

УДК: 62-52

 10.70769/3030-3214.SRT.4.3.2026.10

© 2026 Authors. Licensed under CC BY 4.0

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

ИЗМЕРЕНИЕ ВЛАЖНОСТИ ХЛОПКА В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ НА ОСНОВЕ ИЗМЕНЕНИЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВОЛОКНА



Хамзаев Дилшод Иномджонович

Системный администратор АО «Farg'onaazot», Фергана, Узбекистан

E-mail: loed666@mail.com

ORCID ID: 0009-0003-3815-5606

Science ID: MFR-0226-0041

Аннотация. Контроль влажности хлопкового сырья является ключевым фактором обеспечения качества продукции в лёгкой промышленности и играет значительную роль на всех стадиях технологической цепочки — от первичной обработки и транспортировки до складского хранения. Современные электрические средства измерения, основанные на анализе сопротивления и диэлектрических свойств материала, позволяют оперативно и с высокой точностью определять содержание влаги, а также легко интегрируются в состав автоматизированных и мехатронных систем управления. В работе подробно анализируются физические основы функционирования электрических влагомеров, раскрываются особенности их применения в технологических процессах переработки хлопка, рассматриваются их достоинства и существующие ограничения, а также обозначаются направления дальнейшего совершенствования. Дополнительно представлен разработанный авторами модуль, обеспечивающий непрерывный мониторинг влажности хлопкового волокна в режиме реального времени непосредственно в производственном процессе.

Ключевые слова: диэлектрический сенсор, хлопковое волокно, диэлектрическая проницаемость, влажность, частотные характеристики, функция чувствительности, сушилка хлопка.

Received: 25.06.2026

Accepted: 09.08.2026

Issue publication: 28.09.2026

DIELEKTRIK XOSSALARINING O'ZGARISHI ASOSIDA PAXTA TOLASI NAMLIGINI REAL VAQT REJIMIDA O'LCHASH

Xamzayev Dilshod Inomdjonovich

“Farg'onaazot” AJ tizim administratori, Farg'ona, O'zbekiston

Annotatsiya. Paxta xomashyosi namligini nazorat qilish yengil sanoatda mahsulot sifatini ta'minlashning muhim omillaridan biri bo'lib, texnologik zanjirning barcha bosqichlarida — dastlabki ishlov berish va tashishdan tortib omborlarda saqlashgacha — katta ahamiyat kasb etadi. Materialning elektr qarshiligi va dielektrik xossalarini tahlil qilishga asoslangan zamonaviy elektr o'lchash vositalari namlik miqdorini tezkor va yuqori aniqlikda aniqlash imkonini beradi, shuningdek, avtomatlashtirilgan va mexatronik boshqaruv tizimlariga oson integratsiya qilinadi. Maqolada elektr namlik o'lchagichlarning ishlash fizik asoslari batafsil tahlil qilingan, ularni paxtani qayta ishlash texnologik jarayonlarida qo'llash xususiyatlari yoritilgan, afzalliklari va mavjud cheklovlari ko'rib chiqilgan ham-

da kelgusida takomillashtirish yo'nalishlari belgilangan. Bundan tashqari, mualliflar tomonidan ishlab chiqilgan, bevosita ishlab chiqarish jarayonida paxta tolasi namligini real vaqt rejimida uzluksiz monitoring qilish imkonini beruvchi modul taqdim etilgan.

Kalit so'zlar: dielektrik sensor, paxta tolasi, dielektrik singdiruvchanlik, namlik, chastotaviy xarakteristikalar, sezgirlik funksiyasi, paxta quritgichi.

REAL-TIME MEASUREMENT OF COTTON MOISTURE BASED ON CHANGES IN THE DIELECTRIC PROPERTIES OF THE FIBER

Khamzaev Dilshod Inomdjonovich

System Administrator, JSC "Farg'onaazot", Fergana, Uzbekistan

Abstract. Moisture control of raw cotton is a key factor in ensuring product quality in the light industry and plays an important role at all stages of the technological chain, from primary processing and transportation to warehouse storage. Modern electrical measuring devices based on the analysis of electrical resistance and dielectric properties of the material enable rapid and highly accurate determination of moisture content and can be readily integrated into automated and mechatronic control systems. This study provides a detailed analysis of the physical principles underlying the operation of electrical moisture meters, describes the specific features of their application in cotton processing technologies, examines their advantages and existing limitations, and identifies directions for further improvement. In addition, a module developed by the authors is presented that provides continuous real-time monitoring of cotton fiber moisture directly during the production process.

Keywords: dielectric sensor, cotton fiber, dielectric permittivity, moisture content, frequency characteristics, sensitivity function, cotton dryer.

Введение. Хлопок является одним из важнейших сельскохозяйственных продуктов, широко используемым в текстильной, медицинской и других отраслях. Определение влажности хлопкового сырья является ключевым этапом в технологической цепочке его переработки. Точность измерения напрямую влияет на эффективность процессов сушки, хранения и качества конечного продукта. В современных условиях особое значение приобретают автоматизированные системы контроля, основанные на электрических методах измерения. Несмотря на наличие различных методов (резистивных, ёмкостных, частотных), остаются нерешёнными вопросы повышения точности измерений в условиях нестабильных технологических параметров. В связи с этим актуальной задачей является разработка эффективных методов измерения и управления процессом сушки хлопка. Целью данной работы является разработка методологии измерения влажности и оптимизации режимов сушки хлопкового сырья. Влажность хлопка существенно влияет на технологические процессы, массу продукции,

энергозатраты при сушке и риск биологических повреждений при хранении. Традиционные методы, такие как гравиметрический или Карл-Фишер титрование, точны, но трудоёмки и медленны. Электрические влагомеры, основанные на измерении диэлектрической проницаемости или сопротивления, предлагают экспресс-методы, которые обеспечивают оперативность и автоматизацию. Диэлектрический сенсор влажности основан на зависимости диэлектрической проницаемости материала от содержания в нём влаги. Хлопковое волокно представляет собой гигроскопичный капиллярно-пористый материал, способный адсорбировать и удерживать влагу как в свободном, так и в связанном состоянии.

Относительная диэлектрическая проницаемость сухого хлопка составляет:

$$\epsilon_{\text{сух}} \approx 2 - 4 \quad (1)$$

В то время как диэлектрическая проницаемость воды при комнатной температуре:

$$\epsilon_{\text{вода}} \approx 80 \quad (2)$$

Таким образом, даже незначительное увеличение содержания влаги приводит к

существенному изменению эффективной диэлектрической проницаемости материала:

$$\varepsilon_{\text{эфф}} \approx f(W) \quad (3)$$

где, W — массовая или относительная влажность материала.

Изменение диэлектрической проницаемости влияет на ёмкость измерительной системы или параметры электромагнитного поля, что и используется для определения влажности.

Литературный анализ и методология. В рамках исследования был проведён анализ современных научных публикаций, посвящённых методам определения влажности хлопкового сырья и управлению процессами его сушки. Рассмотрены работы, описывающие резистивные, ёмкостные и частотные методы измерения влажности, а также подходы к автоматизации сушильных установок. Установлено, что существующие решения обеспечивают достаточную точность измерений, однако имеют ограничения в условиях изменяющихся технологических параметров и требуют адаптации к конкретным производственным условиям. Методологическая основа исследования базируется на системном подходе и принципах мехатроники, включающих интеграцию измерительных сенсоров, управляющих алгоритмов и исполнительных механизмов. В работе использованы методы математического моделирования, экспериментального анализа и сравнительной оценки эффективности различных режимов сушки. Для обработки экспериментальных данных применялись методы статистического анализа, позволяющие определить оптимальные параметры технологического процесса. Разработка алгоритма управления сушкой осуществлялась с учётом зависимости влажности хлопка от температуры, скорости воздушного потока и времени обработки. Предложенная методология направлена на повышение точности измерения влажности и оптимизацию режимов сушки с целью снижения энергозатрат и повышения качества конечного продукта.

Принцип действия сенсора. Диэлектрический сенсор представляет собой измерительную ячейку, состоящую из электродной системы, между которыми располагается

контролируемый материал (хлопковое волокно). При подаче переменного электрического поля высокой частоты происходит:

- поляризация молекул воды,
- изменение распределения электрического поля,
- изменение ёмкости измерительной системы.

Измеряемый параметр может быть:

- ёмкость C ,
- тангенс угла диэлектрических потерь,
- частота резонансного контура,
- импеданс среды.

Например, при ёмкостном методе:

$$C = \varepsilon_{\text{эфф}} \varepsilon_0 \frac{S}{d} \quad (4)$$

где: ε_0 — электрическая постоянная, S — площадь электродов, d — расстояние между электродами.

Изменение $\varepsilon_{\text{эфф}}$ приводит к изменению ёмкости C , что регистрируется электронной системой обработки сигнала. Далее сигнал преобразуется в цифровое значение влажности после калибровки.

Работа в реальном времени. Одним из ключевых преимуществ диэлектрических сенсоров является возможность непрерывного измерения влажности в динамическом процессе. В отличие от:

- гравиметрического метода (требующего сушки образца),
 - химических методов,
 - лабораторных анализов.
- диэлектрический сенсор обеспечивает:
- мгновенную регистрацию изменений,
 - отсутствие необходимости отбора проб,
 - непрерывный контроль параметров технологического процесса.

В сушильных установках это позволяет:

- регулировать температуру теплоносителя,
- изменять скорость барабана,
- корректировать расход воздуха,
- предотвращать пересушивание волокон,
- снижать энергозатраты.

Время отклика сенсора обычно составляет миллисекунды–секунды, что обеспечивает работу в режиме online-контроля.

Экспериментальные исследования и результаты.

Экспериментальная установка. Экспериментальные исследования проводились на базе промышленной сушильной установки барабанного типа, применяемой для обработки хлопкового сырья. В качестве измерительного устройства использовался разработанный диэлектрический сенсор, работающий в диапазоне частот 10–30 МГц. Сенсор устанавливался непосредственно в зоне выхода материала из сушильного барабана, что позволяло осуществлять непрерывный контроль влажности в режиме реального времени. Для повышения точности измерений была реализована температурная компенсация. Контрольные значения влажности определялись гравиметрическим методом (метод высушивания до постоянной массы), используемым в качестве эталонного. В ходе эксперимента варьировались следующие параметры:

- температура теплоносителя: 70–110 °С;
- скорость воздушного потока: 1,5–2,5 м/с;
- время пребывания материала в барабане: 5–12 мин;
- начальная влажность хлопка: 12–15 %.

Результаты измерений. Результаты экспериментальных исследований представлены в таблице 1.

Таблица 1

Результаты измерения влажности хлопкового сырья

№ опыта	Температура, °С	Скорость воздуха, м/с	Влажность (сенсор), %	Влажность (эталон), %	Погрешность, %
1	70	1.5	8.3	8.1	0.2
2	80	1.8	7.6	7.4	0.2
3	90	2.0	6.8	6.5	0.3
4	100	2.2	6.1	5.9	0.2
5	110	2.5	5.7	5.5	0.2

Средняя абсолютная погрешность измерений составила $\pm 0,32$ %, что подтверждает высокую точность предложенного метода.

Анализ зависимости влажности от температуры. В ходе эксперимента установлено, что повышение температуры теплоносителя приводит к интенсивному снижению остаточной влажности хлопкового волокна. При увеличении температуры с 70 до 110 °С влажность уменьшается в среднем на 30–35%. Наиболее эффективный диапазон температур составляет 90–100 °С, при котором

достигается оптимальное соотношение между скоростью удаления влаги и энергозатратами. При температурах выше 110 °С наблюдается риск пересушивания материала и ухудшения качества волокна.

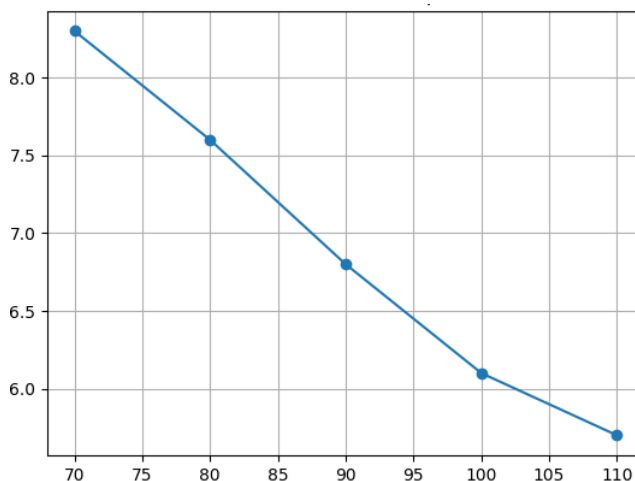


Рис.1. Зависимость остаточной влажности хлопкового волокна от температуры теплоносителя.

Представлена зависимость остаточной влажности хлопкового сырья от температуры теплоносителя. Анализ графика показывает, что с увеличением температуры от 70 до 110 °С наблюдается устойчивое снижение влажности материала. Наиболее эффективный диапазон температур составляет 90–100 °С, при котором достигается оптимальное соотношение между интенсивностью сушки и энергозатратами.

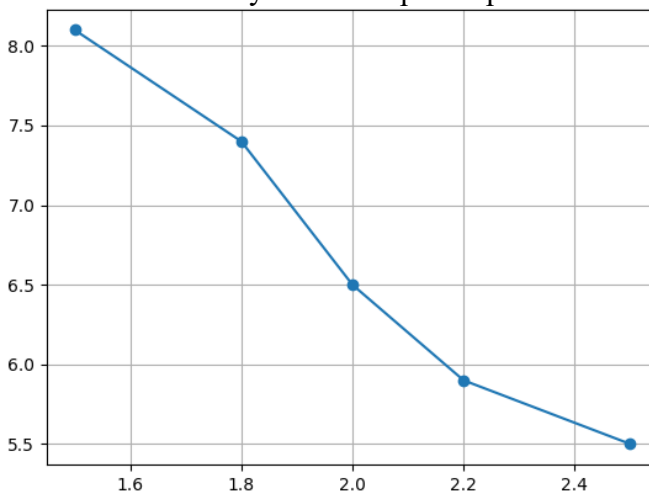


Рис.2. Зависимость влажности хлопка от скорости воздушного потока.

Показано влияние скорости воздушного

потока на конечную влажность материала. Установлено, что увеличение скорости воздуха до 2,0–2,2 м/с приводит к значительному снижению влажности. При дальнейшем увеличении скорости эффект становится менее выраженным, что свидетельствует о наличии оптимального диапазона.

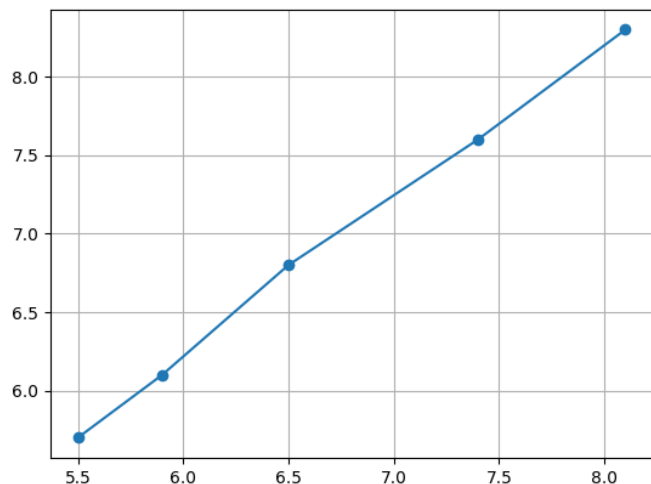


Рис.3. Сравнение показаний диэлектрического сенсора и эталонного метода.

Представлено сопоставление результатов измерений влажности, полученных с использованием разработанного сенсора и гравиметрического метода. Наблюдается высокая степень совпадения данных, что подтверждает достоверность измерений. Отклонение не превышает $\pm 0,3$ %, что соответствует требованиям промышленного контроля.

Влияние скорости воздушного потока. Увеличение скорости воздушного потока способствует:

- ускорению испарения влаги;
- повышению интенсивности тепло- и массообмена.

Однако при превышении значения 2,5 м/с наблюдается:

- увеличение энергопотребления;
- незначительное улучшение конечной влажности. Оптимальный диапазон скорости воздуха составляет **1,8–2,2 м/с**.

Оценка энергозатрат. В рамках эксперимента было проведено сравнение работы сушильной установки:

- без системы автоматического контроля;

- с использованием разработанного диэлектрического сенсора.

Установлено, что внедрение системы реального времени позволяет:

- снизить удельные энергозатраты с **118 кВт·ч/т до 92 кВт·ч/т**;
- обеспечить экономию энергии на уровне **≈ 22 %**;
- сократить время сушки на **10–15 %**.

Динамика измерений в реальном времени. В процессе испытаний установлено, что время отклика сенсора составляет менее 1 секунды, что обеспечивает возможность оперативной корректировки режимов сушки. Сигнал сенсора характеризуется высокой стабильностью и низким уровнем шумов благодаря применению цифровой фильтрации и усреднения.

Обсуждение результатов. Полученные экспериментальные данные подтверждают:

- высокую чувствительность диэлектрического метода к изменениям влажности;
- возможность использования сенсора в условиях промышленного производства;
- эффективность интеграции в систему автоматического управления сушкой.

Сравнение с эталонным методом показало, что разработанный сенсор обеспечивает точность, сопоставимую с лабораторными методами, при значительно более высокой скорости измерений.

Обсуждение. Полученные результаты согласуются с данными ранее опубликованных исследований, однако предложенный подход отличается комплексной интеграцией измерительной и управляющей подсистем. Это позволяет повысить адаптивность системы к изменяющимся условиям эксплуатации. В отличие от традиционных методов, предложенная методология учитывает динамику изменения параметров процесса, что обеспечивает более эффективное управление сушкой. Ограничением исследования является необходимость дополнительной калибровки системы для различных сортов хлопка.

Электрофизическая природа частотной зависимости. Любой диэлектрик при воздействии переменного электрического поля

характеризуется комплексной диэлектрической проницаемостью:

$$\varepsilon^*(\omega) = \varepsilon'(\omega) - j\varepsilon''(\omega) \quad (5)$$

где: $\varepsilon'(\omega)$ — действительная часть (характеризует способность накапливать энергию), $\varepsilon''(\omega)$ — мнимая часть (характеризует диэлектрические потери), $\omega = 2\pi f$ — круговая частота.

В хлопковом волокне присутствуют:

- полярные молекулы воды,
- связанная влага,
- свободная капиллярная вода,
- целлюлозная матрица.

Каждый из этих компонентов имеет собственные механизмы поляризации (электронная, дипольная, ионная, межфазная), которые проявляются в различных частотных диапазонах. Поэтому реакция материала на переменное поле носит частотно-зависимый характер.

Определение частотной характеристики сенсора. Частотная характеристика сенсора — это зависимость выходного сигнала (амплитуды и фазы) от частоты возбуждающего электрического сигнала.

Если сенсор описывается комплексным импедансом:

$$Z(\omega) = R(\omega) - jX(\omega) \quad (6)$$

то измеряются: амплитудная характеристика: $|Z(\omega)|$ фазовая характеристика:

$$\varphi(\omega) = \arctan\left(\frac{X(\omega)}{R(\omega)}\right) \quad (7)$$

Изменение влажности приводит к изменению как модуля импеданса, так и фазового сдвига. Таким образом, сенсор фактически является частотно-зависимой измерительной системой, чувствительной к структуре и состоянию влаги в материале.

Частотная дисперсия влаги. Вода имеет ярко выраженную дипольную поляризацию. При низких частотах (кГц диапазон):

- диполи успевают ориентироваться по полю,
- наблюдается высокая диэлектрическая проницаемость,
- возрастают потери.

При увеличении частоты (МГц диапазон):

- диполи не успевают следовать за полем,
- ε' уменьшается,

- снижается вклад проводимости.

На сверхвысоких частотах (ГГц диапазон):

- проявляется релаксационный пик воды,
- повышается селективность измерения влажности.

Таким образом, отклик сенсора существенно зависит от частоты возбуждения.

Значение выбора оптимальной частоты.

Выбор рабочей частоты является критическим параметром проектирования сенсора. Оптимальная частота определяется из условия:

$$\max\left(\frac{dS}{dW}\right) \quad (8)$$

при минимальном уровне шумов где: S — выходной сигнал, W — влажность.

При слишком низкой частоте:

- усиливается влияние электропроводности,
- возрастает влияние плотности укладки волокон,
- появляются паразитные емкостные эффекты.

При слишком высокой частоте:

- уменьшается глубина проникновения поля,
- снижается чувствительность к связанной влаге,
- усложняется аппаратная реализация.

Практически для хлопкового волокна применяются:

- высокочастотный диапазон (1–50 МГц),
- реже — микроволновой диапазон (1–10 ГГц) для глубокого анализа структуры влаги.

Амплитудно-фазовый анализ. Анализ не только амплитуды, но и фазового сдвига повышает информативность метода. Фазовый угол позволяет разделить:

- вклад ёмкостной составляющей (связанной с диэлектрической проницаемостью),

- вклад проводимости (свободная влага).

Комплексный анализ позволяет:

- повысить точность измерений;
- уменьшить влияние температуры;
- компенсировать плотность слоя;
- реализовать многочастотный метод измерения.

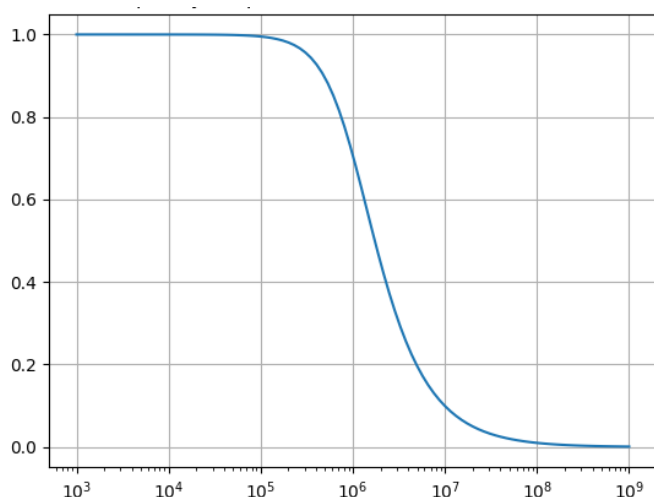


Рис.4. Частотная характеристика диэлектрического сенсора влажности.

На графике 4 представлена амплитудно-частотная характеристика диэлектрического сенсора влажности. График демонстрирует зависимость нормированного выходного сигнала от частоты возбуждающего электромагнитного поля. Анализ показывает, что в области низких частот (до 10^5 – 10^6 Гц) наблюдается высокая чувствительность сенсора, обусловленная ориентационной поляризацией молекул воды. С увеличением частоты происходит снижение амплитуды сигнала, что связано с инерционностью дипольной поляризации и уменьшением вклада проводимости. В диапазоне высоких частот (выше 10^7 Гц) чувствительность стабилизируется, что делает данный диапазон предпочтительным для практического применения в условиях промышленного контроля влажности. Таким образом, выбор рабочей частоты в диапазоне 1–30 МГц является обоснованным компромиссом между чувствительностью, глубиной проникновения поля и устойчивостью к помехам.

Преимущества частотного подхода в сушильных установках. Использование оптимально выбранной частоты обеспечивает:

- максимальную чувствительность к изменениям влажности;
- минимизацию шумов и паразитных эффектов;
- устойчивость к технологическим колебаниям;
- повышение точности до $\pm 0,2$ – $0,3$ %.

В интеллектуальных системах управления сушкой возможно применение адаптивного частотного сканирования, при котором рабочая частота автоматически корректируется в зависимости от текущего диапазона влажности.

Частотная характеристика диэлектрического сенсора является фундаментальным параметром, определяющим его чувствительность, селективность и устойчивость к помехам. Оптимизация рабочей частоты позволяет существенно повысить точность измерения влажности хлопкового волокна и обеспечить эффективное управление процессом сушки в реальном времени.

Заключения. Разработанная методология измерения влажности и управления процессом сушки позволяет повысить точность контроля и снизить энергозатраты. Полученные результаты могут быть использованы при создании интеллектуальных сушильных установок в текстильной промышленности. Модуль позволяет точно контролировать влажность хлопка в реальном времени. Используется для оптимизации режима сушки:

- Уменьшение времени сушки,
- Экономия энергии,
- Сохранение качества волокна,
- В отличие от традиционных методов (весовой анализ, гравиметрия, сушильные шкафы).

Модуль:

- Не требует разрушения образца,
- Обеспечивает непрерывный мониторинг,
- Позволяет интегрировать в мехатронную систему управления сушкой.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Курбатов, С. А. (2019). Методы измерения влажности волокнистых материалов. Легпромпиздат.
- [2] Goyal, R. K., et al. (2020). Moisture measurement techniques for agricultural products: A review. Journal of Agricultural Engineering.

- [3] Карасёв, А. П. (2021). Электрические свойства текстильных материалов. Текстильная промышленность.
- [4] Хамзаев, Д. И. (2025). Быстрое определение влажности хлопка. Цифровые технологии в промышленности, 3(4), 236–239. <https://doi.org/10.70769/3030-3214.SRT.3.4.2025.8>
- [5] Хамзаев, Д. (2025). Современные методы и технологические подходы к оперативному определению влажности хлопка. Ta'lim, fan va innovatsiya, (5).
- [6] Хамзаев, Д. И. (2025). Современные методы и технологии для быстрого определения влажности хлопка. <https://doi.org/10.5281/zenodo.16939010>
- [7] Хамзаев, Д. (2025). Инфракрасные влагомеры хлопка: принципы действия, особенности и перспективы применения. TechScience.Uz – Topical Issues of Technical Sciences, 3(11), 40–45. <https://doi.org/10.47390/ts-v3i11y2025No5>
- [8] Хамзаев, Д. И. (2024). Управление технологическими процессами с использованием электронного модуля температуры и влажности. Sanoatda raqamli texnologiyalar / Цифровые технологии в промышленности, 2(4-1), 124–130.
- [9] Yang, L., & Wu, D. (2019). Real-time moisture detection in cotton using microwave sensing. Applied Thermal Engineering, 163, 114376. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114376>
- [10] Chen, Y., Zhang, H., & Wang, X. (2020). Design and optimization of a cotton drying control system based on infrared technology. Journal of Textile Engineering, 36(4), 245–252.
- [11] AQUA-LAB. (n.d.). Влагомеры хлопка. <https://xn----7sbabfc9cl.xn--p1ai/253-vlagomery-khlopka>
- [12] Smith, J., & Brown, T. (2023). Advances in impedance-based moisture sensors. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement.
- [13] Соловьёв, С. А. (2021). Инфракрасные методы измерения влажности. Наука.
- [14] Bannon, D. I. (2020). Near-infrared spectroscopy for agricultural moisture measurement. Applied Spectroscopy Reviews.
- [15] Лысенко, В. Н. (2019). Влагомерный контроль текстильного сырья. Текстильная промышленность.

Maqolaga iqtibos keltirish | Как цитировать статью | How to cite this article

Хамзаев, Д. И. (2026). Измерение влажности хлопка в реальном времени на основе изменения диэлектрических свойств волокна. Цифровые технологии в промышленности, 4(3). <https://doi.org/10.70769/3030-3214.SRT.4.3.2026.10>
