

УДК 621.3.084.2

к.т.н., доцент кафедры «Промышленная электроника и информационно-измерительная техника», ФГБОУ ВО «Ангарский государственный технический университет»

Мазур Владимир Геннадьевич,

Пудалов Алексей Дмитриевич,

к.т.н., доцент кафедры «Промышленная электроника и информационно-измерительная техника», ФГБОУ ВО «Ангарский государственный технический университет»,

e-mail: puddim@yandex.ru

АНАЛИЗ МЕТОДОВ АВТОМАТИЧЕСКОЙ КАЛИБРОВКИ ИЗМЕРИТЕЛЕЙ ТЕМПЕРАТУРЫ И ВЛАЖНОСТИ

Mazur V.G., Poudalov A.D.

ANALYSIS OF METHODS FOR AUTOMATIC CALIBRATION OF TEMPERATURE AND HUMIDITY METERS

Аннотация. Рассматриваются современные методы и технологии автоматической калибровки приборов для измерения температуры и влажности. Проанализированы различные типы датчиков, принципы их работы и методы автоматической калибровки. Особое внимание уделено алгоритмам автоматической калибровки, оценке погрешностей измерений и влиянию внешних факторов на точность калибровки. Рассмотрены перспективы развития технологий автоматической калибровки, включая применение искусственного интеллекта.

Ключевые слова: измерительное устройство, калибровка, температура, влажность, алгоритмы автокалибровки, методы автокалибровки, нейросеть.

Abstract. Modern methods and technologies of automatic calibration of devices for measuring temperature and humidity are considered. Various types of sensors, their operating principles and methods of automatic calibration are analyzed. Special attention is paid to automatic calibration algorithms, estimation of measurement errors and the influence of external factors on calibration accuracy. The prospects for the development of automatic calibration technologies, including the use of artificial intelligence, are considered.

Keywords: measuring device, calibration, temperature, humidity, auto-calibration algorithms, autocalibration methods, neural network.

Измерения температуры и влажности играют ключевую роль во многих областях науки, техники и промышленности. От метеорологии до производства электроники, от сельского хозяйства до медицины – везде требуются надёжные и точные данные о температуре и влажности не только окружающей среды, но и анализируемых веществ. Однако даже самые современные приборы подвержены дрейфу показаний и требуют регулярной калибровки для поддержания заданной точности измерений [1]. Если не выполнять периодическую калибровку измерительных устройств, то это будет приводить к появлению погрешностей результатов измерений, например, систематических, случайных, дополнительных. К наиболее значимым факторам, влияющим на точность показаний измерительных устройств, обычно относятся:

– температурная зависимость, так как изменение температуры зачастую существенно влияет на показания датчиков влажности и требует специальных методов ком-

пенсации [2–5],

– влияние давления особенно критично для некоторых типов датчиков влажности и требует учёта при калибровке [6],

– электромагнитные помехи могут искажать сигналы датчиков и требуют применения методов экранирования и фильтрации [7],

– загрязнение поверхности чувствительных элементов приводит к дрейфу показаний и требует регулярного обслуживания или применения самоочищающихся технологий [8].

Указанные факторы, влияя по отдельности или в совокупности, требуют периодичности проведения калибровки измерительных устройств. Эта периодичность определяется типом датчика, условиями эксплуатации, требуемой точностью измерений, стабильностью точностных характеристик датчика. Чаще всего измерительные устройства калибруют непосредственно перед началом проведения измерений, что сказывается на

времени проведения подготовки измерительных устройств к работе. В связи с этим целесообразнее определить периодичность калибровки по некоторым оптимальным параметрам, к которым можно отнести:

- статистический анализ дрейфа показаний,
- прогнозирование на основе ранее установленных данных,
- адаптивные алгоритмы определения интервалов калибровки.

Общепринятые методы калибровки часто требуют значительных затрат времени и ресурсов, а также могут приводить к длительным простоям оборудования, что, в конечном итоге, влияет на экономические показатели. Обычно калибровкой занимаются сотрудники метрологических служб, которые непосредственно перед измерениями в ручном режиме выполняют настройку измерительного оборудования. Такие способы приводят к значительным временным затратам. Особенно это заметно в инерционных измерительных системах, когда либо анализируются медленно изменяющиеся процессы, либо чувствительные элементы обладают невысокими динамическими характеристиками. Например, для процессов сорбции/десорбции калибровка чувствительных элементов может достигать десятков, а иногда и сотен секунд [9]. В связи с этим, технологии автоматической калибровки (автокалибровки) приобретают всё большее значение, позволяя оптимизировать процессы измерений и повысить их достоверность [10].

Цель статьи – провести анализ современных методов автокалибровки приборов для измерения температуры и влажности, произвести оценку их эффективности и рассмотреть перспективы развития этой области.

Все аналитические приборы, предназначенные для измерения температуры, делятся на типы, связанные с методами измерений, заложенными в основу работы этих приборов. Например, ртутные, электронные, инфракрасные, термопары, термисторы и т. д.

Приборы, предназначенные для измерения влажности, также делятся на типы, связанные с методами измерений, например, гигрометры, психрометры, пьезорезонансные, кулонометрические, ёмкостные, резистивные и т. д.

Редко встречаются измерительные

приборы, работающие на комбинированном принципе, например, термогигрометры.

Каждый тип прибора имеет свои особенности применения, преимущества и ограничения, которые необходимо учитывать при разработке систем автокалибровки [11].

Методы автокалибровки, по аналогии с приборами, можно также условно разделить на различные типы.

Первым типом может быть метод сравнения с эталонными приборами. Этот метод основан на сравнении показаний калибруемого измерительного прибора с показаниями эталонного устройства, имеющего более высокую точность. Такой метод требует наличия в измерительной схеме дополнительно либо более точного опорного чувствительного элемента, либо измерительного устройства с меньшей погрешностью. Недостатком является необходимость встраивать с измерительную схему дополнительное оборудование, что приведёт к удорожанию всей системы. Выходом из данной ситуации может быть применение такого оборудования сразу для нескольких измерительных приборов.

Вторым типом может быть использование климатических камер, которые позволяют создавать контролируемые условия температуры и влажности для проведения автокалибровки [12, 13]. Недостатком такого типа является введение в измерительную схему дополнительных устройств высококачественной регулировки климатических параметров. Также следует тщательно отслеживать изменение влажности, так как небольшие колебания влаги вблизи точки росы могут приводить к образованию конденсата на поверхности чувствительных элементов, что, чаще всего, негативно сказывается на показаниях измерительных приборов. В качестве решения данной проблемы может быть поочерёдное плавное изменение одного из климатических параметров в сторону увеличения. К одному из наиболее точных и распространённых методов калибровки датчиков влажности относится метод насыщенных растворов солей. Этот метод основан на свойстве таких растворов поддерживать постоянную относительную влажность над своей поверхностью [14]. К сожалению, данный метод не реализован в устройствах автоматической калибровки и используется исключительно при активном участии человека.

Третьим типом автокалибровки может

быть применение математических моделей, статистических методов, а также нейросетей. К ним можно отнести аппроксимацию статических характеристик, применение фильтрации Калмана, адаптивные алгоритмы и т. д. Данный тип автокалибровки представляет высокий интерес в связи с быстрыми темпами развития информационных вычислительных систем и нейросетей.

Рассмотрим алгоритмы автокалибровки третьего типа подробнее:

- линейная калибровка. Простейший метод, основанный на линейной зависимости между измеренными и истинными значениями. Однако он может быть недостаточно точным для некоторых типов датчиков, таких как широкодиапазонные или с ярко выраженными нелинейными участками [15],

- полиномиальная калибровка. Использует полиномы высших степеней для более точной аппроксимации характеристики датчика. Этот метод особенно эффективен для датчиков с нелинейной статической характеристикой [16],

- нейронные сети. Применение искусственных нейронных сетей позволяет учитывать сложные нелинейные зависимости и взаимное влияние различных факторов на показания датчиков. Применение искусственных нейронных сетей для автокалибровки датчиков температуры и влажности является перспективным подходом, позволяющим учитывать корреляционные зависимости различных факторов, влияющих на показания датчиков. Преимуществами использования нейронных сетей может быть: способность моделировать сложные нелинейные зависимости, возможность учёта влияния нескольких факторов одновременно (например, температуры и влажности), адаптивность к изменениям характеристик датчика [17],

- фильтр Калмана. Является мощным инструментом для оценки состояния системы и минимизации ошибок измерений в реальном времени. Этот статистический алгоритм очень эффективен для оценки состояния системы и минимизации ошибок измерений, но подходит только для линейных систем [18],

- адаптивные алгоритмы. Позволяют системе автокалибровки подстраиваться под изменяющиеся условия окружающей среды и характеристики датчика [19].

Применение алгоритмов автокалибровки ставит задачу разработки специально-

го программного обеспечения (ПО). Реализация этого может быть осуществлена одним из следующих вариантов:

- встроенное ПО датчиков реализует базовые алгоритмы автокалибровки непосредственно в микроконтроллере датчика,

- специализированные программные пакеты сторонних разработчиков предоставляют расширенные возможности для анализа данных, визуализации результатов и управления процессом калибровки,

- реализация облачных решений позволяет централизованно управлять калибровкой множества датчиков и анализировать большие объёмы измеренных данных.

Разработка и внедрение методов автокалибровки измерительных устройств позволит значительно повысить экономическую эффективность работы измерительных систем. Развитие информационных систем открывает возможности интеграции средств измерений со сложными вычислительными системами и позволяет использовать базы знаний для повышения точности измерительных устройств. Интеграция с системами «Интернета вещей» (IoT) предоставляет возможности удалённого мониторинга и управления калибровкой через IoT-платформы [20]. Применение технологий искусственного интеллекта повышает эффективность прогнозирования дрейфа показаний и оптимизации процесса калибровки [21].

Автокалибровка приборов для измерения температуры и влажности представляет собой динамично развивающуюся область, объединяющую достижения в технологиях производства чувствительных элементов, алгоритмах обработки данных и методах автоматизации. Рассмотренные в статье методы и технологии демонстрируют значительный прогресс в повышении точности и надёжности измерений при одновременном снижении эксплуатационных затрат.

Перспективы развития технологий автокалибровки связаны с дальнейшей интеграцией в системы IoT, применением методов искусственного интеллекта и разработкой новых типов самокалибрующихся сенсоров. Эти направления открывают широкие возможности для дальнейших исследований и инноваций в области метрологии и технологий производства чувствительных элементов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Chen, J.**, et al. (2018). A Review of Self-Calibrating Humidity Sensors. *Sensors Journal*, 18(5), 1437-1452.
2. **Farahani, H.**, et al. (2014). Temperature compensation of a capacitive humidity sensor. *Sensors*, 14(7), 12453-12473.
3. **Воронова, Т.С., Липнин, Ю.А., Мазур, В.Г., Пудалов, А.Д.** Исследование чувствительности широкодиапазонных пьезо-сорбционных влажочувствительных элементов для неразрушающего контроля органических растворителей // *Измерительная техника*. – 2017. – № 3. С. 65–68.
4. **Берлинер, М. А.** Измерения влажности. – М.: Энергия, 1973. – 400 с.
5. **Липнин, Ю.А., Мазур, В.Г., Пудалов, А.Д.** Анализ суммарной погрешности сорбционно-частотного измерителя влажности органических жидкостей // *Современные технологии. Системный анализ. Моделирование*. – 2014. – № 1 (41). – С. 153–160.
6. **Hanson, C., Moen, K.** (2017). Effect of pressure on relative humidity sensors. *Sensors & Transducers*, 217(11), 36-41.
7. **Awan, M.**, et al. (2018). EMI susceptibility of humidity sensors: A comparative study. *IEEE Sensors Journal*, 18(23), 9739-9746.
8. **Wang, Y.**, et al. (2015). Self-cleaning and antifouling nanomaterials for self-diagnostic devices. *ACS Nano*, 9(4), 3656-3668.
9. **Липнин, Ю.А., Мазур, В.Г., Пудалов, А.Д.** Исследование динамических свойств широкодиапазонных пьезо-сорбционных датчиков влажности органических жидкостей // *Измерительная техника*. – 2014. – № 7. С. 65–68.
10. **Kim, S., Lee, J.** (2020). Automatic Calibration Techniques for Temperature and Humidity Sensors. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 69(9), 6815-6823.
11. **Fraden, J.** (2016) *Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs, and Applications*. Springer.
12. **Bentley, R. E.** (1998). *Temperature and Humidity Measurement*. Springer.
13. **Wang, M.**, et al. (2019). Self-Calibration Methods for Capacitive Humidity Sensors. *Measurement Science and Technology*, 30(6), 062001.
14. **Мазур, В.Г., Пудалов, А.Д., Тур, А.А.** Приготовление образцов органических жидкостей заданной влажности // *Вестник Ангарской государственной технической академии*. – 2014. – № 8. – С. 24–28.
15. **Li, X., Yang, Y.** (2018). A novel linear calibration method for temperature sensors. *Measurement*, 122, 80-88.
16. **Shen, C.**, et al. (2019). A high-precision and low-cost temperature measurement system based on polynomial calibration. *Sensors*, 19(2), 414.
17. **Liu, Y.**, et al. (2020). Neural network-based calibration of low-cost temperature sensors. *IEEE Sensors Journal*, 20(15), 8139-8150.
18. **Kuhn, V.**, et al. (2017). Kalman filter-based temperature calibration of a radar system. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 65(9), 3381-3393.
19. **Zhang, Z.**, et al. (2019). An adaptive calibration method for temperature sensors based on least squares support vector machines. *Sensors*, 19(5), 1103.
20. **Al-Ali, A. R.**, et al. (2017). IoT-based temperature and humidity monitoring system for smart buildings. *IEEE International Conference on Engineering Technologies and Applied Sciences (ICETAS)*, 1-5.
21. **Yan, B., Shi, P.** (2018). Intelligent sensor calibration and compensation using machine learning. *IEEE Access*, 6, 36508-36514.