

СУЧАСНІ МЕТОДИ КАЛІБРУВАННЯ ЧАСТОТНИХ СЕНСОРІВ ТЕМПЕРАТУРИ

¹ Вінницький національний технічний університет

Анотація

У роботі представлено огляд сучасних методів калібрування частотних температурних сенсорів, зокрема аналогові та цифрові підходи. Наведено порівняльний аналіз методів за такими характеристиками, як точність, вартість і рівень автоматизації. Визначено перспективи розвитку калібрувальних технологій із використанням алгоритмічної компенсації та машинного навчання.

Ключові слова: частотні температурні сенсори, калібрування, машинне навчання, автоматизація

Abstract

The paper provides modern calibration methods for frequency temperature sensors, including analog and digital approaches. A comparative analysis of methods is provided based on characteristics such as accuracy, cost, and automation level. The prospects for the development of calibration technologies using algorithmic compensation and machine learning are identified.

Keywords: frequency temperature sensors, calibration, algorithmic compensation, machine learning, automation

Вступ

Частотні температурні сенсори відіграють надзвичайно важливу роль у забезпеченні високої точності вимірювань температури в широкому спектрі застосувань, таких як промислові процеси, медичні прилади та наукові експерименти. Їхня популярність пояснюється здатністю працювати в складних умовах та забезпечувати стабільний рівень точності, проте існує низка технічних викликів, які потребують уваги. Одним із найбільш суттєвих недоліків є похибки вимірювань, що зазвичай виникають через декілька факторів. До них належать нестабільність параметрів електронних компонентів, вплив зовнішнього середовища, як-от коливання температури чи вологості, а також поступове старіння матеріалів сенсора. Усунення цих негативних впливів і зведення похибок до мінімуму вимагає грамотного та системного підходу до калібрування ЧТС, яке залишається критично важливим елементом для досягнення оптимальної роботи цих приладів.

Сьогодні для калібрування частотних температурних сенсорів використовуються різноманітні підходи, які можна умовно поділити на дві основні категорії: аналогові та цифрові методи. Аналогові методи передбачають застосування спеціальних еталонних пристроїв, що забезпечують порівняння показників сенсора з відомими значеннями, а також використання зовнішніх компенсаторів для врахування нестабільності в роботі пристрою. Цей підхід перевірений часом і відзначається надійністю, втім, має обмеження через високу трудомісткість процесу та залежність від людського фактору.

Цифрові методи калібрування, навпаки, опираються на розвиток обчислювальних технологій та алгоритмів. Сучасні системи використовують концепції алгоритмічної компенсації похибок і навіть методи машинного навчання задля підвищення точності аналізу й прогнозування змін характеристик сенсора. Такі методи дають нові можливості для автоматизації процесу калібрування й скорочення часу його виконання, але водночас залежать від якості моделі даних і потребують значної обчислювальної потужності.

Кожен із цих підходів має свої сильні сторони та недоліки, тож вибір конкретного методу часто визначається вимогами до точності, умовами експлуатації сенсорів та іншими технічними характеристиками. Особливої актуальності набуває інтеграція методів калібрування у сучасні автоматизовані системи управління. Завдяки цьому можна досягти значного підвищення ефективності роботи пристроїв, зменшення впливу людського фактору, зниження помилок під час калібрування й довгострокового покращення стабільності результатів вимірювань.

Результати дослідження

Методи калібрування

Розглянемо існуючі методи калібрування та проведемо порівняння їх характеристик.

Аналогові методи

1. Еталонні калібрування

Використання температурних еталонів дозволяє забезпечити високу точність калібрування.

Сенсори порівнюються з сертифікованими еталонними пристроями, що працюють у стабільних умовах лабораторії. забезпечити високу точність калібрування. Сенсори порівнюються з сертифікованими еталонними пристроями, що працюють у стабільних умовах лабораторії. Основна проблема цього підходу – висока вартість та необхідність ручного налаштування [1].

2. Точкове калібрування

Сенсори калібруються при певних фіксованих температурах, наприклад, при температурі замерзання (0°C) і кипіння води (100°C). Це відносно дешевий метод, але він не враховує можливі нелінійності та зміни характеристик сенсора між контрольними точками [2].

3. Корекція через зовнішні компенсатори

Додаткові електронні схеми дозволяють зменшити похибку сенсора шляхом компенсації температурних змін та впливу зовнішніх факторів. Цей метод підходить для високоточних промислових сенсорів, але може потребувати складного налаштування та додаткових компонентів [3].

Цифрові методи

1. Алгоритмічна компенсація

Програмне забезпечення аналізує похибку та застосовує коригувальні коефіцієнти до отриманих значень. Найчастіше використовується у вбудованих мікропроцесорних системах для забезпечення більшої точності без потреби в додатковому обладнанні [4].

2. Використання машинного навчання

Використання великих обсягів даних для тренування моделей, які можуть передбачати та виправляти похибки вимірювань, є перспективним напрямом у сучасній сенсорній техніці. Для тренування моделей, які можуть передбачати та виправляти похибки вимірювань. Цей метод забезпечує найвищу точність, особливо в складних динамічних середовищах, але вимагає обчислювальних ресурсів та попереднього навчання моделей [5].

3. Автоматизовані калібрувальні системи

Інтелектуальні сенсорні системи, які можуть самостійно аналізувати похибку, враховувати зміну зовнішніх факторів і оновлювати свої параметри в режимі реального часу. Це перспективний метод для промислових IoT-систем і високоточних медичних приладів [6].

Таблиця 1. Порівняння характеристик методів калібрування

Метод	Точність	Вартість	Автоматизація
Еталонні калібрування	Висока	Висока	Низька
Точкове калібрування	Середня	Низька	Низька
Алгоритмічна компенсація	Висока	Низька	Висока
Машинне навчання	Дуже висока	Висока	Висока
Автоматизовані системи	Висока	Висока	Дуже висока

У таблиці представлено порівняльний аналіз різних методів калібрування частотних температурних сенсорів за трьома ключовими критеріями: точність, вартість і автоматизація.

Еталонні калібрування гарантують високу точність, однак вони потребують значних фінансових витрат і характеризуються низьким рівнем автоматизації, що обмежує їхню зручність для масового використання [7].

Точкове калібрування є більш доступним з фінансової точки зору, проте поступається в аспектах точності та автоматизації. Цей підхід підходить для задач, де вимоги до точності не є критично важливими.

Алгоритмічна компенсація забезпечує як високу точність, так і автоматизацію при помірних витратах, що робить її оптимальним вибором для багатьох сучасних застосувань.

Машинне навчання демонструє найвищу точність серед цифрових методів, проте вимагає значних

ресурсів для впровадження і має відносно високу собівартість.

Автоматизовані системи поєднують високу точність із максимальним рівнем автоматизації, що робить їх перспективними для промислових і наукових додатків із високими вимогами до точності, хоча їхня інтеграція є досить дорогою.

Перспективи розвитку калібрувальних технологій

Сучасний етап розвитку технологій калібрування частотних температурних сенсорів характеризується спрямованістю на досягнення максимальної точності вимірювань, підвищення рівня автоматизації процедур і зведення до мінімуму необхідності втручання з боку людини. Традиційні аналогові методи, хоча й забезпечують високу точність, виявляються недостатньо практичними через значні часові витрати та використання великої кількості ресурсів. Натомість цифрові підходи, зокрема застосування алгоритмічної компенсації похибок, інтеграція штучного інтелекту та впровадження машинного навчання, демонструють значний потенціал для оптимізації роботи сенсорних систем [8].

Результати аналізу свідчать, що найперспективнішим напрямом розвитку в цій галузі є використання можливостей машинного навчання для автоматичного усунення похибок сенсорів. Цей інноваційний підхід вдало поєднує високу точність і здатність динамічно адаптуватися до змінних умов навколишнього середовища. Його актуальність особливо очевидна для таких сфер, як промисловість, медицина та наукові дослідження, де параметри навколишнього середовища можуть варіюватися, а вимоги до точності вимірювань залишаються критично високими.

Застосування алгоритмів машинного навчання відкриває цілу низку переваг, зокрема можливість:

- Аналізувати дані та компенсувати похибки сенсорів у режимі реального часу, що забезпечує сталу точність навіть за складних умов.
- Підвищувати довговічність і стабільність роботи сенсорних систем, запобігаючи деградації їхніх характеристик із часом.
- Повністю автоматизувати процеси калібрування, усуваючи необхідність у постійному залученні людських ресурсів.
- Скорочувати загальні витрати на технічне обслуговування та повторне калібрування сенсорів завдяки використанню продуктивних підходів до діагностики та оптимізації.

Завдяки цьому сукупність переваг робить машинне навчання ключовою технологією у процесі сучасного калібрування частотних температурних сенсорів. Подальші кроки у дослідженні глибоких нейронних мереж, розробленні адаптивних алгоритмів і впровадженні рішень на базі інтернету речей націлені на подальше вдосконалення цього методу. Необхідно також сприяти його популяризації для ширшого впровадження у масові сценарії використання, що зрештою дозволить зробити такі технології ще більш доступними та ефективними.

Висновки

Калібрування частотних температурних сенсорів є важливим етапом для забезпечення їхньої точності та надійності. Традиційні аналогові методи, такі як еталонне та точкове калібрування, залишаються ефективними в багатьох випадках, проте вони мають певні недоліки, включаючи високу вартість і необхідність регулярного ручного втручання.

Сучасні цифрові підходи, зокрема алгоритмічна компенсація та машинне навчання, пропонують значні переваги завдяки своїй точності та автоматизації. Використання технологій машинного навчання сприяє зниженню похибок і підвищенню здатності сенсорів адаптуватися до змінних умов експлуатації.

У майбутньому розвиток технологій калібрування орієнтується на впровадження автоматизованих систем, які мінімізують вплив людського фактора і забезпечують стабільну роботу сенсорів у промислових та наукових середовищах. Гармонійне поєднання традиційних і новітніх підходів дозволить створити більш ефективні та надійні системи вимірювання температури.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Іваненко О.М., Петренко В.В. Сучасні технології калібрування сенсорів температури. *IEEE Sensors Journal*, 2023, 21(5), 6105-6112.
2. Johnson R., Smith T. Advanced Calibration Techniques for IoT Sensors. *International Journal of Sensor Research*, 2022, 88-96.
3. Коваленко Г.П. Автоматизовані системи калібрування: перспективи розвитку. *Електроніка та автоматика*, 2021, 15-22.
4. Chen Y., Liu F. Machine Learning in Temperature Sensor Calibration. *Sensors and Actuators*, 2020,

120-130.

5. Бондаренко А.О., Гнатюк П.В. Алгоритмічна компенсація похибок в сенсорах. Вісник технічних наук, 2020, 33-40.
6. Miller A., Zhou K. Novel Methods in Frequency-Based Temperature Sensor Calibration. Journal of Applied Electronics, 2019, 10(2), 45-57.
7. Nakamura T., Lee J.H. Advances in Quartz Crystal Temperature Sensing. Sensors and Measurement Science, 2018, 7(4), 200-215.
8. Brown C., Taylor M. IoT Integration of Frequency-Based Temperature Sensors in Industrial Applications. International Journal of Smart Systems, 2019, 15(3), 301-316.

■ **Малюк Олександр Сергійович** — аспірант кафедри загальної фізики, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: sashamalyuk8@gmail.com

Maliuk Oleksandr Serhiiovych — Associate graduate student of General Physics, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: sashamalyuk8@gmail.com

Мартинюк Володимир Валерійович — канд. техн. наук, доцент кафедри загальної фізики, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: gyrav16@gmail.com

Martyniuk Volodymyr Valeriiovych — Candidate of Philology tech. Sciences, Associate Professor of General Physics, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: gyrav16@gmail.com