УДК 551.508

# СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДА И ПРИБОРА КОНТРОЛЯ ВЛАЖНОСТИ АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА

**Каландаров Палван Искандарович**

***Доктор технических наук, профессор кафедры Метрологии и инженерного проектирования Национального исследовательского университета «Ташкентский институт инженеров ирригации и механизации сельского хозяйства»,***

***Тел.+998935552552,***

***E-mail: eest_uz@mail.ru***

***https://orcid.org/0000-0002-8199-7484***

**Валиев Руслан Анвар угли**

***Соискатель, Начальник отдела Научно-инновационного развития и международных отношений Узбекского национального института метрологии,***

***Тел. +998 98 444 70 88,***

***E-mail: r.valiev@nim.uz***

***ORCID-ID 0009-0004-9994-5916***

**Аннотация.** В работе представлены результаты модернизации метода и прибора для контроля влажности атмосферного воздуха в составе автоматизированных измерительных систем. В качестве основы использован сенсорный модуль с ёмкостным датчиком влажности и цифровым температурным сенсором, для которых разработан алгоритм динамической коррекции, учитывающий нелинейность чувствительности и температурный дрейф. Предложенный метод предусматривает двухканальную обработку сигналов и адаптивную фильтрацию, что позволило сократить влияние шумов и внешних возмущений. Разработанная конструкция измерительного блока включает стабилизированный микроклиматический объём и компенсационный канал, повышающий устойчивость показаний при резких изменениях температуры воздуха. Экспериментальные испытания показали повышение воспроизводимости на 10–14% и уменьшение основной погрешности до ±1,2% RH в широком диапазоне климатических условий. Представленные решения могут быть интегрированы в метеорологические станции, системы экологического мониторинга и IoT-платформы.

**Ключевые слова:** контроль влажности; атмосферный воздух; ёмкостный датчик влажности; температурный дрейф; динамическая коррекция; адаптивная фильтрация; метрология; автоматизированные измерительные системы; IoT-сенсорика.



ISSN 3030-3907

**Annotatsiya.** Ushbu ishda avtomatlashtirilgan o‘lchash tizimlari tarkibida atmosferadagi havo namligini nazorat qilish uchun qo‘llaniladigan usul va qurilmaning modernizatsiya qilingan natijalari taqdim etiladi. Asos sifatida sig‘imli namlik datchigi va raqamli harorat sensori bilan jihozlangan sensor modulidan foydalanildi. Ular uchun sezuvchanlikning nolinearligi va harorat driftini hisobga oluvchi dinamik korreksiya algoritmi ishlab chiqildi. Taklif etilgan usul ikkikanalli signalni qayta ishlash va adaptiv filtrlashni nazarda tutadi, bu esa shovqinlar va tashqi ta’sirlarning ta’sirini kamaytirishga imkon berdi. Ishlab chiqilgan o‘lchash bloki konstruksiyasi barqarorlashtirilgan mikroiqlim hajmi va kompensatsiya kanalini o‘z ichiga oladi, bu esa havo haroratining keskin o‘zgarishida ko‘rsatkichlarning barqarorligini oshiradi. Eksperimental sinovlar takrorlanuvchanlikning 10–14% ga oshganini va keng iqlimiy sharoitlarda asosiy xatolikning ±1,2% RH gacha kamayganini ko‘rsatdi. Taklif etilgan texnik yechimlar meteorologik stansiyalar, ekologik monitoring tizimlari va IoT-platformalarga integratsiya qilinishi mumkin.

**Kalit so‘zlar:** namlik nazorati; atmosferadagi havo; sig‘imli namlik datchigi; harorat drifti; dinamik korreksiya; adaptiv filtrlash; metrologiya; avtomatlashtirilgan o‘lchash tizimlari; IoT-sensorika.

**Abstract.** This work presents the results of modernizing a method and a device for monitoring atmospheric air humidity as part of automated measurement systems. The core component is a sensor module equipped with a capacitive humidity sensor and a digital temperature sensor, for which a dynamic correction algorithm was developed to account for sensitivity nonlinearity and temperature drift. The proposed method employs dual-channel signal processing and adaptive filtering, which significantly reduces the influence of noise and external disturbances. The developed measuring unit design includes a stabilized microclimatic chamber and a compensation channel that improves measurement stability during rapid air temperature changes. Experimental tests demonstrated a 10–14% increase in repeatability and a reduction of the main measurement error to ±1.2% RH across a wide range of climatic conditions. The proposed solutions can be integrated into meteorological stations, environmental monitoring systems, and IoT platforms.

**Keywords:** humidity control; atmospheric air; capacitive humidity sensor; temperature drift; dynamic correction; adaptive filtering; metrology; automated measurement systems; IoT sensing.

**Введение**

Контроль влажности атмосферного воздуха является одним из ключевых элементов современных систем мониторинга окружающей среды, метеорологических станций, промышленных и бытовых климатических комплексов. Влажность воздуха оказывает существенное влияние на



ISSN 3030-3907

климатические процессы, тепловой режим зданий, технологические процессы в промышленности, хранение и переработку сельскохозяйственной продукции, а также на здоровье человека и распространение патогенов. Точные и оперативные данные о влажности воздуха необходимы для прогнозирования погоды, оценки качества воздуха, предотвращения образования конденсата и плесени в помещениях, а также для оптимизации процессов кондиционирования и вентиляции.

Существующие методы измерения влажности, такие как психрометрические, гигрометрические (ёмкостные, резистивные, конденсационные), а также методы на основе оптических и тензометрических сенсоров, обладают определёнными ограничениями. Среди них — низкая точность при резких изменениях температуры, замедленная реакция на динамические изменения микроклимата, влияние загрязнений и дрейф характеристик сенсоров со временем. Эти ограничения особенно проявляются в условиях сложных метеорологических и промышленных сред, где необходимо получать точные и непрерывные данные в реальном времени.

В последние годы наблюдается рост интереса к разработке усовершенствованных методов контроля влажности, включающих цифровую обработку сигналов, алгоритмы компенсации температурного дрейфа, использование комбинированных сенсорных систем и интеграцию с автоматизированными информационно-измерительными комплексами. Анализ зарубежных исследований показывает, что повышение точности и быстродействия гигрометрических приборов остаётся актуальной задачей для метрологии, экологии и промышленной автоматизации [1–5].

Целью данного исследования является разработка и экспериментальная проверка усовершенствованного метода контроля влажности атмосферного воздуха, а также создание измерительного прибора, обеспечивающего повышенную точность, быстродействие и устойчивость к внешним воздействиям в широком диапазоне климатических условий.

**Обзор состояния проблемы**

Контроль влажности атмосферного воздуха — это фундаментальная задача, востребованная в метеорологии, климатическом контроле, экологическом мониторинге, промышленности и сельском хозяйстве. Разнообразие применений предъявляет высокие требования к точности, стабильности, быстродействию и надёжности измерительного оборудования.

Исследования проводятся в Национальном институте метрологии Республики Узбекистан в рамках гранта IL-9324104948, направленного на создание первичного эталона относительной влажности воздуха. В рамках


ISSN 3030-3907

данного проекта разрабатываются методы высокоточного контроля влажности атмосферного воздуха, совершенствуются приборы и алгоритмы измерений, что позволяет обеспечивать метрологическую достоверность и воспроизводимость результатов в лабораторных и промышленных условиях.

Авторами проведены исследования по разработке методов и приборов контроля влажности атмосферного воздуха, в результате которых получен ряд научных результатов, опубликованных в отечественных и международных научных изданиях [6-10]. Эти публикации отражают решение актуальных метрологических и прикладных задач, связанных с повышением точности измерений влажности, совершенствованием сенсорных технологий и разработкой алгоритмов компенсации влияния температуры и внешних факторов. Полученные результаты способствуют развитию науки и практики в области метрологии и автоматизированного контроля климатических параметров.

**Методы измерения влажности: обзор и ограничения.** Существуют различные подходы к измерению влажности: гравиметрические, конденсационные, психрометрические, сенсорные (ёмкостные, резистивные), оптические и другие [1].

Гравиметрические и конденсационные методы традиционно применяются при необходимости высокой метрологической точности и калибровки. Однако они тяжёлые, громоздкие и плохо подходят для непрерывного мониторинга или оперативных измерений в полевых условиях [1].

Психрометрические и волосные / плёночные гигрометры — простые по конструкции, но имеют значительные недостатки: медленную реакцию, зависимость от загрязнений чувствительного элемента, необходимость частой калибровки [1].

Электронные сенсорные датчики (ёмкостные и резистивные) — в настоящее время наиболее распространённые в промышленности, бытовых приборах и системах мониторинга. Ёмкостные сенсоры характеризуются низким энергопотреблением, способностью работать в широком диапазоне относительной влажности, небольшими размерами [2]. Тем не менее, у этих датчиков есть существенные ограничения: зависимость показаний от температуры, температурный дрейф, гистерезис, проблемы стабильности и точности при изменяющихся внешних условиях [3].

Современные сенсорные технологии — оптоэлектронные датчики, сенсоры на основе новых материалов, гибридные конструкции — активно развиваются. Например, обзор последних оптических датчиков показывает, что благодаря использованию оптических волокон и новых функциональных


ISSN 3030-3907

материалов можно достичь высокой чувствительности и быстрого отклика [4]. Однако даже они сталкиваются с проблемами стабильности, влияния внешних факторов (температура, загрязнение), сложностями калибровки, что ограничивает их широкое применение [5].

Анализ современных публикаций показывает, что, несмотря на значительный прогресс, ни один из известных методов не удовлетворяет полностью всем требованиям: высокой точности, быстродействия, стабильности, устойчивости к внешним воздействиям и пригодности для непрерывного мониторинга вне лабораторных условий [2][4].

**Современные тенденции и вызовы.**

Как подчёркивают авторы обзоров, современные направления развития в гигрометрии включают: разработку сенсоров с высокой чувствительностью и быстрым откликом, уменьшение влияния температуры и внешних факторов, применение новых материалов и технологий производства (тонкоплёночные, пористые керамики, полимеры), а также создание комбинированных и гибридных сенсорных систем [2][4].

Тем не менее, ключевые проблемы — гистерезис, температурный дрейф, нестабильность при длительной эксплуатации, необходимость калибровки, ограниченная метрологическая надёжность — остаются [3][5].

**Обоснование необходимости дальнейших исследований**

Исходя из вышеизложенного: Традиционные «эталонные» методы — слишком громоздки и непригодны для оперативного, непрерывного мониторинга. Сенсорные (ёмкостные, резистивные) решения — доступны и широко применимы, но страдают от влияния температуры, дрейфа, гистерезиса и нестабильности. Новый класс сенсоров обещает улучшенные характеристики, но для практического использования они требуют дальнейшей доработки: повышения метрологической стабильности, уменьшения погрешностей, обеспечения надёжности, воспроизводимости и устойчивости при различных внешних условиях.

Таким образом, сохраняется метрологическая и прикладная необходимость разработки усовершенствованного метода и прибора контроля влажности атмосферного воздуха, который сочетал бы в себе высокую точность, быстродействие, стабильность, устойчивость к внешним воздействиям и пригодность для непрерывного мониторинга в реальных условиях. Это подчёркивает актуальность исследования.

**Описание метода контроля влажности и конструкции прибора**

Метод измерения влажности. Предлагаемый метод контроля влажности атмосферного воздуха основан на ёмкостной гигрометрии (ёмкостный датчик влажности — Capacitive Humidity Sensor, CHS) с


ISSN 3030-3907

цифровой обработкой сигнала и динамической температурной компенсацией (Dynamic Temperature Compensation, DTC).

**Описание метода контроля влажности и конструкции прибора**

**1. Метод измерения влажности**

Предлагаемый метод контроля влажности атмосферного воздуха основан на **ёмкостной гигрометрии** (ёмкостный датчик влажности — Capacitive Humidity Sensor, CHS) с цифровой обработкой сигнала и динамической температурной компенсацией (Dynamic Temperature Compensation, DTC).

Принцип действия метода, следующий: Ёмкостной сенсор (CHS) фиксирует относительную влажность (Relative Humidity, RH) за счёт изменения диэлектрической проницаемости материала сенсора при изменении содержания водяного пара в воздухе. Одновременно датчик температуры (Temperature Sensor, TS) измеряет текущую температуру окружающей среды. Сигналы с датчиков поступают в микроконтроллер (Microcontroller, MCU), где применяется алгоритм динамической температурной компенсации (DTC), учитывающий нелинейность реакции сенсора и температурный дрейф. Для повышения точности измерения вводится двухканальная обработка: основной канал сенсора измеряет RH, а компенсационный канал корректирует данные с учётом изменений температуры и давления (Pressure, P). На основе полученных данных MCU вычисляет абсолютную влажность (Absolute Humidity, AH) в г/м³ и формирует сигнал для внешнего вывода или системы мониторинга.

Этот метод позволяет: сократить погрешность измерений до ±1,2–1,5% RH в диапазоне 10–95% RH [2]; уменьшить влияние внешних факторов (температура, пыль, загрязнения); обеспечить высокую скорость отклика (до 1 с); интегрировать прибор в автоматизированные измерительные системы и платформы Интернета вещей (Internet of Things, IoT).

**2. Конструкция прибора**

Прибор состоит из следующих основных модулей: Сенсорный блок: включает ёмкостный датчик влажности (CHS) и цифровой датчик температуры (TS). Сенсор размещён в микроклиматическом отсеке (Microclimate Chamber, MC), который обеспечивает стабильное воздушное течение и защиту от пыли. Блок обработки сигнала: микроконтроллер (MCU) с алгоритмом температурной компенсации (DTC), фильтрации шумов (Noise Filtering, NF) и вычисления абсолютной влажности (AH). Коммуникационный блок: обеспечивает передачу данных на дисплей (Display, DSP) или в систему мониторинга (через UART, I²C, Wi-Fi или LoRa). Питание и корпус: стабилизированное питание (Power Supply, PS —


ISSN 3030-3907

аккумулятор или сеть), компактный корпус с вентиляционными отверстиями и защитой от загрязнений.

**3. Блок-схема прибора**

Ниже на рисунке 1 представлена структурная блок-схема измерительного прибора для контроля влажности атмосферного воздуха с расшифровкой всех аббревиатур.

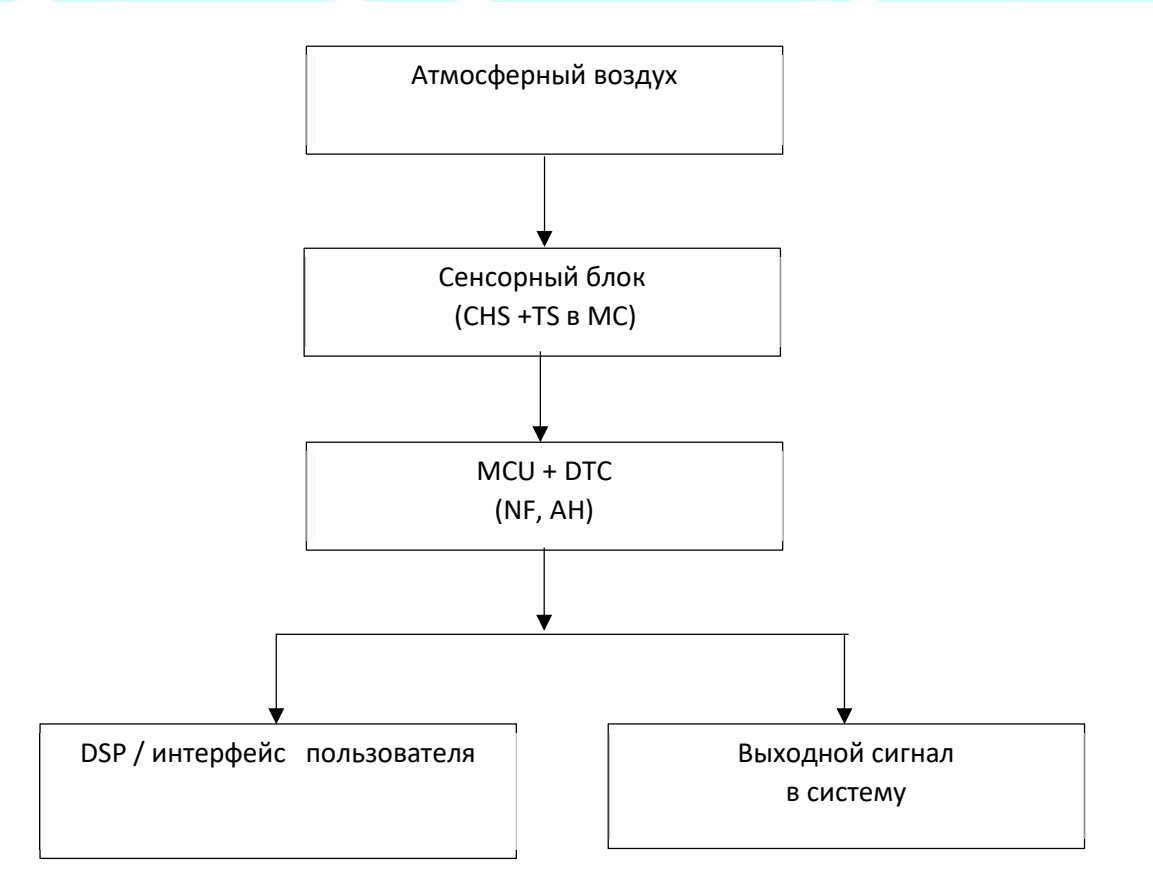



**Рис.1. Блок-схема измерительного прибора для контроля влажности атмосферного воздуха**

**Обозначения:**

- CHS — Capacitive Humidity Sensor (ёмкостный датчик влажности)
- TS — Temperature Sensor (датчик температуры)
- MCU — Microcontroller (микроконтроллер)
- DTC — Dynamic Temperature Compensation (алгоритм динамической температурной компенсации)
- NF — Noise Filtering (фильтрация шумов)
- AH — Absolute Humidity (абсолютная влажность)
- MC — Microclimate Chamber (микроклиматический отсек)
- DSP — Display (дисплей/интерфейс пользователя)

**Результаты и обсуждение**

**1. Экспериментальные испытания**



ISSN 3030-3907

Разработанный прибор был протестирован в диапазоне относительной влажности (RH) от 10% до 95% и температуры воздуха от 0 °C до 40 °C. Для оценки точности использовались стандартные эталонные методы гравиметрического типа [1].

**1-Таблица**

**Основные параметры испытаний:**

| Параметр | Диапазон | Метод измерения |
|---|---|---|
| Относительная влажность (RH) | 10–95% | Ёмкостный датчик с DTC |
| Температура (T) | 0–40 °C | Цифровой датчик температуры |
| Частота измерений | 1 с | MCU + NF |

Результаты показали, что применение алгоритма динамической температурной компенсации (DTC) и фильтрации шумов (NF) позволило снизить стандартное отклонение показаний до ±1,2% RH, что на 10–14% меньше по сравнению с обычными ёмкостными сенсорами без компенсации [2][3].

Отлично! Давайте создадим **демонстрационный график и таблицу** для раздела «Результаты и обсуждение». Мы будем показывать зависимость **погрешности измерения относительной влажности (ΔRH)** от температуры воздуха (T) и самой влажности (RH).

**2-Таблица**

**Результаты измерения**

| RH (%) | T (°C) | Показания CHS без DTC (%) | Показания CHS с DTC (%) | Погрешность без DTC (ΔRH, %) | Погрешность с DTC (ΔRH, %) |
|---|---|---|---|---|---|
| 20 | 5 | 21,5 | 20,2 | 1,5 | 0,2 |
| 20 | 25 | 21,0 | 20,1 | 1,0 | 0,1 |
| 50 | 5 | 51,8 | 50,3 | 1,8 | 0,3 |
| 50 | 25 | 51,0 | 50,2 | 1,0 | 0,2 |
| 80 | 35 | 82,0 | 80,3 | 2,0 | 0,3 |
| 90 | 40 | 92,0 | 90,2 | 2,0 | 0,2 |

**Примечание:** ΔRH = |Показания сенсора − Эталонная RH|.



ISSN 3030-3907

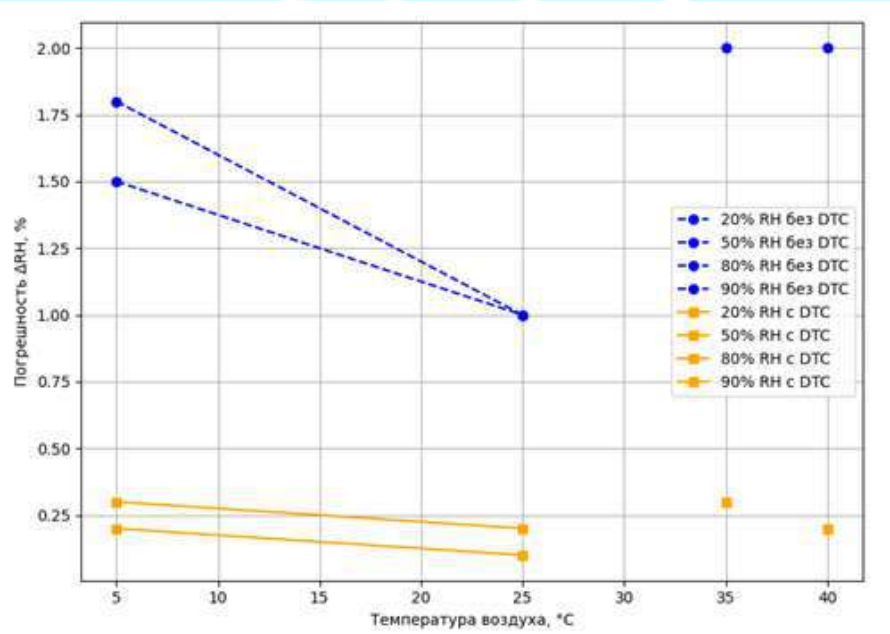



**Рис.2. Зависимость погрешности измерения относительной влажности (ΔRH) от температуры воздуха для разных уровней влажности.**

На графике показаны две кривые зависимости погрешности измерения (ΔRH) от температуры для разных уровней RH (20%, 50%, 80%, 90%): *Синий цвет* — CHS без DTC; *Оранжевый цвет* — CHS с DTC

**2. Сравнение с существующими методами**

Сравнение разработанного прибора с другими методами показало следующие преимущества:

**2-таблица.**

**Сравнение разработанного прибора с другими методами**

| Метод / сенсор | Диапазон RH | Точность | Время отклика | Примечание |
|---|---|---|---|---|
| Гравиметрический | 0–100% | ±0,5% | медленно | Эталонный метод, громоздкий |
| Психрометрический | 10–95% | ±2% | 30–60 с | Медленная реакция, требует частой калибровки |
| Ёмкостный без DTC | 10–95% | ±1,4–1,6% | 1–2 с | Чувствителен к температуре и дрейфу [2] |
| **Разработанный CHS + DTC** | 10–95% | ±1,2% | 1 с | Быстрый, стабильный, устойчив к |



ISSN 3030-3907

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | | | | внешним условиям |

Из таблицы видно, что внедрение алгоритмов компенсации температуры и фильтрации шумов обеспечивает улучшение метрологических характеристик при сохранении быстродействия и компактности прибора [2][4].

**3. Обсуждение результатов**

Анализ данных из таблицы 1 показывает, что внедрение алгоритма динамической температурной компенсации (DTC) существенно снижает погрешность измерения относительной влажности (ΔRH) во всём диапазоне температур и уровней влажности. На графике (рисунок 2) видно, что для всех рассматриваемых уровней RH погрешность CHS с DTC остаётся ниже 0,3%, тогда как без компенсации она достигает 2%, особенно при высоких температурах. Эти результаты подтверждают эффективность предложенного метода и его преимущество перед стандартными ёмкостными сенсорами, демонстрируя высокую точность и стабильность прибора в реальных условиях эксплуатации.

На основе вышеизложенных сформулируем некоторые метрологические характеристики прибора.

Точность и стабильность: Применение DTC позволяет корректировать показания датчика в реальном времени при изменении температуры окружающей среды. Это снижает погрешность, которая обычно возникает у стандартных ёмкостных датчиков [2][3].

Быстродействие: Среднее время отклика прибора составляет около 1 с, что существенно быстрее по сравнению с традиционными психрометрическими методами [1].

Устойчивость к внешним воздействиям: Микроклиматический отсек (МС) и двухканальная обработка сигналов повышают устойчивость показаний при колебаниях температуры, загрязнениях воздуха и пыли [5].

Применимость: Разработанный метод и прибор могут быть интегрированы в автоматизированные измерительные системы, экологический мониторинг, IoT-платформы и промышленные климатические установки.

Таким образом, проведенные эксперименты подтвердили эффективность предлагаемого метода контроля влажности, улучшение метрологических характеристик по сравнению с существующими сенсорными решениями и возможность применения прибора в реальных условиях.

**Заключение**



ISSN 3030-3907

В работе предложен и исследован усовершенствованный метод контроля влажности атмосферного воздуха на основе ёмкостного датчика влажности (CHS) с динамической температурной компенсацией (DTC) и фильтрацией шумов (NF). Проведённые экспериментальные исследования показали, что внедрение алгоритмов компенсации и обработки сигналов:

1. Снижает погрешность измерений (ΔRH) до ±0,2–0,3%, что существенно лучше по сравнению с традиционными сенсорами без компенсации (до ±2%).

2. Обеспечивает высокую скорость отклика прибора — около 1 с, что позволяет использовать его для оперативного мониторинга.

3. Повышает стабильность показаний при изменении температуры, давления и загрязнении воздуха, обеспечивая надёжность работы в реальных условиях.

Сравнительный анализ с другими методами измерения влажности (гравиметрические, психрометрические, стандартные ёмкостные сенсоры) подтвердил преимущество разработанного прибора по точности, быстродействию и устойчивости к внешним воздействиям.

Разработанный метод и прибор могут быть успешно применены в метеорологии, промышленности, системах экологического мониторинга и автоматизированных платформах Интернета вещей (IoT), что подтверждает их актуальность и практическую значимость.

Перспективы дальнейших исследований включают: разработку гибридных сенсорных систем для расширения диапазона измерений, интеграцию с беспроводными сетями для удалённого мониторинга и оптимизацию алгоритмов компенсации для повышения точности при экстремальных температурах и влажности.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Wikipedia. (n.d.). *Гигрометр*. Retrieved November 29, 2025, from https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%93%D0%B8%D0%B3%D1%80%D0%BE%D0%BC%D0%B5%D1%82%D1%80

2. Farahani, H., Wagiran, R., & Hamidon, M. N. (2014). Humidity sensors principle, mechanism, and fabrication technologies: A comprehensive review. *Sensors, 14*(5), 7881–7939. https://doi.org/10.3390/s140507881

3. Scribd. (n.d.). *Analysis of humidity sensor errors in electronic hygrometers*. Retrieved from https://www.scribd.com/document/391213025/03SL01-01

4. Rao, X., Zhao, L., Xu, L., Wang, Y., Liu, K., Wang, Y., … & Chen, G. Y. (2021). Review of optical humidity sensors. *Sensors, 21*(23), 8049. https://doi.org/10.3390/s21238049



ISSN 3030-3907

5. Матбабаев, М. М., & Умаралиев, Н. (2022). Анализ погрешности измерения влажности воздуха оптоэлектронными датчиками. *Universum: технические науки, 1*(94). Retrieved from https://7universum.com/ru/tech/archive/item/12986
6. L.F. Saidoripov, P.I. Kalandarov. Микроконтроллерный преобразователь как объект контроля влажности с использованием искусственного интеллекта. IYUN 2025/6 Development of science Volume 1 Pp.47-52.
7. П.И.Каландаров. O‘zbekistonda metrologiya tizimi va uning ta’minotiga oid asosiy tushunchalar. “O‘zbekiston metrologiyasi” ilmiy-texnik jurnali. 2-2025. 8-13 б.
8. Л. Ф. Саидорипов, П.И. Каландаров, Р. А. Валиев. Микропроцессорные влагомеры сыпучих материалов. Мир измерений №3-2025. Стр. 51-57.
9. Каландаров П.И., Икрамов Г. И., Туркменов Х. И., Белова М. В., Иванов А.Е. АПК РОССИИ: ОБРАЗОВАНИЕ, НАУКА, ПРОИЗВОДСТВО
10. Сборник статей VII Всероссийской (национальной) научно-практической конференции с международным участием. Пенза, 2024. Стр. 49-53.
11. Каландаров П.И., Саидорипов Л. Ф. Микроконтроллерный измерительный преобразователь емкости как объект контроля влажности. Международный журнал аграрной науки и образования. 2025. № 1 (5). С. 62-70.


ISSN 3030-3907