок його пружної деформації виявляються за допомогою мостових схем, зокрема моста Вітстона, що дозволяє фіксувати навіть незначні відхилення параметрів [1] (рис. 1).

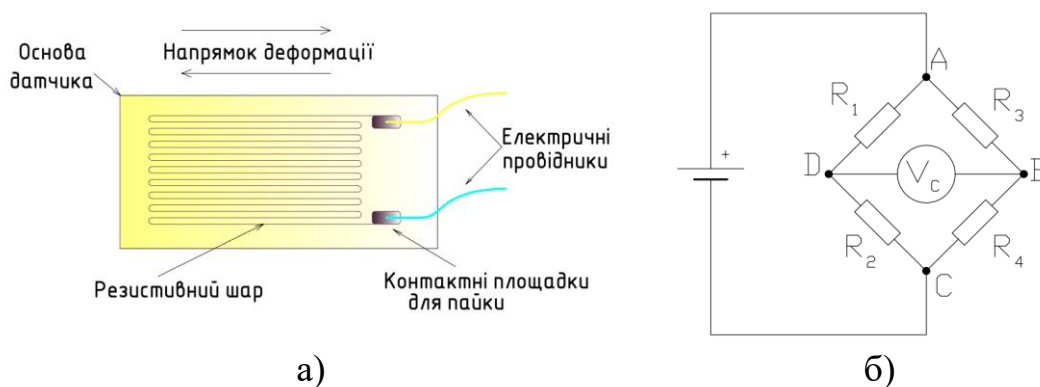


Рис. 1. Схема тензометричного датчика (а) та моста Вітстона (б).

Додатковими елементами обробки даних є системи живлення та канали зв'язку, вибір яких залежить від режиму роботи, умов експлуатації та вимог до автономності [2].

Класифікація систем моніторингу технічного стану конструкцій представлена на рис. 2.



Рис. 2. Класифікація систем моніторингу

Psuj i Szymanik [3] розглядають сучасні напрями розвитку структурного моніторингу, підкреслюючи зростаючу роль автоматизованої обробки даних у системах спостереження за технічним станом конструкцій. Автори зазначають, що ефективність такого моніторингу залежить не лише від сенсорного оснащення, а й від здатності обробляти великі масиви даних для виявлення пошкоджень та оцінки залишкового ресурсу. Вони також узагальнюють сучасні тенденції, серед яких — використання нових типів сенсорів, складних алгоритмів аналізу сигналів, а також міждисциплінарних підходів до забезпечення надійності конструкцій у реальному часі.

У розділі 8 монографії *Structural Health Monitoring: Damage Detection Systems for Aerospace* [4] докладно розглянуто методи вимірювання деформацій у складних конструкціях авіаційного призначення. Автори підкреслюють ключову роль тензометричних сенсорів як джерела точних даних про напружено-деформований стан конструкцій у режимі реального часу. Особлива увага приділяється двом основним класам сенсорів: фольговим тензодатчикам і оптоволоконним сенсорам, зокрема решіткам Брега. Розглянуто принципи дії, умови монтажу, температурну компенсацію, потребу в калібруванні та вимоги до зчитувального обладнання.

У випадку оптоволоконних сенсорів ідеться про використання спектральних аналізаторів і фотонних інтерферометрів, які мають високу вартість і потребують спеціалізованого обслуговування. Для традиційних тензодатчиків зазвичай застосовується лабораторне або промислове обладнання для підсилення та обробки сигналів, що також виходить за межі доступного для масового використання. Такий підхід виправданий у рамках високоточних аерокосмічних програм, однак обмежує застосування у менш критичних або освітніх проектах.

У роботі Кузьмич Л. В. [5] розглянуто підхід до синтезу методу вимірювання напружено-деформованого стану складних конструкцій з урахуванням дестабілізуючих факторів, що впливають на точність тензометричних вимірювань. Авторка детально аналізує такі джерела похибок, як температурні впливи, випадкові шуми, механічний гістерезис, пружна післядія та повзучість. Запропоновано математичну модель функції перетворення сигналу, яка враховує ці фактори, а також можливість їх автоматичної корекції на основі допоміжних вимірювань. У роботі обґрунтовується доцільність використання цифрової обробки сигналів для зменшення систематичних похибок, зокрема нелінійності та температурної залежності.

Водночас, запропонований підхід передбачає надмірну залежність від програмної компенсації похибок без достатньої уваги до апаратної частини системи: фізичного калібрування сенсорів, стабільності джерел живлення, монтажних умов. Значна кількість емпіричних коефіцієнтів, необхідних для моделювання, знижує відтворюваність результатів. Крім того, відсутнє експериментальне підтвердження запропонованої моделі в реальних умовах. Це обмежує прикладну цінність методики, особливо в кон-

тексті побудови практичних систем для моніторингу напружено-деформованого стану конструкцій.

У роботі *Chen* та ін. [6] проведено експериментальне дослідження точності та стабільності волоконно-оптичних сенсорів типу *Fiber Bragg Grating* і *Optical Frequency Domain Reflectometry* при механічному навантаженні. Сенсори було закріплено на консольній балці в зоні максимальних нормальних напружень, де також розміщено класичний резистивний тензодатчик для порівняння. В якості еталонного орієнтиру використовувалася модель, побудована за допомогою методу скінченних елементів. За результатами експерименту зафіксовано високу узгодженість між оптоволоконними сенсорами, тензодатчиком і чисельною моделлю: розбіжність не перевищувала 2 % для порівняння з тензодатчиком і 5 % для *FEM*. Також підтверджено стабільність сигналів при циклічному навантаженні та високу лінійність залежностей. Попри це, дослідження зосереджено виключно на властивостях сенсорів, без розгляду повноцінної системної реалізації. Зчитування виконувалося за допомогою лабораторного обладнання, що обмежує придатність результатів для вбудованих або польових систем. Не розглядаються програмні аспекти, збереження та обробки даних, а також поведінка в умовах впливу зовнішніх факторів. Робота демонструє потенціал сенсорної технології, однак не є прикладом реалізованої системи спостереження за технічним станом конструкцій.

У роботі *Silva* та ін. [7] представлено спробу створення недорогої системи для вимірювання механічних деформацій на основі фольгових тензодатчиків та мікроконтролера *Arduino Uno*. У теоретичній частині докладно розглянуто принцип роботи тензодатчиків, схеми мосту Вітстона у чверть-, напів- та повному виконанні, а також аналітичні залежності для обчислення деформацій у простих конструкціях. Практична частина містить опис експериментального стенду, що складається із *Arduino Uno*, модуля *Nanoshield Load Cell* та одного тензодатчика. Систему протестовано на консольній балці та консольному валу. Отримані результати узгоджуються з аналітичними та числовими розрахунками, що підтверджує базову працездатність конструкції. Разом з тим, програмна частина реалізації фактично відсутня: автори не наводять коду, не аналізують алгоритмів обробки сигналів або процесів калібрування, обмежуючись загальною згадкою про наявність прикладів у відкритому доступі. Це значно знижує прикладну цінність роботи як основи для практичного використання або подальшої модифікації системи. Відсутність системного підходу до аналізу сигналу, шумозахисту і валідації результатів обмежує дослідження рівнем базової демонстрації концепту.

У дослідженні *Experimental investigation of strain sensitivity for surface bonded fibre optic sensors* [8] проаналізовано вплив типу клею на ефективність передачі деформації від конструкції до волоконно-оптичного сенсора. За основу взято решітки Брега, приклеєні до зразків з армованого вуг-

лецевого полімеру. У роботі порівнюються два типи клею: ціаноакрилатний та епоксидний. Результати свідчать про те, що вибір клею суттєво впливає на коефіцієнт чутливості сенсора до деформації і, відповідно, може зумовлювати значні похибки у вимірюваннях. З метою підвищення точності запропоновано використовувати коригувальні коефіцієнти, що враховують властивості клею та особливості монтажу. Залежність результатів від монтажних факторів підводить до висновку, що найнадійнішим підходом до забезпечення достовірності є калібрування сенсорної системи безпосередньо на об'єкті вимірювання.

У статті *Investigation on Flight Load Calibration of Aircraft Composite Wing Based on Strain Gauge Measurement* [9] досліджено метод визначення аеродинамічних навантажень на композитне крило літака під час польоту за допомогою тензометричних вимірювань. Основну увагу приділено задачі калібрування навантажень, які в умовах реальної експлуатації можуть істотно відрізнятись від прогнозованих на основі теоретичних або чисельних моделей. Запропоновано метод, заснований на встановленні системи тензодатчиків у характерних точках конструкції та застосуванні матричного підходу зворотної інженерії, який дає змогу відновлювати розподіл зовнішніх навантажень за локальними деформаціями. Описано проведення експериментальної програми, що включала статичне навантаження в лабораторних умовах і побудову матриці впливу між прикладеними силами та сигналами сенсорів. За твердженням авторів, використання цієї методики дозволяє знизити похибку до рівня менше 5 відсотків, що є суттєвим поліпшенням у порівнянні з традиційними підходами. Метод дає змогу здійснювати оцінку навантаження в реальному часі і може бути застосований у бортових системах спостереження за технічним станом літальних апаратів. Робота є прикладом практичного використання тензометрії для реконструкції повного силового навантаження, що діє на конструкцію, і демонструє важливість точного калібрування та просторового розміщення сенсорів.

Обмежена доступність промислових систем моніторингу технічного стану конструкцій унеможливорює їх широке застосування в умовах обмеженого фінансування, зокрема, в освітньому середовищі та прикладних лабораторних дослідженнях. У зв'язку з цим доцільним є використання апаратно-програмних засобів загального призначення з відкритою архітектурою. Комбінація тензометричних сенсорів з недорогими модулями підсилення і аналого-цифрового перетворення сигналів, а також мікроконтролерів з інтегрованими засобами обробки та передачі даних створює технічні передумови для побудови автоматизованих систем моніторингу напружено-деформованого стану конструкцій. Такі рішення можуть бути адаптовані до завдань попереднього оцінювання механічного стану об'єктів, збирання експериментальних даних та проведення демонстраційних вимірювань.

Перспективними напрямками є розробка типових конфігурацій вимірювальних вузлів, реалізація алгоритмів цифрової обробки сигналів, забезпечення температурної компенсації, інтеграція з візуалізаційними та аналітичними програмними засобами. У подальшому це може бути використано як основа для створення адаптивних систем контролю технічного стану, орієнтованих на дослідницькі та навчальні потреби.

Висновки

У роботі представлено систематизований огляд сучасних підходів до побудови автоматизованих систем моніторингу напружено-деформованого стану конструкцій. Проаналізовано класифікацію таких систем за технічними ознаками, описано структуру типових рішень та охарактеризовано основні сенсорні технології, зокрема тензометричні та оптоволоконні.

Розглянуто низку факторів, що впливають на ефективність роботи систем, серед яких: архітектура, доступність компонентів, відкритість програмного забезпечення, умови експлуатації, особливості монтажу та методи компенсації температурної похибки.

Встановлено, що більшість промислових рішень є закритими, дорогартісними та орієнтованими на специфічні задачі. Водночас існують можливості для створення більш доступних систем на основі фольгових тензодатчиків, цифрових підсилювачів і мікроконтролерів.

Список використаної літератури

1. *K. Hoffmann*, An Introduction to Measurements using Strain Gages. Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, Darmstadt, 1989. [Online]. Available: http://elektron.pol.lublin.pl/users/elekp/MNEQ_english/Hoffmann_An_Introduction_to_Measurements_using_Strain_Gages.pdf
2. *B. López-Castro, A. G. Haro-Baez, D. Arcos-Aviles, M. Barreno-Riera, and B. Landázuri-Avilés*, "A Systematic Review of Structural Health Monitoring Systems: Architecture, Data Processing, and Visualization," *Sensors*, vol. 22, no. 23, p. 9206, 2022. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/1424-8220/22/23/9206>
3. *G. Psuj and B. Szymanik*, "Structural Health Monitoring: Latest Applications and Data Analysis," *Applied Sciences*, vol. 13, no. 13, p. 7617, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/app13137617>
4. *S. Vanlanduit, M. Sorgente, A. R. Zadeh, A. Güemes, and N. Faisal*, "Strain Monitoring," in *Structural Health Monitoring: Damage Detection Systems for Aerospace*, M. G. R. Sause and E. Jasiūnienė, Eds. Springer, 2021, pp. 219–241. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/978-3-030-72192-3_8
5. *L. V. Kuzmych*, "Synthesis of Measurement Method of Stressed — Deformed Condition of Complex Structures," *Metrology and Instruments*, no.

- 3(77), pp. 12–18, 2019. DOI: 10.33955/2307-2180(3)2019.12-18. https://nure.ua/wp-content/uploads/2019/Scinetific_editions/mp-3-2019.pdf
6. B. Chen, J. Yang, A. Li, M. Zhang, J. Li, and Z. Wang, "Strain Measurement Technology and Precision Calibration Experiment Based on Flexible Sensing Fiber," *Sensors*, vol. 24, no. 12, p. 3811, 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/s24123811>
 7. A. L. Silva, M. Varanis, A. G. Mereles, C. Oliveira, and J. M. Balthazar, "A Study of Strain and Deformation Measurement Using the Arduino Microcontroller and Strain Gauges Devices," *Revista Brasileira de Ensino de Física*, vol. 41, no. 3, p. e20180206, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2018-0206>
 8. "Experimental investigation of strain sensitivity for surface bonded fibre optic sensors," *Sensors and Actuators A: Physical*, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2020.111833>
 9. X. Zhao, Y. Li, Z. Yun, and W. Zhang, "Investigation on flight load calibration of aircraft composite wing based on strain gauge measurement," *Theoretical and Applied Mechanics Letters*, vol. 14, no. 5, p. 100540, 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.taml.2024.100540>
 10. C. R. Farrar and K. Worden, *Structural Health Monitoring: A Machine Learning Perspective*. Wiley, 2012. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1002/9781118443118>
 11. M. O. Kaman, M. A. Yilmaz, G. Aytimur, E. Altin, and S. Erdem, "Structural Health Monitoring by Using Fiber Optic Sensors in Composite Materials," *Proceedings of the International Conference on Advances in Composite Materials*, 2022. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/364168532_Structural_Health_Monitoring_by_Using_Fiber_Optic_Sensors_in_Composite_Materials
 12. T. H. Loutas and V. Kostopoulos, "Health Monitoring of Aerospace Structures Using Fibre Bragg Gratings Combined with Advanced Signal Processing and Pattern Recognition Techniques," *Strain*, vol. 47, no. s1, pp. e234–e244, 2011. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1111/j.1475-1305.2011.00820.xWiley Online Library+2>
 13. A. Rytter, *Vibration Based Inspection of Civil Engineering Structures*. Department of Building Technology and Structural Engineering, Aalborg University, Denmark, 1993. [Online]. Available: <https://core.ac.uk/download/pdf/60434156.pdf>.

Received: 19 March 2025 / Revised: 15 April 2025 / Accepted: 05 May 2025



© The Author(s)2025. Published by Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute
This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons License Attribution4.0 International (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited