



ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

Izmeritel'naya Tekhnika

№4 • 2023

Научно-технический журнал
Периодичность 12 раз в год
Основан в 1939 г.

С 1958 г. переводная версия
«Measurement Techniques»
ISSN 0543-1972 (Print)
ISSN 1573-8906 (Online)
Springer Nature
www.springer.com/11018

Свидетельство о регистрации:
ПИ № ФС 77-84564 от 06.02.2023 г.
Издание зарегистрировано Федеральной службой
по надзору в сфере связи, информационных
технологий и массовых коммуникаций

УЧРЕДИТЕЛИ

Федеральное агентство по техническому
регулированию и метрологии

ФГБУ «Всероссийский научно-
исследовательский институт
метрологической службы»

ФГУП «Всероссийский научно-
исследовательский институт метрологии
им. Д. И. Менделеева»

ФГБУ «Всероссийский научно-
исследовательский институт оптико-
физических измерений»

ФГУП «Всероссийский научно-
исследовательский институт физико-
технических и радиотехнических
измерений»

МОО «Метрологическая академия»

ИЗДАТЕЛЬ

ФГБУ «Всероссийский научно-
исследовательский институт
метрологической службы»

Адрес редакции и издателя:
119361, Москва, ул. Озёрная, 46,
ФГБУ «ВНИИМС»
Тел.: +7(495)781-48-70
E-mail: izmt@vniims.ru
Сайт: www.izmt.ru

СОДЕРЖАНИЕ

Всемирный день метрологии – 20 мая 2023 года

Приветствие директора Международного бюро мер и весов М. Милтона
и директора Международного бюро законодательной метрологии
Э. Доннеллана 4

■ ГОСУДАРСТВЕННЫЕ ЭТАЛОНЫ

В. С. Иванов, В. Н. Крутиков, А. С. Микрюков, С. А. Москалюк. Государственный
первичный эталон единицы средней мощности лазерного излучения
ГЭТ 28-2022 5

■ ОБЩИЕ ВОПРОСЫ МЕТРОЛОГИИ И ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

А. В. Лапко, В. А. Лапко. Модификация непараметрической методики проверки
гипотезы о распределениях случайных величин 11

А. Н. Жирабок, А. В. Зуев, А. Е. Шумский. Виртуальные датчики для дискретных
нелинейных систем 18

■ ИЗМЕРЕНИЯ В ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ

П. И. Каландаров, Г. И. Икрамов. Оценка эффективности применения
информационно-измерительной системы контроля температуры и
влажности зернопродуктов 23

■ ЛИНЕЙНЫЕ И УГЛОВЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

В. И. Бусурин, С. О. Васецкий, К. А. Коробков. Компенсация влияния линейного
ускорения на параметры рамочного микрооптоэлектромеханического
преобразователя угловой скорости 31

■ ОПТИКО-ФИЗИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Г. П. Арумов, А. В. Бухарин. Сравнение методов определения концентраций
частиц модельного рассеивающего слоя лидаром упругого рассеяния 38

В. И. Григорьевский, Я. А. Тезадов. Компенсация систематической погрешности
спектральных измерений фоновой концентрации метана в атмосфере Земли 44

■ ИЗМЕРЕНИЯ ВРЕМЕНИ И ЧАСТОТЫ

В. Ф. Фатеев, Ф. Р. Смирнов, А. А. Карауш. Метод релятивистской синхронизации
квантовых часов: экспериментальные исследования 50

■ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

О. Г. Бондарь, Е. О. Брежнева, А. Ю. Зубарев. Совершенствование алгоритмов
измерения температуры при двухпроводном подключении термометра
сопротивления 57

■ МЕЖДУНАРОДНОЕ СОТРУДНИЧЕСТВО

П. В. Базылев, В. А. Луговой. Результаты пилотных сличений национальных
эталонов единицы скорости распространения продольных ультразвуковых
волн в твёрдых средах КОOMET 706/RU-a/16 63

■ ИНФОРМАЦИЯ

Президиум Метрологической академии приступил к обсуждению Стратегии
обеспечения единства измерений до 2035 года 71



ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

Izmeritel'naya Tekhnika

№4 • 2023

➤ Наиболее полная информация о государственных первичных эталонах и результатах научных исследований в области метрологии и обеспечения единства измерений.

➤ Индексация научных статей в ключевых российских и международных реферативных базах данных:

⊙ RSCI (сводный рейтинг от 01.12.2022 г.) Q2;

⊙ ВАК (К1);

⊙ Scopus Q4:

Engineering: Engineering (miscellaneous),
General Engineering;

Mathematics: Applied Mathematics;

Physics and Astronomy: Instrumentation;

⊙ WOS, Emerging Sources Citation Index (ESCI) Q4:

Engineering, Multidisciplinary;

Instruments & Instrumentation;

⊙ «Белый список» РЦНИ.

➤ Полная электронная копия журнала размещена в Научной электронной библиотеке https://www.elibrary.ru/title_about_new.asp?id=8723

Доступ к электронным копиям архивных выпусков журнала (2003–2013 гг.) открыт на бесплатной основе. Доступ к выпускам журнала с 2014 г. по настоящее время осуществляется на платной основе по подписке.

Сдано в набор 27.03.2023.

Подписано в печать 28.04.2023.

Формат 60x90 1/8. Бумага мелованная.

Печать офсетная.

Усл. п. л. 9,0. Уч.-изд. л. 11,0. Тир. 150 экз. Зак. 23-д09.

Свободная цена.

Знаком информационной продукции не маркируется.

Отпечатано в ООО «Типография «Миттель Пресс»,
127254, Москва, ул. Руставели, 14, с. 6, оф. 7.

Редакция не несёт ответственности за содержание рекламных материалов. Точка зрения редакции может не совпадать с позицией авторов. Полное или частичное воспроизведение материалов допускается с письменного разрешения редакции.

При перепечатке материалов ссылка на журнал «Измерительная техника» обязательна.

Все поступившие в редакцию материалы подлежат рецензированию. Материалы, переданные в редакцию, не возвращаются.

Правила для авторов и требования к оформлению статей размещены на сайте www.izmt.ru

CONTENTS

World Metrology Day – 20 May 2023

Message from M. Milton, Director of the BIPM and E. Donnellan, Director of the BIML..... 4

STATE STANDARDS

V. S. Ivanov, V. N. Krutikov, A. S. Mikryukov, S. A. Moskalyuk. National primary standard for the unit of average laser power GET 28-2022 5

GENERAL PROBLEMS OF METROLOGY AND MEASUREMENT TECHNIQUES

A. V. Lapko, V. A. Lapko. Modification of a nonparametric method for testing the hypothesis of distributions of random variables 11

A. N. Zhirabok, A. V. Zuev, A. E. Shumsky. Virtual sensors for discrete-time nonlinear systems 18

MEASUREMENTS IN INFORMATION TECHNOLOGIES

P. I. Kalandarov, G. I. Ikramov. Evaluation of the effectiveness of the application of the information and measurement system for monitoring the temperature and humidity of grain products..... 23

LINEAR AND ANGULAR MEASUREMENTS

V. I. Busurin, S. O. Vasetskiy, K. A. Korobkov. Compensation of the influence of linear acceleration on the parameters of the frame micro optoelectromechanical angular velocity transducer..... 31

OPTICOPHYSICAL MEASUREMENTS

G. P. Arumov, A. V. Bukharin. Comparison of methods for determining concentrations of particles in a model scattering layer for an elastic scattering lidar 38

V. I. Grigorievsky, Ya. A. Tezadov. Compensation for the systematic error of spectral measurements of the methane background in the Earth's atmosphere 44

TIME AND FREQUENCY MEASUREMENTS

V. F. Fateev, F. R. Smirnov, A. A. Karaush. Method of relativistic syntonization of quantum clocks: experimental studies..... 50

TERMOPHYSICAL MEASUREMENTS

O. G. Bondar, E. O. Brezhneva, A. Yu. Zubarev. Improving temperature measurement algorithms for two-wire connection of a resistance thermometer..... 57

INTERNATIONAL COLLABORATION

P. V. Bazylev, V. A. Lugovoi. Results of the COOMET 706/RU-a/16 pilot comparison of national standards of the unit of propagation velocity of longitudinal ultrasonic waves in solids 63

INFORMATION

The Presidium of the Metrological Academy has started discussing the Strategy on Assurance of Measurement Uniformity until 2035..... 71

Оценка эффективности применения информационно-измерительной системы контроля температуры и влажности зернопродуктов

Палван Искандарович Каландаров^{1✉}, Гани Икрамович Икрамов²

¹ Национальный исследовательский университет «Ташкентский институт инженеров ирригации и механизации сельского хозяйства», Ташкент, Республика Узбекистан, eest_uz@mail.ru✉, <https://orcid.org/0000-0002-8199-7484>

² Республиканский проектный институт «УзИнжиниринг», Ташкент, Республика Узбекистан, gani.ikramov2022@mail.ru

Аннотация. Рассмотрены актуальные в настоящее время вопросы комплексной автоматизации различных объектов переработки и хранения зерна и зернопродуктов. Описана автоматизированная система управления технологическими процессами хранения и переработки зерна на соответствующих предприятиях. Показано, что система позволяет не только оценивать соответствие параметров указанных процессов технологическим регламентам, но и контролировать деятельность технического персонала, а также снижать финансовые и энергетические затраты предприятий. Рассмотрен основной элемент автоматизированной системы – информационно-измерительная система контроля температуры и влажности зернопродуктов. Проанализированы косвенные неразрушающие методы контроля параметров (влажности и температуры) зернопродуктов. Обсуждены построение функциональной схемы измерительных преобразователей и дальнейшая разработка на их основе электронных устройств информационно-измерительных систем. Оценена эффективность информационно-измерительной системы контроля температуры и влажности зернопродуктов. Показано, что применение таких информационно-измерительных систем позволяет ужесточить контроль технологических процессов и тем самым повысить степень управления техническими устройствами влагометрии и термометрии.

Ключевые слова: влажность, температура, контроль, диэлькометрический метод, хранение и переработка зерна, преобразователь, информационно-измерительные системы, автоматизированные системы управления технологическими процессами

Для цитирования: Каландаров П. И., Икрамов Г. И. Оценка эффективности применения информационно-измерительной системы контроля температуры и влажности зернопродуктов // Измерительная техника. 2023. № 4. С. 23–30. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2023-4-23-30>

Evaluation of the effectiveness of the application of the information and measurement system for monitoring the temperature and humidity of grain products

Palvan I. Kalandarov^{1✉}, Gani I. Ikramov²

¹ National Research University “Tashkent Institute of Irrigation and Agricultural Mechanization Engineers”, Tashkent, Republic of Uzbekistan, eest_uz@mail.ru✉, <https://orcid.org/0000-0002-8199-7484>

² Republican Design Institute “UzEngineering”, Tashkent, Republic of Uzbekistan, gani.ikramov2022@mail.ru

Abstract. The current issues of complex automation of various grain processing and storage facilities are considered. The system of automated control of technological processes of grain storage and processing at the corresponding enterprises is proposed. The use of the system allows you to control the storage and processing of grain and grain products in accordance with the technological regulations, as well as the activities of technical personnel, reduce financial and energy costs of enterprises. Indirect non-destructive methods of control of parameters (humidity and temperature) of grain products are analyzed. The construction of a functional circuit of measuring transducers and the further development of electronic devices of information and measurement systems based on them are discussed. It is shown that the use of such information-measuring systems makes it possible to tighten the control of technological processes and thereby increase the degree of control of technical devices of moisture and thermometry.

Keywords: humidity, temperature, control, dielmetric method, grain storage and processing, converter, information and measurement systems, automated process control systems

Введение. В сельском хозяйстве и пищевой промышленности широко применяются анализаторы влажности зерна и зернобобовых, хлопка и хлопковых семян, табачных листьев и продукции на их основе. Оперативный контроль влажности указанных продуктов необходим на всех

стадиях технологического цикла их производства и хранения. С учётом влажности определяют начало уборки урожая, устанавливают режимы обмолотки, сушки и хранения, а также качество полученных зернопродуктов [1]. Особенно такой контроль требуется при дозревании зерна, в период

роста влажности зерновой массы. По данным [2] влажность отдельных зёрен в начальный период уборки урожая находится в интервале 10–50 %. Зерно убирают в стадии технологической спелости, когда влажность достигает 20–25 % и не завершён синтез питательных веществ. По достижении спелости увеличивается влажность зерновой массы и окружающего воздуха, что чревато самовозгоранием урожая при повышении внутренней температуры и потере питательных свойств зерна [3]. Поэтому для правильного хранения зерна в соответствии с агротехническими требованиями нормативных документов необходимо обеспечить оперативный контроль влажности и температуры зерна, а также влажности и температуры воздуха окружающей среды при длительном хранении зерна.

В настоящее время актуальной является комплексная автоматизация зернохранилищ элеваторов, мукомольных заводов и других объектов по переработке и хранению зерна, особенно в части автоматизации технологических процессов сушки, хранения и перемещений зерна на указанных объектах. К основным направлениям автоматизации относятся внедрение систем нового поколения – автоматизированных комплексов зерноперерабатывающих предприятий и хранилищ вместо существующих релейных систем автоматики, а также модернизация оборудования для хранения

и переработки зерна, которое обеспечивает подготовку зерна к размолу, включая формирование помольной партии, и при этом контролирует автоматическое увлажнение зерна с учётом начальной влажности и другие характеристики, например температуру зерна и окружающей среды в хранилищах.

Для повышения эффективности технологического контроля дисперсных неоднородных систем при автоматизации производства готовой продукции можно использовать косвенные неразрушающие методы измерений, реализуемые информационно-измерительными системами (ИИС). При разработке ИИС важно знать, как на их характеристики влияют характеристики составных элементов [4].

Цель настоящей статьи – описание и оценка эффективности ИИС контроля температуры и влажности зернопродуктов, которая входит в состав автоматизированной системы управления технологическими процессами хранения и переработки зерна на предприятиях.

Измерение влажности зерна и зернопродуктов. Влажность является одним из основных параметров качества зерна. Собранное зерно поступает на заготовительные пункты зерноперерабатывающих предприятий, где хранится некоторое время. Зерно – гигроскопичный материал, поэтому недостаточный контроль его влажности при транспортировке и хранении приводит к значительным потерям качества зерна. При длительном хранении зерна с повышенной влажностью за счёт развития плесени и зерновых вредителей масса зерна уменьшается, а также повышается его слеживаемость, возможность самосогревания и прорастания. В технологических процессах переработки повышенная влажность зерна затрудняет его размол и просеивание продуктов переработки, а также ухудшает свойства зерноматериалов, уменьшает производительность оборудования.

На предприятиях агропромышленного комплекса широко используются автоматизированные системы управления технологическими процессами (АСУТП) хранения и переработки зерна. Данные системы предназначены для оперативного контроля производимой предприятием продукции с отслеживанием соответствия действий персонала технологическому регламенту и позволяют строго учитывать влияние человеческого фактора (операторов) на экономические показатели зерноперерабатывающих предприятий. В состав АСУТП могут входить различные ИИС. Для решения описанных выше проблем в ИИС необходимо включать устройства для экспресс-измерений температуры и влажности зерна как в полевых условиях, так и при промышленном хранении и переработке. Эти устройства должны быть приспособлены для работы в условиях агрессивных сред, высоких давлений и температур при организации контроля в сырьевой зоне, т. е. в поле или на сырьевых площадках предприятий.

Одним из перспективных методов технологического контроля зерна и зернопродуктов является диэлькометрический метод [5], основанный на взаимодействии электрического поля первичного преобразователя с веществом [6] и реализуемый с помощью ИИС. При анализе свойств твёрдых и жидких веществ и материалов в химической, пищевой и других перерабатывающих отраслях промышленности

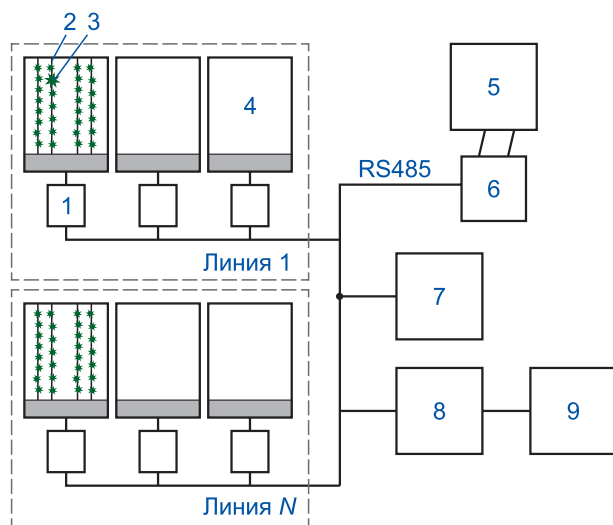


Рис. 1. Автоматизированная система контроля температуры и влажности зерна для элеваторов и зернохранилищ: 1 – блок опроса подвесок элеватора; 2 – подвески для подключения датчиков влажности силосов к управляющему контроллеру; 3 – подвески для подключения датчиков температуры; 4 – элеватор; 5 – блок согласования линий элеваторов с компьютером; 6 – блок программы обеспечения системы; 7 – управляющий контроллер; 8 – блок опроса аналоговых подвесок; 9 – аналоговые подвески силосов

Fig. 1. Automated grain temperature and humidity control system for grain elevators and granaries: 1 – elevator suspension polling unit; 2 – suspensions for connecting silo humidity sensors to the control controller; 3 – suspensions for connecting temperature sensors; 4 – elevator; 5 – elevator line matching unit to the computer; 6 – software system; 7 – control controller; 8 – analog suspension polling unit; 9 – analog silo suspensions

широко распространены ИИС с диэлькометрическими влагомерами благодаря простоте конструкции, надёжности, точности и удобству использования. В [7] предложена функциональная схема ИИС на основе диэлькометрического способа и высокочастотного метода измерения влажности твёрдых, дисперсных и сыпучих материалов.

В настоящее время в автоматизированных ИИС используются различные по конструкции и методам современные средства измерений влажности и температуры, разрабатываемые в Республике Узбекистан и других странах.

Автоматизированная ИИС контроля температуры и влажности зерна. На рис. 1 приведена структурная схема ИИС контроля температуры и влажности зерна, применяемая в хранилищах. Система содержит N линий групп элеваторов, каждая линия снабжена блоками 1 опроса подвесок 3, 2 для подключения датчиков температуры и влажности зерновой массы силоса к управляющему контроллеру 7, например УК-01 (АО «СКТБ Кольцова», Россия), или других моделей, совместимых с программным обеспечением ИИС. Данная ИИС является основой АСУТП предприятия. Структура ИИС содержит три уровня. Первый уровень составляют датчики влажности и температуры, второй уровень представляет контроллер для сбора данных устройств первого уровня, третий (высший) уровень – компьютер с программным обеспечением для обработки данных и управления всей ИИС, а также для отображения и архивирования полученной измерительной информации.

Авторами [8] разработан ёмкостный первичный преобразователь, представляющий собой плоский выносной металлокерамический (из титанового сплава) датчик цилиндрической формы, который можно использовать в качестве контактно-закладного датчика в течение длительного времени без ухудшения его параметров. На рис. 2 представлена схема датчика. Electrodes датчика коаксиально запрессованы в керамическую подошву (основание). Электромагнитное поле датчика сосредоточено в сравнительно тонкой межэлектродной области, что исключает влияние геометрии и целостности керамики на результаты измерения влажности. Electrodes датчика снабжены электроподогревом, для чего в подошве основания датчика имеются пазы для укладки нагревательного элемента. Это позволяет предотвращать налипание на Electrodes влажного измеряемого материала в статическом состоянии при измерениях абсолютных и относительных значений влажности и температуры зерна на рабочих местах в силосе/бункере зернохранилища. На основе датчика в качестве первичного преобразователя создан опытный образец диэлькометрического высокочастотного экспресс-влажгомера для зерна и зернопродуктов. Предложенная конструкция прибора [9, 10] позволила измерять влажность проб зерна на ленте конвейера или шнека в течение длительного времени с минимальной погрешностью измеряемой диэлектрической проницаемости, а следовательно, и влажности. Технические условия процесса измерения на ленте конвейера подобны процессу измерения влажности зерна в силосе при закладочном состоянии, разница состоит в том, что в непрерывном потоке измеряемого

материала при закладке датчика в силосе зерно находится больше в статическом состоянии, чем в движении, так как перемещение зерновой массы в элеваторе происходит при саморазогреве, когда сигнал термодатчика поступает в центр управления автоматизированной ИИС или АСУТП. При этом глубина погружения Electrodes датчика с учётом внешней поверхности подошвы в рабочих пределах плотности измеряемого материала перемещаемой зерновой массы практически не влияет на измеряемое значение влажности: соединение высокочастотного коаксиального кабеля связи (шлейфа) измерительной части экспресс-прибора с кольцевыми Electrodes исключает вертикальную составляющую напряжённости электромагнитного поля E между Electrodes датчика.

С помощью контактов $K1, K2$ (см. рис. 2) с входом измерительного генератора через коаксиальный шнур связи соединяются кольцевые Electrodes из титана, а с помощью контактов $K3, K4$ к электрическому источнику питания подключается нагревательный элемент керамической подошвы – основания датчика.

Контролируемый материал в процессе измерения плотно соприкасается с поверхностью металлических кольцевых Electrodes, к которым подведено высокочастотное напряжение

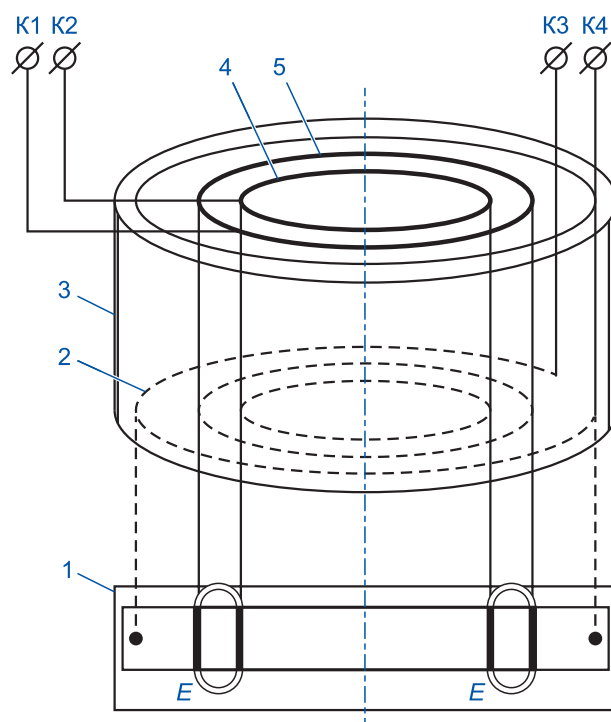


Рис. 2. Устройство датчика влажности зерна системы контроля элеваторов: 1 – подошва датчика из прочного диэлектрика; 2 – кольцевая линия подогрева (ЛЭП); 3 – корпус закладного датчика системы контроля влажности элеватора; 4, 5 – металлические (титановые) кольцевые Electrodes

Fig. 2. Grain moisture sensor device of the elevator control system: 1 – the sole of the durable dielectric trace sensor; 2 – ring heating line (power line); 3 – the housing of the lining sensor of the elevator humidity control system; 4, 5 – metal (Titanium) ring Electrodes

измерительного генератора, для определения диэлектрической проницаемости, соответствующей влажности материала. При этом формально функциональную зависимость диэлектрических характеристик материала от его влажности можно рассматривать как первичное преобразование, причём выходной (электрический) сигнал первичного измерительного преобразователя является полезным выходным сигналом влажности зерна измерительного устройства [11].

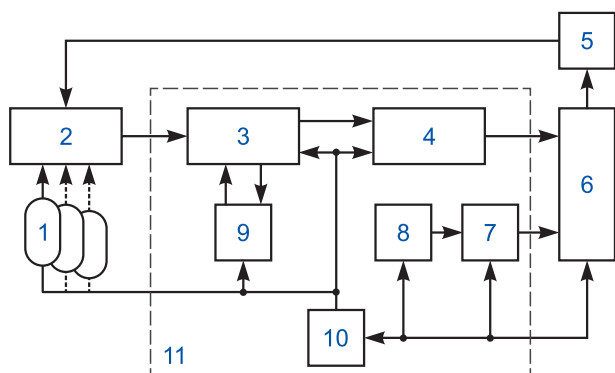


Рис. 3. Функциональная схема информационно-измерительной системы для измерения влажности и температуры: 1 – датчик влажности элеватора; 2 – управляющий узел очередности; 3 – измерительный генератор; 4, 7 – блоки формирования сигналов; 5 – управляющий контроллер; 6 – компьютер; 8 – опорный высокочастотный генератор; 9 – стабилизатор активных потерь; 10 – блок питания; 11 – блок измерительной и опорной информации

Fig. 3. Functional diagram of an information-measuring system for measuring humidity and temperature: 1 – elevator humidity sensor; 2 – priority control unit; 3 – measuring generator; 4, 7 – signal generation units; 5 – control controller; 6 – computer; 8 – reference generator; 9 – active loss stabilizer; 10 – power supply; 11 – measuring and reference information unit

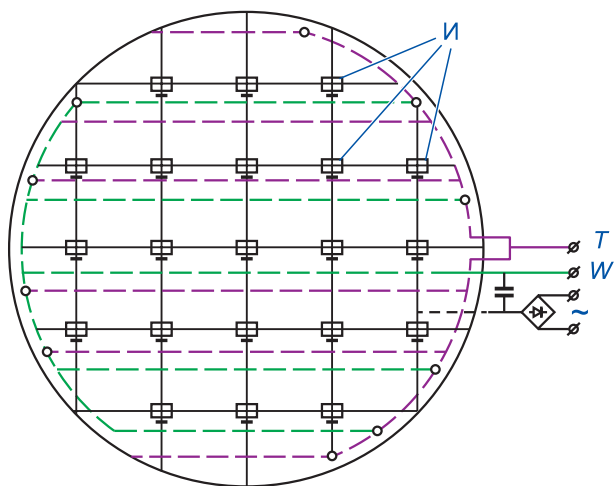


Рис. 4. Схема установки измерителей *И* влажности и температуры воздуха в измерительном зонде: *T*, *W* – датчики температуры и относительной влажности воздуха соответственно

Fig. 4. Example of installation of humidity and air temperature meters *M* in an elevator: *T* is the air temperature, *W* is the relative humidity of the air

Характер взаимодействия электромагнитного поля с влажным материалом определяется комплексными диэлектрической и магнитной проницаемостями с обязательным учётом явлений поляризации. Как известно [12], существует четыре вида поляризации: электронная, атомная, ориентационная и объёмная. Поляризуемость – комплексная величина, которая проявляет резонансные свойства, и поляризация каждого вида проявляется в определённом диапазоне частот электромагнитного поля, где потери энергии максимальны. При измерениях влажности используют комплексную диэлектрическую проницаемость $\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon'' = \varepsilon' + (\varepsilon' - \varepsilon'') / (1 + j\omega\tau)$ и тангенс угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta = \varepsilon'' / \varepsilon'$, где ε' , ε'' – действительная и мнимая части ε ; $\varepsilon'' = \sigma / \omega$; ω – круговая частота; τ – временной промежуток; σ – удельная проводимость.

При построении математической модели, описывающей сложную многокомпонентную систему, в которой диэлектрические характеристики звеньев схемы замещения ёмкостей преобразователя соответствуют различным формам связи влаги (различным поляризациям), в основном учитывали ориентационную поляризацию и зависимости между количественным содержанием влажности в материале и его диэлектрическими характеристиками.

На рис. 3 приведена функциональная схема измерителя с датчиками диэлькометрического высокочастотного влагомера, предназначенного для измерения влажности зерна. Значение влажности определяется ёмкостным первичным преобразователем 1 (в виде закладного датчика), установленным в зерновой массе и соединённым коаксиальным кабелем через термоподвеску с электронной частью измерительного высокочастотного генератора 3. Его частота изменяется в соответствии с изменением влажностного содержания зерна, так как датчик включён в колебательный контур генератора. С выхода генератора аналоговые высокочастотные сигналы поступают на вход блока 4 формирования сигнала, выдающего сигналы прямоугольной формы с частотой следования импульсов, равной частоте измерительного генератора.

Опорный высокочастотный генератор 8 собран из элементов, идентичных элементам измерительного генератора. Сигнал постоянной (опорной) частоты генератора 8, равный частоте измерительного высокочастотного генератора, в случае нулевого значения влажности контролируемого компонента (резонансный режим работы) поступает на вход блока 7 формирования сигнала. При этом сигнал опорного высокочастотного генератора в блоке формирования сигналов обрабатывается так же, как и сигнал измерительного генератора в блоке формирования сигналов. Выходные сигналы блоков 4, 7 поступают в блок 11 обработки информации компьютера, который в результате сравнения их частот фиксирует разность частот, пропорциональную влажности зерна, и передаёт данную информацию в цифроаналоговый преобразователь компьютера после паузы, соответствующей алгоритму работы влагометрической системы. Система включается по команде распределителя девяти сигналов в виде прямоугольных

импульсов инфранизкой частоты порядка 1 Гц, выдаваемых поочерёдно с определённым интервалом для коммутации электрических цепей, записи частот сигналов измерительного и опорного генераторов, а также индикации на цифровом табло информационной системы значения влажности, фиксируемой в памяти компьютера до следующего отсчёта, и архивной записи. Блок распределения сигналов вместе с низкочастотным тактовым генератором и делителем частоты выполняют роль электронного коммутатора, работающего совместно с третьим уровнем ИИС. Непрерывный (с временем установления показаний около 10 с) обеспечиваемый диапазон измерения влажности зерна составляет 8,0–18,5 % при изменении рабочей температуры объекта в интервале 5–60 °С. Предел допускаемых значений основной погрешности 0,8 % (абс).

Результаты и обсуждение. Как правило, в ИИС контроля процессов хранения и переработки зерна используют измерители влажности и температуры воздуха, поскольку влажность зерна напрямую зависит от влажности и температуры воздуха.

Учитывая особую важность процесса хранения зерна, в системе автоматизированного контроля влажности и температуры воздуха в хранилище предложено использовать обладающий высокими быстродействием и надёжностью измеритель влажности и температуры окружающей среды модели Farmex HT-PR (Финляндия). На рис. 4 показана схема размещения в измерительном зонде измерителей влажности и температуры воздуха Farmex HT-PR.

Каждый из 21 измерителей, управляемых контролером ИИС, поочерёдно подключается для измерений влажности и температуры, показания прибора высвечиваются на дисплее измерителя, а также архивируются на третьем уровне ИИС и отображаются у оператора ИИС. Измерители влажности и температуры для мониторинга окружающей среды устанавливаются в каждом из силосов элеватора или в хранилище зерна, конкретное расположение измерителей в пространстве планируется заранее в соответствии с геометрией помещений хранилища или силосов, а также с учётом метрологических характеристик приборов. Диапазоны измерений влажности и температуры измерителя Farmex HT-PRO составляют соответственно 8–45 % и 0–99 °С, площадь измерительного зонда (в виде металлической сетки) 1 м².

Получение достоверной и точной информации о влажности зерна и относительной влажности воздуха в хранилище возможно лишь при использовании надёжных датчиков влажности и температуры как зерна, так и воздуха, а также современных программно-технических средств в автоматизированных ИИС. Анализ ряда литературных источников [13–24] и научных исследований [25–31] подтверждает, что эффективность применения таких систем контроля затруднена отсутствием на современном рынке средств измерений надёжных закладных датчиков сыпучих материалов, которые устанавливаются определённым образом в зерновой массе и согласуются с работой термоподвесок и гигрометрических датчиков воздуха, как элементов единой системы автоматизации контроля параметров зернохранилища [32–40].

По результатам исследований данной тематики авторами настоящей статьи получен патент Республики Узбекистан [41]. Высокочастотный ёмкостный влагомер внедрён в промышленных условиях хранения и переработки зернопродуктов, его применение повышает эффективность технологического процесса при управлении контролируемыми параметрами в процессах хранения и переработки зерна.

Заключение. Преимущества используемого в ИИС диэлькометрического метода наиболее ощутимы при создании измерителей влажности. Измерительное устройство, основанное на данном методе, реализовано и внедрено в промышленных условиях зерноперерабатывающего предприятия в Республике Узбекистан.

Эффективное управление системой термометрии, входящей в состав ИИС и предназначенной для непрерывного циклического многоканального измерения и контроля температуры сыпучих сред исключает процессы самосогревания зерна, предотвращает взрывоопасные ситуации и случаи самовозгорания зерна, которые приводят не только к убыткам из-за снижения или полной потери потребительских качеств зерна, но и к поломкам оборудования элеваторов, зернохранилищ, мукомольных предприятий, комбикормовых заводов.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Список источников

1. Каландаров П. И., Логунова О. С., Андреев С. М. Научные основы влагометрии: Монография. Ташкент, 2021. 174 с.
2. Зимин Е. М., Волхонов М. С., Зимин И. Б. Результаты лабораторных исследований работы охладителя зерна аэрожелобного типа // Сборник научных трудов международной конференции «Актуальные проблемы инженерного обеспечения АПК», Ярославль, 2004. Т. 3. С. 58–62.
3. Савосин С. И., Солдатов В. В. Автоматизация контроля влажности зерна и воздуха при его хранении // Вестник ФГОУ ВПО «МАГУ им. В. П. Горячкина». Агроинженерия. 2008. Вып. 3(28). С. 28–30.
4. Берлинер М. А. Измерения влажности. М.: Энергия, 1973. 400 с.
5. Теория и практика экспрессного контроля влажности твёрдых и жидких материалов / Под общей редакцией Е. С. Кричевского. М.: Энергия, 1980. 239 с.
6. Ковалёва А. А., Саитов Р. И., Запорожец А. С., Парфёнова Е. Г. Методика градуировки серийных СВЧ-влагомеров. // Измерительная техника. 2017. № 3. С. 72–76.
7. Kalandarov P., Mukimov Z., Tursunov O., Kodirov D., Erkinov B. Study on dielectric moisture control method based on capacitive transducers. *AIP Conference Proceedings*, 2022, vol. 2686, 020016. <https://doi.org/10.1063/5.0114591>
8. Kalandarov P. I., Abdullaeva D. A. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2022, vol. 1043(1), 012012. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1043/1/012012>

9. Kalandarov P. I., Abdullayev K. K. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2022, vol. 1043(1), 012011. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1043/1/012011>
10. Kalandarov P. I., Mukimov Z. M. Humidity Control During Hydrothermal Treatment of Grain and Their Processed Products. In: Radionov A. A., Gasiyarov V. R. (eds) *Proceedings of the 8th International Conference on Industrial Engineering. ICIE 2022*. Springer, Cham., pp. 966–981. https://doi.org/10.1007/978-3-031-14125-6_94
11. Сайтов Р. И. СВЧ-влажметрия сельскохозяйственных продуктов. Уфа: Гилем, 2009. 158 с.
12. Кричевский Е. С., Волченко А. Г., Галушкин С. С. Контроль влажности твёрдых и сыпучих материалов / Под ред. Е. С. Кричевского. М.: Энергоатомиздат, 1987. 136 с.
13. Клоков Ю. В. Теория удаления влаги. О нагреве пищевых продуктов в ЭМП СВЧ «объёмно» // Хранение и переработка сельхозсырья. 2003. № 7. С. 29–31.
14. Бородин И. Ф. Применение СВЧ-энергии в сельском хозяйстве. М.: Книжный мир, 2012. 56 с.
15. Федюнин П. А. и др. Микроволновая термовлажметрия. М.: Машиностроение-1, 2004. 208 с.
16. Благовещенская М. М., Карелина Е. Б., Клехо Д. Ю. Разработка программно-аппаратного комплекса для контроля качественных показателей муки в потоке // Сборник научных докладов II международной научно-практической конференции «Автоматизация и управление технологическими и бизнес процессами в пищевой промышленности». М., 2016. С. 140–145.
17. Джапаридзе Т. Д., Шаламберидзе Э. Д., Месхидзе Р. Н. и др. Ёмкостные датчики и лабораторные влагомеры зерна и зернопродуктов. М.: ЦНИИТЭИ ВНПО «Зернопродукт». Серия: Элеваторная промышленность, 1990. 36 с.
18. Грачев А. В., Чураков П. П. Преобразователь параметров бесконтактных ёмкостных датчиков для кондуктометрических измерений // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2016. Т. 18. № 4(7). С. 1363–1366.
19. Четвериков Е. А., Моисеев А. П., Каргин В. А. Совершенствование установки сушки расторопши за счет автоматизации процесса измерения влажности // Аграрный научный журнал. 2015. № 7. С. 52–55.
20. Хайретдинова А. Ф., Сайтов Р. И., Абдеев Р. Г. Прибор контроля влажности зерна пшеницы в технологическом процессе сушки // Измерительная техника. 2011. № 3. С. 70–72.
21. Aguilar-Castro K. M., Flores-Prieto J. J., Macías-Melo E. V. *J. Mech. Sci. Technol.* 2014, no. 28, pp. 293–300. <https://doi.org/10.1007/s12206-013-0964-3>
22. Лисовский В. В., Титовицкий И. А. Микроволновой контроль в технологических процессах АПК. Минск: БГАТУ, 2013. 232 с.
23. Гуляев Г. А. Автоматизация послеуборочной обработки и хранения зерна. М.: Агропромиздат, 2003. 324 с.
24. Каландаров П. И. Высокочастотный влагомер для измерения влажности зерна и зернопродуктов // Измерительная техника. 2022. № 4. С. 65–71. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-4-65-71>
25. Петров Г. П. Современное российское оборудование для определения влажности сельскохозяйственной продукции // Хлебопродукты. 2018. № 12. С. 22–25.
26. Aichholzer A., Schuberth C., Mayer H. et al. *Eur. J. Wood Prod.* 2018, vol. 76, pp. 89–103. <https://doi.org/10.1007/s00107-017-1203-x>
27. Искандаров Б. П., Каландаров П. И. Анализ влияния факторов на результаты измерений влажности материала на высоких частотах // Измерительная техника. 2013. № 7. С. 64–66.
28. Narkevich M. Yu., Logunova O. S., Kalandarov P. I. et al. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, vol. 939(1), 012031. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/939/1/012031>
29. Каландаров П. И. Оценка точности термогравиметрического метода измерения влажности и эффективность применения данного метода в агропромышленном комплексе // Метрология. 2021. № 2. С. 44–62.
30. Narkevich M. Yu., Logunova O. S., Kalandarov P. I. et al. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, vol. 939(1), 012030. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/939/1/012030>
31. Kalandarov P. I., Mukimov Z. M., Nigmatov A. M. Automatic Devices for Continuous Moisture Analysis of Industrial Automation Systems. In: Radionov A. A., Gasiyarov V. R. (eds) *Proceedings of the 7th International Conference on Industrial Engineering. ICIE 2021*. Springer, Cham., pp. 810–817. https://doi.org/10.1007/978-3-030-85230-6_96
32. Parsokhonov A., Kalandarov P., Olimov O., Akhmedov A. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2022, vol. 1076(1), 012010. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1076/1/012010>
33. Nikolaev A., Logunova O., Garbar E., Arkulis M., Kalandarov P. *ACM International Conference Proceeding Series*, 2021, pp. 23–27. <https://doi.org/10.1145/3502814.3502818>
34. Marynowicz A., Kucharczyk A. *Measurements*, 2021, vol. 185, 110054. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.110054>
35. Susha Lekshmi S. U., D. N. Singh, Maryam Shojaei Baghini. *Measurement*, 2014, no. 54, pp. 92–105. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2014.04.007>
36. Moron C., Garcia-Fuentevilla L., Garcia A., Moron A. *Sensors*, 2016, vol. 16, no. 5, 697. <https://doi.org/10.3390/s16050697>
37. Larsen P. K. *Journal of Architectural Conservation*, 2012, vol. 18, no. 1, pp. 47–62. <https://doi.org/10.1080/13556207.2012.10785103>
38. Dahlen J., Schimleck L., Schilling E. *Forests*, 2020, vol. 11, no. 4, 479. <https://doi.org/10.3390/f11040479>
39. Икрамов Г. И., Каландаров П. И. Измерение влажности зерна и зернопродуктов сверхвысокочастотным методом: влияние неоднородности по плотности зерна на массовое отношение влаги // Измерительная техника. 2022. № 9. С. 71–76. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-9-71-76>
40. Каландаров П. И., Икрамов Г. И. Автоматизация процесса мониторинга влажности, температуры зерна и воздуха в хранилищах мелькомбинатов // Электронный периодический научный журнал SCI-ARTICLE.RU. 2022. № 108. С. 50–62. URL: https://sci-article.ru/number/08_2022.pdf (дата обращения: 28.02.2023).

41. Kalandarov P. I., Ikramov G. I., Mukimov Z. M. Patent Republic of Uzbekistan UZ FAR 02103 (31.10.2022).

References

1. Kalandarov P. I., Logunova O. S., Andreev S. M. *Scientific foundations of moisture measurement*. Monograph, Tashkent, 2021, 174 p. (In Russ.)
2. Zimin E. M., Volkonov M. S., Zimin I. B. Results of laboratory studies of the work of an aerobic grain oxidizer. *Proceedings of the International Conference "Actual problems of agricultural engineering support"*, Yaroslavl, 2004, vol. 3, pp. 58–62. (In Russ.)
3. Savosin S. I., Soldatov V. V. Avtomatizatsiya kontrolya vlazhnosti zerna i vozduha pri ego hranenii. *Vestnik FGOU VPO "MAGU im. V. P. Goryachkina"*. *Agroinzheneriya*, 2008, no. 3(28), pp. 28–30. (In Russ.)
4. Berliner M. A. *Izmereniya vlazhnosti [Measurements of humidity]*. Moscow, Energia Publ., 1973, 400 p. (In Russ.)
5. *Teoriya i praktika ekspressnogo kontrolya vlazhnosti tvyordykh i zhidkikh materialov [Theory and practice of express humidity control of solid and liquid materials]*. Ed. Krichevskiy E. S., Moscow, Energia Publ., 1980, 240 p. (In Russ.)
6. Kovaleva A. A., Saitov R. I., Zaporozhets A. S. et al. *Measurement Techniques*. 2017, vol. 60, no. 4, pp. 305–308. <https://doi.org/10.1007/s11018-017-1191-6>
7. Kalandarov P., Mukimov Z., Tursunov O., Kodirov D., Erkinov B. Study on dielectric moisture control method based on capacitive transducers. *AIP Conference Proceedings*, 2022, vol. 2686, 020016. <https://doi.org/10.1063/5.0114591>
8. Kalandarov P. I., Abdullaeva D. A. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2022, vol. 1043(1), 012012. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1043/1/012012>
9. Kalandarov P. I., Abdullayev K. K. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2022, vol. 1043(1), 012011. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1043/1/012011>
10. Kalandarov P. I., Mukimov Z. M. Humidity Control During Hydrothermal Treatment of Grain and Their Processed Products. In: Radionov A. A., Gasiyarov V. R. (eds) *Proceedings of the 8th International Conference on Industrial Engineering. ICIE 2022*. Springer, Cham., pp. 966–981. https://doi.org/10.1007/978-3-031-14125-6_94
11. Saitov R. I. *SVCh-vlagometriya sel'skhozyajstvennykh produktov [Microwave moisture measurement of agricultural products]*, Ufa, Gilem Publ., 2009, 158 p. (In Russ.)
12. Krichevskiy E. S., Volchenko A. G., Galushkin S. S. *Kontrol' vlazhnosti tvyordykh i syuchih materialov [Moisture control of solid and bulk materials]*, ed. E. S. Krichevskiy, Moscow, Energoatomizdat Publ., 1987, 136 p. (In Russ.)
13. Klovov Yu. V. Teoriya udaleniya vlagi. O nagreve pishchevykh produktov v EMP SVCh "ob'yomno". *Hranenie i pererabotka sel'hozsyrya [Storage and processing of agricultural raw materials]*, 2003, no. 7, pp. 29–31. (In Russ.)
14. Borodin I. F. *Primenenie SVCh-energii v sel'skom hozyajstve [Application of microwave energy in agriculture]*. Moscow, Knizhny mir Publ., 2012, 56 p. (In Russ.)
15. Fedyunin P. A. et al. *Mikrovolnovaya termovlagometriya [Microwave thermovlagometry]*, Moscow, Mashinostroenie-1 Publ., 2004, 208 p. (In Russ.)
16. Blagoveshchenskaya M. M., Karelina E. B., Klekko D. Yu. Razrabotka programmno-apparatnogo kompleksa dlya kontrolya kachestvennykh pokazatelej muki v potoke. *Collection of scientific reports of the II International scientific and practical conference "Avtomatizatsiya i upravlenie tekhnologicheskimi i biznes processami v pishchevoj promyshlennosti"*, Moscow, 2016, pp. 140–145. (In Russ.)
17. Japaridze T. D., Shalamberidze E. D., Meskhidze R. N. et al. *Yomkostnye datchiki i laboratornye vlagomery zerna i zerno-produktov [Capacitive sensors and laboratory moisture meters of grain and grain products]*. Moscow, CNIITEI VNPO Zernoprodukt Publ., Ser. Elevatornaya promyshlennost', 1990, 36 p. (In Russ.)
18. Grachev A. V., Churakov P. P. Converter of parameters of contactless capacitive sensors for conductodiometric measurements. *Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2016, vol. 18, no. 4(7), pp. 1363–1366. (In Russ.)
19. Chetverikov E. A., Moiseev A. P., Kargin V. A. Improvement of the milk thistle drying unit due to automation of the humidity measurement process. *Agrarian Scientific Journal*, 2015, no. 7, pp. 52–55. (In Russ.)
20. Khairidinova A. F., Saitov R. I., Abdeev R. G. *Measurement Techniques*, 2011, vol. 53, no. 3, pp. 356–360. <https://doi.org/10.1007/s11018-011-9732-x>
21. Aguilar-Castro K. M., Flores-Prieto J. J., Macías-Melo E. V. *J. Mech. Sci. Technol.* 2014, no. 28, pp. 293–300. <https://doi.org/10.1007/c12206-013-0964-3>
22. Lisovsky V. V., Titovitskiy I. A. *Mikrovolnovoj kontrol' v tekhnologicheskikh processah APK [Microwave control in agro-industrial complex technological processes]*. Minsk, BGATU Publ., 2013. 232 p. (In Russ.)
23. Gulyaev G. A. *Avtomatizatsiya posleuborochnoj obrabotki i hraneniya zerna [Automation of post-harvest processing and grain storage]*. Moscow, Agropromizdat Publ., 2003, 324 p. (In Russ.)
24. Kalandarov P. I. *Measurement Techniques*, 2022, vol. 65, no. 4, pp. 297–303. <https://doi.org/10.1007/s11018-022-02082-9>
25. Petrov G. P. Modern Russian equipment for determining the moisture content of agricultural products. *Bread products*, 2018, no. 12, pp. 22–25. (In Russ.)
26. Aichholzer A., Schuberth C., Mayer H. et al. *Eur. J. Wood Prod.* 2018, vol. 76, pp. 89–103. <https://doi.org/10.1007/s00107-017-1203-x>
27. Iskandarov B. P., Kalandarov P. I. *Measurement Techniques*, 2013, vol. 56, no. 7, pp. 827–830. <https://doi.org/10.1007/s11018-013-0290-2>
28. Narkevich Yu. M., Logunova O. S., Kalandarov P. I. et al. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, vol. 939(1), 012031. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/939/1/012031>
29. Kalandarov P. I. *Measurement Techniques*, 2021, vol. 64, no. 6, pp. 522–528. <https://doi.org/10.1007/s11018-021-01963-9>
30. Narkevich Yu. M., Logunova O. S., Kalandarov P. I. et al. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, vol. 939(1), 012030. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/939/1/012030>

31. Kalandarov P. I., Mukimov Z. M., Nigmatov A. M. Automatic Devices for Continuous Moisture Analysis of Industrial Automation Systems. In: Radionov A. A., Gasiyarov V. R. (eds) *Proceedings of the 7th International Conference on Industrial Engineering. ICIE 2021*. Springer, Cham., pp. 810–817. https://doi.org/10.1007/978-3-030-85230-6_96
32. Parsokhonov A., Kalandarov P., Olimov O., Akhmedov A. *IOP Conference Series: Earth and Environmental*, 2022, vol. 1076(1), 012010. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1076/1/012010>
33. Nikolaev A., Logunova O., Garbar E., Arkulis M., Kalandarov P. *ACM International Conference Proceeding Series*, 2021, pp. 23–27. <https://doi.org/10.1145/3502814.3502818>
34. Marynowicz A., Kucharczyk A. *Measurements*, 2021, vol. 185, 110054. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.110054>
35. Susha Lekshmi S. U., D. N. Singh, Maryam Shojaei Baghini. *Measurement*, 2014, no. 54, pp. 92–105. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2014.04.007>
36. Moron C., Garcia-Fuentevilla L., Garcia A., Moron A. *Sensors*. 2016, vol. 16, no. 5, 697. <https://doi.org/10.3390/s16050697>
37. Larsen P. K. *Journal of Architectural Conservation*, 2012, vol. 18, no. 1, pp. 47–62. <https://doi.org/10.1080/13556207.2012.10785103>
38. Dahlen J., Schimleck L., Schilling E. *Forests*, 2020, vol. 11, no. 4, 479. <https://doi.org/10.3390/f11040479>
39. Ikramov G. I., Kalandarov P. I. *Izmeritel'naya Tekhnika*, 2022, no. 9, pp. 71–76. (In Russ.) <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-9-71-76>
40. Kalandarov P. I., Ikramov G. I. Automation of the process of monitoring the humidity, temperature of grain and air in the warehouses of melkombinates. *Electronic periodical scientific journal SCI-ARTICLE.RU*, 2022, no. 108, pp. 50–62, available at: https://sci-article.ru/number/08_2022.pdf (accessed: 28.02.2023). (In Russ.)
41. Kalandarov P. I., Ikramov G. I., Mukimov Z. M. Patent Republic of Uzbekistan UZ FAR 02103 (31.10.2022).

Статья поступила в редакцию 29.12.2022; одобрена после рецензирования 02.02.2023; принята к публикации 04.02.2023.
The article was submitted 29.12.2022; approved after reviewing 02.02.2023; accepted for publication 04.02.2023.