

ІННОВАЦІЙНІ ПІДХОДИ ДО ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ТЕНЗОРЕЗИСТОРНИХ ВИМІРЮВАНЬ МЕХАНІЧНИХ ВЕЛИЧИН

Владислав Друзякін , аспірант

Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Україна

Черепашук Григорій Олександрович , д.т.н., проф.

Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Україна

Анотація

У статті розглядаються інноваційні підходи до підвищення точності вимірювань механічних величин тензосенсорами. Особлива увага приділяється джерелам додаткових похибок, спричинених зовнішніми факторами, такими як температура, вібрація, нестабільність потужності та структурні недосконалості сенсора. Представлено аналітичний огляд сучасних методів компенсації похибок та перспективних технологій у галузі сенсорних вимірювань.

Ключові слова

Тензометричні сенсори, механічні величини, похибка, точність, компенсація, інновація, сигнал, алгоритм, деформація, мікропроцесор.

1. Вступ

Аналіз наукових джерел свідчить про активний розвиток напрямків, пов'язаних з мінімізацією похибок вимірювань тензосенсорів. Кузьмич Л.В. вказує на переваги використання схем активної температурної компенсації та впровадження адаптивних цифрових фільтрів для усунення шуму [1, с.15]. У статті запропоновано нові конструкції мембранних елементів тензосенсорів, які зменшують механічні резонанси та покращують лінійність характеристик. Згідно з дослідженням [2], використання мікроконтролерів з можливістю локального калібрування в режимі реального часу значно підвищує надійність зчитування даних.

2. Недоліки

У сучасних вимірювальних системах точність тензосенсорів є критичним фактором, що визначає ефективність контролю механічних параметрів об'єктів. За даними [3, с.52], важливу роль у зниженні точності відіграють вторинні ефекти, що виникають під час вимірювань, наприклад, температурний дрейф.

3. Мета

Метою цієї статті є визначення ефективних інноваційних підходів до зменшення додаткових похибок у вимірюваннях механічних величин тензосенсорами.

4. Виклад основного матеріалу

Тензометричні сенсори працюють на основі зміни опору чутливого елемента під дією механічної деформації. Однак ця зміна супроводжується різними побічними ефектами, що впливають на електричний сигнал. Одним з найбільш суттєвих джерел похибки є температура, яка змінює як опір матеріалу, так і механічні характеристики середовища [11]. Відомим методом боротьби з тепловою похибкою є використання мостових схем з

температурною компенсацією, але останнім часом активно впроваджуються алгоритмічні підходи, засновані на температурному моделюванні та машинному навчанні [4, с. 52].

Іншим напрямком є підвищення точності шляхом використання мікропроцесорної обробки сигналів безпосередньо на сенсорному модулі. Це дозволяє реалізувати високоточні фільтри, коригувальні таблиці та алгоритми згладжування, що мінімізують шум і нестабільність. За даними, ефективність такого підходу значно перевищує традиційні аналогові методи [3].

У таблиці 1 демонструється ефективність різних методів корекції помилок на прикладі експериментального дослідження тензосенсорів, що піддаються температурним та динамічним навантаженням.

Метод компенсації	Середня похибка, %	Середня похибка після, %	Зменшення помилок, %	Коментар щодо ефективності
Без компенсації	3.2	—	—	Базовий рівень похибки, спричинений температурою
Корекція температури (аналогова)	3.2	1.38	56,9	Часткове зменшення похибки під час нагрівання
Цифрова фільтрація (ФНЧ 2-го порядку)	3.2	0,86	73.1	Зниження шуму, не компенсує повністю тепловий зсув
Адаптація мікропроцесора (PID + ML)	3.2	0,47	85,3	Найкращі результати за змінних зовнішніх умов
Комбінований метод (фільтр + адаптація)	3.2	0,32	90,0	Найстабільніший сигнал у динамічному режимі

Таблиця 1 - Порівняльна оцінка точності після застосування різних методів компенсації похибок

У процесі дослідження ефективності різних методів компенсації похибки під час вимірювання механічного навантаження за допомогою тензосенсорів було змодельовано п'ять варіантів обробки сигналів. Усі експерименти проводилися з умовним навантаженням до 1000 Н у середовищі зі змінною температурою, що дозволило виявити вплив температурних зрушень на точність вимірювання. Початкове значення середньої похибки без компенсації становило 3,2%, що є типовим показником для аналогових тензосенсорних мостів без зовнішніх фільтрів або алгоритмів корекції. Цей рівень похибки слугував базовим стандартом, за яким оцінювалася ефективність інших методів. Особлива увага була приділена методам цифрової фільтрації, мікропроцесорної адаптації та їх комбінованим формам.

Результати застосування аналогової температурної корекції показали, що середня похибка зменшилася до 1,38%. Це свідчить про значне, хоча й не максимальне, покращення точності. Методи аналогової корекції базуються на прямій залежності опору тензосенсора

від температури, тому їх ефективність обмежується здатністю компенсувати лише лінійні зміни [5, с.120].

Наступним кроком стало тестування цифрової фільтрації. Після її впровадження середня похибка зменшилася до 0,86%, що вже є значним покращенням порівняно з аналоговою компенсацією. Такий підхід дозволяє ефективно фільтрувати випадкові коливання сигналу, спричинені електромагнітними перешкодами або мікровібраціями системи.

Найпереконливіші результати були отримані після застосування мікропроцесорної адаптації. Цей метод поєднує ПІД-керування з елементами машинного навчання, що дозволяє системі адаптуватися до змін зовнішніх умов у режимі реального часу. Результатом стало зниження похибки до рівня 0,47%, що є найкращим показником серед усіх розглянутих варіантів. Такий підхід передбачає не лише компенсацію температурних та механічних зрушень, але й врахування довгострокових тенденцій зміни сигналу, що забезпечує вищий рівень метрологічної надійності.

Кульмінацією аналізу стала реалізація комбінованого методу, що поєднує переваги цифрової фільтрації та мікропроцесорної адаптації. Такий підхід дозволив досягти найнижчого рівня похибки – 0,32%. Цей результат демонструє синергію методів: цифрова фільтрація усуває перехідні перешкоди, а адаптивний алгоритм адаптується до глобальних змін.

Аналіз дозволив чітко простежити залежність точності вимірювання від складності та адаптивності методів компенсації. Зокрема, відносне зменшення похибки на 90% за допомогою комбінованого підходу свідчить про потенціал інтелектуальних систем керування сигналами [7, с 42]. Дослідження показало, що сучасні вимоги до точності вимірювань неможливо виконати, використовуючи лише аналогові або базові цифрові методи. У реальних умовах експлуатації сенсорів, особливо у випадках багатокомпонентного навантаження та складних температурних умов, лише інтелектуальні комбіновані системи можуть гарантувати високий рівень надійності.

Інший підхід полягає в оптимізації геометрії сенсорного елемента. Впровадження композитних матеріалів з низьким коефіцієнтом теплового розширення ще більше зменшує вплив теплових навантажень. Інноваційні підходи до підвищення точності вимірювань механічних величин тензосенсорами залишаються в центрі наукових та прикладних досліджень в умовах зростаючих вимог до метрологічної надійності та стабільності результатів. Одним з ключових напрямків удосконалення є впровадження технологій цифрової обробки сигналів, які мінімізують вплив шуму та температурних зрушень.

Важливу роль відіграє інтеграція адаптивних фільтрів та алгоритмів машинного навчання, які дозволяють покращити якість інтерпретації даних тензосенсорних мостів у режимі реального часу. Це значно підвищує точність визначення напружено-деформованого стану об'єктів, одночасно зменшуючи похибки, пов'язані із зовнішніми впливами [8, с 15]. Особлива увага приділяється розробці сенсорних систем з комбінованими структурами, де тензометричні елементи працюють у поєднанні з іншими типами сенсорів, наприклад, оптичними або ємнісними. Такий гібридний підхід дозволяє реалізувати принцип багатоканальної перевірки вимірювань, підвищуючи загальну достовірність результатів.

Водночас у вимірювальній практиці широко використовуються технології компенсації температурних дрейфів шляхом використання коригувальних сигналів або моделювання температурної поведінки матеріалу на основі експериментальних даних. У таблиці 1 наведено приклади інноваційних методів теплової компенсації та їх вплив на зменшення похибок у тензометричних системах.

Підвищення точності значною мірою залежить від геометрії та технології виготовлення тензосенсора. Сучасні дослідження доводять ефективність наноструктурованих матеріалів,

таких як графен або кремнієві нанодроти, які забезпечують значно вищу чутливість порівняно з традиційними металевими сплавами. Технологічне вдосконалення процесів фотолітографії, травлення та мікромеханічної обробки також відіграє важливу роль у стабілізації електричних параметрів тензосенсорів [9, с. 150].

Іншим аспектом є цифрова обробка сигналів за допомогою вейвлет-перетворень та регресійного аналізу, що дозволяє виявляти слабкі коливання на тлі сильного шуму. Така обробка надзвичайно актуальна в умовах складних польових випробувань, де важливо забезпечити стабільність вимірювання без втрати часу на перекалібрування [11]. Використання вейвлетів також дозволяє збільшити роздільну здатність сигналу без фізичного здавлення елементів деформації, що робить метод особливо корисним у неінвазивних дослідженнях.

Інноваційним також є калібрування тензометричних систем за допомогою нейронних мереж. Такі системи навчаються під час роботи та дозволяють прогнозувати дрейф параметрів або втрату точності на ранніх стадіях. Синергетичне поєднання традиційної метрології з нейромережевими підходами вже продемонструвало ефективність у промисловому середовищі [3].

Окремо варто згадати розробку бездротових тензометричних систем, які забезпечують автономність та мобільність вимірювань. Використання енергоефективних протоколів зв'язку та схем енергозбереження дозволяє розгортати масштабовані сенсорні мережі на об'єктах будь-якої складності. У таких системах акцент робиться не лише на точності, але й на надійності передачі даних, для чого використовуються алгоритми корекції помилок та шифрування. Варто відзначити перспективний розвиток інтегрованих систем самодіагностики тензосенсорів. Такі системи дозволяють виявляти дрейф характеристик під час роботи, своєчасно виконувати перекалібрування або повідомляти про зниження точності [2].

5. Висновок

У статті проаналізовано сучасні проблеми точності вимірювань тензосенсорами та запропоновано інноваційні шляхи їх вирішення. Найбільш ефективними методами виявилися мікропроцесорна обробка сигналів, цифрова компенсація похибок та конструктивна оптимізація сенсорних елементів. Використання цих підходів дозволяє значно знизити рівень додаткових похибок, підвищити надійність та довговічність вимірювальних систем.

У рамках статті було змодельовано та проаналізовано п'ять варіантів обробки сигналів. Найвищу ефективність продемонстрував комбінований метод, який поєднує цифрову фільтрацію та мікропроцесорну адаптацію. Такий підхід дозволяє досягти найнижчого рівня похибки – 0,32%, що виводить систему на рівень точності, необхідний для критичних застосувань. Усі варіанти оцінювалися з однаковими вхідними параметрами, що забезпечує об'єктивність порівняння. Отримані результати можуть бути використані як основа для подальших прикладних розробок у галузі точного машинобудування, медичних технологій, авіаційних приладів та інших високоточних областях.

Конфлікт інтересів

Автори стверджують, що немає жодних фінансових чи інших потенційних конфліктів щодо цієї роботи.

Посилання

- [1] Кузьмич, Л.В. (2019). Синтез методу вимірювання напружено – деформованого стану складних конструкцій [Синтез методу вимірювання напружено-деформованого стану складних конструкцій]. Метрологія та прилади – Метрологія та прилади, (3(77)), 12–18. <https://uacademic.info/ua/document/0519U001819> [українською мовою].
- [2] Тензорезистентні перетворювачі. Принцип Тензометричні перетворювачі. Принцип роботи. Отримано з <http://um.co.ua/9/9-7/9-78866.html> [українською мовою].
- [3] Перетворювачі механічних величина в електричній. Отримано з <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/269f3e91-f048-4213-8a7d-3c7909dd99f9/content> [українською мовою].
- [4] Попович, В.Є. (2023). Вдосконалення тензорезистентних перетворювачів для створення системи автоматичного керування у світло-дизайні : Дипломна бакалаврська Робота [Удосконалення тензометричних перетворювачів для створення систем автоматичного керування у світловому дизайні: бакалаврська дисертація]. Київ: Київський національний університет технологій та дизайну. https://er.knutd.edu.ua/bitstream/123456789/23799/4/Dyplom105_Popovich_Gorbachuk.pdf [українською мовою].
- [5] Биков, В. В. (2024). Тензометричні електронні ваги з мікропроцесорним Керування : Магістерська кваліфікація робота [Тензометричні електронні ваги з мікропроцесорним керуванням: Магістерська кваліфікаційна робота]. Вінниця: Вінницький національний технічний університет. <https://iq.vntu.edu.ua/repository/getfile.php/9793.pdf> [українською мовою].
- [6] Бабич І. І. (2019). Магістерська дисертація [магістерська робота]. К.: Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/45496272-ffec-41b1-92f2-3e41a4a7bc0b/content> [укр.].
- [7] Вимірювання механічних величина за допомогою електричних перетворювачів : Методичні Вимірювання механічних величин за допомогою електричних перетворювачів: Методичні вказівки. (2025). Житомир: Житомирська політехніка. https://learn.ztu.edu.ua/pluginfile.php/324018/mod_resource/content/2/ [українською мовою].
- [8] Розробка методів та засоби підвищення метрологічних характеристика дистанційних вимірювання [Розробка методів та засобів для покращення метрологічних характеристик дистанційних вимірювань]. (2020). Київ: Національний авіаційний університет. <https://nau.edu.ua/ua/menu/science/zagalna-informatsiya/naukovi-dosyagnennya.html> [українською мовою].
- [9] Контрольно-вимірювальні прилади системи керування : Навчальний Контрольно - вимірювальні прилади систем керування: Підручник. (2021). Київ: Національний технічний університет України «КПІ імені Ігоря Сікорського». [українською мовою].
- [10] Засоби вимірювальної техніки неелектричних величин : Навчальний посібник [Вимірювальні прилади для неелектричних величин: Підручник]. (2022). Харків: Харківський національний університет Повітряних Сил. https://moodle.hnups.mil.gov.ua/pluginfile.php/56585/mod_resource/content/1/ [українською мовою].
- [11] Черепашук Г. О. та Друзякін В. В. (2024). Додаткові похибки у тензорезисторних датчиках [Додаткові похибки тензодатчиків], (26), 113. <http://www.konferenciaonline.org.ua/ua/article/id-2085/> [українською мовою].

Дані про авторів

Владислав Друзякін

Аспірант

Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Україна

Електронна пошта: drz.vladadd@gmail.com

Контактний телефон : +380509398476

Григорій Олександрович

кандидат технічних наук, доцент, професор

Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Україна

Електронна пошта: cherepaschuk@bigmir.net

Контактний телефон : +380503008233