O‘ZBEKISTON METROLOGIYASI

Ilmiy-texnik jurnal
2026/3



O‘ZBEKISTON MILLIY METROLOGIYA INSTITUTI
UzNIM

“O‘ZBEKISTON METROLOGIYASI” ILMIY-TEXNIK JURNALI

Tahrir hay’ati

Hay’at raisi:

L.F. Saidoripov
O‘zbekiston texnik jihatdan tartibga solish agentligi direktorining birinchi o‘rinbosari

Hay’at raisi o‘rinbosarlari:

Sh.X. Ismatullayev
O‘zbekiston milliy metrologiya instituti direktori, Bosh muharrir
N.S. Mamadaliyeva
O‘zbekiston texnik jihatdan tartibga solish agentligi direktori maslahatchisi, fan doktori, professor

Tahrir kengashi a’zolari/Tahririyat a’zolari:

- *Salimov Oqil Umurzoqovich,* t.f.d., professor, akademik
- *Negmatov Soibjon Sadikovich,* t.f.d., professor, akademik
- *Yusufbekov Nodirbek Rustambekovich,* t.f.d., professor
- *Kalandarov Palvan Iskandarovich,* t.f.d., professor
- *Ikramov Gani Ikramovich,* t.f.d., professor
- *Matyakubova Paraxat Mayliyevna,* t.f.d., professor
- *Tuychiyev Olimjon Alijonovich,* t.f.d., DSc
- *Maxmudov Hikmat Maxamatovich,* DSc
- *Babashev Kutlimurat Aytmuratovich,* t.f.n., dotsent
- *Abduqayumov Abdurauf Abdurashidovich,* PhD
- *Masharipov Shodlik Masharipovich,* PhD
- *Mamarasulov Xasan Kayumovich,* t.f.n.
- *Raymjonov Nuriddin Alijonovich,* O‘zMMI bosh metrologi
- *Usmonqulov Sharofjon Qodirqulovich,* O‘zMMI bo‘lim boshlig‘i
- *Klimushin Gennadiy Eduardovich,* O‘zMMI bosh mutaxassisi
- *Xaitova Mastura Xusanovna,* O‘zMMI ilmiy-texnik jurnali tahrirchisi

Manzil: O‘zbekiston r., Toshkent sh., Olmazor t., Farobiy k., 333A
Pochta indeksi: 100174
E-mail: info@nim.uz
Web-sayt: https://nim.uz/
Nashr O‘zbekiston Respublikasi Prezidenti Administratsiyasi huzuridagi Axborot va ommaviy kommunikatsiyalar agentligi tomonidan 2025-yil 28-mayda 794968 raqami bilan ro‘yxatga olingan.
ISSN 3093-8805
Bichimi 60x90 1/8

MUNDARIJA

MUSTAQILLIKNING 35 YILLIGI:
METROLOGIYA TARAQQIYOTI – TARIX VA NATIJALAR 4

O‘ZBEKISTON MILLIY METROLOGIYA INSTITUTINING
QASHQADARYO FILIALIDA YANGI ZAMONAVIY
LABORATORIYA FOYDALANISHGA TOPSHIRILDI 6

МЕТОДИКИ ИЗМЕРЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ КАЧЕСТВА СЕТЕЙ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ 8

GURUCH VA DON MAHSULOTLARINING NAMLIGINI O‘LCHASHDA
METROLOGIK NAZORATNING IQTISODIY SAMARADORLIGI 19

MILLIY INSTITUTLAR ORQALI XALQARO TEXNIK TIZIMGA
INTEGRATSIYALASHUVNING INSTITUTSIONAL MEXANIZMLARI 25

SUYUQLIKLAR ELEKTR O‘TKAZUVCHANLIGI STANDART
NAMUNALARINING TARKIBI VA METROLOGIK TAVSIFLARINI ISHLAB CHIQISH 32

O‘LCHOVLARNI BOSHQARISH TIZIMINING O‘LCHOV MA’LUMOTLARI
ISHONCHLILIGINI TA’MINLASHDAGI ROLI (ISO 10012:2026 TALABLARI ASOSIDA) 40

MAHALLIY ISHLAB CHIQILGAN HARORAT QIYOSLASH
QURILMASINING XALQARO ETALON KALIBRATORLAR BILAN
QIYOSIY METROLOGIK TAHLILI VA O‘LCHASH NOANIQLIGINI BAHOLASH 53

BOSIM O‘LCHASH VOSITALARINI AVTOMATIK
KALIBRLASH TIZIMINI ISHLAB CHIQISH VA TADQIQ ETISH 63

O‘ZBEKISTON KALIBRLASH LABORATORIYALARI UCHUN
RAQAMLI KALIBRLASH SERTIFIKATI (DCC-UZ): METROLOGIK KUZATUVCHANLIK,
O‘LCHASH NOANIQLIGI VA AVTOMATIK VALIDATSIYA MODELI 69

SUYUQLIKLARNING SOLISHTIRMA ELEKTR O‘TKAZUVCHANLIGINI
O‘LCHASHDA O‘ZBEKISTON RESPUBLIKASINING MILLIY BIRLAMCHI ETALONI 82

KISHMISH UZUM NAMLIGINI INFRAQIZIL SPEKTROSKOPIK USULDA O‘LCHASH:
ZAMONAVIY USULLAR VA METROLOGIK YONDASHUVLAR TAHLILI 89

QISHLOQ XO‘JALIGI MAHSULOTLARI (PAXTA VA DON) SIFATINI
ANIQLASHDA TAJRIBA USULLARINING QIYOSIY TAHLILI VA OPTIMALLASHTIRISH 98

SANOAT KORXONALARINING EKSPORT
RAQOBATBARDOSHLIGINI OSHIRISHDA METROLOGIYANING O‘RNI 105

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ОЦЕНКИ
НЕОПРЕДЕЛЁННОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ ФИЗИКО-
ХИМИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН В УСЛОВИЯХ ДЕФИЦИТА ИНФОРМАЦИИ 115

GUM-BASED ANALYSIS OF ULTRASOUND-INDUCED HEATING
AS AN INFLUENCE QUANTITY IN MAGNETIC SUSCEPTIBILITY
MEASUREMENTS OF MANGANESE-DOPED SILICON 123

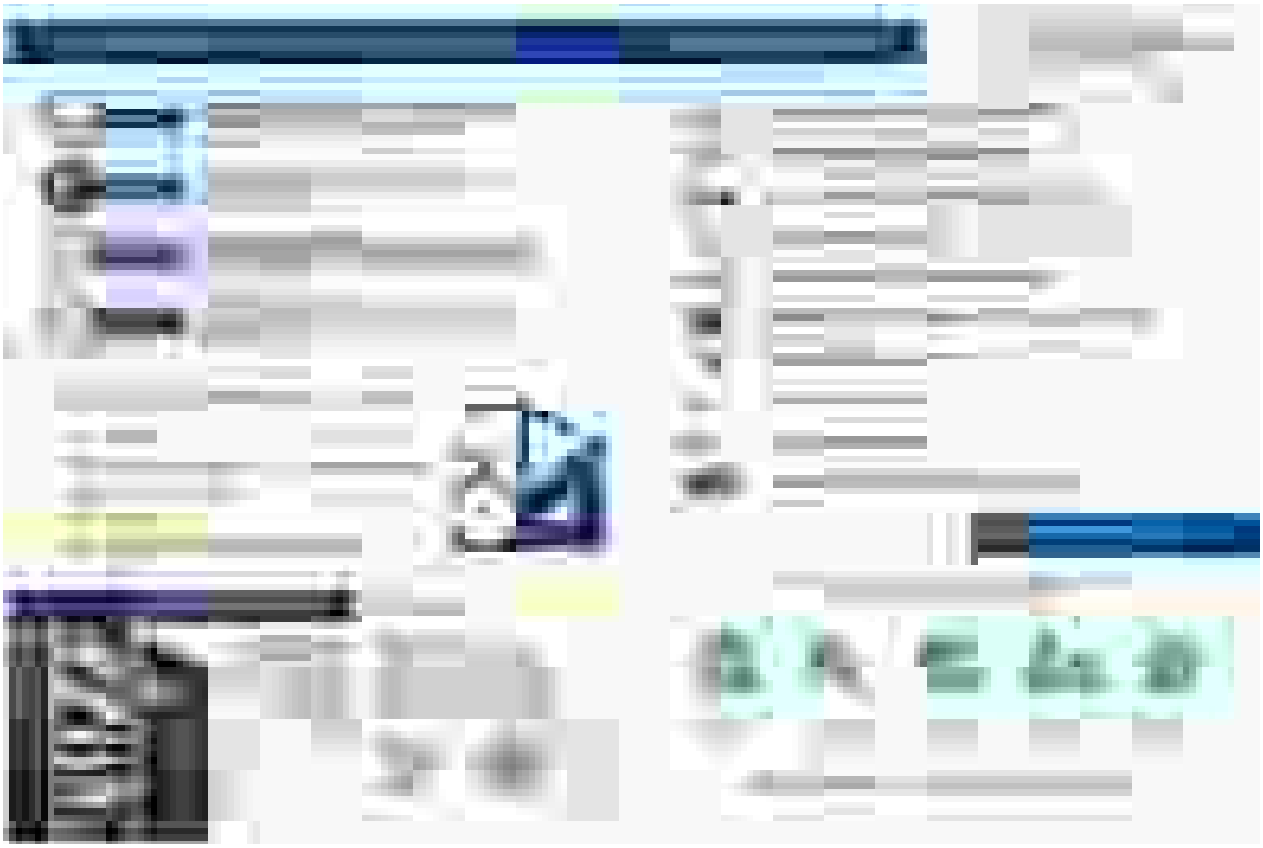
NEFT VA NEFT MAHSULOTLARI SATHINI LAZERLI SATH O‘LCHAGICH BILAN
O‘LCHASHLARNI BAJARISH USLUBIYOTINI ISHLAB CHIQISH 137

MUSTAQILLIKNING 35 YILLIGI: METROLOGIYA TARAQQIYOTI – TARIX VA NATIJALAR

O'zbekiston Respublikasi davlat mustaqilligining 35 yilligi munosabati bilan tayyorlangan "Tarix va natijalar" foto-ma'lumotida milliy metrologiya tizimining bosib o'tgan yo'li, amalga oshirilgan islohotlar va erishilgan muhim yutuqlar o'z aksini topgan.

Unda sohaning zamonaviy taraqqiyoti, milliy etalonlar bazasining rivojlanishi, xalqaro tashkilotlar bilan samarali hamkorlik, mamlakatimizda o'lchashlar birligini ta'minlash borasida amalga oshirilgan ishlar hamda xalqaro miqyosda e'tirof etilgan natijalar fotolavhalar orqali yoritilgan.

Mazkur foto-ma'lumot mustaqillik yillarida O'zbekiston milliy metrologiyasi bosib o'tgan sharafli yo'l, to'plangan tajriba va kelgusi taraqqiyot uchun mustahkam poydevorni namoyon etadi.



O‘zbekiston Respublikasi mustaqilligining 35 yilligi munosabati bilan O‘zbekiston milliy metrologiya institutining bir guruh xodimlari esdalik nishoni bilan taqdirlandi



O‘zbekiston Respublikasi mustaqilligining 35 yilligi munosabati bilan mamlakatimizda amalga oshirilayotgan islohotlarga daxldorlik tuyg‘usi bilan yashab, fidokorona mehnat qilgan bir guruh yurtdoshlarimiz yuksak davlat mukofotlari bilan taqdirlandi.

Taqdirlash marosimida insonning qaysi soha yoki lavozimda faoliyat yuritishidan qat’i nazar, uning mehnati munosib e’tirof etilishi katta baxt ekani ta’kidlandi. Shuningdek, O‘zbekiston Respublikasi Prezidenti mukofotlanganlarning mashaqqatli mehnat yo‘li, erishgan yutuqlari hamda mamlakat taraqqiyotiga qo‘shgan hissasini yuksak baholadi.

O’tkazilgan taqdirlash marosim davomida davlat mukofotlariga sazovor bo‘lgan har bir insonning mehnati va fidoyiligi alohida e’tirof etildi. Shuningdek, mamlakatimizda amalga oshirilayotgan islohotlarni qo‘llab-quvvatlab, O‘zbekistonga investitsiyalar va zamonaviy texnologiyalarni jalb etishga munosib hissa qo‘shayotgan xorijiy hamkorlarga ham minnatdorlik bildirildi.

Quvonarlisi, “O‘zbekiston milliy metrologiya instituti” davlat muassasasining bir guruh xodimlari ham O‘zbekiston Respublikasi mustaqilligining 35 yilligi munosabati bilan ta’sis etilgan esdalik nishoni bilan taqdirlandi.

Mazkur e’tirof institut xodimlarining kasbiy faoliyati, fidokorona mehnati hamda mamlakatimizda metrologiya sohasini rivojlantirishga qo‘shayotgan hissasining munosib bahosi bo‘ldi.

Davlat mukofotiga sazovor bo‘lgan barcha xodimlarni ushbu yuksak e’tirof bilan samimiy muborakbod etamiz hamda ularga kelgusi faoliyatida ulkan muvaffaqiyatlar tilaymiz.

O‘ZBEKISTON MILLIY METROLOGIYA INSTITUTINING QASHQADARYO FILIALIDA YANGI ZAMONAVIY LABORATORIYA FOYDALANISHGA TOPSHIRILDI



Qashqadaryo viloyatida metrologik xizmatlar ko‘lami kengayib, zamonaviy laboratoriyalar faoliyati yo‘lga qo‘yilmoqda. O‘zbekiston Respublikasi davlat mustaqilligining 35 yilligi munosabati bilan O‘zbekiston milliy metrologiya institutining Qashqadaryo filialida metrologiya sohasini yanada rivojlantirish, zamonaviy infratuzilmani shakllantirish hamda hududda sifatli metrologik xizmatlarni kengaytirishga qaratilgan muhim loyiha amalga oshirildi.

Loyiha doirasida filialda 6 ta yangi zamonaviy laboratoriya — massa, bosim, fizika-kimyo, elektr, geometriya va hajm laboratoriyalari tashkil etildi. Mazkur laboratoriyalar zamonaviy, yuqori aniqlikdagi namunaviy o‘lchash vositalari bilan jihozlandi. Laboratoriyalar uchun Rossiya, Xitoy, AQSh va Yevropa davlatlaridan 19 turdagi zamonaviy, yuqori aniqlikdagi o‘lchash vositalari xarid qilindi. Yangi uskunalarning asosiy afzalligi — o‘lchash jarayonlarida inson omilini minimallashtirish, yuqori aniqlikni ta’minlash hamda qiyoslash va kalibrlash jarayonlarini qisqa vaqtda amalga oshirish imkoniyatidir.

Yangi laboratoriyalarning ishga tushirilishi Qashqadaryo viloyatidagi yirik sanoat, neft-gaz, ishlab chiqarish va boshqa korxonalarda foydalanilayotgan zamonaviy o‘lchash vositalarini hududning o‘zida metrologik xizmatlar bilan qamrab olish imkonini beradi.



МЕТОДИКИ ИЗМЕРЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ КАЧЕСТВА СЕТЕЙ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ



Саидорипов Лазизбек Фуркатжанович
Первый заместитель директора Узбекского агентства по техническому регулированию при Кабинете Министров Республики Узбекистан

E-mail: saidoripov@standart.uz

Утабаев Байсеит Сайфуллаевич
Ведущий инженер Базовой метрологической службы (ООО "Unicon.uz Министерства цифровых технологий Республики Узбекистан

E-mail: utabaev@unicon.uz

Аннотация. В статье рассматривается актуальная проблема обеспечения и контроля параметров качества обслуживания (QoS) в современных сетях передачи данных с пакетной коммутацией. Авторы обосновывают неэффективность применения стандартных компьютерных средств и простейших утилит (таких как эхо-тестирование ICMP/"Ping") для полноценного аудита сетевой инфраструктуры. В работе анализируются ключевые параметры транспортной среды, определяющие качество сервисов (полоса пропускания, потери пакетов, круговая задержка и её вариация/джиттер). Основное внимание уделено международной методологии RFC 2544, описывающей сценарии автоматизированного тестирования производительности Ethernet-каналов и верификации

соглашений об уровне услуг (SLA). Детально раскрывается суть входящих в стандарт тестов, включая измерение пропускной способности и задержки распространения кадров.

Ключевые слова: Сети передачи данных, пакетная коммутация, качество обслуживания (QoS), методология измерений, RFC 2544, соглашение об уровне услуг (SLA), пропускная способность, задержка распространения, Ethernet, телекоммуникации.

Annotatsiya. Maqolada paketli kommutatsiyaga asoslangan zamonaviy ma’lumotlar uzatish tarmoqlarida xizmat ko‘rsatish sifati (QoS) parametrlarini ta’minlash va nazorat qilishning dolzarb muammolari ko‘rib chiqilgan. Mualliflar tarmoq infratuzilmasini to‘liq audit qilishda standart kompyuter vositalari va oddiy utilitalardan (masalan, ICMP aks-testlash/“Ping”) foydalanishning samarasizligini asoslab berishgan. Ishda xizmatlar sifatini belgilovchi transport muhitining asosiy parametrlari (o‘tkazish qobiliyati, paketlarning yo‘qolishi, aylanma kechikish va uning variatsiyasi/jitter) tahlil qilingan. Asosiy e’tibor Ethernet kanallari unumdorligini sinash va xizmat ko‘rsatish darajasi to‘g‘risidagi kelishuvlarni (SLA) tekshirishga mo‘ljallangan avtomatlashtirilgan tartib-taomillarni tavsiflovchi RFC 2544 xalqaro metodologiyasiga qaratilgan. Standart tarkibiga kiruvchi testlarning, jumladan, o‘tkazish qobiliyati va kadrlar tarqalish kechikishini o‘lchashning mohiyati batafsil yoritilgan.

Kalit so‘zlar: Ma’lumotlar uzatish tarmoqlari, paketli kommutatsiya, xizmat ko‘rsatish sifati (QoS), o‘lchash metodikalari, RFC 2544, xizmat ko‘rsatish darajasi to‘g‘risidagi kelishuv (SLA), o‘tkazish qobiliyati, tarqalish kechikishi, Ethernet, telekommunikatsiyalar.

Abstract. The paper addresses the urgent issue of ensuring and monitoring Quality of Service (QoS) parameters in modern packet-switched data networks. The authors substantiate the inefficiency of using standard computer hardware and basic utilities (such as ICMP echo testing/”Ping”) for a comprehensive audit of network infrastructure. The study analyzes the key parameters of the transport medium that determine service quality, including bandwidth, packet loss, round-trip delay, and packet delay variation (jitter). Main attention is paid to the international methodology RFC 2544, which describes scenarios for automated performance testing of Ethernet channels and verification of Service-Level Agreements (SLA). The essence of the tests included in the standard, such as throughput measurement and propagation delay evaluation, is disclosed in detail.

Keywords: Data transmission networks, packet switching, Quality of Service (QoS), measurement methodologies, RFC 2544, Service-Level Agreement (SLA), throughput, propagation delay, Ethernet, telecommunications.

Введение. Современные сети с пакетной коммутацией отличаются многообразием сетевых сервисов, и качество обслуживания в современных условиях приобретает очень весомое значение. Не так много вре-

мени прошло с тех пор, когда операторы связи предлагали свои услуги без определения их параметров качества, зачастую с клиентом оговаривалась лишь максимальная скорость канала. При этом в порядке вещей было даже предложение канала с нулевым значением минимальной гарантированной скорости передачи данных, т. е. предоставление пропускной способности без каких-либо гарантий ее наличия. Однако такие условия в настоящий момент не приемлемы, это противоречит постановлениям правительства РУз. и приказам отраслевого Регулятора (Минцифры), да клиенты стали более компетентны в вопросах качества и уже вряд ли кто-либо согласится на такие условия.

Конкуренция на рынке телекоммуникационных услуг постоянно растет, при этом предложение зачастую превышает спрос, стоимость услуг неукоснительно падает, а операторы развивают свои магистральные сети, расширяя емкость и территориальное покрытие, поэтому клиентам есть из чего выбирать.

С другой стороны, технология не стоит на месте, появились новые средства передачи данных и их защиты. Сети на базе IP теперь доставляют не только данные, но и служат транспортом для самых разных сервисов с различными, а иногда и противоречивыми требованиями к сети: данные, видео, голос, сетевые игры, разнообразные бизнес-приложения и т.д. И всех этих случаях от транспортной среды требуются обеспечение заявленных параметров качества.

В таких постоянно меняющихся условиях нужно четко понимать, какие требования к качеству транспорта IP пакетов выдвигает клиент и что именно может предложить оператор. Вопрос качества сервиса играет важнейшую роль в развитии рынка телекоммуникаций. Поэтому, в последнее время, все чаще поднимается вопрос о необходимости систематического проведения контроля параметров качества услуг связи в операторских сетях с пакетной коммутацией (передача данных, голосовой информации, телекомуникационных услуг связи и. т. д.), что в свою очередь требует разработки критериев контроля и методик его проведения, а также наличия средств измерений параметров сети.

1. **О политике дифференцированного обслуживания сетевых сервисов.** Для того чтобы критически важные сетевые сервисы не страдали в моменты перегрузок, на протяжении всего транзитного участка должна быть реализована политика дифференцированного обслуживания трафика сетевых сервисов - QoS (Quality of Service). Политика QoS представляет собой набор методов для контроля и управления перечисленными выше параметрами качества, с помощью которых пропускная способность перераспределяется в моменты перегрузок, что позволяет обеспечить функционирование критических сервисов за счет ограничения трафика менее важных сетевых приложений.

Это достигается путем назначения различных уровней приоритета для каждого вида услуг. Однако, реализации политики дифференцированного обслуживания в корпоративной сети недостаточно для обеспечения надлежащего функционирования критически важных приложений. QoS будет успешно работать в моменты перегрузок, но в случае ухудшения параметров канала настройкой QoS проблемы не решить, и в этом случае возникает ряд вопросов:

– как быть уверенным, что параметры качества всей сети удовлетворяют установленным требованиям?

– как убедиться в произвольный момент времени, что декларированные оператором параметры находятся в норме и не ухудшились с момента приема услуги?

– в случае выхода какого-либо из параметров за установленные пределы, как выяснить причину происшедшего? Действительно ли виной тому нехватка пропускной способности?

– на каком из участков сети возникла проблема, в чьей зоне ответственности она находится, что надо делать и кому?

Оконечным оборудованием для каналов Ethernet часто являются компьютеры. И первым делом возникает желание реализовать какую-либо схему тестирования на базе компьютера и стандартной сетевой карты.

Но использовать их для тестирования канала Ethernet не представляется возможным, поскольку это не специализированные устройства,

- во-первых, не способны генерировать трафик с варьируемой и настраиваемой нагрузкой вплоть до стопроцентной скорости загрузки канала;

- во-вторых, такая схема не позволяет производить измерения на нижних уровнях модели IP;

- в-третьих, схема не позволяет формировать настраиваемые шлейфы разного уровня с фиксированной задержкой;

- в-четвертых, схема не позволяют проводить измерения ошибок.

При этом компьютеры обладают зависимостью результатов от версии внедренной операционной системы и от конфигурации аппаратной части компьютера (по классу и по назначению), а сетевые карты выполняют функцию фильтров ошибок, отбрасывая пакеты, содержимое которых не соответствует контрольной сумме, сопровождающей информационный пакет.

Для тестирования сети передачи данных может возникнуть желание пользоваться простой функцией ICMP-протокола – эхо-тестированием, проверкой достижимости узла сети – командой "Ping". Но данное тестирование не позволяет продемонстрировать производительность, правильно померить задержку передачи, неравномерность передачи и целостность сервиса. Поскольку, опять же требуемой загрузки канала получить невозможно. А при измерениях кроме требуемых параметров, таких как задержка распространения, начинают суммироваться произвольные задержки отработки более высокоуровневых элементов схемы, таких как IP-стеки на приеме и передаче.

2. О современных методах тестирования. Когда по IP сети осуществляется транспорт сетевых сервисов, качество транспортной среды определяется несколькими параметрами:

– полоса пропускания, номинальная пропускная способность среды передачи;

– потеря пакетов;

– круговая задержка;

– вариация задержки (пакетный джиттер).

При выборе методик тестирования сетей IP хорошо зарекомендовали себя сценарии, разработанные уже много лет назад для контроля Ethernet. Основная методика, RFC-2544, активно используется до сих пор, хотя и с некоторыми модификациями. Кроме того, в различных

ситуациях применимы стресс-тестирование с помощью эмуляции различного вида и уровня пакетного трафика, контроль потерь пакетов (PL), задержек пакетов и вариации этих задержек (PDV).

Методики измерения вышеуказанных параметров описываются в рекомендациях RFC-2544 и RFC-3393.

3. Тестирование по методике RFC 2544. RFC 2544 — это международная методология тестирования производительности сетевых устройств, принятая в 1999 году. Стандарт используется операторами связи для проверки каналов связи (Ethernet и IP) и верификации SLA (соглашений об уровне услуг). Тест определяет, как оборудование справляется с максимальной нагрузкой в жестких лабораторных или полевых условиях.

Стандарт описывает сценарий автоматизированной процедуры тестирования Ethernet канала при отсутствии рабочего трафика. В сценарии фиксированы ключевые параметры для тестов пропускной способности, задержки распространения пакетов, зависимости уровня потерь пакетов от загрузки канала и теста определения времени предельной нагрузки канала. Причем каждый тест позволяет проверить определенные параметры, описанные в соглашениях об уровне сервиса SLA (Service-level agreement).

Методология вышеуказанных тестов определяет размеры кадров, продолжительность испытания и число повторений испытаний. В результате проведения измерений получаются результаты, дающие представление о производительности тестируемой Ethernet сети (рис. 1).

Рис. 1. Тест по RFC – 2544



I. Тест пропускной способности

Тестирование пропускной способности позволяет определить максимальное количество кадров в секунду, которые могут быть переданы без возникновения потерь пакетов. Этот тест проводится для определения максимально возможной скорости коммутации для сетевых элементов (свитчей, сетевых шлюзов и маршрутизаторов) в транспортных сетях Ethernet.

II. Тест измерения задержки распространения

Измерение задержки проводится для оценки времени прохождения, которое необходимо кадру для прохождения по сети от исходного элемента к конечному сетевому элементу (тестирование между оконечных точек). Этот тест может также быть сконфигурирован, чтобы измерить круговую задержку, т. е. для измерения времени, которое необходимо кадру для прохождения от исходного элемента к конечному элементу и возврата обратно.

Если время задержки меняется от кадра к кадру, это может вызвать проблемы в работе сервисов реального времени. Например, изменения задержки в приложениях VoIP приведут к деградации качества голоса, появлению треска и щелчков в линии, также при больших задержках появятся паузы в разговоре.

Большая задержка также может привести к ухудшению качества Ethernet сервисов. В клиент-серверных приложениях может произойти истечение времени ожидания на сервере, или клиентское приложение будет работать с перебоями.

III. Тест потерь кадров

Тестирование потерь кадров позволяет оценить реакцию сети, работающей в условиях перегрузки. Такой тест критичен для проверки возможности сети поддерживать приложения, работающие в реальном времени, где большой процент потерь быстро приведет к деградации качества сервиса. Поскольку при работе в реальном времени повторной передачи не происходит, такие сервисы могут полностью потерять свою работоспособность, если потери кадров не будут взяты под контроль.

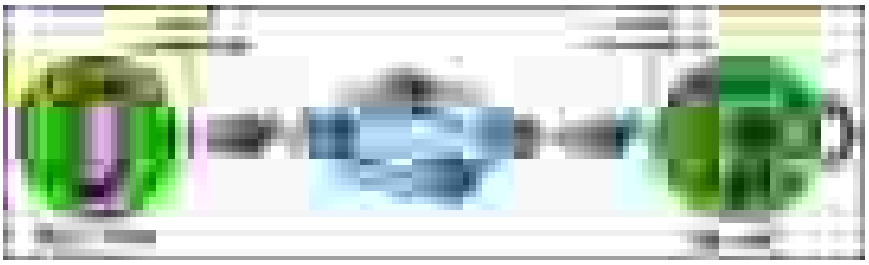
IV. Тест предельной нагрузки

Измерение неравномерной передачи данных (тест предельной нагрузки), позволяет оценить возможности буферизации в маршрутизаторах и свитчах. В транспортных сетях Ethernet это измерение является полезным, поскольку позволяет проверить форсированную скорость передачи, которая фигурирует во многих соглашениях об уровне сервиса.

V. Тестирование с помощью шлейфа

Тестирование сетей Ethernet с помощью функции шлейфа весьма распространено. Такое тестирование позволяет снизить время диагностики и локализовать проблему. С помощью шлейфа различного уровня можно проводить тесты RFC-2544 или BERT, а также любое другое тестирование, требующее заворот передаваемого трафика в обратном направлении (рис. 2).

Рис. 2. Функция "Шлейф"



На порту при включенной функции шлейфа одновременно можно просматривать статистику по принимаемым и передаваемым пакетам, на любом из уровней, осуществлять выборку входящего трафика, отфильтровывать пакеты, предназначенные для сетевого стека этого интерфейса.

Функцию шлейфа можно реализовать на любом из трех нижних уровнях модели IP: физическом, канальном или сетевом.

При этом в приборе реализован алгоритм перестановки либо подмены полей пакета, соответствующих каждому из уровней. Для канального уровня – это MAC-адреса источника и получателя, для сетевого уровня IP-адреса источника и получателя.

2. Тестирование по методике RFC-3393. Важной характеристикой участка сети является вариация задержки пакетов (пакетный джиттер), которая определяется в RFC-3393 как разница сквозных задержек прохождения двух пакетов (рис. 3).

Рис.3 Пакетный джиттер



если Si - время отправки пакета (при этом временная метка включается в тело пакета), а Ri - время доставки пакета, то значение вариации задержки для пакетов с номерами i и j будет рассчитываться согласно простой формуле:

$$D_{i,j} = (R_j - R_i) - (S_j - S_i)$$

Метод тестирования RFC 3550 определяет RTP (Real-time Transport Protocol) — стандартный сетевой протокол IETF для передачи потокового аудио и видео по IP-сетям.

Он состоит из двух частей: самого RTP для доставки данных и RTCP (RTP Control Protocol) для мониторинга качества обслуживания и синхронизации потоков

В RFC 3550 определен метод инкрементального расчета вариации для серии пакетов:

$$J_i = J_{j-1} + (D_{j-1,i} (-J_{j-1}))/ 16$$

При измерении берутся средние значения вариации задержки за заданный промежуток времени.

Возникновение вариаций задержки вытекает из самой природы пакетной коммутации сети IP.

В идеальном случае вариация равна нулю, то есть длительность доставки пакетов не различается.

Однако в силу неоднородности сетевого потока, проходящего через узлы сети, а также вследствие действия механизмов дифференцированного обслуживания сетевого трафика вариации не являются нулевыми.

4. Тестирование по методике ITU-T Y.1564. Рекомендация ITU-T Y.1564 была разработана в 2016 году, но повсеместно начала применяться в конце 2018 года. Методика ITU-T Y.1564 — более актуальная на сегодняшний день, имеет описания для тестирования современных, высокоскоростных каналов связи с современными понятиями о SLA (Service Layer Agreement). Методология теста разбивается на две части: тест конфигурации сервиса, которая поможет найти и исправить проблемы с конфигурации сети, и тест эксплуатации сервиса, которая подтверждает, что производительность соответствует критериям приемки и обслуживания является неизменным со временем (рис. 4).

Рис. 4. тестирование по методике ITU-T Y.1564



Как и в предыдущих рекомендациях, показатели эффективности включают в себя:

– пропускную способность;
– задержку;
– потери кадров;
– пакетный джиттер.

Отличие данной рекомендации состоит в том, что все показатели измеряются не последовательно, а параллельно, что значительно снижает время прохождения теста. Оценка пропускной способности производится с разделением на интервалы с учетом перегрузок в сети.

Так как качество Ethernet-канала - это совокупность многих факторов, следовательно, правильное тестирование должно максимально охватывать все эти совокупности. При

тестировании необходимо учесть многие аспекты и было бы полезно иметь расширенные возможности, такие как BER Test, пакетный джиттер, поддержку MPLS, QoS, тестирование нагрузкой протоколов прикладного уровня (http, ftp, etc...).

Для тестирования каналов от 1G до 10G и выше достаточно сложно делать нагрузочные тесты при помощи неспециализированного средства измерений или ПО, зачастую процессоры не способны генерировать достаточный объем трафика, в отличие от специализированных тестеров-анализаторов. Такие приборы можно положить в 19 дюймовую стойку, телекоммуникационный шкаф, даже в кабельный ящик на опоре или крыше здания и далее запускать тесты удаленно. Любые портативные приборы-анализаторы не испортятся в суровых условиях эксплуатации, так как проходят жестокие испытания на прочность.

5. Современные методы тестирования и мониторинга. История развития цифровых телекоммуникационных сетей тесно связана с решением задач синхронизации оборудования сетевых узлов. Изначально сети с коммутацией пакетов предназначались для передачи асинхронных данных. Но так как в современных условиях пакетные методы передачи становятся основными транспортными телекоммуникационными технологиями, это требует от них обеспечения качества передачи не хуже, чем в сетях синхронной цифровой иерархии. В частности, должны обеспечиваться высокая готовность соединений, малые задержки, высокое качество синхронизации, низкий уровень ошибок, оперативность обнаружения неисправностей, удобство администрирования, резервирование, обеспечивающее отсутствие перерывов связи более 50 μs.

В современных сетях связи, наряду с проблемой тактовой синхронизации, все большую актуальность приобретают задачи передачи сигналов времени с необходимой точностью. в связи с этим, возник целый комплекс задач согласования шкал времени по специальным меткам, передаваемым в пакетной транспортной среде. для решения этих задач были разработаны двухсторонние сетевые протоколы NTP (Network Time Protocol) и PTP (Precision Time Protocol). Последний из них, обеспечивающий более высокую точность, естественно приобрел большую популярность.

Протокол PTP было первоначально стандартизован для промышленных предприятий и измерительной техники. Вторая версия протокола PTP (Рекомендация IEEE 1588 v2), которая вышла в 2008 году и была доработана в 2020 году предполагает множество вариантов применения измерительного протокола для решения тех или иных задач.

Под каждое конкретное приложение были выработаны свои установочные условия, так называемый "профиль применения", в том числе были разработаны и телекоммуникационные профили. В связи с этим приведем ниже области применения данного протокола:

– проводная связь;
– сотовая связь;
– энергетика;
– промышленная автоматика;
– измерительная техника;
– роботизированные системы;
– финансовые приложения.

Протокол PTP является протоколом взаимодействия устройств, участвующих в синхронизации.

Протокол подразумевает двунаправленный обмен сообщениями, заключенными в структуру пакета,

включающими в себя метки времени, и др. параметры. Сетевые элементы, задействованные в синхронизации можно поделить на три категории:

– мастер-устройства, содержащее PTP часы и которое являться источником синхронизации (ведущий);

– слейв-устройства, которые синхронизируются от ведущего (ведомый);

– пассивные устройства, пропускающие через себя сигналы синхронизации, либо не участвующие во взаимодействии.

Уровневая архитектура работы PTP устройств представлена на рис. 5.

Рис. 5. Уровневая архитектура работы PTP



Для проверки работы системы синхронизации в пакетной сети нужно удостовериться, что в проверяемую точку приходят все сигналы синхронизации и протокол взаимодействует правильно. В процессе измерений эмулируется ведомое устройство PTP и осуществляется верификация всех сигналов синхронизации (рис. 6), при этом измеряются следующие параметры:

– смещение между ведущим и ведомым;

– средняя и односторонняя задержки;

– вариация задержки для пакетов;

– уход фазы между часами.

Помимо верификации самого протокола PTP с помощью этого алгоритма можно осуществлять измерения параметров асимметричных линий, таких как задержка и вариация задержки. Для асимметричных линий стандартные измерения этих параметров, описанные по рекомендациям RFC - 2544 и RFC - 3393, не всегда дают корректный результат. Поэтому измерения данных параметров на основе протокола PTP перекрывают недостающее звено. При этом следует учесть, что генерация и считывание временных меток идут на нижнем уровне модели IP, что дает высокую точность определения временных параметров.

Рис 6. Измерения по протоколу PTP



Заключение. В последние годы сети с пакетной коммутацией становятся универсальной транспортной средой для передачи различных типов трафика, в том числе и для сервисов чувствительных к параметрам сетевой синхронизации, таких как, например, - популярные телекоммуникационные технологии как Wi-Max, W-CDMA, LTE требуют поддержания временной синхронизации с точностью порядка 1μs.

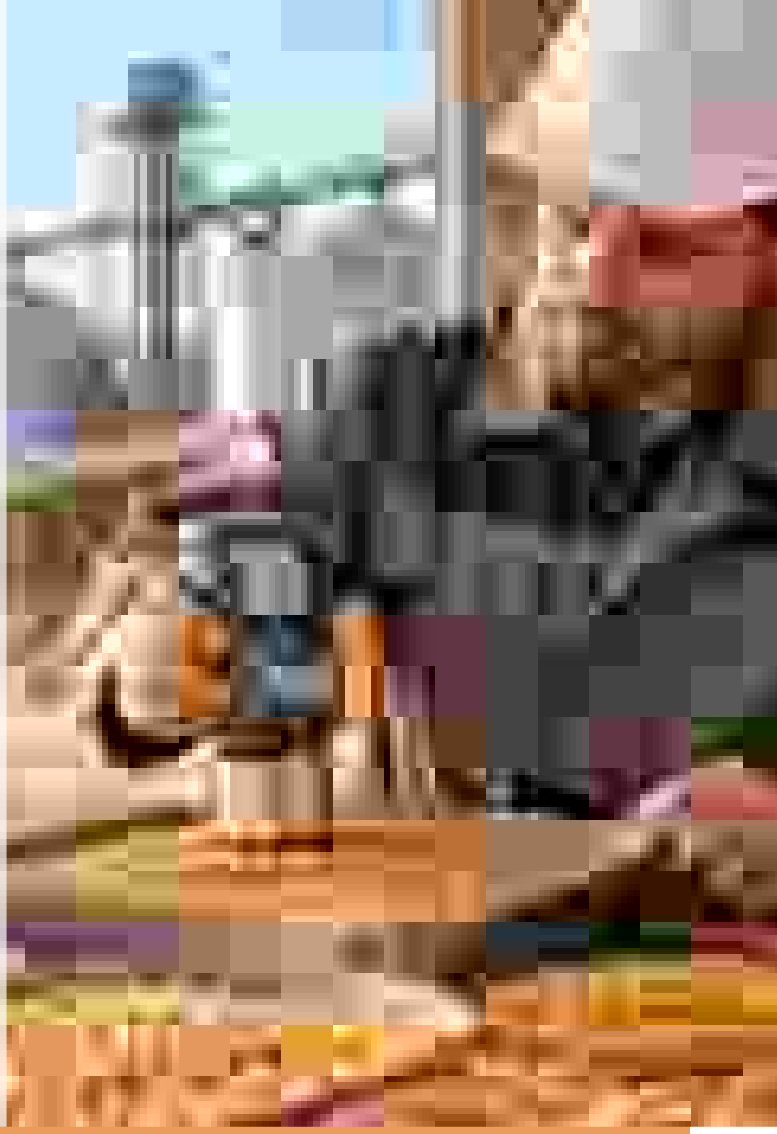
Таким образом, для полноценной оценки качества работы телекоммуникационных сетей с коммутацией пакетов необходимо наряду с измерением параметров, описываемых рекомендациями RFC-2544 и RFC-3393 или Y.1564 проверять и параметры синхронизации оборудования узлов сети. Только скоординированная и стабильная синхронизация обеспечивает высокое качество работы телекоммуникационной сети передачи данных. При этом нельзя забывать о промежуточных и профилактических измерениях параметров сети, чтобы, гарантировать стабильность и надежность эксплуатируемой сети.

Список использованной литературы:

1. Рекомендация МСЭ-Т G.703 Физические и электрические характеристики иерархических цифровых стыков.
2. Рекомендация МСЭ-Т G.821 Характеристика ошибок на международном цифровом соединении, образуемом в цифровой сети с интеграцией служб.
3. Рекомендация МСЭ-Т G.823 Нормирование дрожания и дрейфа фазы в цифровых сетях, основанных на иерархии 2048 кбит/с.
4. Рекомендация МСЭ-Т G.826 Показатели ошибок и нормы для цифровых международных трактов с постоянной скоростью передачи, равной или превышающей первичную скорость.
5. Рекомендация МСЭ-Т M.2100 Допустимые пределы показателей ошибок при вводе в эксплуатацию и техническом обслуживании международных цифровых трактов, участков и систем передачи.
6. Рекомендация M.2301 Нормы на качественные показатели и процедуры для подготовки к работе и для эксплуатации сетей на основе IP.
7. Бирюков Н.Л., Триска Н.Р. Синхронный Ethernet как основа частотно-временного обеспечения современных и будущих сетей связи. Электросвязь, №2, 2023.
8. https://www.lastmile.su/journal/article/5169
9. https://certificate.net/Portals/1/STANDARDS/ITU/y-1541-rus.pdf -
10. https://siblec.ru/telekommunikatsii/upravlenie-telekommunikatsionnymi-setyami/2-standarty-protokoly-interfejsy-upravleniya-setyami-svyazi-rekomenduemye-mse-t



GURUCH VA DON MAHSULOTLARINING NAMLIGINI O‘LCHASHDA METROLOGIK NAZORATNING IQTISODIY SAMARADORLIGI



Kalandarov Palvan Iskandarovich
texnika fanlari doktori, professor,
O‘zbekiston milliy metrologiya instituti
yetakchi mutaxassisi

E-mail: eest_uz@mail.ru

Murodova Sarvinoz Fahriddin qizi
O‘zbekiston milliy metrologiya instituti
1-bosqich tayanch doktoranti

E-mail: murodovas638@gmail.com

Annotatsiya. Maqolada qishloq xo‘jaligi mahsulotlari, xususan, guruch (sholi) va don mahsulotlarini saqlash hamda savdo qilish jarayonida ularning sifat ko‘rsatkichlarini ta’minlovchi metrologik nazorat masalalari ko‘rib chiqilgan. Don namligini aniqlashda ekspress namlik o‘lchagichlar (nam o‘lchagich) xatoliklarining mahsulot qiymatiga va saqlanish muddatiga ta’siri tahlil qilingan. Xalqaro OIML R 59 va ISO 7700-1 standartlari talablari asosida namlik o‘lchash vositalarini davlat qiyoslovidan va kalibrlashdan o‘tkazishning metrologik zanjiri asoslab berilgan. Tadqiqot natijasida o‘lchashlardagi yo‘l qo‘yilishi mumkin bo‘lgan chegaraviy xatoliklarning iqtisodiy zarar derivatsiyasi baholangan va sohada o‘lchashlar birliligini ta’minlash bo‘yicha tavsiyalar ishlab chiqilgan.

Kalit so‘zlar: metrologiya, guruch, sholi, don namligi, namlik o‘lchagich (nam o‘lchagich), OIML R 59, qiyoslash, kalibrlash, metrologik kuzatiluvchanlik, iqtisodiy xatolik.

Аннотация. В статье исследуются вопросы метрологического обеспечения и контроля качества сельскохозяйственной продукции, в частности риса (пади) и зерновых культур, в процессах их хранения и торгового оборота. Обоснована критическая значимость точного измерения влажности как ключевого фактора, определяющего класс, рыночную стоимость и сохраняемость зерна. На основе анализа международных стандартов OIML R 59 и ISO 7700-1 построена цепь метрологической прослеживаемости для верификации и калибровки экспресс-влагомеров. Авторами предложена многофакторная математическая модель нелинейной регрессии, учитывающая влияние плотности и температуры пробы на погрешность диэлектрического метода измерений. В соответствии с международным руководством JCGM GUM рассчитан бюджет неопределенности измерений и проведена деривация экономических потерь, возникающих вследствие превышения максимально допустимых погрешностей. Сформулированы научно обоснованные рекомендации по совершенствованию контроля единства измерений в аграрном секторе.

Ключевые слова: метрология, единство измерений, влажность зерна, рис, пади, экспресс-влагомер, OIML R 59, поверка, калибровка, математическая модель, неопределенность измерений, экономические потери.

Abstract. The article examines the issues of metrological control that ensures the quality indicators of agricultural products, in particular, rice (paddy) and cereal grains during their storage and trade. The impact of error in express moisture meters on the product value and shelf life is analyzed. Based on the requirements of international standards OIML R 59 and ISO 7700-1, the metrological traceability chain for verification and calibration of moisture measurement instruments is substantiated. As a result of the study, the economic loss derivation of maximum permissible errors in measurements was evaluated, and recommendations for ensuring the uniformity of measurements in the agricultural sector were developed.

Keywords: metrology, rice, paddy, grain moisture, moisture meter, OIML R 59, verification, calibration, metrological traceability, economic error.

Kirish. Dunyo miqyosida va O‘zbekiston iqtisodiyotida oziq-ovqat xavfsizligini ta’minlash, qishloq xo‘jaligi mahsulotlarini yetishtirish va qayta ishlash tizimida metrologik ta’minot ustuvor yo‘nalishlardan biridir. Guruch (sholi) va boshqa don ekinlarini yig‘ib olish, quritish, elevatorlarda saqlash va oldi-sotdi jarayonlarida namlik ko‘rsatkichi mahsulotning sinfi va narxini belgilovchi eng asosiy mezon hisoblanadi [1,2].

Agar don tarkibidagi namlik me’yordan (masalan, guruch uchun 14% dan) yuqori bo‘lsa, don omborlarida o‘z-o‘zidan qizish, mog‘orlash va chirish jarayonlari boshlanadi. Agar o‘lchash asbobi namlikni real ko‘rsatkichdan past qilib ko‘rsatsa (masalan, reallikda 15% bo‘lgan donni 14% deb baholasa), xaridor ortiqcha suv uchun pul to‘laydi va mahsulot tez orada yaroqsiz holga keladi. Teskari xatolikda esa sotuvchi (dehqon) moddiy

zarar ko'radi. Shu bois, don namligini o'lchaydigan asboblarning metrologik nazorati va ularning milliy va xalqaro etalonlarga kuzatiluvchanligini ta'minlash dolzarb ilmiy-amaliy vazifadir.

Materiallar va metodlar. Tadqiqot jarayonida don va sholi mahsulotlari namligini o'lchashning ikkita asosiy metodi solishtirildi:

1. Birinchi darajali (Termogravimetrik) metod (ISO 712 / ISO 6540): don namunasini quritish shkafida (termogravimetrik usul) ma'lum harorat va vaqt davomida quritib, vaznining kamayishi orqali suv massasini aniqlash. Bu metod eng aniq (etalon) hisoblanadi, ammo ko'p vaqt talab etadi [3].

Ikkinchi darajali (Ekspress) metod: dala sharoitida va qabul qilish punktlarida ishlatiladigan dielektrik yoki o'ta yuqori chastotali (O'YUCH) raqamli nam o'lchagichlar. ularning ishlash printsipi donning dielektrik singdiruvchanligi namlikka bog'liqligiga asoslangan [4].

Metrologik tahlil sifatida OIML R 59 xalqaro tavsiyalari va ISO 7700-1 standartidagi yo'l qo'yiladigan chegaraviy xatoliklar mezon qilib olindi [5; B. 525].

Matematik modellashtirish. Don va guruch (sholi) mahsulotlari tarkibidagi namlikni ekspress usulda (dielektrik metod yordamida) o'lchash jarayoni ko'p omilli fizik-kimyoviy tizim hisoblanadi. Dielektrik namlik o'lchagichlarning (nam o'lchagich) chiqish signali (dielektrik singdiruvchanlik nafaqat don tarkibidagi haqiqiy suv miqdoriga W, balki don namunasining harorati T va uning hajmiy zichligi (natura massasi) ga ham bog'liqdir.

Shu bois, [6; B.299] binoan, o'lchash jarayonining matematik modelini quyidagi ko'p omilli nochiziqli funktsiya ko'rinishida ifodalaymiz:



Amaliyotda atrof-muhit va mahsulot haroratining hamda don zichligining o'zgarishi natijasida yuzaga keladigan tizimli xatoliklarni kompensatsiya qilish uchun chiziqli bo'lmagan regressiya modeli qo'llaniladi:



Bu yerda:

W — don yoki guruchning hisoblangan haqiqiy namligi (%);

ε — asbob datchigi tomonidan o'lchangan dielektrik singdiruvchanlik ko'rsatkichi;

T — o'lchash paytidagi don harorati (°C);

T_0 — kalibrlash o'tkazilgan tayanch harorat (standart bo'yicha 20;

ρ — don namunasining real hajmiy zichligi g/sm3;

$ρ_0$ — mazkur don navi uchun standartlangan tayanch zichlik g/sm3;

$α_0$, $α_1$, $α_2$, $δ_1$, $γ_1$ — empirik yo'l bilan aniqlanadigan va asbob dasturiy ta'minotiga kiritiladigan kalibrlash koeffitsiyentlari.

3.1. O'lchash noaniqligining matematik modeli (JCGM GUM bo'yicha)

Metrologik kuzatiluvchanlik zanjirini baholash va o'lchash natijalarining ishonchliligini tasdiqlash uchun namlikni aniqlashdagi standart noaniqlik byudjeti modelini tuzamiz. Namlik o'lchashning umumiy funktsional xatolik modeli quyidagicha ko'rinishga ega:



Bu yerda:

$ΔW_{asbob}$ — namlik o'lchagichning pasport bo'yicha xususiy asosiy xatoligi;

$ΔW_T$ — harorat kompensatsiyasi tizimining qoldiq xatoligi;

$ΔW_ρ$ — donning bir jinsli emasligi va zichlik tebranishidan kelib chiqadigan xatolik;

$ΔW_{operator}$ — namuna olish va operator tomonidan yo'l qo'yiladigan tasodifiy xatolik.

Xalqaro **JCGM 100:2008 (GUM)** qo'llanmasi talablariga muvofiq, umumlashtirilgan standart noaniqlik uc(W) quyidagi matematik dispersiya tenglamasi orqali hisoblanadi:

Bu yerda  — sezuvchanlik koeffitsientlari (xususiy hosilalar) hisoblanib, ular har bir omilning yakuniy natijaga ko'rsatadigan ta'sir darajasini belgilaydi.

Guruch (sholi) doni ustida o'tkazilgan metrologik tadqiqotlar shuni ko'rsatadiki, harorat to'g'rilagichi (kompensatsiyasi) mavjud bo'lmagan asboblarda harorat koeffitsienti 1 = 0.05% ni tashkil etadi.

Bu esa harorat tayanch nuqtadan 10°C ga farq qilganda, yakuniy natijaga chiziqli ravishda ± 0.5% lik tizimli xatolik kiritadi va asbobning xalqaro OIML R 59 standarti talablari doirasidan chiqib ketishiga sabab bo'ladi.

1-rasm. Guruch (sholi) haroratining namlik o'lchagich ko'rsatkichiga ta'siri.



Ishonchlilik ehtimolligi P = 0.95 va qamrab olish koeffitsienti k = 2 bo'lganda, kengaytirilgan metrologik noaniqlik (U) quyidagicha ifodalanadi:



Ushbu matematik model ekspress-nam o'lchagichlarni milliy etalon (quritish shkafi) yordamida kalibrlashda dasturiy tuzatishlarni (korrektsiya) to'g'ri kiritish uchun matematik-algoritmik asos bo'lib xizmat qiladi.



2-rasm. Namlik o'lchashdagi kengaytirilgan noaniqlik byudjetining taqsimlanishi

Ishlab chiqilgan matematik model asosida tuzilgan noaniqlik byudjeti tahlili shuni ko'rsatdiki (2-rasm), umumiy o'lchash noaniqligining eng katta qismi (45%) asbobning xususiy xatoligiga va 25 foizi harorat kompensatsiyasining noaniqligiga to'g'ri keladi.

Natijalar va muhokama. Xalqaro metrologik talablarga ko'ra, tijorat operatsion jarayonlarida qo'llaniladigan don namlik o'lchagichlarining yo'l qo'yiladigan xatolik chegarasi quyidagi jadvalda ifodalanadi:

1-jadval.
Namlik o'lchagichlar uchun xalqaro standart (OIML R 59) bo'yicha yo'l qo'yiladigan xatoliklar

Don turi	Namlik diapazoni(%)	Qiyoslashdagi yo'l qo'yiladigan xatolik (MPE)	Ishlatilish jarayonidagi xatolik (MPE)
Guruch (Sholi)	10% – 15% (Past namlik)	0.3%	0.4%
Guruch (Sholi)	15% – 22% (Yuqori namlik)	0.4%	0.6%
Bug'doy / Arpa	10% – 20%	0.3%	0.5%

Tadqiqotlar shuni ko'rsatdiki, ekspress-nam o'lchagichlar ishlatilish jarayonida atrof-muhit harorati, donning zichligi va navi o'zgarishi natijasida dreyfga (kalibrlash ko'rsatkichlarining surilishiga) uchraydi. Elektron namlik o'lchagichda harorat kompensatsiyasi tizimi to'g'ri sozlanmasa, haroratning har 10 °C ga o'zgarishi o'lchash natijasiga 0.5% dan ortiq qo'shimcha xatolik kiritadi.

4.1.Iqtisodiy zarar formulasi (Derivatsiya):

Agar elevatorga 1000 tonna guruch qabul qilinayotganda, nam o'lchagichning tizimli xatoligi +0.8% ni tashkil etsa (ya'ni namlik 14% bo'lganda asbob 14.8% ko'rsatsa), mahsulotning sof vaznidan ortiqcha namlik uchun chegirma (usushka) hisoblanadi:

Bu degani, dehqon birgina o'lchashdagi xatolik tufayli 8 tonna guruch qiymatidagi mablag'ni yo'qotadi. Mamlakat miqyosida bu ko'rsatkich milliardlab so'mlik noto'g'ri hisob-kitobga olib keladi [7; B. 632].

Xulosa. Don va guruch mahsulotlari namligini o'lchash iqtisodiy va oziq-ovqat xavfsizligi nuqtai nazaridan "Metrologiya to'g'risida" gi Qonunning savdo-tijorat va moddiy boyliklarni hisobga olish sohasiga kiradi va majburiy davlat metrologik tekshiruvidan o'tkazilishi shart.

1. Dala va qabul punktlaridagi ekspress namlik o'lchagichlar yiliga kamida bir marta O'zbekiston milliy metrologiya instituti (O'zMMI) laboratoriyalarida davlat standarti yordamida qiyoslanishi va kalibrlanishi lozim.

2. Don qabul qilish punktlarida harorat kompensatsiyasiga ega bo'lgan, OIML sertifikatiga ega zamonaviy o'lchash vositalarini joriy etish o'lchashlardagi xatolikni 0.3% ichida ushlab turishga va nizoli vaziyatlarning oldini olishga imkon beradi.

Foydalanilgan adabiyotlar ro'yxati:

1. O'zbekiston Respublikasining "Metrologiya to'g'risida"gi Qonuni (Yangi tahriri, OO'Q-614).

2. OIML R 59:2016 "Moisture meters for cereal grains and oilseeds". International Organization of Legal Metrology.

3. ISO 7700-1:2019 "Check of the calibration of moisture meters in service — Part 1: Grain moisture meters".

4. ISO 712:2009 "Cereals and cereal products — Determination of moisture content — Reference method".

5. Kalandarov, P.I. Estimate of Precision of Thermogravimetric Method of Measuring Moisture Content: Estimate of Precision and Effectiveness Gained with the Use of the Method in the Agro-Industrial Complex. Measurement Techniques, 2021, 64(6), Pp.522-528 https://doi.org/10.1007/s11018-021-01963-9

6. Kalandarov, P.I. High-Frequency Moisture Meter for Measuring the Moisture Content of Grain and Grain Products Measurement Techniques, 2022, 65(4), pp. 297–303 (2022). https://doi.org/10.1007/s11018-022-02082-9

7. Kalandarov, P.I., Saidoripov, L.F. & Iskandarov, B.P. Effect of wheat bulk density on the accuracy of moisture measurement via the microwave method. Meas Tech 68, 632–641 (2025). https://doi.org/10.1007/s11018-026-02484-z



MILLIY INSTITUTLAR ORQALI XALQARO TEXNIK TIZIMGA INTEGRATSIYALA-SHUVNING INSTITUTSIONAL MEXANIZMLARI



Orifboyev Abdullaxon Asadullo o‘g‘li
O‘zbekiston Texnik jihatdan tartibga solish agentligi Xalqaro hamkorlik va integratsiya boshqarmasi boshlig‘i, O‘zbekiston Milliy elektrotexnika qo‘mitasi kotibi

E-mail: abdullo1978@mail.ru

Annotatsiya. Maqolada milliy texnik jihatdan tartibga solish institutlarining xalqaro texnik tizimga integratsiyalashuvining institutsional mexanizmlari tahlil qilingan. Tadqiqotda milliy sifat infratuzilmasining asosiy tarkibiy qismlari hisoblangan standartlashtirish, metrologiya, akkreditatsiya va muvofiqlikni baholash tizimlarining o‘zaro funksional bog‘liqligi baholangan. ISO, IEC, BIPM, OIML, GLOBAL ACI hamda Jahon savdo tashkiloti doirasida shakllangan xalqaro institutsional muhitning milliy texnik jihatdan tartibga solish tizimiga ta’siri tahlil qilingan. Milliy institutlarning xalqaro standartlarni milliylashtirish, metrologik trassirovkani ta’minlash, laboratoriyalarni akkreditatsiya qilish va muvofiqlikni baholash natijalarini xalqaro darajada tan olish jarayonlaridagi o‘rni asoslangan. Tadqiqot natijalari milliy sifat infratuzilmasini rivojlantirish, mahsulot raqobatbardoshligini oshirish hamda milliy texnik jihatdan tartibga solish tizimini xalqaro talablar asosida takomillashtirish bo‘yicha ilmiy asoslangan takliflarni ishlab chiqish imkonini berdi.

Kalit so'zlar: texnik jihatdan tartibga solish, milliy sifat infratuzilmasi, standartlashtirish, metrologiya, akkreditatsiya, muvofiqlikni baholash, ISO, IEC, BIPM, OIML, GLOBAL ACI, institutsional integratsiya.

Аннотация. В статье исследованы институциональные механизмы интеграции национальных институтов в международную систему технического регулирования. Проведён анализ функциональной взаимосвязи стандартизации, метрологии, аккредитации и оценки соответствия как ключевых элементов национальной инфраструктуры качества. Рассмотрено влияние международной институциональной среды, сформированной ISO, IEC, BIPM, OIML, GLOBAL ACI и Всемирной торговой организацией, на развитие национальной системы технического регулирования. Обоснована роль национальных институтов в гармонизации международных стандартов, обеспечении метрологической прослеживаемости, аккредитации испытательных лабораторий и международном признании результатов оценки соответствия. Полученные результаты позволили разработать научно обоснованные рекомендации по совершенствованию национальной инфраструктуры качества, повышению конкурентоспособности продукции и развитию системы технического регулирования в соответствии с международными требованиями.

Ключевые слова: техническое регулирование, национальная инфраструктура качества, стандартизация, метрология, аккредитация, оценка соответствия, ISO, IEC, BIPM, OIML, GLOBAL ACI, институциональная интеграция.

Abstract. This paper examines the institutional mechanisms for integrating national institutions into the international technical regulation system. The functional interrelationship between standardization, metrology, accreditation, and conformity assessment as the core components of the National Quality Infrastructure (NQI) is analyzed. The study evaluates the impact of the international institutional framework established by ISO, IEC, BIPM, OIML, GLOBAL ACI, and the World Trade Organization on the development of national technical regulation systems. Particular attention is paid to the role of national institutions in harmonizing international standards, ensuring metrological traceability, accrediting testing laboratories, and achieving international recognition of conformity assessment results. The findings provide scientifically grounded recommendations for strengthening the National Quality Infrastructure, improving product competitiveness, and further developing the technical regulation system in accordance with international best practices.

Keywords: technical regulation, National Quality Infrastructure, standardization, metrology, accreditation, conformity assessment, ISO, IEC, BIPM, OIML, GLOBAL ACI, institutional integration.

Kirish. Zamonaviy iqtisodiyotning globallashuvi milliy mahsulotlar raqobatbardoshligini ta’minlashga qaratilgan institutsional mexanizmlarning ahamiyatini sezilarli darajada oshirdi. Agar ilgarigi davrlarda tashqi savdoda asosiy e’tibor tarif siyosati va bojxona tartiblariga qaratilgan bo‘lsa, hozirgi kunda mahsulotning xalqaro standartlarga muvofiqligi, uning xavfsizligi, sifat ko‘rsatkichlarining ishonchliligi hamda muvofiqlikni baholash natijalarining xalqaro darajada tan olinishi asosiy raqobat omillaridan biriga aylandi. Shu sababli texnik jihatdan tartibga solish milliy iqtisodiyotning tashqi bozorlarga integratsiyalashuvini ta’minlovchi strategik institut sifatida qaralmoqda [1; P. 34].

Xalqaro texnik tizimning shakllanishi ISO, IEC, BIPM, OIML, GLOBAL ACI va Jahon savdo tashkiloti kabi xalqaro institutlar faoliyati bilan bevosita bog‘liq. Ushbu institutlar tomonidan ishlab chiqilgan standartlar, metrologik qoidalar, akkreditatsiya mexanizmlari va muvofiqlikni baholash tartiblari jahon bozorida mahsulotlarning erkin harakatlanishi uchun yagona texnik muhitni shakllantiradi. Biroq mazkur muhitga mamlakatning to‘g‘ridan-to‘g‘ri emas, balki milliy texnik jihatdan tartibga solish institutlari orqali integratsiyalashishi ta’minlanadi. Milliy institutlar xalqaro texnik tizim bilan milliy iqtisodiyot o‘rtasidagi institutsional bog‘lovchi vazifasini bajaradi. O‘zbekistonda ushbu vazifani Texnik jihatdan tartibga solish agentligi, O‘zbekiston standartlar instituti, Milliy metrologiya instituti, UzTest va milliy akkreditatsiya organi amalga oshiradi.

Institutsional iqtisodiyot nazariyasi nuqtai nazaridan texnik jihatdan tartibga solish iqtisodiy munosabatlarda noaniqlikni kamaytiruvchi va ishtirokchilar o‘rtasida ishonchni ta’minlovchi institut hisoblanadi. D.Nort ta’kidlaganidek, institutlar iqtisodiy munosabatlarda “o‘yin qoidalari”ni belgilaydi, O.Uilyamson esa institutsional muhit tranzaksion xarajatlarni kamaytirish orqali iqtisodiy samaradorlikni oshirishini asoslab bergan. Ushbu yondashuv texnik jihatdan tartibga solish sohasi uchun ham to‘liq xosdir. Agar milliy mahsulot xalqaro standartlar asosida ishlab chiqarilgan, xalqaro talablarga muvofiq sinovdan o‘tkazilgan va xalqaro tan olingan laboratoriya tomonidan baholangan bo‘lsa, tashqi bozor ishtirokchilari uchun qo‘shimcha tekshiruvlarga ehtiyoj kamayadi. Bu esa eksport xarajatlarining pasayishiga va mahsulot raqobatbardoshligining oshishiga xizmat qiladi.

Jahon savdo tashkilotining Texnik to‘siqlar to‘g‘risidagi kelishuvi (WTO/TBT Agreement) milliy texnik jihatdan tartibga solish tizimini xalqaro talablar bilan uyg‘unlashtirishning huquqiy asosini yaratdi. Mazkur kelishuv davlatlardan texnik reglamentlar va standartlarni xalqaro standartlarga muvofiq ishlab chiqishni, muvofiqlikni baholash jarayonlarida asossiz cheklovlarga yo‘l qo‘ymaslikni hamda texnik talablardan yashirin savdo to‘sig‘i sifatida foydalanmaslikni talab qiladi. Shu jihatdan milliy institutlarning xalqaro texnik tashkilotlar bilan integratsiyalashuvi tashqi savdo siyosati emas, balki milliy iqtisodiyotning institutsional rivojlanish ko‘rsatkichi sifatida baholanishi mumkin.

So‘nggi yillarda milliy sifat infratuzilmasini rivojlantirishga bag‘ishlangan ilmiy tadqiqotlarda standartlashtirish, metrologiya va akkreditatsiyaning alohida yo‘nalishlari keng o‘rganilgan bo‘lsa-da, milliy institutlar orqali xalqaro texnik tizimga integratsiyalashuvning bosqichma-bosqich institutsional algoritmi yetarlicha tadqiq etilmagan. Ayniqsa, huquqiy uyg‘unlashtirish, xalqaro tashkilotlarda institutsional ishtirok, ISO va IEC standartlarini milliylashtirish, metrologik trassirovka, laboratoriyalarni xalqaro tan olish va raqamli texnik infratuzilmani yagona tizim si-

fatida baholovchi kompleks yondashuvlar cheklangan.

Shundan kelib chiqqan holda mazkur tadqiqotning maqsadi milliy institutlar orqali xalqaro texnik tizimga integratsiyalashuvning institutsional mexanizmlarini kompleks tahlil qilish, integratsiya algoritmining funksional bosqichlarini baholash hamda O'zbekiston milliy sifat infratuzilmasini takomillashtirish bo'yicha ilmiy asoslangan takliflar ishlab chiqishdan iborat.

Materiallar va metodlar. Mazkur tadqiqot xalqaro texnik tashkilotlar bilan milliy texnik jihatdan tartibga solish institutlari o'rtasidagi institutsional munosabatlarni kompleks baholashga qaratilgan sifat (qualitative) tadqiqoti sifatida tashkil etildi. Tadqiqotning nazariy asosini milliy sifat infratuzilmasi (National Quality Infrastructure – NQI) konsepsiyasi, institutsional iqtisodiyot nazariyasi hamda texnik jihatdan tartibga solishning xalqaro modeli tashkil etdi. Metodologik yondashuv sifatida tizimli tahlil, institutsional tahlil, funksional tahlil va qiyosiy-komparativ tahlil usullari birgalikda qo'llanildi, bu esa milliy institutlarning xalqaro texnik tizimga integratsiyalashuvini yagona funksional jarayon sifatida baholash imkonini berdi [2; P. 112, 3; P. 86].

Tadqiqot obyekti sifatida xalqaro texnik jihatdan tartibga solish tizimi hamda uning tarkibiy institutlari tanlandi. Bunda ISO, IEC, BIPM, OIML, GLOBAL ACI, Jahon savdo tashkiloti va milliy texnik jihatdan tartibga solish organlari o'rtasidagi institutsional munosabatlar asosiy tahlil obyekti hisoblandi. Tadqiqot predmetini mazkur institutlarning funksional vazifalari, o'zaro hamkorlik mexanizmlari hamda milliy sifat infratuzilmasini shakllantirishdagi ishtiroki tashkil etdi. Yuklangan manbada keltirilgan milliy institutlar va ularning xalqaro tashkilotlar bilan o'zaro aloqasi tahlilning asosiy empirik negizini tashkil qildi.

Tadqiqotning axborot manbalari sifatida ISO Strategy 2030, IEC Strategic Plan, SI Brochure, CIPM MRA, OIML Strategy, WTO Technical Barriers to Trade Agreement, UNIDOning milliy sifat infratuzilmasiga oid hujjatlari, shuningdek, O'zbekiston Respublikasining texnik jihatdan tartibga solish sohasidagi qonunlari va meyoriy hujjatlaridan foydalanildi [1-21; 43-47]. Bundan tashqari, ilova qilingan materialda keltirilgan milliy institutlar faoliyati, xalqaro tashkilotlarga a'zolik holati, institutsional hamkorlik mexanizmlari va integratsiya bosqichlari tahlil qilindi.

Tadqiqotda institutsional tahlil usuli asosiy tadqiqot usuli sifatida qo'llanildi. Ushbu usul orqali xalqaro va milliy institutlarning huquqiy maqomi, vakolatlari, vazifalari hamda o'zaro munosabatlari baholandi. Institutsional tahlil standartlashtirish, metrologiya va akkreditatsiya tizimlari mustaqil emas, balki yagona funksional tizimning tarkibiy elementlari sifatida faoliyat yuritishini aniqlash imkonini berdi. Bunda har bir institutning xalqaro texnik tizimdagi vazifasi va milliy texnik jihatdan tartibga solish tizimiga ta'siri o'zaro bog'liq holda ko'rib chiqildi.

Qiyosiy tahlil usuli orqali xalqaro texnik tashkilotlar faoliyati milliy institutlar faoliyati bilan solishtirildi. Baholash mezonlari sifatida xalqaro standartlarni milliylashtirish darajasi, metrologik trassirovka tizimining shakllanganligi, akkreditatsiya jarayonlarining xalqaro tan olinishi, laboratoriyalar kompetentligini baholash tartibi hamda raqamli texnik infratuzilmaning rivojlanganlik darajasi qabul qilindi. Ushbu yondashuv milliy texnik jihatdan tartibga solish tizimining xalqaro institutlar bilan integratsiyalashuv darajasini aniqlash imkonini berdi.

Funksional tahlil jarayonida xalqaro texnik tizimning ishlash algoritmi bosqichma-bosqich rekonstruksiya qilindi. Bunda texnik reglamentlar va standartlarni ishlab chiqish, xalqaro standartlarni milliylashtirish, etalonlar tizimini

shakllantirish, metrologik trassirovkani ta’minlash, muvofiqlikni baholash, laboratoriyalarni akkreditatsiya qilish, sertifikatlashtirish va xalqaro darajada o‘zaro tan olish jarayonlari yagona funksional zanjir sifatida tahlil qilindi. Ilova qilingan manbada keltirilgan integratsiya algoritmi ushbu funksional tahlilning asosiy manbai bo‘lib xizmat qildi.

Kontent-tahlil usuli yordamida xalqaro tashkilotlarning strategik hujjatlari, qonunchilik materiallari va rasmiy hisobotlari tizimlashtirildi. Tahlil jarayonida “milliy sifat infratuzilmasi”, “texnik jihatdan tartibga solish”, “standartlashtirish”, “metrologiya”, “akkreditatsiya”, “muvofiqlikni baholash”, “o‘zaro tan olish” kabi asosiy kategoriyalarning mazmuni va ular o‘rtasidagi funksional bog‘liqlik baholandi.

Tadqiqot natijalarining ishonchliligini ta’minlash maqsadida ma’lumotlar triangulyatsiyasi qo‘llanildi. Xalqaro tashkilotlarning rasmiy hujjatlari, milliy qonunchilik, ilmiy adabiyotlar hamda ilova qilingan materialdagi ma’lumotlar o‘zaro taqqoslandi. Bu tadqiqot xulosalarining ilmiy asoslanganligini va obyektivligini oshirish imkonini berdi.

Tadqiqotning cheklovlari sifatida ishning institutsional-sifat tahliliga asoslanganligini qayd etish lozim. Maqolada iqtisodiy-matematik modellashtirish yoki katta hajmli statistik ma’lumotlar tahlil qilinmadi. Shuning uchun tadqiqot natijalari xalqaro texnik tashkilotlar bilan milliy institutlar o‘rtasidagi funksional munosabatlarning institutsional modelini asoslash va milliy sifat infratuzilmasini takomillashtirish bo‘yicha ilmiy xulosalar ishlab chiqishga qaratilgan.

Natijalar. Tadqiqot natijalari milliy texnik jihatdan tartibga solish tizimining xalqaro texnik muhitga integratsiyalashuvi alohida chora-tadbirlar yig‘indisi emas, balki izchil institutsional jarayon ekanligini ko‘rsatdi. Institutsional tahlil natijalariga ko‘ra, milliy sifat infratuzilmasining samaradorligi xalqaro tashkilotlarga rasmiy a’zolik darajasi bilan emas, balki milliy institutlarning xalqaro texnik qoidalarni amaliyotga joriy etish qobiliyati bilan belgilanadi. Bu esa texnik jihatdan tartibga solish sohasida institutsional muvofiqlashuv huquqiy uyg‘unlashtirish, standartlarni milliylashtirish, metrologik trassirovkani ta’minlash, muvofiqlikni baholash va xalqaro o‘zaro tan olish mexanizmlarining izchil amal qilishiga bog‘liq ekanligini tasdiqladi [1; P. 34, 2; P. 112].

Ilova qilingan material tahlili milliy institutlar orqali xalqaro texnik tizimga integratsiyalashuv bosqichlari o‘zaro mantiqiy ketma-ketlikda amalga oshishini ko‘rsatdi. Birinchi bosqichda xalqaro huquqiy majburiyatlar milliy qonunchilikka implementatsiya qilinadi. Keyingi bosqichda ISO va IEC xalqaro standartlari milliy standartlar sifatida qabul qilinadi. Uchinchi bosqichda milliy metrologiya tizimi xalqaro etalonlar bilan trassirovkalanadi. Shundan so‘ng muvofiqlikni baholash organlari xalqaro talablar asosida akkreditatsiyadan o‘tkaziladi va ularning natijalari xalqaro o‘zaro tan olish mexanizmlari orqali tashqi bozorlarda qabul qilinadi. Bu jarayonning yakuniy natijasi sifatida milliy mahsulotlar xalqaro bozorga qo‘shimcha texnik to‘siqlarsiz chiqish imkoniyatiga ega bo‘ladi.

Olingan natijalar xalqaro texnik tashkilotlar vazifalari bir-birini takrorlamasligini, aksincha, ular yagona funksional zanjirni shakllantirishini ko‘rsatdi. ISO va IEC texnik talablarni ishlab chiquvchi institutlar hisoblansa, BIPM va OIML mazkur talablarning o‘lchanishini ta’minlaydi. GLOBAL ACI hamda milliy akkreditatsiya organlari esa ushbu talablarni baholovchi tashkilotlarning kompetentligini tasdiqlaydi. Jahon savdo tashkiloti esa ushbu jarayonning xalqaro huquqiy asosini shakllantiradi. Shu tariqa texnik jihatdan tartibga solish sohasida normativ, metrologik, institutsio-

nal va huquqiy mexanizmlar o‘zaro muvofiq holda ishlaydigan kompleks tizim vujudga keladi [1; P. 4-21].

1-jadval
Milliy texnik jihatdan tartibga solish tizimining xalqaro texnik muhitga integratsiyalashuv bosqichlari

Integratsiya bosqichi	Asosiy institut	Natija
Huquqiy uyg‘unlashtirish	WTO, milliy qonunchilik	Xalqaro talablarga mos huquqiy muhit
Standartlarni milliylashtirish	ISO, IEC, milliy standartlashtirish organi	Uyg‘unlashtirilgan milliy standartlar
Metrologik integratsiya	BIPM, OIML, milliy metrologiya instituti	O‘lchashlarning xalqaro trassirovkasi
Akkreditatsiya	GLOBAL ACI, milliy akkreditatsiya organi	Kompetent laboratoriyalar
Muvofiqlikni baholash	Sinov va sertifikatlashtirish organlari	Ishonchli texnik natijalar
O‘zaro tan olish	Xalqaro kelishuvlar	Eksport mahsulotlarining xalqaro qabul qilinishi

Jadval tahlili integratsiya jarayonining har bir bosqichi keyingi bosqich uchun institutsional asos vazifasini bajarishini ko‘rsatdi. Agar ushbu zanjirning biror bo‘g‘ini to‘liq shakllanmagan bo‘lsa, butun milliy sifat infratuzilmasining samaradorligi pasayadi.

Tadqiqot natijalari milliy institutlar faoliyatini baholashda ularning xalqaro tashkilotlarga a’zoligi yetarli ko‘rsatkich emasligini ham ko‘rsatdi. Masalan, xalqaro standartlarni milliy standart sifatida qabul qilishning o‘zi eksport raqobatbardoshligini ta’minlamaydi. Agar milliy etalonlar xalqaro etalonlarga trassirovkalanmagan bo‘lsa yoki laboratoriyalar ISO/IEC 17025 talablari asosida akkreditatsiyadan o‘tmagan bo‘lsa, mahsulot tashqi bozorda qayta sinovdan o‘tkazilishi ehtimoli saqlanib qoladi. Shuning uchun milliy sifat infratuzilmasining samaradorligi uning alohida elementlari emas, balki ularning funksional integratsiyasi orqali baholanishi maqsadga muvofiq hisoblanadi [10; P. 30, 14; P. 216, 18; P. 21].

Ilmiy tahlil natijasida milliy texnik jihatdan tartibga solish tizimi samaradorligini belgilovchi to‘rtta asosiy institutsional omil aniqlandi. Birinchi omil huquqiy uyg‘unlashtirish darajasi bo‘lib, milliy texnik reglamentlarning xalqaro talablarga mosligi bilan belgilanadi. Ikkinchi omil standartlashtirish tizimining rivojlanganligi hisoblanadi va u xalqaro standartlarni milliy standart sifatida joriy etish sur’ati bilan baholanadi. Uchinchi omil metrologik infratuzilmaning rivojlanganligi bo‘lib, milliy etalonlar va kalibrlash tizimining xalqaro tan olinishiga bog‘liq. To‘rtinchi omil akkreditatsiya tizimining xalqaro darajada tan olinishi hisoblanadi. Aynan mazkur to‘rt omilning bir vaqtda yuqori darajada shakllanganligi milliy mahsulotlarning tashqi bozorda erkin harakatlanishi uchun zarur institutsional muhitni ta’minlaydi.

Tadqiqotning muhim ilmiy natijalaridan biri milliy institutlar orqali xalqaro texnik tizimga integratsiyalashuvning funksional modeli takomillashtirilganligidir. Ilova qilingan materialda bosqichlar alohida tavsiflangan bo‘lsa, ushbu tadqiqotda ular o‘rtasidagi sabab-oqibat munosabatlari aniqlandi. Tahlil shuni ko‘rsatdiki, milliy sifat infratuzilmasida huquqiy, texnik, metrologik va institutsional elementlar bir vaqtning o‘zida rivojlantirilgandagina xalqaro texnik muhit bilan to‘liq integratsiya ta’minlanadi.

Foydalanilgan adabiyotlar ro‘yxati:

1. World Trade Organization. Agreement on Technical Barriers to Trade. – Geneva: WTO, 1995. – 34 p.
2. United Nations Industrial Development Organization (UNIDO). National Quality Infrastructure: Supporting Sustainable Development. – Vienna: UNIDO, 2023. – 112 p.
3. United Nations Industrial Development Organization (UNIDO). Quality Infrastructure for Sustainable Development (QI4SD): Guiding Principles. – Vienna: UNIDO, 2020. – 86 p.
4. International Organization for Standardization. ISO Strategy 2030. – Geneva: ISO, 2021. – 24 p.
5. International Organization for Standardization. ISO/IEC Directives. Part 1. Procedures for the Technical Work. – 17th ed. – Geneva: ISO, IEC, 2024. – 168 p.
6. International Electrotechnical Commission. IEC Strategic Plan 2030. – Geneva: IEC, 2022. – 39 p.
7. International Organization for Standardization. ISO 9001:2015. Quality Management Systems – Requirements. – Geneva: ISO, 2015. – 29 p.
8. International Organization for Standardization. ISO 14001:2015. Environmental Management Systems – Requirements with Guidance for Use. – Geneva: ISO, 2015. – 35 p.
9. International Organization for Standardization. ISO 22000:2018. Food Safety Management Systems – Requirements. – Geneva: ISO, 2018. – 38 p.
10. International Organization for Standardization. ISO/IEC 17025:2017. General Requirements for the Competence of Testing and Calibration Laboratories. – Geneva: ISO, IEC, 2017. – 30 p.
11. International Organization for Standardization. ISO/IEC 17020:2012. Conformity Assessment – Requirements for the Operation of Various Types of Bodies Performing Inspection. – Geneva: ISO, IEC, 2012. – 24 p.
12. International Organization for Standardization. ISO/IEC 17065:2012. Conformity Assessment – Requirements for Bodies Certifying Products, Processes and Services. – Geneva: ISO, IEC, 2012. – 38 p.
13. International Organization for Standardization. ISO/IEC 17021-1:2015. Conformity Assessment – Requirements for Bodies Providing Audit and Certification of Management Systems. – Geneva: ISO, IEC, 2015. – 43 p.
14. Bureau International des Poids et Mesures. The International System of Units (SI). SI Brochure. – 9th ed. – Sèvres: BIPM, 2019. – 216 p.
15. Bureau International des Poids et Mesures. CIPM MRA: Mutual Recognition Arrangement. – Sèvres: BIPM, 2023. – 58 p.
16. International Organization of Legal Metrology. OIML Strategy 2030. – Paris: OIML, 2020. – 32 p.
17. International Organization of Legal Metrology. International Vocabulary of Terms in Legal Metrology (VIML). – Paris: OIML, 2022. – 94 p.
18. International Laboratory Accreditation Cooperation. ILAC Strategic Plan 2021–2025. – Sydney: ILAC, 2021. – 21 p.

SUYUQLIKLAR ELEKTR O‘TKAZUVCHANLIGI STANDART NAMUNALARINING TARKIBI VA METROLOGIK TAVSIFLARINI ISHLAB CHIQISH



Xabibullayev Saidaziz Shoxsuvorovich
texnika fanlari bo‘yicha falsafa doktori, dotsent
Texnik jihatdan tartibga solish agentligi bosh mutaxassisi

E-mail: saidazizxonhabibullayev@gmail.com

Dodoyev Alisher Roziqovich
Texnik jihatdan tartibga solish agentligi mustaqil izlanuvchisi

E-mail: alisherdodoev@mail.ru

Annotatsiya. Maqolada suyuqliklar elektr o‘tkazuvchanligi standart namunalarining tarkibi va metrologik tavsiflarini birgalikda shakllantirish usuli taklif etildi. Tajriba qismi 2025-yil 26-martda Keysight E4980AL ko‘prigi va Anton Paar MKT-50 Pt100 termometri bilan 20–10 000 Gs oralig‘ida olingan 28 ta haqiqiy nuqtaga asoslandi; har bir chastotada 25 ta o‘qish bajarildi. Hujayra harorati o‘rtacha 25,000993 °C bo‘lib, umumiy oraliq 0,00041 °C ni tashkil etdi. Tuzatilgan parallel o‘tkazuvchanlik 190,368–193,519 mkS oralig‘ida o‘zgardi, 2–10 kGs sohada nisbiy standart og‘ish 0,00976 % bo‘ldi. $G(f) = G\infty - A \cdot f^{-b}$ modeli R^2=0,999981 bilan moslashdi. Tajriba faylida hujayra doimiysi va eritmaning aniq tarkibi berilmagani sababli mutlaq elektr o‘tkazuvchanlik uchun sertifikatlangan qiymat o‘ylab topilmadi. KCl–yuqori tozalikdagi suv tizimi uchun gravimetrik tayyorlash, bir jinslilik, barqarorlik, chastotaviy tanlash va noa-

niqlikni yagona qiymat berish zanjiriga birlashtiruvchi metrologik sxema ishlab chiqildi.

Kalit so‘zlar: elektr o‘tkazuvchanlik, standart namuna, kaliy xlorid, molyallik, hujayra doimiysi, impedans, chastota, metrologik kuzatuvchanlik, o‘lchash noaniqligi, bir jinslilik, barqarorlik.

Аннотация. В статье предложен метод совместного формирования состава и метрологических характеристик стандартных образцов удельной электрической проводимости жидкостей. Экспериментальная часть основана на 28 экспериментальных точках, полученных 26 марта 2025 года с использованием измерительного моста Keysight E4980AL и термометра Anton Paar MKT-50 Pt100 в диапазоне частот от 20 Гц до 10 000 Гц; на каждой частоте выполнено 25 отсчётов. Средняя температура измерительной ячейки составила 25,000993 °C, общий размах температуры – 0,00041 °C. Скорректированная параллельная проводимость изменялась в пределах 190,368–193,519 мкСм; в диапазоне 2–10 кГц относительное стандартное отклонение составило 0,00976 %. Модель $G(f) = G\infty - A \cdot f^{-b}$ аппроксимирована с коэффициентом детерминации $R^2 = 0{,}999981$. Поскольку в файле экспериментальных данных не указаны постоянная измерительной ячейки и точный состав раствора, сертифицированное значение абсолютной электрической проводимости не определялось. Разработана метрологическая схема для системы “KCl – вода высокой чистоты”, объединяющая гравиметрическое приготовление раствора, оценку однородности и стабильности, выбор рабочей частоты и оценивание неопределённости измерений в единую цепочку метрологической прослеживаемости.

Ключевые слова: электрическая проводимость, стандартный образец, хлорид калия, моляльность, постоянная измерительной ячейки, импеданс, частота, метрологическая прослеживаемость, неопределённость измерений, однородность, стабильность.

Abstract. This paper proposes a method for jointly establishing the composition and metrological characteristics of reference materials for the electrical conductivity of liquids. The experimental part is based on 28 real data points obtained on 26 March 2025 using a Keysight E4980AL bridge and an Anton Paar MKT-50 Pt100 thermometer over the range 20–10,000 Hz; 25 readings were taken at each frequency. The mean cell temperature was 25.000993 °C, with a total spread of 0.00041 °C. The corrected parallel conductance varied between 190.368 and 193.519 µS, and in the 2–10 kHz region the relative standard deviation was 0.00976 %. The model $G(f) = G\infty - A \cdot f^{-b}$ was fitted with $R^2 = 0.999981$. Because the experimental file did not specify the cell constant or the exact composition of the solution, no certified value of absolute electrical conductivity was invented. A metrological scheme was developed for the KCl–high-purity water system that integrates gravimetric preparation, homogeneity, stability, frequency selection, and uncertainty into a single value-assignment chain.

Keywords: electrical conductivity, reference material, potassium chloride, molality, cell constant, impedance, frequency, metrological traceability, measurement uncertainty, homogeneity, stability.

Kirish. Suyuqliklarning elektr o‘tkazuvchanligini ishonchli o‘lchash suv tayyorlash, farmatsevtika, oziq-ovqat, energetika, yarimo‘tkazgich ishlab chiqarish, ekologik monitoring va kimyoviy tahlil laboratoriyalarida asosiy metrologik vazifalardan biridir. O‘lchashning amaliy natijasi faqat konduktometr ko‘rsatishiga emas, balki eritmaning ion tarkibi, harorat, o‘lchash hujayrasining geometrik doimiysi, elektrod qutblanishi, parazit sig‘imlar va o‘lchash chastotasiga ham bog‘liq. Shu sababli elektr o‘tkazuvchanlikni kalibrlash uchun ishlatiladigan standart namuna oddiy “ma’lum konsentratsiyadagi tuz eritmasi” sifatida qaralmasligi, balki tarkibi, tayyorlash jarayoni, bir jinsliligi, barqarorligi, qiymat berish usuli, noaniqligi va metrologik kuzatuvchanligi hujjatlashtirilgan o‘lchash obyekti bo‘lishi kerak [1; B. 1-7].

2024–2026-yillarda standart namunalar bo‘yicha ISO bazasi yangilandi:

ISO 33405:2024 bir jinslilik, barqarorlik, tavsiflash, noaniqlik va kuzatuvchanlikni [3; B.1-5.];

ISO/TR 33402:2025 tayyorlash amaliyotini[4; B.1-6.]; ISO 33401:2024 sertifikat mazmunini [5; B.1-7.]; ISO 33403:2024 foydalanish qoidalarini belgilaydi [6; B.1-5.]. ISO 33400:2026 esa atamalarni yagona tizimga keltiradi [1; B.1-7.]. Demak, zamonaviy standart namuna konsepsiyasi faqat nominal tarkibni emas, butun hayot sikli bo‘yicha metrologik dalillarni talab qiladi.

Eng yangi xalqaro dalillar CCQM-K170 va EURAMET.QM-K170 solishtirishlarida 0,5 va 20 S/m darajalardagi KCl eritmalari orqali shakllantirildi [7; B.5. 8; B.6.]. So‘nggi ilmiy sharh va tajribalar esa hujayra doimiysi, elektrod qutblanishi, o‘lchash chastotasi, standart eritma bilan namuna o‘tkazuvchanligining yaqinligi hamda harorat nazorati aniqlikning asosiy shartlari ekanini ko‘rsatadi [12; B.4. 13; B.6.]. Standart namunaning qayta ochib ishlatilishi ham ayrim o‘tkazuvchanlik darajalarida barqarorlikka sezilarli ta’sir qilishi mumkin [14; B. 3].

Birlamchi o‘tkazuvchanlik standartlarining ilmiy asosi KCl suvli eritmalariga tayanadi. NIST va IUPAC tadqiqotlarida 0,01; 0,1 va 1,0 mol/kg molyallikdagi KCl eritmalari 0–50 °C diapazonda mutlaq usullar bilan tavsiflangan va 25 °C da mos ravishda 0,140823; 1,28246 va 10,8620 S/m qiymatlar tavsiya etilgan [9; B.2. 10; B.4.]. KCl ning tanlanishi uning yuqori tozalikda olinishi, kimyoviy barqarorligi va gravimetrik tayyorlashga mosligi bilan izohlanadi. Shunga qaramay, juda past o‘tkazuvchanliklarda suvning karbonat angidridni yutishi, idish devorlari bilan ion almashinuvi va mikroifloslanishlar nisbiy xatoni keskin oshiradi; shu sababli past diapazon uchun suv–n-propanol aralashmasidagi KCl tizimlari ham qo‘llanilgan [11; B. 2].

Ilmiy muammo – standart namuna tarkibini tayyorlash bilan qiymat berish bosqichlari amaliyotda ko‘pincha ajratib ko‘rilishi, holbuki molyallik, hujayra doimiysi, harorat, chastotaviy dispersiya va ko‘prik tuzatishlari yakuniy qiymatga birgalikda ta’sir qilishidir. Maqsad KCl–suv standart namunasi tarkibi va metrologik tavsiflarini yagona modelda ishlab chiqish hamda haqiqiy chastotaviy ma’lumotlardan maqbul ish sohasini aniqlashdir. Vazifalar: tarkib darajalarini tanlash; gravimetrik tayyorlash modelini tuzish; 20–10 000 Gs ma’lumotlarini tahlil qilish; chastota–faza ta’sirini modellashtirish; noaniqlik komponentlarini birlashtirish va sertifikatlash uchun yetishmayotgan kirish ma’lumotlarini ajratish. Ilmiy yangilik tarkib, chastotaviy dispersiya va noaniqlikni bitta qiymat berish algoritmida bog‘lash hamda o‘tkazuvchanlikning chastotaviy barqarorlashish mezonini tajriba bilan asoslashdan iborat.

Materiallar va usullar. Standart namuna tarkibini loyihalash. Tarkibning tayanch elektroliti sifatida yuqori toza-

likdagi kaliy xlorid tanlandi. Birlamchi standartlar uchun KCl ning 0,01; 0,1 va 1,0 mol/kg molyallik darajalari NIST/IUPAC tavsiyalariga asoslanadi [9; B. 5. 10; B. 2]. Ushbu maqoladagi 1-jadval tarkibni ishlab chiqish uchun metrologik maqsadli darajalarni ko‘rsatadi; ular yuklangan tajriba faylidagi noma’lum eritma tarkibi deb talqin qilinmaydi. Standart namuna-

ni amalda ishlab chiqarishda KCl namligi yo‘qotilishi uchun tasdiqlangan tartibda quritilishi, desikkatorda sovutilishi, yuqori tozalikdagi suvdan foydalanilishi, massa bo‘yicha tayyorlash va havoning ko‘taruvchi kuchiga tuzatish kiritilishi zarur.

1-jadval. KCl–suv asosidagi standart namuna tarkibi uchun maqsadli darajalar

Daraja	KCl molyalligi, mol/kg	25 °C dagi tayanch qiymat, S/m	Metrologik vazifa
SN-1	0,01	0,140823	past-o‘rta diapazon hujayralarini kalibrlash
SN-2	0,1	1,28246	o‘rta diapazonni uzatish
SN-3	1,0	10,8620	yuqori diapazonni uzatish

Izoh: tayanch qiymatlar NIST/IUPAC molyallik asosidagi birlamchi standartlaridan olingan ular ushbu ishda o‘lchangan noma’lum namunaga avtomatik ravishda tegishli emas.

Molyallik bo‘yicha tayyorlash uchun asosiy tenglama b(KCl)=n(KCl)/m(suv) ko‘rinishida qo‘llanadi. Bu yerda b(KCl) – molyallik, n(KCl) – KCl modda miqdori, m(suv) – erituvchi suv massasi, kg. KCl massasi m(KCl)=n(KCl)·M(KCl) orqali aniqlanadi. Sertifikatlangan eritma tayyorlashda massa o‘lchovlari kalibrlangan tarozilar bilan bajarilib, KCl tozaligi, namligi, molyar massasi va havo ko‘taruvchi kuchi tuzatishlari hisobga olinishi kerak. Tayyor eritma partiyasi qadoqlangandan so‘ng tasodifiy tanlangan flakonlar bo‘yicha bir jinslilik, vaqt bo‘yicha esa qisqa va uzoq muddatli barqarorlik tadqiqotlari ISO 33405:2024 talablari asosida bajariladi [3; B. 2].

Tajriba qurilmasi va o‘lchash rejimi. Ma’lumotlar Excel faylining “corrected bridge” va “direct reading” varaqlaridan olindi. Keysight Technologies E4980AL ko‘prigida 1,00 V kuchlanish, 2 m kabel va uzoq o‘lchash rejimi qo‘llangan; har bir chastotada 5 ta o‘qish 5 marta takrorlanib, jami 25 ta natija olingan. Harorat Anton Paar MKT-50 va Pt100 bilan kuzatilgan. 20–10 000 Gs oralig‘ida 28 ta chastota nuqtasi ishlatilgan. Ko‘prik uchun 3000 Om tayanch impedans hamda chastotaga bog‘liq amplituda va faza tuzatishlari kiritilgan. Bu parametrlar tajribani ayni fayldagi sozlamalar bilan takrorlash uchun zarur boshlang‘ich shartlardir.

Elektr model. O‘lchangan ketma-ket aktiv va reaktiv tarkiblar Rs va Xs orqali kompleks impedans $Z^* = R + jX$ sifatida ifodalanadi. Uning moduli $|Z| = \sqrt{(R^2 + X^2)}$, fazasi $\varphi = \mathrm{arctg}(X/R)$. Parallel kompleks o‘tkazuvchanlik $Y^* = 1/Z^* = G + jB$ bo‘lib, faol tarkib $G = R/(R^2 + X^2)$, reaktiv tarkib $B = -X/(R^2 + X^2)$ tenglamalari orqali hisoblanadi. Elektr o‘tkazuvchanlikning mutlaq qiymati $\kappa = K \cdot G$ bilan aniqlanadi; bu yerda K – hujayra doimiysi, m^{-1}. Yuklangan faylda K qiymati mavjud bo‘lmaganı sababli tajriba natijalari G darajasida tahlil qilindi va κ uchun sertifikatlangan qiymat hisoblanmadi.

Chastotaviy dispersiyani baholash uchun ma’lumotlarga $G(f) = G\infty - A \cdot f^b$ empirik tenglama moslashtirildi. Bu tenglama universal fizik qonun sifatida emas, aynan mazkur o‘lchash tizimi va namuna uchun chastota qutblanishining kamayishini ifodalovchi lokal model si-

fatida ishlatildi. Model sifatini determinatsiya koeffitsiyenti R^2 bilan baholandi. Yuqori chastotali barqaror soha sifatida 2000–10 000 Gs qabul qilinib, undagi G ning o‘rtacha qiymati, standart og‘ishi va nisbiy standart og‘ishi hisoblandi.

Noaniqlik modeli. Sertifikatlangan elektr o‘tkazuvchanlik qiymati uchun kombinatsiyalangan standart noaniqlik quyidagi umumiy ko‘rinishda baholanishi kerak: $u_c(\kappa)/\kappa = \sqrt{[u(K)/K]^2 + [u(G)/G]^2 + [\alpha \cdot u(T)]^2 + u^2(\text{tarkib}) + u^2(\text{bir jinslilik}) + u^2(\text{barqarorlik}) + u^2(\text{chastota})}$. Bu yerda α_t – harorat sezgirlik koeffitsiyenti; qolgan hadlar mos ravishda tarkib, bir jinslilik, barqarorlik va tanlangan chastotaning qoldiq ta’sirini ifodalaydi. ISO 33405:2024 sertifikatlangan qiymat noaniqligida tavsiflash, bir jinslilik va barqarorlik komponentlarini asosli birlashtirishni talab qiladi [3; B. 3].

Natijalar. Tajriba davomida 28 ta chastota nuqtasi bo‘yicha hujayra harorati 25,00070–25,00111 °C diapazonda bo‘ldi; o‘rtacha harorat 25,000993 °C, maksimal-minimal farq esa 0,00041 °C ni tashkil etdi. Demak, kuzatilgan elektr dispersiyani haroratning makroskopik siljishi bilan tushuntirish mumkin emas: o‘lchash davrida harorat o‘zgarishi Gp ning 20 Gs dan 10 kGs gacha bo‘lgan 1,655 % o‘zgarishiga nisbatan juda kichik bo‘lgan.

2-jadval. Tanlangan chastotalardagi haqiqiy o‘lchash natijalari

f, Gs	t, °C	|Z|, Om	φ, rad	Gp, mkS	U(Gp), mkS
20	25,00087	5244,318	-0,057409	190,368413	0,01636
40	25,00110	5210,724	-0,032217	191,812327	0,01634
100	25,00105	5187,097	-0,015000	192,764359	0,01636
200	25,00101	5178,185	-0,008390	193,111052	0,01636
600	25,00107	5171,614	-0,003334	193,362148	0,01634
2000	25,00108	5168,850	-0,001284	193,466457	0,01635
4000	25,00078	5168,055	-0,000833	193,496319	0,01635
10000	25,00070	5167,437	-0,000672	193,519490	0,01635

20 Gs da tuzatilgan parallel o‘tkazuvchanlik 190,368413 mkS bo‘lgan bo‘lsa, 10 000 Gs da 193,519490 mkS ga yetgan; nisbiy o‘sish 1,65525 % ni tashkil etdi. Xuddi shu oraliqda impedans moduli 5244,318 Om dan 5167,437 Om gacha kamaygan, ya’ni 1,46599 % pasaygan. Faza burchagi −0,057409 rad dan −0,000672 rad gacha yaqinlashib, chastota ortishi bilan reaktiv komponentning nisbiy hissasi keskin kamayganini ko‘rsatdi.

2000 dan 10 000 Gs oralig‘idagi sakkizta nuqta uchun G ning o‘rtacha qiymati 193,496090 mkS, standart og‘ishi 0,018888 mkS va nisbiy standart og‘ishi 0,009761 % bo‘ldi. Shu oraliqda |Z| ning o‘rtacha qiymati 5168,061 Om, nisbiy standart og‘ishi 0,009741 % ni tashkil etdi. Bu natija yuqori chastota sohasida o‘lchash tizimi past chastotadagi qutblanish ta’siridan ancha kam ta’sirlanishini va metrologik qiymat uzatish uchun barqarorroq “plato” shakllanishini ko‘rsatadi.

Empirik model uchun $G_\infty = 193.523429$ mkS, $A = 44.346930$ mkS·Gs^b va $b = 0.882397$ topildi; $R^2 = 0.999981$. Modelning yuqori R^2 qiymati 20–10 000 Gs oralig‘ida faol o‘tkazuvchanlikning chastotaga bog‘liqligi monoton so‘nuvchi qutblanish komponenti bilan yaxshi ifodalanishini ko‘rsatadi. Bu model qiymat berish algoritmida chastotani tanlash mezoni sifatida ishlatilishi mumkin, biroq u boshqa hujayra geometriyasi yoki boshqa eritmaga to‘g‘ridan-to‘g‘ri ko‘chirilmasligi kerak.

1-rasm. Parallel o‘tkazuvchanlikning chastotaga bog‘liqligi va empirik model

Amplituda tuzatish koeffitsiyenti 0,9999788–1,000085, faza tuzatishi −94,54...−18,24 mikroradian oralig‘ida bo‘ldi; barcha 28 nuqta yaroqli deb qayd etilgan. Gp uchun ko‘rsatilgan nisbiy standart noaniqlik taxminan 0,00845–0,00860 % bo‘lib, chastota bo‘yicha deyarli o‘zgarmadi. Shu sababli past chastotadagi 1,655 % dispersiyani faqat asbob tasodifiyligiga bog‘lash mumkin emas; elektrod qutblanishi va hujayra elektr modeli asosiy omil sifatida ko‘riladi.

Muhokama. Olingan chastotaviy xususiyatlar elektrolitik o‘tkazuvchanlik o‘lchashlarining klassik fizik tasavvuri bilan mos keladi. Ikki elektrodli yoki ekvivalent o‘lchash tizimlarida past chastotada elektrod–eritma chegarasida zaryad to‘planishi, ikki qavat sig‘imi va ionlarning diffuzion qayta taqsimlanishi qo‘shimcha reaktiv qarshilik hosil qiladi. Chastota oshishi bilan bu qutblanishning o‘lchangan faol komponentga ta’siri kamayadi, faza nolga yaqinlashadi va o‘tkazuvchanlik asimptotik qiymatga intiladi. NISTning birlamchi standartlarni o‘lchash bo‘yicha ishlari ham AC o‘lchashda chastota effektlarini nazorat qilish va hujayra doimiysini aniq belgilash zarurligini ta’kidlaydi.

Mazkur tajribada 20 Gs dagi faza −0,0574 rad bo‘lib, 10 kGs da −0,000672 rad gacha kamaydi. Shu bilan bir vaqtda Gp 1,655 % ga oshdi. Harorat diapazoni atigi 0,00041 °C bo‘lgani sababli bu o‘zgarishni harorat koeffitsiyenti bilan izohlash metodik jihatdan asossiz bo‘ladi. Natija o‘lchash chastotasini standart namunaning “foydalanish sharti” sifatida sertifikatda yoki metodik ko‘rsatmada belgilash zarurligini ko‘rsatadi. ISO 33401:2024 standart namuna hujjatlarida foydalanish va saqlash bo‘yicha muhim shartlarni aniq ko‘rsatishni talab qilishi aynan shunday omillar uchun amaliy ahamiyatga ega.

CCQM-K170 va EURAMET.QM-K170 laboratoriyalararo ekvivalentlik faqat KCl massasiga emas, balki hujayra geometriyasi, haroratga keltirish, qutblanishni kamaytirish va tuzatish algoritmiga ham bog‘liqligini ko‘rsatadi. Hibino va Ohata ikki elektrodli tijoriy asboblarda yuqori o‘tkazuvchanlik sohasida standart va namuna qiymatlarining yaqinligi muhimligini ko‘rsatgan; bu natija kalibrlash diapazonini standart namuna tarkibini tanlash bilan birga loyihalash zarurligini tasdiqlaydi.

Tarkibni molyallikda ifodalash hajmning haroratga bog‘liqligini kamaytiradi va gravimetrik tayyorlash orqali SI ga bog‘lanishni soddalashtiradi. Biroq sertifikatlash uchun gravimetrik aniqlikning

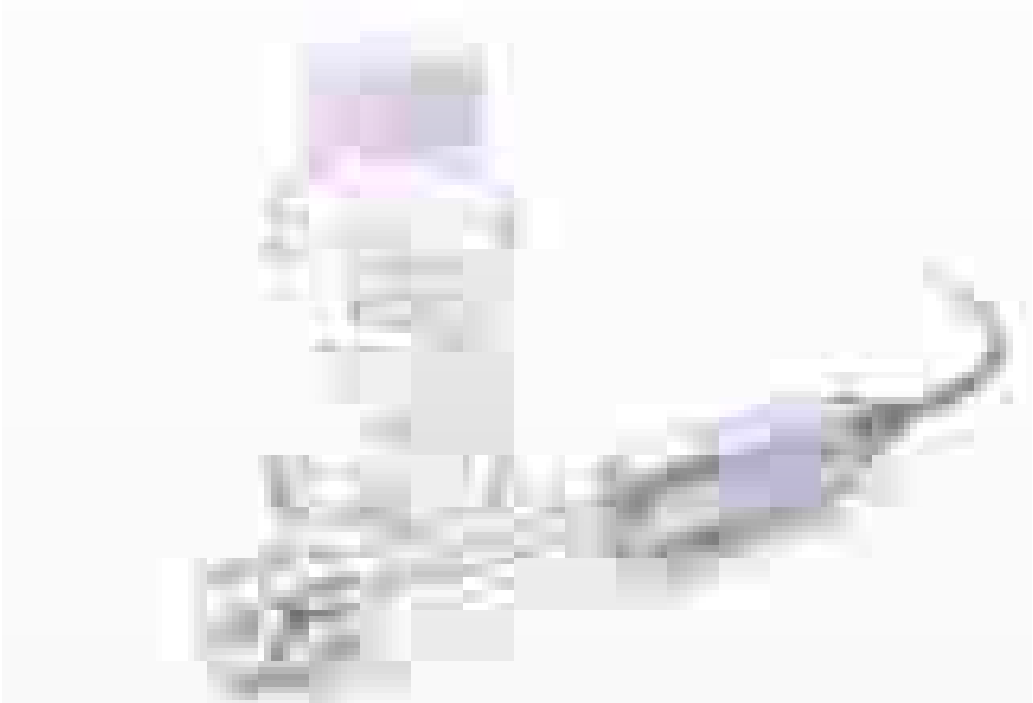
o‘zi yetarli emas: partiya bir jinsliligi va saqlash barqarorligi statistik baholanishi shart. Qayta foydalanish sharoitida ayrim o‘tkazuvchanlik darajalarida siljish kuzatilgani ham qadoqlash va foydalanish rejimini noaniqlik modeliga kiritish zarurligini ko‘rsatadi.

Bajarilish ketma-ketligi quyidagicha: maqsadli diapazon va 25 °C tayanch haroratini belgilash → yuqori tozalikdagi KCl va suvni tanlash → gravimetrik tayyorlash → bir jinslilashtirish va qadoqlash → bir jinslilik hamda qisqa/uzoq muddatli barqarorlik sinovlari → hujayra doimiysini kalibrlash → chastotaviy plato tanlash → qiymat va noaniqlikni baholash → ISO 33401:2024 bo‘yicha sertifikatlash. Bu zanjir tarkibni tayyorlashdan metrologik qiymat berishgacha bo‘lgan uzluksiz kuzatuvchanlikni ta’minlaydi.

Tadqiqot cheklovi aniq: faylda KCl molyalligi, suv tavsifi, partiya raqami va hujayra doimiysi yo‘q. Shuning uchun 193,496 mkS atrofidagi Gp ni S/m dagi mutlaq elektr o‘tkazuvchanlik yoki 1-jadvaldagi biror tarkibning sertifikatlangan qiymati deb talqin qilish mumkin emas. K_h va tarkib ma’lum bo‘lgandagina $\kappa = K_h \cdot G_p$ orqali qiymat, 25 °C ga keltirish va to‘liq noaniqlik budjeti hisoblanadi.

DSc darajasidagi yangi umumlashtirish: ish chastotasi asbob diapazoni bilan emas, $d \ln(G_p)/d \ln(f)$ ning nolga yaqinlashishi va faza modulining kamayishi bilan tanlanishi lozim. Mazkur tizimda 2–10 kGs sohada Gp ning nisbiy standart og‘ishi 0,01 % dan kichik; shu sababli bu oraliq aynan ushbu hujayra–namuna–ko‘prik kombinatsiyasi uchun chastotaviy barqarorlik sohasi sifatida taklif etiladi. Mezondan standart namunaning tavsiflash protsedurasida foydalanish uchun uni boshqa partiyalar va hujayralarda validatsiya qilish talab etiladi.

Xulosa. KCl–yuqori tozalikdagi suv standart namunalari uchun gravimetrik tarkib, bir jinslilik, barqarorlik, hujayra doimiysi, chastotaviy dispersiya va noaniqlikni yagona metrologik zanjirga birlashtiruvchi yondashuv ishlab chiqildi. Haqiqiy tajribada 20–10 000 Gs oralig‘ida Gp 190,368 dan 193,519 mkS gacha oshdi, |Z| 5244,318 dan 5167,437 Om gacha kamaydi va faza nolga yaqinlashdi. 2–10 kGs sohada Gp ning nisbiy standart og‘ishi 0,00976 %, empirik model uchun R^2=0,999981 bo‘ldi. Natijalar standart namuna sertifikatida tarkib va 25 °C dagi qiymat bilan birga ish chastotasi, hujayra doimiysi, harorat rejimi va tuzatish algoritmini ham ko‘rsatish zarurligini asoslaydi. Tajriba faylida hujayra doimiysi va aniq tarkib bo‘lmagani sababli mutlaq elektr o‘tkazuvchanlik uchun sertifikatlangan qiymat berilmadi; bu parametrlar keyingi qiymat berish bosqichining majburiy kirish ma’lumotlari hisoblanadi.



Foydalanilgan adabiyotlar ro‘yxati:

1. ISO 33400:2026. Standart namunalar – Atamalar va ta’riflar. Xalqaro standartlashtirish tashkiloti.

2. ISO 17034:2016. Standart namuna ishlab chiqaruvchilarning vakolatliligiga qo‘yiladigan umumiy talablar. Xalqaro standartlashtirish tashkiloti.

3. ISO 33405:2024. Standart namunalar – Tavsiflash, bir jinslilik va barqarorlikni baholash yondashuvlari. Xalqaro standartlashtirish tashkiloti.

4. ISO/TR 33402:2025. Standart namunani tayyorlash bo‘yicha ilg‘or amaliyot. Xalqaro standartlashtirish tashkiloti.

5. ISO 33401:2024. Standart namunalar – Sertifikatlar, yorliqlar va ilova hujjatlarining mazmuni. Xalqaro standartlashtirish tashkiloti.

6. ISO 33403:2024. Standart namunalar – Foydalanishga doir talablar va tavsiyalar. Xalqaro standartlashtirish tashkiloti.

7. Wang H., Wang M., Song X., Seitz S. va boshq. CCQM-K170: 0,5 S/m va 20 S/m darajalarda elektrolitik o‘tkazuvchanlik bo‘yicha yakuniy kalit solishtirish hisoboti. Metrologia. 2025;62(1A):08002.

8. Seitz S., Snedden A., Dumańska J., Hanková Z. va boshq. EURAMET.QM-K170: elektrolitik o‘tkazuvchanlikni o‘lchash bo‘yicha hududiy kalit solishtirish hisoboti. CIPM MRA Comparison Reports. 2026:08004.

9. Pratt K.W., Koch W.F., Wu Y.C., Berezansky P.A. Molyallikka asoslangan elektrolitik o‘tkazuvchanlik birlamchi standartlari. Pure and Applied Chemistry. 2001;73(11):1783-1793.

10. Wu Y.C., Jameel R.H. Elektrolitik o‘tkazuvchanlikning birlamchi standartlari va standart namunalari. NIST Special Publication 260-142. 2000.

11. Wu Y.C., Berezansky P.A. Past elektrolitik o‘tkazuvchanlik standartlari. Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology. 1995;100(5):521–527.

12. Thirstrup C., Deleebeeck L. Elektrolitik o‘tkazuvchanlik datchiklari bo‘yicha sharh. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2021;70:1-22.

13. Hibino Y., Ohata M. Ikki elektrodli tijoriy konduktometrning aniq elektrolitik o‘tkazuvchanlikni aniqlashdagi qo‘llanish diapazoni. Journal of Chemistry. 2022:9913667.

14. Cunha K.C., Pardellas L.S., Gonzaga F.B. Takroriy foydalanish sharoitida elektrolitik o‘tkazuvchanlik standart namunalari barqarorligini birlamchi usul bilan monitoring qilish. Journal of Solution Chemistry. 2020;49:306-315.

O‘LCHOVLARNI BOSHQARISH TIZIMINING O‘LCHOV MA’LUMOTLARI ISHONCHLILIGINI TA’MINLASHDAGI ROLI (ISO 10012:2026 TALABLARI ASOSIDA)



Mahkamova Saida Doniyor qizi
Islom Karimov nomidagi Toshkent davlat texnika universiteti
“Metrologiya, texnik jihatdan tartibga solish, standartlashtirish va sertifikatlashtirish” kafedrasi doktoranti

E-mail: saidamahkamova1227@gmail.com

Annotatsiya. Maqolada ISO 10012:2026 talablari asosida o‘lchovlarni boshqarish tizimining o‘lchov ma’lumotlari ishonchliligini ta’minlashdagi o‘rni tahlil qilingan. To‘rt qatlamli kontseptual model taklif etilgan. Tok transformatorini tekshirish misolida elektromagnit ta’sirlar tarkibiy qismini e’tiborga olmaslik kengaytirilgan noaniqlikni taxminan 21 % ga kam baholashga olib kelishi ko‘rsatilgan.

Kalit so‘zlar: o‘lchovlarni boshqarish tizimi, ISO 10012:2026, metrologik tasdiqlash, metrologik kuzatiluvchanlik, o‘lchov noaniqligi, noaniqlik byudjeti, qaror qabul qilish qoidasi, himoya oralig‘i, xavfga asoslangan yondashuv, PDCA sikli, tok transformatori, elektromagnit ta’sirlar (EMI/EMC), raqamli kalibrlash sertifikati, IIoT.

Аннотация. В статье на основе требований ISO 10012:2026 проанализирована роль системы менеджмента измерений в обеспечении достоверности измерительных данных. Предложена четырёхуровневая концептуальная модель. На примере поверки трансформатора тока показано, что без учёта составляющей электромагнитных воздействий расширенная неопределённость занижается примерно на 21 %.

Ключевые слова: система менеджмента измерений, ISO 10012:2026, метрологическое подтверждение, метрологическая прослеживаемость, неопределённость измерений, бюджет неопределённости, правило принятия решения, интервал защиты, риск-ориентированный подход, цикл PDCA, трансформатор тока, электромагнитные воздействия (EMI/EMC), цифровой сертификат калибровки, IIoT.

Abstract. The article analyses the role of the measurement management system in ensuring the reliability of measurement data under ISO 10012:2026. A four-layer conceptual model is proposed. A current-transformer verification example shows that neglecting the electromagnetic interference component underestimates the expanded uncertainty by about 21 %.

Keywords: measurement management system, ISO 10012:2026, metrological confirmation, metrological traceability, measurement uncertainty, uncertainty budget, decision rule, guard band, risk-based approach, PDCA cycle, current transformer, electromagnetic interference (EMI/EMC), digital calibration certificate, IIoT.

Kirish. Sanoat ishlab chiqarishining raqamlashuvi va texnologik jarayonlarning murakkablashuvi sharoitida o‘lchov ma’lumotlarining ishonchliligi mahsulot sifatini nazorat qilish, texnologik xavfsizlikni ta’minlash va boshqaruv qarorlarini asoslashning hal qiluvchi omillaridan biriga aylanmoqda. Elektrotexnika sanoati korxonalarida transformatorlar, kommutatsiya apparatlari, kabel-o‘tkazgich mahsulotlari va elektr energiyasi hisoblagichlari ishlab chiqarishda o‘lchov natijalari mahsulotning aniqlik sinfini, xavfsizlik ko‘rsatkichlarini va muvofiqlik to‘g‘risidagi xulosani bevosita belgilaydi. Bu sohadagi o‘lchov jarayonlari yuqori kuchlanish, katta toklar, kuchli elektromagnit maydonlar va keng chastota diapazoni bilan bog‘liq bo‘lganligi sababli, o‘lchovlarning metrologik jihatdan izchil boshqarilishi alohida ahamiyat kasb etadi.

Xalqaro amaliyotda o‘lchovlarni boshqarish tizimlari (O‘BT) uchun asosiy me’yoriy hujjat ISO 10012 xalqaro standarti hisoblanadi. 2003-yildan beri amalda bo‘lgan birinchi nashr [9; B. 1–15] 2026-yil fevralida ikkinchi nashr — “Quality management — Requirements for measurement management systems” nomli ISO 10012:2026 [10; B. 13] bilan almashtirildi. Yangi nashr menejment tizimi standartlari uchun uyg‘unlashtirilgan tuzilma (harmonized structure) asosida qayta tuzilgan va uning bandlari manfaatdor tomonlar ehtiyojlaridan kelib chiqib jiddiy qayta ko‘rib chiqilgan [10; B. 14]. Bu esa O‘BTni ISO 9001:2015 [11; B. 4–5] asosidagi

sifat menejmenti tizimi bilan yagona tuzilmada integratsiya qilish, xavfga asoslangan yondashuvni o'lchov jarayonlariga tatbiq etish va tizimni mustaqil audit obyekti sifatida shakllantirish imkonini beradi.

O'zbekiston Respublikasida metrologiya sohasidagi munosabatlar "Metrologiya to'g'risida"gi Qonun (yangi tahriri) [22; 4-modda] bilan tartibga solinadi. Qonunda ishonchsiz o'lchash natijalarining oldini olish hamda o'lchash natijalarining milliy va xalqaro etalonlargacha metrologik kuzatiluvchanligini ta'minlash metrologiya sohasidagi asosiy vazifalar qatorida belgilangan. Sanoat korxonalarida ISO 9001 bo'yicha sertifikatlashtirish kengayib borayotgan sharoitda ISO 10012:2026 talablarini milliy metrologik infratuzilma va tarmoq xususiyatlariga moslashtirish masalasi dolzarb ilmiy-amaliy vazifaga aylanadi.

Shu bilan birga, standart umumiy talablarni belgilaydi va muayyan tarmoq — xususan, elektrotexnika ishlab chiqarishi — uchun metodik yechimlar bermaydi. Uchta masala yetarlicha ishlab chiqilmagan. Birinchidan, elektromagnit ta'sirlar (EMI/EMC) tarkibiy qismini o'lchov noaniqligi byudjetiga kiritish va uning muvofiqlik to'g'risidagi qarorlarga ta'sirini baholash. Ikkinchidan, raqamli kalibrlash sertifikatlari (DCC) va sanoat narsalar interneti (IIoT) texnologiyalarining O'BT funksiyalari bilan integratsiyasi: ilmiy adabiyotda bu masala asosan milliy metrologiya institutlari nuqtai nazaridan ko'rib chiqilgan, korxona O'BTsi nuqtai nazaridan esa kam o'rganilgan. Uchinchidan, ISO 10012:2026 ning uyg'unlashtirilgan tuzilmasi bandlarini O'BTning amaliy elementlariga bog'lovchi yaxlit model mavjud emas.

Tadqiqotning maqsadi — o'lchovlarni boshqarish tizimining o'lchov ma'lumotlari ishonchliligini ta'minlashdagi rolini ISO 10012:2026 talablari asosida nazariy-metodik jihatdan asoslash va tizimni tashkil etishning kontseptual modelini taklif etishdan iborat. Tadqiqot vazifalari: ISO 10012:2003 va ISO 10012:2026 nashrlarini qiyosiy tahlil qilish; O'BTning tarkibiy elementlarini tizimlashtirib, to'rt qatlamli kontseptual modelni ishlab chiqish va uni PDCA sikli orqali standart bandlariga bog'lash; EMI/EMC tarkibiy qismini hisobga olgan holda o'lchov noaniqligi byudjetini tuzish va uning qaror qabul qilish qoidasiga ta'sirini model misolda miqdoriy baholash; DCC va IIoT texnologiyalarining O'BT samaradorligiga qo'shadigan hissasini aniqlash.

Tadqiqot nazariy-metodik xususiyatga ega: unda taqdim etilgan miqdoriy misol real korxona ma'lumotlari emas, balki uslubiy yondashuvni ko'rsatish uchun tuzilgan model hisob-kitobdir; barcha dastlabki qiymatlar va ularning qabul qilinish shartlari ochiq ko'rsatilgan. Ishning ilmiy yangiligi ISO 10012:2026 ning uyg'unlashtirilgan tuzilmasi bandlariga bog'langan to'rt qatlamli O'BT modelini taklif etishda, EMI tarkibiy qismini e'tiborga olmaslikning kengaytirilgan noaniqlik va qabul qilish chegarasiga ta'sirini miqdoriy ko'rsatishda hamda DCC va IIoT funksiyalarini PDCA bosqichlari bo'yicha taqsimlashda namoyon bo'ladi.

Adabiyotlar sharhi va muammoning qo'yilishi. O'lchov natijalari ishonchliligini baholashning zamonaviy metodologik asosini o'lchov noaniqligini ifodalash bo'yicha yo'riqnoma — GUM (JCGM 100:2008) [13; B. 2, 10–14] va Xalqaro metrologiya lug'ati — VIM (JCGM 200:2012) [15; B. 29–30] tashkil etadi. GUM "xatolik" tushunchasidan farqli o'laroq, o'lchov natijasiga asosli ravishda bog'lanishi mumkin bo'lgan qiymatlar tarqoqligini

tavsiflovchi “noaniqlik” parametrini kiritadi va uni A turi (statistik) va B turi (boshqa ma’lumotlarga asoslangan) baholashlar orqali kombinatsiyalashni belgilaydi. Noaniqlikning muvofiqlikni baholashdagi roli JCGM 106:2012 [14; B. 23–31] da bayon etilgan: noaniqlik noto‘g‘ri qabul qilish va noto‘g‘ri rad etish xavflarini belgilaydi, bu esa qaror qabul qilish qoidasini shakllantirishni talab qiladi. ILAC-G8:09/2019 [8; B. 8–12] qaror qabul qilish qoidalari va himoya oralig‘i (guard band) bo‘yicha amaliy yo‘riqnoma beradi; ISO/IEC 17025:2017 [12; B. 17] esa kalibrlash laboratoriyalaridan qaror qoidasini hujjatlashtirishni va noaniqlikni sertifikatda ko‘rsatishni talab qiladi. Kalibrlash oraliqlarini belgilash va qayta ko‘rib chiqish usullari ILAC-G24:2022 / OIML D 10:2022 [7; B. 14–17] hujjatida umumlashtirilgan (“zinapoya” usuli, nazorat kartalari, foydalanish vaqti bo‘yicha usul va boshqalar).

So‘nggi yillarda metrologiya funksiyasini “me’yoriy talablarga rasmiy muvofiqlik”dan “qarorlar ishonchliligini ta’minlash”ga qayta yo‘naltirish g‘oyasi — “smart metrology” - keng muhokama qilinmoqda. Lazzari va hammualliflar [17; B. 22–29] katta ma’lumotlar davrida o‘lchov ma’lumotlari ishonchliligi tahlil natijalarining foydaliligini belgilovchi shart ekanligini va noaniqlikni bilish qarorlar metrologiyasining asosi bo‘lishini ko‘rsatadi. Mari va Petri [18; B. 7–20] ma’lumotlarga asoslangan qarorlarning ishonch darajasini boshqarishda metrologik madaniyatning ahamiyatini asoslaydi; Pou va Leblond [23; B. 6–10] ISO/IEC Guide 98-4 asosida muvofiqlik qarorlari xavflarini baholash yondashuvini rivojlantiradi. Sousa va Almeida [25; B. 1–14] metrologiya va raqamli (“aqlli”) transformatsiya kesishmasidagi tadqiqotlar rivojini bibliometrik usulda xaritalagan.

Metrologiyani raqamlashtirish yo‘nalishida raqamli kalibrlash sertifikati (DCC) kontsepsiyasi markaziy o‘rin tutadi. DCC Germaniya milliy metrologiya instituti (PTB) tomonidan XML formatidagi, mashina o‘qiy oladigan va elektron imzo bilan tasdiqlangan hujjat sifatida taklif etilgan [3; B. 75–81]; uning amaliyotda qo‘llanilishi va mashina tomonidan interpretatsiya qilinishi masalalari [4; B. 51–62] da rivojlantirilgan. Mustapää va hammualliflar DCC, raqamli SI (D-SI) va kriptografik identifikatorlar asosida sensor tarmoqlarida metrologik kuzatuvchanlikni ta’minlash kontsepsiyasini [19; B. 1–19], sanoat ko‘tarish kranida metrologik ma’lumotlarni xavfsiz almashishni [21; B. 1–21] va farmatsevtika sanoatida kalibrlash ma’lumotlarini boshqarish platformasini [20; B. 1–22] taqdim etganlar. Eichstädt va hammualliflar [2; B. 1–15] raqamli sensorlar va sanoat narsalar interneti uchun “aqlli kuzatuvchanlik” tamoyillarini, Brown va hammualliflar [1; B. 485–489] DCC infratuzilmasini, Kuster [16; B. 479–484] o‘lchov axboroti infratuzilmasining sanoat metrologiyasi va IoT uchun foydasini asoslaydi. Schütze va hammualliflar [24; B. 359–371] “Sensors 4.0” kontsepsiyasida aqlli sensorlarni Industry 4.0 ning metrologik asosi sifatida ko‘rib chiqadi.

Elektrotexnika sohasida o‘lchov vositalariga qo‘yiladigan aniqlik talablari IEC 61869-2 [6; B. 22] (tok transformatorlari) kabi mahsulot standartlarida, sanoat muhitidagi elektromagnit ta’sirlarga chidamlilik talablari esa IEC 61000-6-2 [5; B. 6–7] da belgilangan. Biroq EMC standartlari uskunaning ishlash qobiliyati saqlanishini belgilaydi, elektromagnit ta’sirning o‘lchov natijasi noaniqligiga qo‘shadigan miqdoriy hissasini emas. Shu sababli EMI tarkibiy qismi noaniqlik byudjetlarida ko‘pincha faqat sifat jihati-

dan qayd etiladi yoki umuman e'tiborga olinmaydi.

Tahlil qilingan manbalar quyidagi ilmiy bo'shliqni ko'rsatadi: bir tomondan, noaniqlikka asoslangan qarorlar metrologiyasi va DCC/IIoT texnologiyalari alohida-alohida chuqur ishlab chiqilgan; boshqa tomondan, ularni ISO 10012:2026 ning uyg'unlashtirilgan tuzilmasi doirasida korxona O'BTsining yaxlit modeliga birlashtirish, xususan elektrotexnika ishlab chiqarishi sharoitida, yetarlicha o'rganilmagan. Mazkur tadqiqot shu bo'shliqni to'ldirishga qaratilgan.

Materiallar va metodlar. 3.1. Me'yoriy-metodik asos

Tadqiqotning me'yoriy asosini ISO 10012:2026 [10; B.6–32] va ISO 10012:2003 [9; B.1–15], ISO 9001:2015 [11; B.4–5], ISO/IEC 17025:2017 [12; B.17], GUM [13; B.2–24] va VIM [15; B.29–30], JCGM 106:2012 [14; B.23–31], ILAC-G8 [8; B.8–12], ILAC-G24 / OIML D 10 [7; B.14–17], IEC 61869-2 [6; B.22], IEC 61000-6-2 [5; B.6–7] hamda O'zbekiston Respublikasining "Metrologiya to'g'risida"gi Qonuni [22; 4-modda] tashkil etadi. Atamalar VIM va milliy qonunchilikka muvofiq qo'llanilgan: metrologik kuzatiluvchanlik (traceability) — o'lchov natijasini har bir bo'g'inida noaniqlik ko'rsatilgan uzluksiz hujjatlashtirilgan kalibrlashlar zanjiri orqali etalonga bog'lash xususiyati; metrologik tasdiqlash (metrological confirmation) — o'lchov vositasining ko'zlangan foydalanish uchun talablarga muvofiqligini ta'minlash uchun zarur operatsiyalar majmui.

3.2. Tadqiqot usullari. Quyidagi usullar qo'llanildi: tizimli tahlil - O'BTni o'zaro bog'liq elementlar majmui sifatida ko'rib chiqish; qiyosiy tahlil - ISO 10012 ning 2003 va 2026 nashrlarini tuzilma, yondashuv va talablar bo'yicha solishtirish; kontseptual modellashtirish - O'BT elementlarini darajalar bo'yicha tizimlashtirish va standart bandlariga bog'lash; GUM metodologiyasi asosida o'lchov noaniqligini baholash — B turi tarkibiy qismlari uchun taqsimot qonuniga muvofiq bo'lish koeffitsientlaridan foydalanish, kombinatsiyalangan va kengaytirilgan noaniqlikni hisoblash; qaror qabul qilish qoidasini tahlil qilish - JCGM 106 va ILAC-G8 asosida himoya oralig'i va qabul qilish chegarasini aniqlash.

3.3. To'rt qatlamli kontseptual model. O'BT elementlarini tizimlashtirish natijasida to'rt darajali (qatlamli) kontseptual model ishlab chiqildi (1-rasm, 1-jadval). Me'yoriy-tashkiliy daraja tashkilot kontekstini, rahbariyat mas'uliyatini, O'BT siyosati va maqsadlarini, xavf va imkoniyatlarni baholashni qamrab oladi va ISO 10012:2026 ning 4–6-bandlariga mos keladi. Metrologik ta'minot darajasi o'lchov vositalarini metrologik tasdiqlash, kalibrlash oraliqlarini belgilash va qayta ko'rib chiqish hamda metrologik kuzatiluvchanlik zanjirini ta'minlashni o'z ichiga oladi (7–8-bandlar). Texnik-analitik daraja har bir muhim o'lchov jarayoni uchun noaniqlik byudjetini shakllantirish, shu jumladan EMI/EMC tarkibiy qismini hisobga olish, va qaror qabul qilish qoidasini belgilashdan iborat (8-band). Raqamli-monitoring darajasi IIoT sensorlari orqali ta'sir etuvchi kattaliklarni uzluksiz qayd etish, DCC ma'lumotlarini avtomatik o'qish, og'ishlarni erta aniqlash va tizim samaradorligini baholashni ta'minlaydi (9–10-bandlar). Darajalar quyidan yuqoriga qarab bir-birini to'ldiradi: me'yoriy asos bo'lmasa metrologik ta'minot tizimsiz bo'ladi, noaniqlik byudjetisiz raqamli monitoring nimani nazorat qilishini bilmaydi.

1-jadval. To‘rt qatlamli kontseptual model tuzilishi

Daraja	Nomi	Asosiy tarkib	Amalga oshirish vositalari	ISO 10012:2026 bandlari
1	Me’yoriy-tashkiliy	Tashkilot konteksti, rahbariyat, O‘BT siyosati va maqsadlari, xavf va imkoniyatlar	Sifat menejmenti tizimi hujjatlari, xavflar reyestri, metrologik talablar ro‘yxati	4–6
2	Metrologik ta’minot	Metrologik tasdiqlash, kalibrlash oraliqlari, kuzatiluvchanlik zanjiri	Kalibrlash rejalari, etalonlar ierarxiyasi, ILAC-G24 usullari, akkreditatsiyalangan laboratoriyalar	7–8
3	Texnik-analitik	Noaniqlik byudjeti, EMI/EMC tarkibiy qismi, qaror qabul qilish qoidasi	GUM metodologiyasi, JCGM 106, ILAC-G8, hisoblash dasturlari	8
4	Raqamli-monitoring	Ta’sir etuvchi kattaliklar monitoringi, DCC ma’lumotlarini avtomatik o‘qish, og‘ishlarni erta aniqlash	IIoT sensorlari, DCC platformalari, nazorat kartalari, samaradorlik ko‘rsatkichlari	9–10

3.4. PDCA boshqaruv sikli. Modelning barcha darajalari PDCA (Plan–Do–Check–Act: Rejalashtirish–Bajarish–Tekshirish–Tuzatish) boshqaruv sikli orqali o‘zaro bog‘langan (2-rasm). Uyg‘unlashtirilgan tuzilmaga ega menejment tizimi standartlari uchun PDCA bosqichlari standart bandlariga tabiiy ravishda mos keladi (2-jadval): rejalashtirish — 4–6-bandlar, bajarish — 7–8-bandlar, tekshirish — 9-band, tuzatish — 10-band. Bu moslik O‘BTni ISO 9001:2015 asosidagi sifat menejmenti tizimi bilan yagona hujjatlar tizimi va yagona ichki audit dasturi doirasida yuritish imkonini beradi, xavfga asoslangan yondashuv esa siklning rejalashtirish bosqichida o‘lchov jarayonlarining muhimlik darajasi bo‘yicha resurslarni taqsimlash uchun asos bo‘ladi.

2-jadval.
PDCA bosqichlarining ISO 10012:2026 bandlari va O‘BT faoliyatiga mosligi

PDCA bosqichi	ISO 10012:2026 bandlari	O‘BTdagi asosiy faoliyat	Model darajasi
Plan — Rejalashtirish	4. Tashkilot konteksti; 5. Yetakchilik; 6. Rejalashtirish	Metrologik talablarni aniqlash, xavf va imkoniyatlarni baholash, kalibrlash rejasi va noaniqlik byudjetini tuzish	1, 3
Do — Bajarish	7. Ta’minot; 8. Faoliyat	Resurslar va kompetentlik, metrologik tasdiqlash, o‘lchov jarayonlarini amalga oshirish, ma’lumotlarni qayd etish	2, 3, 4
Check — Tekshirish	9. Samaradorlikni baholash	Monitoring va tahlil, ichki audit, rahbariyat tahlili, kalibrlash oraliqlarini qayta ko‘rib chiqish	4
Act — Tuzatish	10. Takomillashtirish	Nomuvofiqliklar va tuzatuvchi harakatlar, uzluksiz takomillashtirish, modelni yangilash	1–4

3.5. Model misolning shartlari. Texnik-analitik darajani ko‘rsatish uchun 0,5 aniqlik sinfidagi o‘lchov tok transformatorining tok (koeffitsient) xatoligini nominal tokda tekshirish jarayoni tanlandi. IEC 61869-2 ga muvofiq bu sinf uchun nominal tokda yo‘l qo‘yiladigan tok xatoligi chegarasi MPE = ±0,5 % ni tashkil etadi [6; B.22]. Tekshirish differensial (komparator) usulida etalon tok transformatori bilan solish-

tirish orqali amalga oshiriladi. Model misol uchun quyidagi shartlar qabul qilindi: etalon tok transformatorining kalibrlash sertifikatidagi kengaytirilgan noaniqligi U = 0,020 % (k = 2); etalonning kalibrlashlar orasidagi drift chegarasi ±0,010 %; komparatorning yo'l qo'yiladigan xatoligi ±0,005 %; n = 10 takroriy o'lchov bo'yicha o'rtacha qiymatning eksperimental standart og'ishi 0,006 %; ikkilamchi yukning (burden) nominaldan og'ishi hisobiga ±0,010 %; 20 ± 5 °C harorat sharoitida ±0,005 %; ishlab chiqarish muhitidagi tashqi magnit maydon va tarmoq shovqinlari (EMI/EMC) hisobiga ±0,020 %; komparator analog-raqamli o'zgartirgichining rezolyutsiyasi hisobiga ±0,003 %.

Chegaralari ko'rsatilgan tarkibiy qismlar uchun to'g'ri burchakli taqsimot qabul qilindi (u = a/√3), sertifikatdan olingan noaniqlik uchun - normal taqsimot (u = U/k). Barcha tarkibiy qismlar nisbiy birlikda (foizda) ifodalangan va additiv model orqali natijaga ta'sir qiladi, shu sababli sezuvchanlik koeffitsientlari ci = 1. Kombinatsiyalangan standart noaniqlik uc = √(Σui2) formulasi bo'yicha, kengaytirilgan noaniqlik U = k·uc (k = 2, ishonch ehtimoli ≈ 95 %) sifatida hisoblandi. Qaror qabul qilish qoidasi sifatida ILAC-G8 [8; B.12] ga muvofiq himoya oralig'i w = U bo'lgan qoida qabul qilindi: qabul qilish chegarasi AL = MPE − U. Keltirilgan qiymatlar amaliyotda uchraydigan uskunalar texnik xususiyatlariga yaqin tartibda tanlangan model qiymatlar bo'lib, muayyan laboratoriya uchun ular real ma'lumotlar bilan almashtirilishi lozim; hisoblash metodikasi bundan o'zgarmaydi.

Natijalar va ularning tahlili. 4.1. ISO 10012 ning 2003 va 2026 nashrlari qiyosiy tahlili.

Qiyosiy tahlil natijalari 3-jadvalda umumlashtirilgan. ISO 10012:2003 [9; B.1–15] o'ziga xos tuzilmaga ega bo'lib, uning talablari to'rtta asosiy bo'limda — rahbariyat mas'uliyati, resurslarni boshqarish, metrologik tasdiqlash va o'lchov jarayonlarini amalga oshirish, O'BT tahlili va takomillashtirish — jamlangan edi. ISO 10012:2026 [10; B.6–32] esa menejment tizimi standartlari uchun uyg'unlashtirilgan tuzilma (4–10-bandlar) asosida qayta tuzilgan, standartning nomi o'zgargan va u sifat menejmenti standartlari oilasining tarkibiy qismi sifatida pozitsiyalangan. Uyg'unlashtirilgan tuzilmaning "xavf va imkoniyatlarga qaratilgan harakatlar" bandi orqali xavfga asoslangan yondashuv O'BTning ajralmas qismiga aylandi.

3-jadval. ISO 10012:2003 va ISO 10012:2026 nashrlarining qiyosiy tavsifi

Qiyoslash jihati	ISO 10012:2003	ISO 10012:2026
Standart nomi	Measurement management systems — Requirements for measurement processes and measuring equipment	Quality management — Requirements for measurement management systems
Tuzilma	O'ziga xos tuzilma: 4. Umumiy talablar; 5. Rahbariyat mas'uliyati; 6. Resurslarni boshqarish; 7. Metrologik tasdiqlash va o'lchov jarayonlarini amalga oshirish; 8. O'BT tahlili va takomillashtirish	Menejment tizimi standartlari uchun uyg'unlashtirilgan tuzilma: 4. Tashkilot konteksti; 5. Yetakchilik; 6. Rejalashtirish; 7. Ta'minot; 8. Faoliyat; 9. Samaradorlikni baholash; 10. Takomillashtirish
Boshqa menejment tizimlari bilan integratsiya	Bilvosita — ISO 9001 tamoyillariga tayanadi, tuzilma farqli	Bevosita — ISO 9001:2015 va boshqa menejment tizimi standartlari bilan bir xil bandlar tuzilmasi
Xavfga asoslangan yondashuv	Alohida talab sifatida ifodalanmagan	Uyg'unlashtirilgan tuzilmaning xavf va imkoniyatlarga qaratilgan harakatlar bandi orqali tizimga kiritilgan
Diqqat markazi	O'lchov uskunalari va o'lchov jarayonlari	Tashkilot kontekstidan uzluksiz takomillashtirishgacha bo'lgan to'liq menejment sikli
Amal qilish davri	2003 — 2026-yil fevral	2026-yil fevralidan

Tahlil ko‘rsatadiki, yangi nashrda O‘BT “kalibrlash muddatlarini kuzatib borish” ma’muriy funksiyasidan tashkilot kontekstini tahlil qilishdan uzluksiz takomillashtirishgacha bo‘lgan to‘liq menejment siklini qamrab oluvchi tizimga aylanadi. O‘lchov ma’lumotlari ishonchliligi nuqtai nazaridan bu ikki muhim oqibatga olib keladi: birinchidan, o‘lchov jarayonlarining xavf darajasi bo‘yicha tabaqalashtirilishi — mahsulot sifati va xavfsizligiga bevosita ta’sir qiluvchi o‘lchovlar uchun qattiqroq metrologik talablar va qisqaroq kalibrlash oraliqlari belgilanadi; ikkinchidan, O‘BTning ISO 9001 bilan bir xil tuzilmasi rahbariyatning o‘lchovlar ishonchliligi uchun mas’uliyatini sifat menejmenti tizimining umumiy mas’uliyati doirasiga kiritadi.

4.2. Metrologik tasdiqlash va metrologik kuzatiluvchanlik zanjiri. Metrologik tasdiqlash o‘lchov natijalari ishonchliligini ta’minlovchi bosh mexanizm sifatida namoyon bo‘ladi. U kalibrlash (o‘lchov vositasi ko‘rsatkichlari va etalon qiymatlar o‘rtasidagi bog‘liqlikni noaniqlik bilan aniqlash), verifikatsiya (kalibrlash natijalarini o‘lchov jarayonining metrologik talablari bilan solishtirish) va tasdiqlash holatini rasmiylashtirish (markirovka, yozuvlar) bosqichlarini o‘z ichiga oladi. Muhim jihat shundaki, kalibrlash o‘z-o‘zidan muvofiqlik to‘g‘risida xulosa bermaydi: xulosa faqat kalibrlash natijasi, uning noaniqligi va o‘lchov jarayonining metrologik talabi birga ko‘rib chiqilganda, qaror qabul qilish qoidasi asosida shakllanadi [8; B.8–12], [14; B.23–31].

Metrologik kuzatiluvchanlik zanjirining uzluksizligi o‘lchov natijalarining milliy va xalqaro etalonlarga bog‘lanishini ta’minlaydi. Tahlil shuni ko‘rsatadiki, zanjirdagi uzilish faqat kalibrlash muddatining o‘tib ketishi bilan cheklanmaydi — u sertifikatda noaniqlik ko‘rsatilmaganligi, etalonning o‘zi kuzatiluvchan bo‘lmaganligi, ma’lumotlarni qo‘lda ko‘chirishdagi xatolar yoki qaror qabul qilish qoidasining belgilanmaganligi ko‘rinishida ham namoyon bo‘ladi (4-jadval). Bu uzilish turlarining har biri uchun taklif etilgan modelning muayyan darajasi nazorat chorasini beradi.

4-jadval. Kuzatiluvchanlik zanjiridagi uzilishlar, ularning oqibatlari va nazorat choralari

Uzilish turi	Ishonchlilikka oqibati	Nazorat chorasi (model darajasi)
Kalibrlash muddatining o‘tib ketishi	Drift hisobga olinmaydi, o‘lchov noaniqligi noma’lum bo‘lib qoladi	Kalibrlash rejasi, muddatlarni avtomatik nazorat qilish, ILAC-G24 bo‘yicha oraliqni asoslash (2, 4)
Sertifikatda noaniqlik yoki qamrov koeffitsienti k ko‘rsatilmagan	Byudjetda etalon hissasini baholash imkoni yo‘q	Faqat ISO/IEC 17025 bo‘yicha akkreditatsiyalangan laboratoriyalar xizmatidan foydalanish, DCC talab qilish (2, 4)
Etalonning o‘zi milliy yoki xalqaro etalonga bog‘lanmagan	Zanjir rasman uzilgan — natijalar tan olinmaydi	Yetkazib beruvchilarni baholash, kuzatiluvchanlik deklaratsiyasini tekshirish (1, 2)
Sertifikat ma’lumotlarini qo‘lda ko‘chirishdagi xatolar	Noto‘g‘ri tuzatma yoki noaniqlik qiymati qo‘llaniladi	Mashina o‘qiy oladigan DCC, ma’lumotlarni avtomatik import qilish
Qaror qabul qilish qoidasi belgilanmagan	Noaniqlik e’tiborga olinmagan holda “muvofiq” xulosasi — noto‘g‘ri qabul qilish xavfi	ILAC-G8 bo‘yicha himoya oralig‘i, JCGM 106 asosida xavflarni baholash
EMI/EMC tarkibiy qismining byudjetda yo‘qligi	Noaniqlik kam baholanadi, qabul qilish chegarasi noto‘g‘ri kengayadi	EMI ni byudjetga kiritish, maydon monitoringi, ekranlash (3, 4)

4.3. O'lchov noaniqligi byudjeti va qaror qabul qilish qoidasi. 3.5-bandda keltirilgan shartlar asosida hisoblangan noaniqlik byudjeti 5-jadvalda, tarkibiy qismlarning kombinatsiyalangan noaniqlik dispersiyasiga hissasi 3-rasmda keltirilgan. Kombinatsiyalangan standart noaniqlik uc = 0,019 %, kengaytirilgan noaniqlik U = 0,038 % (k = 2) ni tashkil etdi. Byudjetda eng katta hissa elektromagnit ta'sirlar tarkibiy qismiga (37,5 %) to'g'ri keladi, ikkinchi o'rinda etalon tok transformatorining noaniqligi (28,1 %) turadi; qolgan olti tarkibiy qismning umumiy hissasi 34,4 % dan oshmaydi.

5-jadval. 0,5 sinfli tok transformatori tok xatoligini tekshirishning o'lchov noaniqligi byudjeti (model hisob-kitobi)

№	Noaniqlik manbai	Berilgan qiymat, %	Taqsimot	Bo'lish koeffi-tsienti	Standart noaniqlik ui, %	Hissa ui2/ uc2, %
1	Etalon tok transformatori (kalibrlash sertifikati)	U = 0,020 (k = 2)	Normal	2	0,0100	28,1
2	Etalonning kalibrlashlar orasidagi drifti	±0,010	To'g'ri burchakli	√3	0,0058	9,4
3	Komparator (sinov qurilmasi) aniqligi	±0,005	To'g'ri burchakli	√3	0,0029	2,3
4	Takrorlanuvchanlik (A turi, n = 10)	s(x̄) = 0,006	Normal	1	0,0060	10,1
5	Ikkilamchi yuk (burden) og'ishi	±0,010	To'g'ri burchakli	√3	0,0058	9,4
6	Harorat ta'siri (20 ± 5 °C)	±0,005	To'g'ri burchakli	√3	0,0029	2,3
7	Elektromagnit ta'sirlar (EMI/EMC)	±0,020	To'g'ri burchakli	√3	0,0115	37,5
8	Raqamlashtirish (analog-raqamli o'zgartirgich rezolyutsiyasi)	±0,003	To'g'ri burchakli	√3	0,0017	0,8
Kombinatsiyalangan standart noaniqlik uc = √(Σui2)					0,0189	100
Kengaytirilgan noaniqlik U = k·uc (k = 2, P ≈ 95 %)					0,038	—

EMI tarkibiy qismini e'tiborga olmaslikning ta'sirini baholash uchun byudjet ushbu qatorsiz qayta hisoblandi: uc = 0,015 %, U = 0,030 %. Shunday qilib, elektromagnit ta'sirlar hisobga olinmaganda kengaytirilgan noaniqlik 0,038 % o'rniga 0,030 % deb e'lon qilinadi, ya'ni 20,9 % ≈ 21 % ga kam baholanadi (nisbat 1,26). Bu farq muvofiqlik to'g'risidagi qarorga bevosita ta'sir qiladi. Himoya oralig'i w = U bo'lgan qaror qoidasida qabul qilish chegarasi to'liq byudjet bo'yicha AL = 0,500 − 0,038 = 0,462 %, EMI hisobga olinmagan byudjet bo'yicha esa AL = 0,470 % ni tashkil etadi. Tok xatoligi 0,462...0,470 % oralig'ida bo'lgan transformator ikkinchi qoida bo'yicha "muvofiq" deb qabul qilinadi, to'liq byudjet bo'yicha esa uning muvofiqligi ≈95 % ishonch ehtimoli bilan tasdiqlanmaydi — bu noto'g'ri qabul qilish zonasidir. Sinov aniqligi nisbati TUR = MPE/U to'liq byudjet uchun ≈ 13 ni tashkil etadi, bu tekshirish sxemasining yetarli aniqlik zaxirasiga ega ekanligini ko'rsatadi; biroq EMI e'tiborga olinmasa bu ko'rsatkich ≈ 17 deb oshirib ko'rsatiladi.

Olingan natija EMI tarkibiy qismining boshqariladigan tarkibiy qism ekanligini ham ko'rsatadi: agar o'lchov postini ekranlash, kuchli tok manbalaridan uzoqlashtirish yoki maydon monitoringi

natijasida EMI chegarasi ±0,020 % dan ±0,010 % gacha kamaytirilsa, kengaytirilgan noaniqlik 0,038 % dan 0,032 % gacha tushadi. Demak, noaniqlik byudjeti nafaqat ishonchlilikni miqdoriy baholash, balki uni oshirish bo‘yicha texnik choralarni ustuvorlashtirish vositasi bo‘lib ham xizmat qiladi — ustuvorlik eng katta hissa qo‘shuvchi tarkibiy qismlarga beriladi.

4.4. Raqamli-monitoring darajasi: DCC va IIoT texnologiyalarining roli. Raqamli-monitoring darajasi yuqoridagi uch darajaning ma’lumot bilan ta’minlanishini va PDCA siklining tezlashishini ta’minlaydi (6-jadval). Mashina o‘qiy oladigan DCC [3; B.75–81], [4; B.51–62] etalonning noaniqligi va qamrov koeffitsientini noaniqlik byudjetiga avtomatik uzatish, kuzatiluvchanlik ma’lumotlarini o‘lchov natijasi bilan birga saqlash va qo‘lda ko‘chirish xatolarini bartaraf etish imkonini beradi — bu 4-jadvaldagi uzilish turlaridan ikkitasini tizimli tarzda yo‘q qiladi. IIoT sensorlari harorat, namlik, magnit maydon va tarmoq sifati parametrlarini real vaqtda qayd etib, B turi tarkibiy qismlarini taxminiy chegaralar o‘rniga haqiqiy kuzatilgan qiymatlar asosida baholash, hamda etalonlar driftini nazorat kartalari orqali kuzatib, ILAC-G24 [7; B.14–17] usullari bo‘yicha kalibrlash oraliqlarini asoslangan holda qayta ko‘rib chiqish imkonini yaratadi.

6-jadval. DCC va IIoT funksiyalarining PDCA bosqichlari bo‘yicha taqsimlanishi

PDCA bosqichi	DCC funksiyasi	IIoT funksiyasi	Ishonchlilikka ta’siri
Plan	Etalon noaniqligi va k ni byudjetga avtomatik o‘qish; sertifikat muddatlari asosida kalibrlash rejasini shakllantirish	Ta’sir etuvchi kattaliklar bo‘yicha tarixiy ma’lumotlar asosida xavflarni baholash	B turi tarkibiy qismlari real ma’lumotlarga asoslanadi
Do	Kuzatiluvchanlik ma’lumotlarini o‘lchov natijasi bilan birga saqlash; ko‘chirish xatolarini bartaraf etish	Harorat, namlik, magnit maydon va tarmoq sifati parametrlarini real vaqtda qayd etish	Zanjir uzilishlari va inson omili xatolari kamayadi
Check	Sertifikatlar va muddatlarni avtomatik tekshirish, audit izi	Nazorat kartalari, drift tahlili, ILAC-G24 usullarini avtomatlashtirish	Og‘ishlar erta aniqlanadi
Act	Yangi sertifikat kelganda byudjet va tuzatmalarni avtomatik yangilash	Ogohlantirishlar, tuzatuvchi choralar samaradorligini kuzatish	PDCA sikli tezlashadi

Shu bilan birga, raqamli qatlam ishonchlilik masalasini o‘z-o‘zidan hal qilmaydi: IIoT sensorlarining o‘zi ham kalibrlangan va kuzatiluvchan bo‘lishi, ularning ma’lumotlari sifati esa metrologik jihatdan ta’minlangan bo‘lishi lozim [2; B.1–15], [19; B.1–19]. Taklif etilgan modelda bu talab ikkinchi darajaning monitoring sensorlariga ham tatbiq etilishi orqali qondiriladi - raqamli qatlam metrologik ta’minotning o‘rnini bosmaydi, balki uning ma’lumot bazasini kengaytiradi.

Muhokama. Olingan natijalar o‘lchovlarni boshqarish tizimini nafaqat me’yoriy talablarga muvofiqlikni ta’minlovchi vosita, balki tashkilotning texnologik va boshqaruv qarorlari sifatini belgilovchi strategik omil sifatida ko‘rib chiqish zarurligini tasdiqlaydi. Bu xulosa “smart metrology” kontsepsiyasi [17; B.22–29], [18; B.7–20] bilan hamohang: metrologiya funksiyasining maqsadi hujjatlarning rasmiy muvofiqligi emas, balki qarorlar qabul qilinadigan ma’lumotlarning

ishonchliligidir. Taklif etilgan to‘rt qatlamli model bu g‘oyani ISO 10012:2026 ning uyg‘unlashtirilgan tuzilmasi tilida ifodalaydi va shu bilan uni sertifikatlashtirish va audit amaliyotiga bog‘laydi.

Noaniqlik byudjeti bo‘yicha olingan 21 % ko‘rsatkichi model qiymatlarga bog‘liq bo‘lib, uning aniq miqdori laboratoriyadan laboratoriyaga farq qiladi. Biroq tarkibiy xulosa umumiy xususiyatga ega: har qanday ahamiyatli tarkibiy qismning byudjetdan tushib qolishi kengaytirilgan noaniqlikni tizimli ravishda kam baholaydi, himoya oralig‘ini toraytiradi va noto‘g‘ri qabul qilish xavfini oshiradi. Elektr energiyasini hisobga olishda qo‘llaniladigan tok transformatorlari uchun bu bevosita tijorat hisob-kitoblaridagi xatolik xavfini anglatadi, shu sababli elektrotexnika korxonalari uchun EMI tarkibiy qismini byudjetga kiritish metodik tavsiya emas, balki ishonchlilikning zaruriy sharti hisoblanadi.

Raqamli qatlamga oid xulosalar xalqaro tadqiqotlar [2; B.1–15], [3; B.75–81], [19; B.1–19] bilan mos keladi, biroq O‘zbekiston sharoitida DCC ni joriy etish uchun bir qator tashkiliy shartlar zarur: DCC ma’lumotlar sxemasining milliy darajada tan olinishi, elektron imzo infratuzilmasi bilan integratsiya, akkreditatsiyalangan laboratoriyalar va korxona axborot tizimlari o‘rtasida ma’lumot almashinuvi tartibining belgilanishi. Bu masalalar milliy metrologiya instituti va akkreditatsiya organi ishtirokidagi pilot loyihalar doirasida hal etilishi maqsadga muvofiq.

Tadqiqotning cheklovlarini alohida qayd etish lozim. Birinchidan, miqdoriy natijalar model hisob-kitobga asoslangan; ularni real ishlab chiqarish ma’lumotlari asosida tasdiqlash kelgusi tadqiqot vazifasidir. Ikkinchidan, EMI tarkibiy qismini miqdoriy baholash metodikasi standartlashtirilmagan — har bir o‘lchov posti turi uchun eksperimental tadqiqotlar talab etiladi. Uchinchidan, model tok transformatorining faqat tok xatoligi bilan cheklangan; burchak xatoligi va boshqa metrologik xususiyatlar ko‘rib chiqilmagan. To‘rtinchidan, IIoT va DCC texnologiyalarini joriy etish qo‘shimcha moliyaviy va kadr resurslarini talab qiladi, bu kichik va o‘rta korxonalar uchun joriy etish sur’atini cheklashi mumkin. Beshinchidan, ISO 10012:2026 yangi standart bo‘lganligi sababli, u bo‘yicha sertifikatlashtirish va audit amaliyoti hali shakllanmagan.

Kelgusi tadqiqotlar uchun istiqbolli yo‘nalishlar: modelni elektrotexnika korxonasida pilot rejimda sinovdan o‘tkazish; EMI tarkibiy qismini turli o‘lchov postlari uchun eksperimental aniqlash; kalibrlash oraliqlarini optimallashtirish va og‘ishlarni erta aniqlash uchun mashinaviy o‘qitish usullarining qo‘llanilish imkoniyatlarini baholash. Oxirgi yo‘nalish faqat raqamli-monitoring darajasi yetarli hajmdagi sifatli ma’lumotlar bazasini shakllantirgandan keyin amalga oshirilishi mumkin.

Xulosa. O‘tkazilgan tadqiqot natijasida quyidagi xulosalarga kelindi.

1. ISO 10012:2026 standarti o‘lchovlarni boshqarish tizimini uyg‘unlashtirilgan tuzilma asosida qayta belgilaydi va uni sifat menejmenti tizimi bilan bir xil tuzilmaga keltiradi; bu O‘BTni ma’muriy funksiyadan tashkilot kontekstidan uzluksiz takomillashtirishgacha bo‘lgan to‘liq menejment siklini qamrab oluvchi, xavfga asoslangan tizimga aylantiradi.

2. Taklif etilgan to‘rt qatlamli kontseptual model (me’yoriy-tashkiliy, metrologik ta’minot, texnik-analitik va raqamli-monitoring darajalari) O‘BT elementlarini ISO 10012:2026 ning 4–10-bandlariga PDCA sikli orqali bog‘laydi va elektrotexnika korxonalarida tizimni loyihalash, joriy etish va auditdan o‘tkazishning metodik asosi bo‘lib xizmat qilishi mumkin.

3. Metrologik tasdiqlash va kuzatiluvchanlik zanjirining uzluksizligi ishonchlilikning zaruriy, biroq yetarli bo‘lmagan

shartidir: muvofiqlik to‘g‘risidagi xulosa faqat noaniqlik va qaror qabul qilish qoidasi bilan birga asoslanadi. Zanjir uzilishlarining olti turi va ularga qarshi nazorat choralari tizimlashtirildi.

4. Tok transformatorini tekshirish misolidagi model hisob-kitob elektromagnit ta’sirlar tarkibiy qismining noaniqlik byudjetida ustuvor (37,5 %) bo‘lishi mumkinligini va uni e’tiborga olmaslik kengaytirilgan noaniqlikni taxminan 21 % ga kam baholashga, qabul qilish chegarasini 0,462 % dan 0,470 % gacha noto‘g‘ri kengaytirishga olib kelishini ko‘rsatdi. Shu sababli elektrotexnika korxonalarida EMI/EMC tarkibiy qismini byudjetga kiritish ishonchlilikning zaruriy sharti hisoblanadi.

5. Raqamli kalibrlash sertifikatlari va IIoT texnologiyalari kuzatiluvchanlik zanjiridagi inson omili bilan bog‘liq uzilishlarni bartaraf etadi, B turi tarkibiy qismlarini real ma’lumotlar asosida baholash imkonini beradi va PDCA siklini tezlashtiradi; biroq ular metrologik ta’minotning o‘rnini bosmaydi va monitoring sensorlarining o‘zi kuzatiluvchan bo‘lishini talab qiladi.

6. Kelgusi tadqiqotlar modelni real ishlab chiqarish sharoitida sinovdan o‘tkazishga, EMI tarkibiy qismini eksperimental aniqlashga va yetarli ma’lumotlar bazasi shakllangandan keyin kalibrlash oraliqlarini optimallashtirishning intellektual usullarini baholashga qaratilishi maqsadga muvofiq.

Foydalanilgan adabiyotlar ro‘yxati:

1. Brown C., Elo T., Hovhannisyan K., Hutzschenreuter D., Kuosmanen P., Maennel O., Mustapää T., Nikander P., Wiedenhöfer T. Infrastructure for Digital Calibration Certificates // Proceedings of the 2020 IEEE International Workshop on Metrology for Industry 4.0 & IoT (Roma, Italy, 3–5 June 2020). - Piscataway: IEEE, 2020. - P. 485–489. - DOI: 10.1109/MetroInd4.0IoT48571.2020.9138220.

2. Eichstädt S., Gruber M., Vedurmudi A.P., Seeger B., Bruns T., Kok G. Toward Smart Traceability for Digital Sensors and the Industrial Internet of Things // Sensors. - 2021. - Vol. 21, No. 6. - Art. 2019. - 15 p. - DOI: 10.3390/s21062019.

3. Hackel S., Härtig F., Hornig J., Wiedenhöfer T. The Digital Calibration Certificate // PTB-Mitteilungen. -2017. -Vol. 127, No. 4. - P. 75–81. - DOI: 10.7795/310.20170403.

4. Hackel S., Schönhals S., Krah T., Doering L. Maschinenlesbares und maschineninterpretierbares digitales Kalibrierzertifikat (DCC) und sein Einsatz in der Praxis // tm – Technisches Messen. -2024. - Vol. 91, No. 1. - P. 51–62. - DOI: 10.1515/teme-2022-0117.

5. IEC 61000-6-2:2016. Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 6-2: Generic standards - Immunity standard for industrial environments. - Geneva: International Electrotechnical Commission, 2016. - 36 p.

6. IEC 61869-2:2012. Instrument transformers -Part 2: Additional requirements for current transformers. - Geneva: International Electrotechnical Commission, 2012. - 140 p.

7. ILAC-G24:2022 / OIML D 10:2022. Guidelines for the determination of recalibration intervals of measuring equipment. -Silverwater: ILAC; Paris: OIML, 2022. - 18 p.

8. ILAC-G8:09/2019. Guidelines on Decision Rules and Statements of Conformity. -Silverwater: International Laboratory Accreditation Cooperation, 2019. - 20 p.

9. ISO 10012:2003. Measurement management systems -Requirements for measurement processes and measuring equipment. -Geneva: International Organization for Standardization, 2003. - 19 p.

10. ISO 10012:2026. Quality management - Requirements for measurement management systems. - Geneva: International Organization for Standardization, 2026. - 46 p.

11. ISO 9001:2015. Quality management systems -Requirements. -Geneva: International Organization for Standardization, 2015. - 29 p.

12. ISO/IEC 17025:2017. General requirements for the competence of testing and calibration laboratories. -Geneva: ISO/IEC, 2017. - 30 p.

13. JCGM 100:2008. Evaluation of measurement data -Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM 1995 with minor corrections). - Sèvres: Joint Committee for Guides in Metrology (BIPM), 2008. -DOI: 10.59161/JCGM100-2008E.

14. JCGM 106:2012. Evaluation of measurement data -The role of measurement uncertainty in conformity assessment. - Sèvres: Joint Committee for Guides in Metrology (BIPM), 2012. - DOI: 10.59161/JCGM106-2012.

15. JCGM 200:2012. International vocabulary of metrology - Basic and general concepts and associated terms (VIM). -3rd ed. - Sèvres: Joint Committee for Guides in Metrology (BIPM), 2012. - DOI: 10.59161/JCGM200-2012.

16. Kuster M. A measurement information infrastructure's benefits for industrial metrology and IoT // Proceedings of the 2020 IEEE International Workshop on Metrology for Industry 4.0 & IoT (Roma, Italy, 3–5 June 2020). - Piscataway: IEEE, 2020. - P. 479–484. -DOI: 10.1109/MetroInd4.0IoT48571.2020.9138200.

17. Lazzari A., Pou J.-M., Dubois C., Leblond L. Smart metrology: the importance of metrology of decisions in the big data era // IEEE Instrumentation & Measurement Magazine. -2017. -Vol. 20, No. 6. -P. 22–29. -DOI: 10.1109/MIM.2017.8121947.

18. Mari L., Petri D. The metrological culture in the context of big data: managing data-driven decision confidence // IEEE Instrumentation & Measurement Magazine. -2017. -Vol. 20, No. 5. - P. 4–20. - DOI: 10.1109/MIM.2017.8036688.

19. Mustapää T., Nikander P., Hutzschenreuter D., Viitala R. Metrological Challenges in Collaborative Sensing: Applicability of Digital Calibration Certificates // Sensors. -2020. -Vol. 20, No. 17. -Art. 4730. - 19 p. -DOI: 10.3390/s20174730.

20. Mustapää T., Nummiluikki J., Viitala R. Digitalization of Calibration Data Management in Pharmaceutical Industry Using a Multitenant Platform // Applied Sciences. -2022. -Vol. 12, No. 15. -Art. 7531. - 22 p. -DOI: 10.3390/app12157531.

21. Mustapää T., Tunkkari H., Taponen J., Immonen L., Heeren W., Baer O., Brown C., Viitala R. Secure Exchange of Digital Metrological Data in a Smart Overhead Crane // Sensors. -2022. -Vol. 22, No. 4. - Art. 1548. - 21 p. - DOI: 10.3390/s22041548.

22. O'zbekiston Respublikasining "Metrologiya to'g'risida"gi Qonuni (yangi tahriri): 2020-yil 7-apreldagi O'RQ-614-son // Qonun hujjatlari ma'lumotlari milliy bazasi. - 08.04.2020-y. - 03/20/614/0403-son. - URL: https://lex.uz/uz/docs/-4782808 (murojaat sanasi: 19.09.2026).

23. Pou J.-M., Leblond L. ISO/IEC Guide 98-4: A Copernican revolution for metrology // IEEE Instrumentation & Measurement Magazine. -2018. -Vol. 21, No. 5. -P. 6–10. - DOI: 10.1109/MIM.2018.8515699.

24. Schütze A., Helwig N., Schneider T. Sensors 4.0 – smart sensors and measurement technology enable Industry 4.0 // Journal of Sensors and Sensor Systems. - 2018. - Vol. 7, No. 1. - P. 359–371. - DOI: 10.5194/jsss-7-359-2018.

25. Sousa M.C., Almeida M.F. Smart revolution and metrology: A longitudinal science mapping approach // Measurement: Sensors. - 2021. - Vol. 18. - Art. 100340. - p. - DOI: 10.1016/j.measen.2021.100340.

MAHALLIY ISHLAB CHIQILGAN HARORAT QIYOSLASH QURILMASINING XALQARO ETALON KALIBRATORLAR BILAN QIYOSIY METROLOGIK TAHLILI VA O‘LCHASH NOANIQLIGINI BAHOLASH



Ismoilov Muxriddin Tulkin o‘g‘li
Texnika fanlari bo‘yicha falsafa doktori, Navoiy davlat konchilik va texnologiyalar universiteti “Metrologiya, standartlashtirish va sertfikatlashtirish” kafedrasi dotsenti

E-mail: imuxriddint@mail.ru

Faisal Mukhtar
Texnika fanlari doktori, Navoiy davlat konchilik va texnologiyalar universiteti “Metrologiya, standartlashtirish va sertfikatlashtirish kafedrasi” professori

E-mail: fmukhtar86@gmail.com

Rahimov Anvarjon Komilovich
Navoiy davlat konchilik va texnologiyalar universiteti “Metrologiya, standartlashtirish va sertfikatlashtirish” kafedrasi katta o‘qituvchisi

E-mail: anvarjon.komilovich@gmail.com

Annotatsiya. Ushbu maqolada mahalliy sharoitda RMA421 kontrolleri va quruq blokli isitish tizimi asosida ishlab chiqilgan sanoat termometrlarini qiyoslash qurilmasi etalon Fluke 9144 kalibratori bilan 50-600 °C oralig‘ida qiyoslandi. Olti nazorat nuqtasida o‘lchangan absolyut xatolik −0,20 dan +0,87 °C gacha o‘zgardi, o‘rtacha kvadratik xatolik taxminan 0,59 °C ni tashkil etdi. O‘lchash noaniqligi byudjeti GUM va EURAMET cg-13 metodikasi asosida tuzilib, 400 °C uchun kengaytirilgan noaniqlik 0,44 °C deb baholandi. Chiziqli tuzatish qoldiq xatolikni qariyb to‘rt baravar kamaytirdi.

Kalit so'zlar: harorat, qiyoslash, kalibrlash, etalon kalibrator, Fluke 9144, quruq blok, platina qarshilik termometri, o'lchash noaniqligi byudjeti, kengaytirilgan noaniqlik, metrologik izchillik, IEC 60751, EURAMET cg-13, sanoat metrologiyasi, chiziqlilik tuzatishi.

Аннотация. В статье разработанное в местных условиях устройство сравнения промышленных термометров на основе контроллера RMA421 и сухоблочного нагрева сравнивается с эталонным калибратором Fluke 9144 в диапазоне 50-600 °C. В шести контрольных точках измеренная абсолютная погрешность изменялась от −0,20 до +0,87 °C, а среднеквадратичная погрешность составила около 0,59 °C. Бюджет неопределённости измерений составлен согласно GUM и EURAMET cg-13; для 400 °C расширенная неопределённость оценена в 0,44 °C. Линейная коррекция уменьшила остаточную погрешность почти в четыре раза, подтвердив применимость прибора.

Ключевые слова: температура, сравнение, калибровка, эталонный калибратор, Fluke 9144, сухой блок, платиновый термометр сопротивления, бюджет неопределённости, расширенная неопределённость, метрологическая прослеживаемость, IEC 60751, EURAMET cg-13, промышленная метрология.

Abstract. This paper compares a locally developed industrial-thermometer comparison device, based on an RMA421 controller and dry-block heating, with a reference Fluke 9144 dry-well calibrator over the 50-600 °C range. At six control points the measured absolute error ranged from −0.20 to +0.87 °C, and the root-mean-square error was about 0.59 °C. A GUM- and EURAMET cg-13-compliant measurement-uncertainty budget gave an expanded uncertainty of 0.44 °C at 400 °C. A linear correction reduced the residual error almost fourfold.

Keywords: temperature, comparison, calibration, reference calibrator, Fluke 9144, dry-block, platinum resistance thermometer, measurement uncertainty budget, expanded uncertainty, metrological traceability, IEC 60751, EURAMET cg-13, industrial metrology, linearity correction.

Kirish. Sanoat ishlab chiqarishida haroratni aniq o'lchash texnologik jarayonlarning barqarorligi, mahsulot sifati va energiya samaradorligini ta'minlovchi asosiy omillardan biridir. Shu sababli sanoatda qo'llaniladigan termometrlarning ko'rsatishlari muntazam ravishda etalon vositalar yordamida tekshirilishi va kalibrlanishi lozim. Platina qarshilik termometrlariga qo'yiladigan talablar va ularning qarshilik–harorat bog'liqligi IEC 60751:2022 (3-tahrir) xalqaro standartida belgilangan; ushbu hujjat −200 °C dan +850 °C gacha bo'lgan oraliqni va bir necha aniqlik sinflarini qamrab oladi [1; 4.2- va 5-bandlar]. Kalibrlash va sinov laboratoriyalarining vakolatliligiga qo'yiladigan umumiy talablar esa ISO/IEC 17025:2017 standartida keltirilgan [2; 1-band].

Hozirgi kunda yuqori aniqlikdagi etalon harorat kalibratorlari, asosan, xorijiy ishlab chiqaruvchilar (Fluke, AMETEK Jofra va boshqalar) tomonidan taklif etiladi. Bunday qurilmalar yuqori metrologik ko‘rsatkichlarga ega bo‘lsa-da, narxi yuqoriligi va xizmat ko‘rsatish bog‘liqligi rivojlanayotgan mamlakatlar sanoati uchun metrologik tobelikni keltirib chiqaradi. Shu nuqtai nazardan, mahalliy sharoitda ishlab chiqilgan arzon qiyoslash qurilmalarining real metrologik imkoniyatlarini xalqaro etalonlar bilan obyektiv qiyoslash va ularning qo‘llanish chegaralarini aniqlash dolzarb vazifa hisoblanadi.

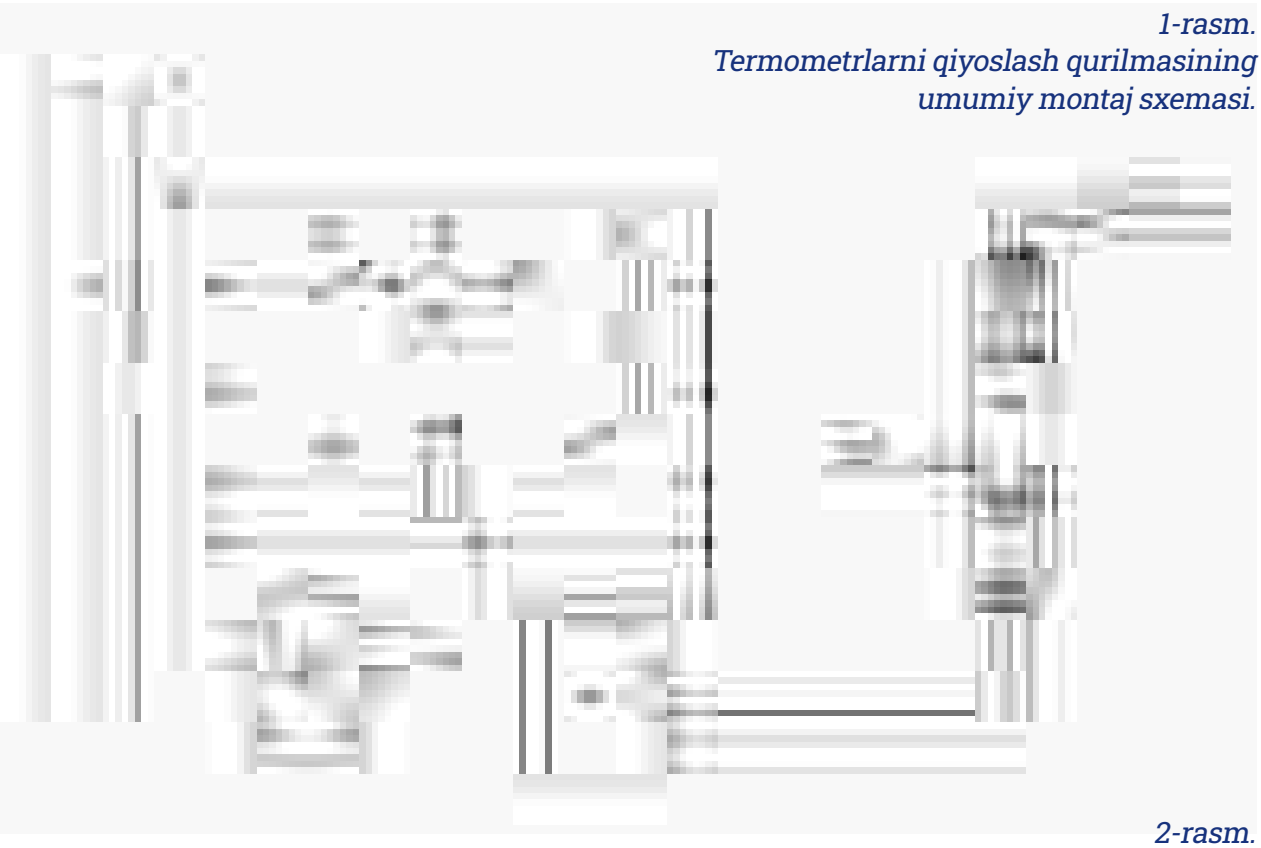
Ushbu maqolaning maqsadi – mahalliy sharoitda RMA421 kontrolleri va quruq blokli isitish tizimi asosida ishlab chiqilgan termometrlarni qiyoslash qurilmasini etalon Fluke 9144 kalibratori bilan 50–600 °C oralig‘ida qiyoslash, o‘lchash noaniqligi byudjetini Xalqaro o‘lchash noaniqligini ifodalash bo‘yicha qo‘llanma (GUM, JCGM 100:2008) [3; 5- va 6-bandlar] talablariga muvofiq tuzish hamda arzon mahalliy uskunaning amaliy o‘rni va modernizatsiya yo‘nalishlarini asoslashdan iborat.

Adabiyotlar tahlili va metodologiya. Etalon harorat kalibratorlari bo‘yicha tahlil shuni ko‘rsatadiki, quruq blokli (dry-block) konstruksiya laboratoriya va dala sharoitida keng tarqalgan. Fluke 9144 maydon metrologiya kalibratori 50-660 °C oralig‘ida ishlaydi; uning e’lon qilingan ko‘rsatuv aniqligi 420 °C da ±0,35 °C va 660 °C da ±0,50 °C ni, barqarorligi esa 660 °C da ±0,05 °C ni tashkil etadi; uyalararo (radial) bir jinslilik ±0,01 °C, o‘q bo‘yicha (aksial) bir jinslilik 40 mm da ±0,05 °C bo‘lib, qurilma ISO/IEC 17025 bo‘yicha akkreditatsiyalangan kalibrlash sertifikati bilan ta’minlanadi [4; “Texnik xususiyatlar” jadvali]. AMETEK Jofra RTC seriyasidagi kalibratorlar −100 °C dan +700 °C gacha oraliqni qamrab oladi va tashqi etalon datchik bilan ±0,04 °C gacha aniqlikni ta’minlaydi; CTC seriyasi esa 28–650 °C oralig‘ida ichki datchik bilan 400 °C da ±0,60 °C va 650 °C da ±0,65 °C aniqlikni beradi [5; “Texnik xususiyatlar” jadvali]. Bu ko‘rsatkichlar mahalliy qurilma natijalarini taqqoslash uchun obyektiv mezon vazifasini bajaradi.

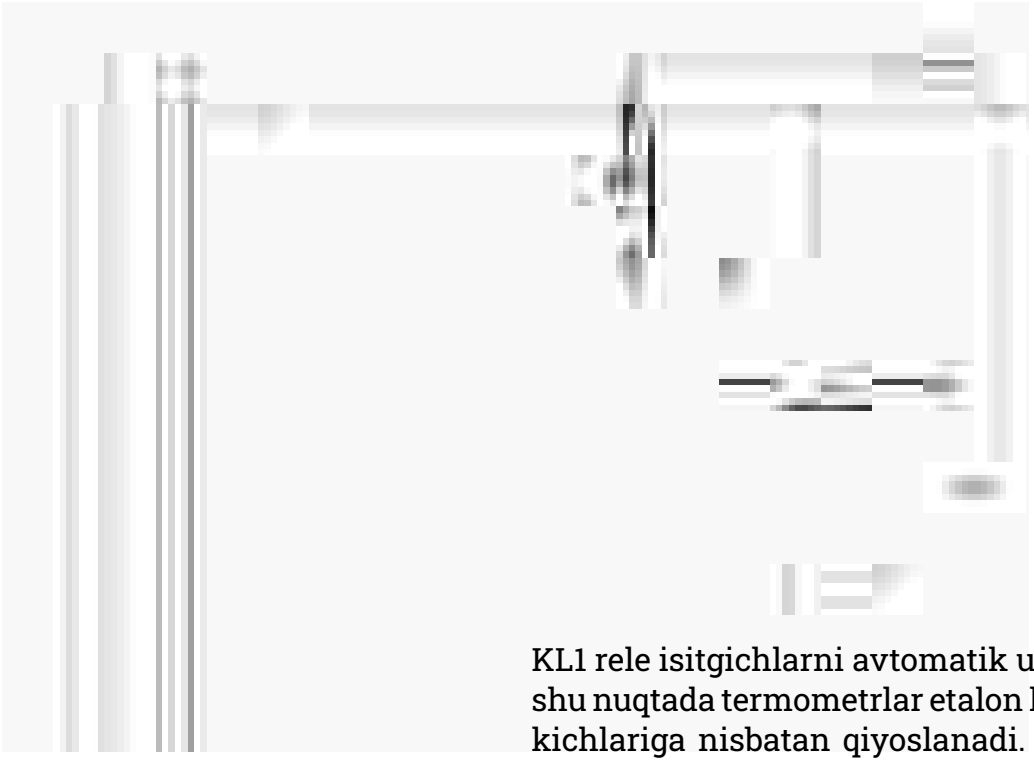
Harorat blokli kalibratorlarini kalibrlash va ularning noaniqligini baholash metodikasi EURAMET cg-13 (3-versiya) qo‘llanmasida batafsil bayon etilgan. Mazkur qo‘llanma −100 °C dan +1300 °C gacha amal qiladi va noaniqlik byudjetiga blokning o‘q hamda radial yo‘nalishdagi bir jinsli emasligi, yuklama ta’siri, vaqt bo‘yicha barqarorligi, boshqaruvchi termometr rezolyutsiyasi va etalon termometr noaniqligini kiritishni talab qiladi [6; 4-band]. So‘nggi yillarda sun’iy neyron tarmoqlari yordamida harorat datchiklarini kalibrlash ham o‘rganilmoqda: Liu va hamkorlari sun’iy neyron tarmoq modeli chiziqli va polinomial regressiyaga nisbatan kichikroq xatolik va noaniqlik berishini ko‘rsatgan [7; B. 7347]. Meteorologik harorat datchiklari uchun kalibrlash tartibi va noaniqlik byudjetini baholashning asoslari Grykalowska va hamkorlari ishida keltirilgan [8; B. 867-872].

Tadqiqotda tahlil qilingan mahalliy qurilma bir fazali elektr ta’minotida ishlaydi va quyidagi asosiy elementlardan tashkil topgan: RMA421 kontrolleri – haroratni boshqarish va nazorat qilish uchun; TEN1 va TEN2 isitish elementlari; termojuft – ishchi o‘lchov datchigi sifatida; KL1 rele – belgilangan haroratga yetganda isitgichlarni uzish uchun; barqarorlashtiruvchi manba. Qurilmaning umumiy montaj sxemasi 1-rasmda, ishchi ulanish sxemasi esa 2-rasmda keltirilgan.

1-rasm.
Termometrlarni qiyoslash qurilmasining umumiy montaj sxemasi.



2-rasm.
Qurilmaning ishchi ulanish sxemasi (RMA421, KL1 rele, TEN1 va TEN2 isitgichlar, termojuft).



Qurilmaning ishlash tartibi quyidagicha: elektr ta'minoti ulangach, RMA421 kontrolleri isitish elementlarini ishga tushiradi va quruq blok qiziy boshlaydi. Harorat o'rnatilgan qiymatga yetganda KL1 rele isitgichlarni avtomatik uzadi va shu nuqtada termometrlar etalon ko'rsatkichlariga nisbatan qiyoslanadi. Kalibrlash jarayoni ketma-ketligi 3-rasmdagi algoritm blok-sxemasida tasvirlangan; algoritm harorat barqarorlashguncha kutish va barcha nazorat nuqtalari yakunlanguncha takrorlash sikllarini o'z ichiga oladi.

O'lchash modeli sifatida termometrning xatoligi etalon va ishchi ko'rsatkichlar ayirmasi orqali aniqlanadi. Har bir nazorat nuqtasi uchun absolyut xatolik (1), nisbiy xatolik (2), o'rtacha qiymat (3) va tajribaviy standart og'ish (4) quyidagicha hisoblanadi:

(1)

(2)

(3)

(4)

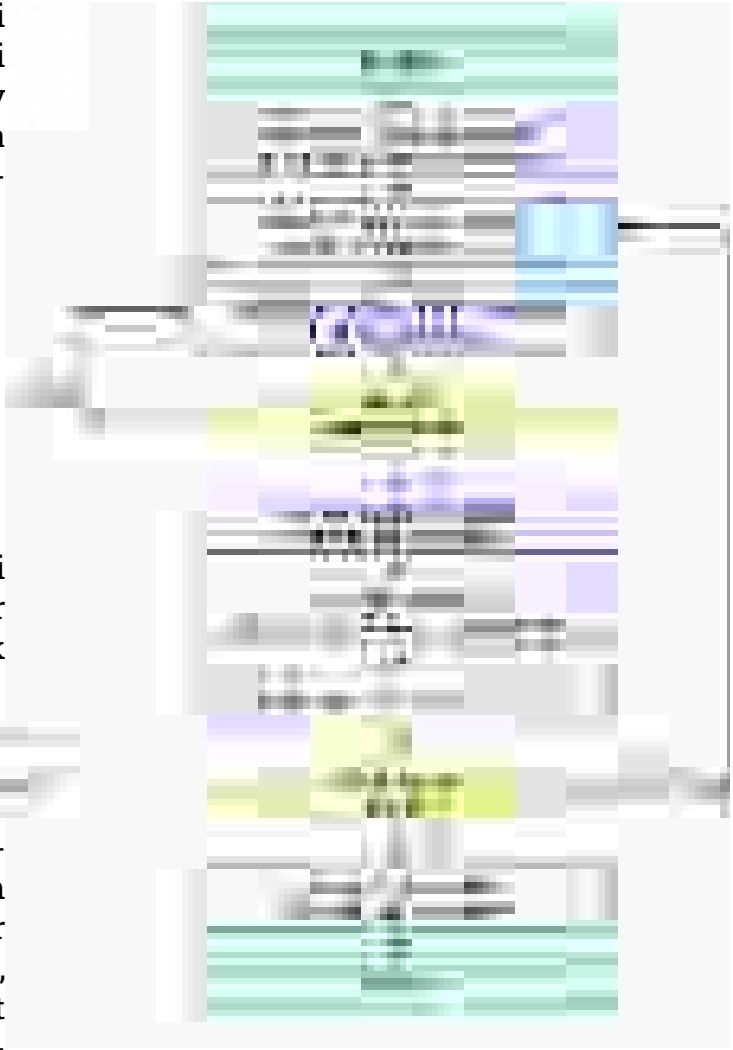
Qurilmaning umumiy mosligini baholash uchun barcha nuqtalar bo'yicha o'rtacha kvadratik xatolik (5) qo'llaniladi:

(5)

Bu yerda Tlokal,i – mahalliy uskuna ko'rsatishi, Tetalon,i – etalon Fluke 9144 ko'rsatishi, n – takror o'lchashlar soni. Eksperiment 50, 100, 200, 300, 400 va 600 °C nazorat nuqtalarida o'tkazildi; har bir nuqtada harorat barqarorlashganidan so'ng etalon va mahalliy uskuna ko'rsatkichlari qayd etildi.

Natijalar. Eksperimental o'lchashlar natijalari va hisoblangan xatoliklar 2-jadvalda keltirilgan. Avval esa qiyoslangan qurilmalarning asosiy metrologik ko'rsatkichlari 1-jadvalda umumlashtirilgan.

3-rasm. Mahalliy qurilmada kalibrlash jarayonining algoritmi (blok-sxema).



1-jadval. Etalon kalibratorlar va mahalliy qurilmaning qiyosiy ko'rsatkichlari.

Qurilma	Harorat oralig'i, °C	E'lon qilingan aniqlik	Avtomatlash / hujjatlash
Fluke 9144	50…660	±0,35 (420 °C) … ±0,50 (660 °C)	bor (sertifikatli)
AMETEK Jofra RTC-700	−100…700	±0,04 (tashqi datchik)	bor
AMETEK Jofra CTC-652	28…650	±0,65±…0,50 (ichki)	bor
Mahalliy qurilma	50…600	ΔT ≈ −0,87+…0,20 (o'lchangan)	yo'q (modernizatsiya talab)

1-jadvaldan ko‘rinadiki, mahalliy qurilma harorat oralig‘i bo‘yicha etalonlarga yaqin bo‘lsa-da, e’lon qilingan aniqlik va avtomatlashtirish darajasi bo‘yicha ulardan farq qiladi. Ayni paytda uning asosiy ustunligi – sezilarli darajada arzonligi va mahalliy ishlab chiqarishga moslashganligidir.

2-jadval. O‘lchash natijalari va xatoliklar.

Nazorat nuqtasi, °C	Fluke 9144 (etalon), °C	Mahalliy uskuna, °C	Absolyut xatolik ΔT, °C	Nisbiy xatolik δ, %
50	50,02	50,80	+0,78	+1,56
100	100,01	100,60	+0,59	+0,59
200	200,03	200,90	+0,87	+0,44
300	300,00	300,50	+0,50	+0,17
400	400,01	400,30	+0,29	+0,07
600	600,00	599,80	−0,20	−0,03

2-jadval ma’lumotlariga ko‘ra, past haroratlarda (50–200 °C) absolyut xatolik nisbatan yuqori (0,59–0,87 °C), o‘rta va yuqori haroratlarda (300–600 °C) esa u kamayib boradi. Barcha nuqtalar bo‘yicha o‘rtacha kvadratik xatolik RMSE ≈ 0,59 °C ni tashkil etadi. Xatoliklarning haroratga bog‘liqligi va etalon Fluke 9144 ning ko‘rsatuv aniqligi chegarasi bilan taqqoslanishi 4-rasmda berilgan.

4-rasm.
Mahalliy uskuna xatoligining etalon (Fluke 9144) aniqlik chegarasi bilan taqqoslanishi.



O‘lchash noaniqligi byudjeti GUM (JCGM 100:2008) [3; 5- va 6-bandlar] va EURAMET cg-13 [6; 4-band] metodikasi asosida tuzildi; model taxminan chiziqli bo‘lganligi sababli birinchi tartibli tarqalish qonuni qo‘llanildi, muqobil yon-

dashuv esa taqsimotlarni tarqatishning Monte-Karlo usuli (JCGM 101:2008) [9; 5-band] hisoblanadi. A turdagi standart noaniqlik takror o‘lchashlar bo‘yicha (6)-ifoda yordamida, B turdagi tarkibiy qismlar esa etalon sertifikati, rezolyutsiya hamda blokning bir jinsliligi va barqarorligi ma’lumotlaridan baholandi. Birlashtirilgan standart noaniqlik (7) va kengaytirilgan noaniqlik (8) quyidagicha aniqlanadi:

(6)

(7)

(8)



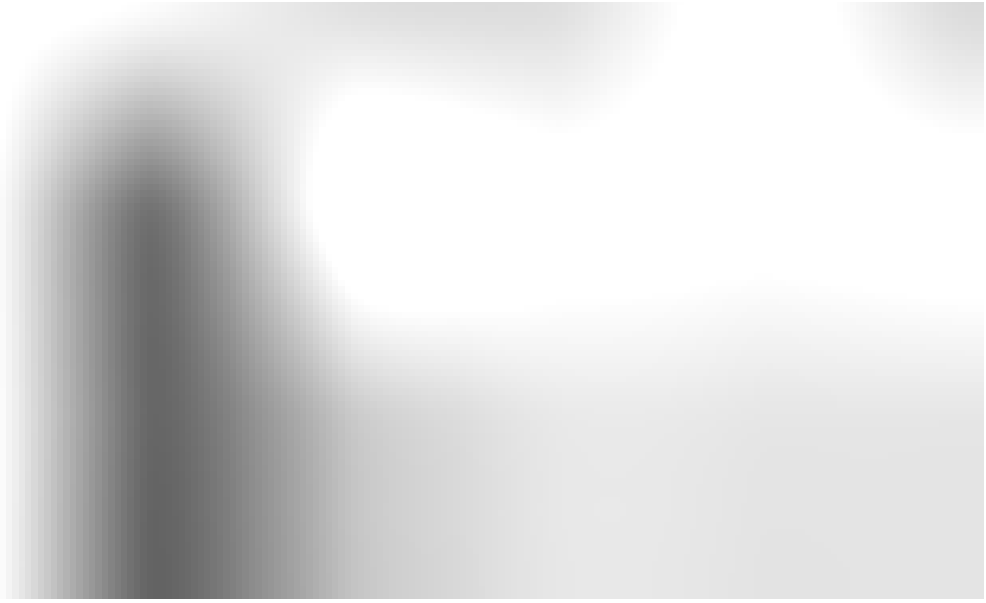
Bu yerda k – qamrov koeffitsienti (taxminan 95% qamrov ehtimoli uchun k = 2). 400 °C nazorat nuqtasi uchun tuzilgan noaniqlik byudjeti 3-jadvalda keltirilgan.

3-jadval.
400 °C nuqtasi uchun o‘lchash noaniqligi byudjeti.

Noaniqlik manbai	Yarim kenglik / s	Taqsimot	Bo‘luvchi	ui, °C	Ulush, %
Etalon kalibrator (Fluke 9144)	0,35	tekis	√3	0,202	85,8
Takroriylik (A tur)	0,15 (s)	normal	√n	0,067	9,4
Rezolyutsiya	0,10	tekis	2√3	0,029	1,8
O‘q bo‘yicha bir jinslilik	0,05	tekis	√3	0,029	1,8
Vaqt bo‘yicha barqarorlik	0,04	tekis	√3	0,023	1,1
Radial bir jinslilik	0,01	tekis	√3	0,006	0,1
Birlashtirilgan uc	—	—	—	0,218	100
Kengaytirilgan U (k = 2)	—	—	—	0,436	—

Izoh: takroriylik (s) va rezolyutsiya qiymatlari metodik misol sifatida qabul qilingan va yakuniy hisobda laboratoriyaning haqiqiy takroriy o‘lchashlari hamda qurilma pasporti ma’lumotlari bilan almashtirilishi lozim; etalon, bir jinslilik va barqarorlik qiymatlari Fluke 9144 ning e’lon qilingan ko‘rsatkichlaridan olingan [4; “Texnik xususiyatlar” jadvali]. Byudjet tarkibiy qismlarining nisbiy ulushi 5-rasmda tasvirlangan.

5-rasm. Noaniqlik byudjeti tarkibiy qismlarining ulushi (400 °C).



Hisob natijalariga ko‘ra, 400 °C uchun birlashtirilgan standart noaniqlik uc ≈ 0,218 °C, kengaytirilgan noaniqlik esa U ≈ 0,44 °C (k = 2) ni tashkil etadi. Byudjetda hal qiluvchi ulush (taxminan 86%) etalon kalibratorga to‘g‘ri keladi; bu esa noaniqlikni kamaytirishning eng samarali yo‘li yuqori aniqlikdagi tashqi etalon datchikdan foydalanish ekanini ko‘rsatadi.

Past haroratlardagi tizimli og‘ishni kamaytirish maqsadida etalon va mahalliy ko‘rsatishlar orasidagi bog‘liqlik chiziqli regressiya bilan baholandi: Tlokal = 0,99827·Tetalon + 0,946. Mazkur bog‘liqlik asosida amalga oshirilgan chiziqli tuzatish o‘rtacha kvadratik xatolikni RMSE ≈ 0,59 °C dan ≈ 0,15 °C gacha, ya’ni qariyb to‘rt baravar kamaytiradi (6-rasm).

6-rasm. Chiziqli tuzatishdan oldin va keyin xatoliklarning taqsimlanishi.



Muhokama. Olingan natijalar mahalliy qurilmaning yuqori haroratlarda (300-600 °C) etalon Fluke 9144 ning ko‘rsatuv aniqligi chegarasiga yaqin natijalar berishini, past haroratlarda esa tizimli og‘ish kattaroq bo‘lishini ko‘rsatadi. Past haroratdagi og‘ish, asosan, doimiy siljish (ofset) xususiyatiga ega bo‘lganligi sababli, uni chiziqli tuzatish bilan sezilarli kamaytirish mumkin; bu xulosa 6-rasmdagi RMSE ning qariyb to‘rt baravar pasayishi bilan tasdiqlanadi.

Qiyosiy nuqtai nazardan, mahalliy qurilmaning kuchli tomoni – arzonligi, soddaligi va mahalliy ta’mirlanuvchanligidir. Biroq u etalon kalibratorlardan ikki muhim jihatda ortda qoladi: birinchidan, e’lon qilingan/hujjatlashtirilgan metrologik ko‘rsatkichlar (aniqlik, bir jinslilik, barqarorlik) tizimli baholanmagan; ikkinchidan, avtomatik boshqaruv va sertifikat shakllantirish funksiyalari mavjud emas. Noaniqlik byudjeti tahlili ko‘rsatdiki, umumiy noaniqlikning asosiy qismi etalon vositaga bog‘liq, shuning uchun mahalliy uskuna o‘zi etalon emas, balki yuqori aniqlikdagi etalon datchik bilan birgalikda ishlovchi qiyoslash vositasi sifatida pozitsiyalanishi to‘g‘riroqdir.

Qurilmani xalqaro talablarga yaqinlashtirish uchun quyidagi modernizatsiya yo‘nalishlari asoslanadi: RMA421 kontrollerini RS-485/Modbus interfeysi orqali kompyuterga ulash; LabVIEW yoki Python asosidagi dasturiy ta’minot yordamida haroratni real vaqtda kuzatish, xatoliklarni avtomatik hisoblash va kalibrlash protokolini ISO/IEC 17025 [2; 7.8-band] talablariga muvofiq shakllantirish; har bir jarayonda noaniqlik byudjetini EURAMET cg-13 [6; 4-band] bo‘yicha avtomatik tuzish. Bundan tashqari, Liu va hamkorlari [7; B. 7347] ko‘rsatganidek, sun’iy neyron tarmoq yoki regressiyaga asoslangan tuzatish modellari mahalliy uskunaning qoldiq xatoligini yanada kamaytirish imkonini berishi mumkin [10; B.04004, 11;B.22-26].

Tadqiqotning cheklovlari sifatida shuni ta’kidlash lozimki, taqdim etilgan noaniqlik byudjetidagi takroriylik va rezolyutsiya qiymatlari metodik misol darajasida bo‘lib, yakuniy baho uchun laboratoriyaning to‘liq takroriy o‘lchash ma’lumotlari va qurilma pasportidagi haqiqiy ko‘rsatkichlar talab etiladi. Etalon Fluke 9144 ning metrologik izchilligi milliy etalonga va ITS-90 xalqaro harorat shkalasiga bog‘langan bo‘lishi kalibrlash natijalarining ishonchliligini ta’minlaydi.

Xulosa. Maqolada mahalliy sharoitda RMA421 kontrolleri va quruq blokli isitish tizimi asosida ishlab chiqilgan termometrlarni qiyoslash qurilmasi etalon Fluke 9144 kalibratori bilan 50–600 °C oralig‘ida qiyoslandi. O‘lchangan absolyut xatolik −0,20 °C dan +0,87 °C gacha, o‘rtacha kvadratik xatolik esa taxminan 0,59 °C ni tashkil etdi; chiziqli tuzatishdan so‘ng bu ko‘rsatkich ≈ 0,15 °C gacha kamaydi.

GUM va EURAMET cg-13 metodikasi asosida tuzilgan noaniqlik byudjeti 400 °C uchun kengaytirilgan noaniqlikni U ≈ 0,44 °C (k = 2) deb baholadi va uning asosiy ulushi etalon vositaga tegishli ekanini ko‘rsatdi. Shu asosda mahalliy qurilma mustaqil etalon sifatida emas, balki yuqori aniqlikdagi etalon datchik bilan ishlovchi arzon qiyoslash vositasi sifatida amaliy ahamiyatga ega degan xulosaga kelindi.

RS-485/Modbus interfeysi, LabVIEW yoki Python asosidagi avtomatlashtirish, ISO/IEC 17025 bo‘yicha hujjatlashtirish va regressiya/sun’iy neyron tarmoq asosidagi tuzatish modellarini joriy etish orqali qurilmani xalqaro talablarga yaqinlashtirish mumkin. Bu esa O‘zbekiston sanoatining metrologik mustaqilligini mustahkamlashga xizmat qiladi.



Foydalanilgan adabiyotlar ro'yxati:

1. IEC 60751:2022. Industrial platinum resistance thermometers and platinum temperature sensors. Ed. 3.0. International Electrotechnical Commission, 2022.

2. ISO/IEC 17025:2017. General requirements for the competence of testing and calibration laboratories. International Organization for Standardization, 2017.

3. JCGM 100:2008 (GUM). Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement. Joint Committee for Guides in Metrology, 2008.

4. Fluke Calibration. 9144 Field Metrology Well: texnik ma'lumotlar (50–660 °C). Fluke Corporation.

5. AMETEK Sensors, Test & Calibration. JOFRA RTC-700 va CTC-652 quruq blokli harorat kalibratorlari: texnik ma'lumotnoma. AMETEK, Inc.

6. EURAMET. Calibration Guide No. 13 (cg-13), v3.0. Calibration of Temperature Block Calibrators. European Association of National Metrology Institutes, 2015.

7. Liu C., Zhao C., Wang Y., Wang H. Machine-Learning-Based Calibration of Temperature Sensors // Sensors. 2023. Vol. 23, No. 17. Art. 7347. DOI: 10.3390/s23177347.

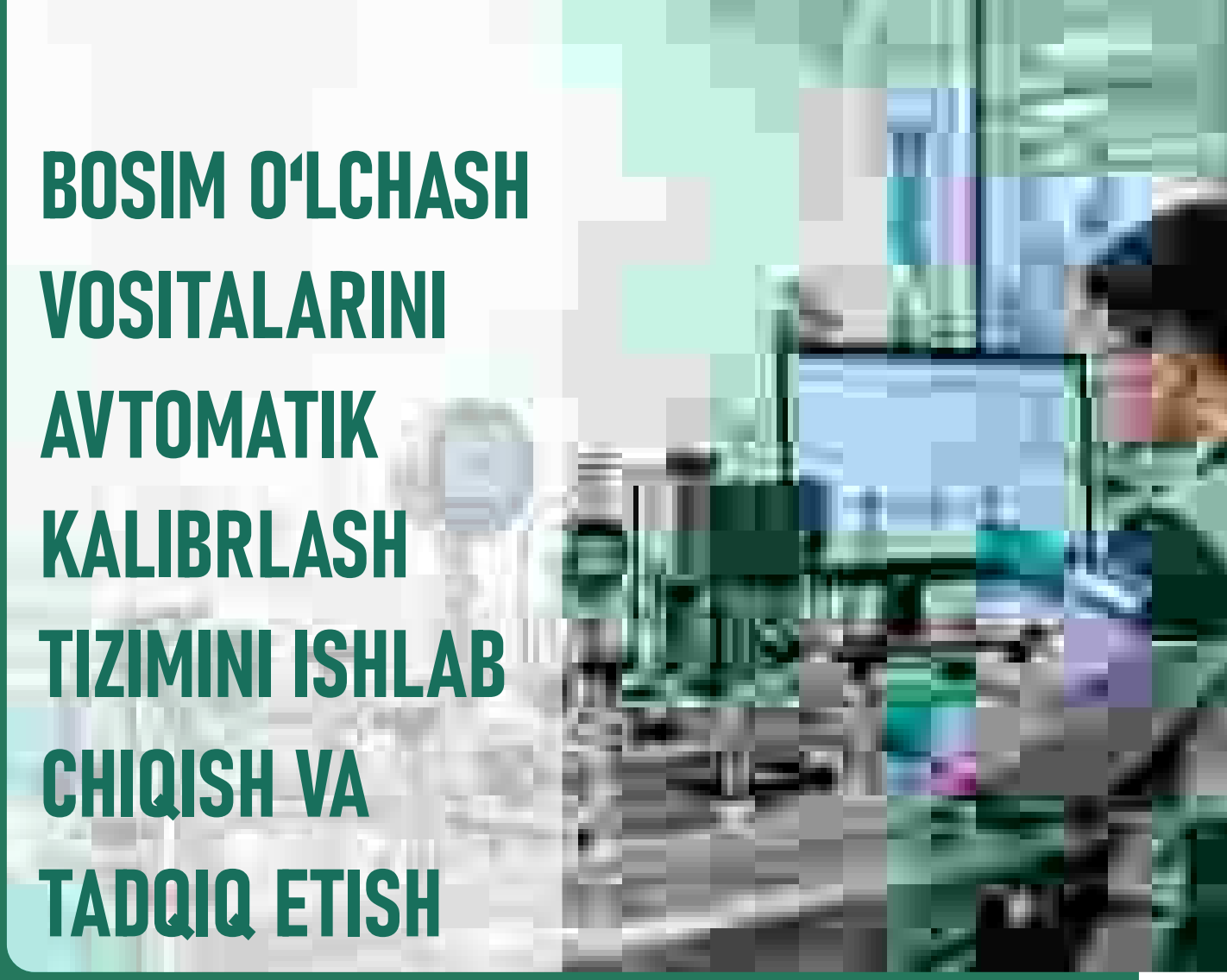
8. Grykalowska A., Kowal A., Szmyrka-Grzebyk A. The Basics of Calibration Procedure and Estimation of Uncertainty Budget for Meteorological Temperature Sensors // Meteorological Applications. 2015. Vol. 22. P. 867–872. DOI: 10.1002/met.1527

9. JCGM 101:2008. Evaluation of measurement data – Supplement 1 to the GUM – Propagation of distributions using a Monte Carlo method. Joint Committee for Guides in Metrology, 2008.

10. Ismoilov M. et al. Analysis of a modern method for calibrating resistance thermometers //E3S Web of Conferences. – EDP Sciences, 2025. – T. 627. – C. 04004.

11. Rahimov A. K., Sh A. O., Mamadiyorov S. S. Signal generatsiyasi va uning chastota spektrini tahlil qilish //International Journal of Advanced Technology and Natural Sciences. – 2025. – T. 6. – №. 1. – C. 22-26.

BOSIM O‘LCHASH VOSITALARINI AVTOMATIK KALIBRLASH TIZIMINI ISHLAB CHIQISH VA TADQIQ ETISH



Mahmudov G‘iyosjon Baqoyevich
texnika fanlari bo‘yicha falsafa doktori, dotsent
Navoiy davlat konchilik va texnologiyalar universiteti “Metrologiya, standartlashtirish va sertifikatlash” kafedrasi mudiri

E-mail: mahmudov.giyos@mail.ru

Orziyev Jonibek Obidjonovich
Navoiy davlat konchilik va texnologiyalar universiteti “Metrologiya, standartlashtirish va sertifikatlash” kafedrasi tayanch doktaranti

E-mail: jorziyev@gmail.com

Annotatsiya. Ushbu maqolada sanoat va laboratoriya sharoitida qo‘llaniladigan bosim o‘lchash vositalarini metrologik tekshiruvdan o‘tkazish jarayonini avtomatlashtirish muammosi ko‘rib chiqilgan. Ishlab chiqilgan tizimning struktura-funksional sxemasi, apparat va dasturiy ta’minoti, shuningdek kalibrlash algoritmi tavsiflangan. Tajriba natijalari avtomatik usulning o‘lchash xatoligini va vaqt sarfini qo‘lda bajariladigan usulga nisbatan bir necha barobar kamaytirishini tasdiqladi.

Kalit so‘zlar: bosim o‘lchash vositasi, avtomatik kalibrlash tizimi, metrologik ta’minot, o‘lchash xatoligi, etalon bosim generatori, PLC kontroller, dasturiy ta’minot, aniqlik sinfi, kalibrlash protokoli, o‘lchash noaniqligi, izlanuvchanlik zanjiri.

Аннотация. В данной статье рассмотрена проблема автоматизации процесса метрологической поверки средств измерения давления, применяемых в промышленных и лабораторных условиях. Описаны структурно-функциональная схема разработанной системы, её аппаратное и программное обеспечение, а также алгоритм калибровки. Результаты эксперимента подтвердили значительное снижение погрешности измерения и затрат времени по сравнению с ручным методом.

Ключевые слова: средство измерения давления, автоматическая калибровка, метрологическое обеспечение, погрешность измерения, эталонный генератор давления, ПЛК контроллер, программное обеспечение, класс точности, протокол калибровки, неопределённость измерения, цепь прослеживаемости.

Abstract: this article addresses the automation of the metrological verification process for pressure measuring instruments used in industrial and laboratory conditions. The structural-functional scheme, hardware and software of the developed system, and the calibration algorithm are described. Experimental results confirmed a significant reduction in measurement error and time compared to the manual method.

Keywords: pressure measuring instrument, automatic calibration system, metrological assurance, measurement error, reference pressure generator, PLC controller, software, accuracy class, calibration protocol, measurement uncertainty, traceability chain.

Kirish. Bosim o‘lchash vositalari (manometrlar va bosim datchiklari,) sanoatning deyarli barcha tarmoqlarida – energetika, neft-gaz, kimyo, mashinasozlik va boshqa sohalarda – texnologik jarayonlarni nazorat qilish va boshqarishning muhim vositasi hisoblanadi. Ushbu vositalarning ko‘rsatkichlari aniqligi ishlab chiqarish xavfsizligi, mahsulot sifati va energiya resurslaridan oqilona foydalanish bilan bevosita bog‘liq. Shu sababli bosim o‘lchash vositalarini davriy ravishda metrologik tekshiruvdan (kalibrlashdan) o‘tkazib turish O‘zbekiston Respublikasining metrologiya sohasidagi qonunchiligi hamda tegishli me’yoriy-texnik hujjatlar talablariga muvofiq majburiy hisoblanadi.

An’anaviy, ya’ni qo‘lda bajariladigan kalibrlash jarayoni bir qator kamchiliklarga ega: operator xatoligining yuqori ehtimoli, jarayonning uzoq davom etishi, natijalarni qo‘lda qayd etish va qayta ishlashda yo‘l qo‘yiladigan noaniqliklar, shuningdek katta hajmdagi o‘lchash vositalarini tekshirishda vaqt va mehnat sarfining ortishi. Bu holat, o‘z navbatida, kalibrlash markazlari va metrologiya xizmatlarining unumdorligini pasaytiradi.

Yuqoridagi muammolarni bartaraf etish maqsadida bosim o‘lchash vositalarini avtomatik kalibrlash tizimlarini ishlab chiqish va joriy etish dolzarb vazifalardan biri hisoblanadi. Avtomatik tizimlar operator omilini minimallashtirish, o‘lchash jarayonini tezlashtirish, natijalarni raqamli ko‘rinishda saqlash va qayta ishlash imkoniyatlarini beradi [3; B.3].

Mazkur tadqiqotning maqsadi – bosim o‘lchash vositalarini avtomatik kalibrlash tizimini ishlab chiqish, uning struktura-funksional tuzilishini asos-

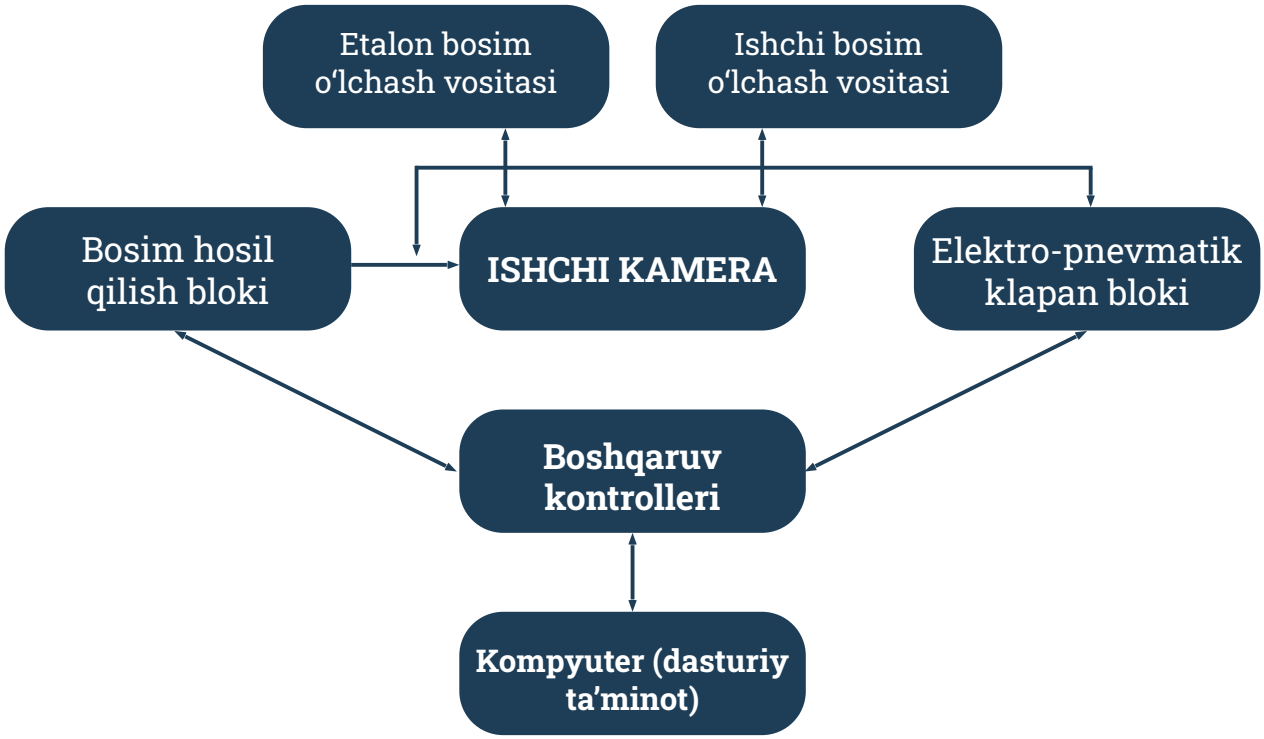
lash hamda tajriba natijalari asosida tizimning metrologik samaradorligini baholashdan iborat. Tadqiqot vazifalari sifatida quyidagilar belgilandi: tizimning apparat va dasturiy ta’minotini ishlab chiqish; kalibrlash algoritmini ishlab chiqish; tizimni sinovdan o‘tkazish va olingan natijalarni qo‘lda bajariladigan usul natijalari bilan solishtirish.

Adabiyotlar tahlili va metodologiyasi. Bosim o‘lchash vositalarini kalibrlash masalalari bo‘yicha xorijiy va mahalliy adabiyotlarda bir qator ishlar chop etilgan. Xususan, [3; B.4] da bosim o‘lchash vositalarining metrologik xususiyatlarini baholash usullari, [4; B.40] da esa avtomatlashtirilgan sinov stendlarining umumiy tuzilishi tahlil qilingan. Shu bilan birga, mavjud tadqiqotlarning aksariyati alohida komponentlarni (masalan, etalon generatorlarni yoki dasturiy ta’minotni) yakka holda ko‘rib chiqadi, tizimni yaxlit metrologik yechim sifatida loyihalashtirishga esa yetarlicha e’tibor qaratilmagan.

Ishlab chiqilgan avtomatik kalibrlash tizimi quyidagi asosiy tarkibiy qismlardan iborat (1-rasm): etalon bosim generatori, etalon bosim datchigi (aniqlik sinfi 0,02), boshqaruv kontrolleri, elektro-pnevmatik klapanlar bloki, nazorat qilinuvchi bosim o‘lchash vositasi va dasturiy ta’minot bilan jihozlangan kompyuter.

Tizimning ishlash prinsipi quyidagicha: kompyuterdagi dasturiy ta’minot orqali beriladigan buyruq asosida boshqaruv kontrolleri elektro-pnevmatik klapanlar blokini boshqaradi, natijada bosim hosil qilish bloki zarur bosim qiymatini shakllantiradi. Shakllangan bosim bir vaqtning o‘zida etalon bosim o‘lchash vositasi va nazorat qilinuvchi vosita orqali o‘lchanadi. Ikkala qurilmadan olingan ko‘rsatkichlar orasidagi farq (xatolik) kontroller tomonidan hisoblanib, natija avtomatik ravishda ma’lumotlar bazasiga yoziladi hamda kalibrlash protokoli shakllantiriladi.

1-rasm. Bosim o‘lchash vositlarini avtomatik kalibrlash tizimining struktrur sxemasi



Kalibrlash algoritmi bosqichma-bosqich quyidagi tartibda amalga oshiriladi: 1) boshlang‘ich (nol) nuqtada tekshirish; 2) o‘lchov diapazonini teng oraliqlarga bo‘lgan holda bosim nuqtalarini ketmaket berish (odatda 5–11 nuqta); 3) har bir nuqtada bosimni statsionar holatga keltirish va kutish vaqtini ta’minlash (3–5 sekund); 4) etalon va nazorat qilinuvchi vositalar ko‘rsatkichlarini bir vaqtda qayd etish; 5) yo‘l qo‘yilgan xatolikni hisoblash va uni ruxsat etilgan chegaraviy qiymat bilan solishtirish; 6) natijalarni statistik qayta ishlash (o‘rtacha qiymat, standart chetlanish, kengaytirilgan noaniqlikni hisoblash) va protokol shakllantirish. [1; B.6]

Tizimning dasturiy qismi Python dasturlash tilida ishlab chiqilgan bo‘lib, ma’lumotlarni real vaqt rejimida qabul qilish, saqlash va vizualizatsiya qilish funksiyalarini bajaradi. Apparat qismi bilan aloqa RS-485 interfeysi orqali Modbus RTU protokoli asosida amalga oshiriladi.

Natijalar. Ishlab chiqilgan tizimning samaradorligini baholash maqsadida 0–1000 kPa diapazonli sanoat manometri namunasida sinov o‘tkazildi. Sinov ikki usulda – an’anaviy qo‘lda kalibrlash va ishlab chiqilgan avtomatik tizim yordamida – bir xil sharoitlarda (harorat 20±2 °C, namlik 45–60%) amalga oshirildi. Olingan natijalar 1-jadvalda keltirilgan.

1-jadval. Qo‘lda va avtomatik kalibrlash natijalarining taqqoslanishi

№	Bosim nuqtasi, kPa	Qo‘lda kalibrlashda xatolik, %	Avtomatik kalibrlashda xatolik, %
1	0	0.42	0.11
2	100	0.38	0.09
3	200	0.35	0.08
4	300	0.31	0.07
5	400	0.33	0.06
6	500	0.29	0.05
7	600	0.27	0.06
8	700	0.30	0.07
9	800	0.34	0.08
10	900	0.37	0.09
11	1000	0.41	0.10

2-rasm. Qo‘lda va avtomatik kalibrlash usullarida o‘lchash xatoligining taqqoslanishi



2-rasmda va 1-jadvalda keltirilgan ma’lumotlardan ko‘rinib turibdiki, avtomatik kalibrlash usulida o‘lchash xatoligi butun diapazon bo‘yicha 0,05-0,11% oralig‘ida bo‘lib, bu qo‘lda bajarilgan kalibrlashdagi 0,27-0,42% ko‘rsatkichdan sezilarli darajada past. O‘rtacha xatolikning kamayishi taxminan 3,8 baravarni tashkil etdi.

Bundan tashqari, bitta o‘lchash vositasini to‘liq tekshirishga (11 nuqtada) sarflanadigan vaqt qo‘lda usulda o‘rtacha 42 daqiqani, avtomatik tizimda esa 11 daqiqani tashkil etdi, ya’ni vaqt sarfi qariyb 3,8 barobarga qisqardi. Kengaytirilgan o‘lchash noaniqligi (k=2 uchun) avtomatik tizimda 0,04% ni tashkil etib, bu tizimning yuqori aniqlikdagi (0,1 va undan yuqori aniqlik sinfli) o‘lchash vositalarini kalibrlash uchun yaroqli ekanligini tasdiqlaydi.

Muhokama. Olingan natijalar shuni ko‘rsatadiki, taklif etilgan avtomatik kalibrlash tizimi o‘lchash xatoligini kamaytirish va kalibrlash jarayonini tezlashtirish borasida qo‘lda bajariladigan usulga nisbatan sezilarli ustunlikka ega. Bunga asosiy sabab quyidagilar hisoblanadi: birinchidan, bosimni shakllantirish va o‘lchash jarayonida operatorning subyektiv ta’siri istisno etiladi; ikkinchidan, bosimni statsionar holatga keltirish vaqti dastur orqali qat’iy nazorat qilinadi, bu esa dinamik xatoliklarni kamaytiradi; uchinchidan, natijalarni qayd etish va hisoblash jarayoni to‘liq avtomatlashtirilgani sababli inson omili bilan bog‘liq xatoliklar bartaraf etiladi.

Shu bilan birga, ishlab chiqilgan tizim bir qator cheklovlarga ham ega. Xususan, tizimning yuqori bosim diapazonlarida (10 MPa dan yuqori) ishlashi uchun qo‘shimcha xavfsizlik choralari va quvvatliroq bosim generatorlarini qo‘llash talab etiladi. Bundan tashqari, tizimning dastlabki sozlash va etalon vositalarni davriy attestatsiyadan o‘tkazish xarajatlari qo‘lda usulga nisbatan yuqoriroq bo‘lishi mumkin, biroq bu xarajatlar tizimning uzoq muddatli ekspluatatsiyasi davomida operatsion xarajatlarning qisqarishi hisobiga oqlanadi.

Mazkur natijalar tadqiqotlarda keltirilgan natijalar bilan umumiy tendensiya jihatidan mos kelib, avtomatlashtirilgan kalibrlash tizimlarining metrologik xizmatlar samaradorligini oshirishdagi ahamiyatini yana bir bor tasdiqlaydi. Kelgusi tadqiqotlarni tizimni bir nechta bosim turi (mutlaq, ortiqcha, differensial) uchun universallashtirish hamda o‘z-o‘zini diagnostika qilish funksiyasini joriy etish yo‘nalishida davom ettirish maqsadga muvofiqdir [6; B.40].

Xulosa. Tadqiqot natijasida bosim o‘lchash vositalarini avtomatik kalibrlash tizimi ishlab chiqildi va tajribada sinovdan o‘tkazildi. Tizimning strukturafunksional sxemasi, apparat va dasturiy ta’minoti hamda kalibrlash algoritmi asoslandi. Amalga oshirilgan tajribalar avtomatik tizimning o‘lchash xatoligini o‘rtacha 3,8 barobar, kalibrlashga sarflanadigan vaqtni esa taxminan shu miqdorda kamaytirishini ko‘rsatdi. Kengaytirilgan o‘lchash noaniqligi 0,04% ni tashkil etib, tizim yuqori aniqlikdagi bosim o‘lchash vositalarini metrologik tekshiruvdan o‘tkazish uchun yaroqli ekanligi aniqlandi.

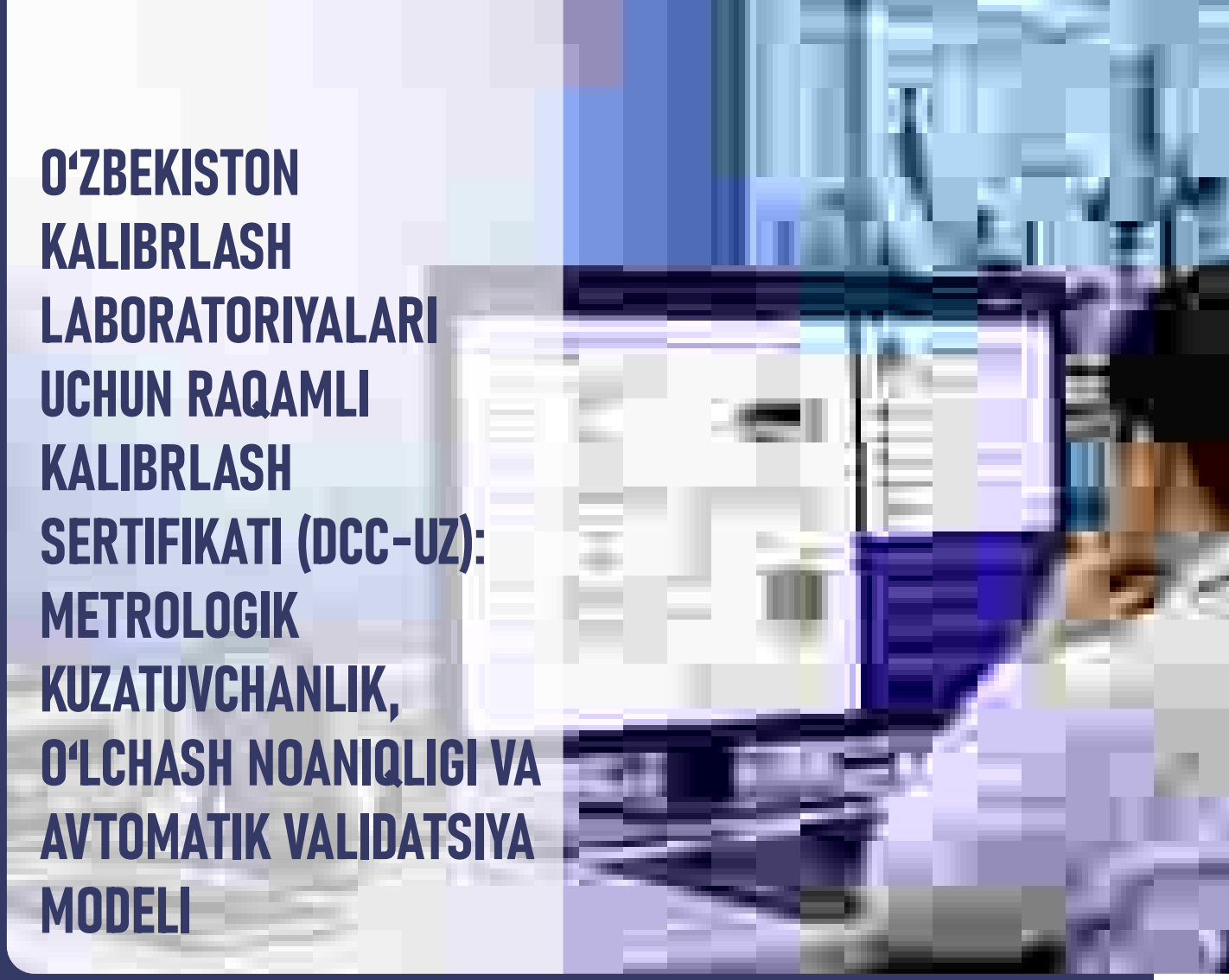
Ishlab chiqilgan tizimni metrologiya markazlari va sanoat korxonalarining kalibrlash laboratoriyalarida joriy etish o‘lchash vositalarini tekshirish sifatini oshirish, xarajatlarni kamaytirish hamda metrologik xizmatlar unumdorligini yaxshilashga xizmat qiladi. Keyingi tadqiqotlar tizimni turli xil bosim o‘lchash vositalari va kengroq diapazonlar uchun moslashtirishga qaratilishi lozim.

Foydalanilgan adabiyotlar ro'yxati:

1. Ismoilov M. et al. Improving the quality of signals using an adaptive filter // E3S Web of Conferences. – EDP Sciences, 2024. – T. 525. – C. 05010.
2. Jumaev O. et al. Fuzzy-logic system for regulating the temperature regime of a bioreactor in the process of bacterial oxidation //E3S Web of Conferences. – EDP Sciences, 2024. – T. 525. – C. 05011
3. Madhu A. S. et al. Automatic pressure calibration system for pressure sensors //FME Transactions. – 2019. – T. 47. – №. 1. – C. 111-115.
4. Petrov I.S., Sidorova E.V. Sistemy avtomaticheskoy poverki sredstv izmereniya davleniya // Izmeritelnaya tehnika. – Moskva, 2018. №7. S. 40-45.
5. Rahimov A. K., Sh A. O., Mamadiyorov S. S. Signal generatsiyasi va uning chastota spektrini tahlil qilish //International Journal of Advanced Technology and Natural Sciences. – 2025. – T. 6. – №. 1. – C. 22-26.
6. Rahimov A., Orziyev J. Past va yuqori chastotali filtrlarni tahlil qilish va simulyatsiya qilish usulini tadqiq etish //International Journal of Advanced Technology and Natural Sciences. – 2024. – T. 5. – №. 4. – C. 102-105.
7. Toshpo'latov R.N. O'lchash vositalarini kalibrlash asoslari: darslik. – Samarqand: SamDU nashriyoti, 2021. – B. 210.
8. O'zbekiston Respublikasining "Metrologiya to'g'risida"gi O'zbekiston Respublikasi Qonuniga o'zgartish va qo'shimchalar kiritish haqida"gi Qonuni. – Toshkent, 2020-y. 7-aprel, O'RQ-614-son.
9. Yusupova M.K. Bosim o'lchash sohasida raqamli texnologiyalarni qo'llash // Metrologiya muammolari. – Toshkent, 2023. №1. B. 15-19.



O‘ZBEKISTON KALIBRLASH LABORATORIYALARI UCHUN RAQAMLI KALIBRLASH SERTIFIKATI (DCC-UZ): METROLOGIK KUZATUVCHANLIK, O‘LCHASH NOANIQLIGI VA AVTOMATIK VALIDATSIYA MODELI



Mamatov Akmaljon Abduqahhor o‘g‘li
Farg‘ona davlat texnika universiteti
“Elektronika va asbobsozlik” kafedrasi
katta o‘qituvchi

E-mail: akmaljon.mamatov@fstu.uz

Annotatsiya: O‘zbekiston kalibrlash laboratoriyalari uchun mavjud PDF hisobot bilan parallel ishlashga mo‘ljallangan mashinada o‘qiladigan DCC-UZ minimal profili ishlab chiqildi. Profil o‘lchash natijasi, SI birligi, u_c, k, U, kuzatuvchanlik va ma’lumot yaxlitligini bog‘laydi. 40 ta mos va 80 ta bittadan nazoratli xato kiritilgan sintetik sertifikatda strukturaviy tekshiruv 37,5 %, qoidaviy validator 98,75 % xatoni aniqladi; 40 ta mos yozuvning barchasi qabul qilindi. Ko‘rsatkichlar faqat ushbu sintetik to‘plam va sakkiz xato turi doirasiga tegishli.

Kalit so‘zlar: raqamli kalibrlash sertifikati, DCC-UZ, metrologik kuzatuvchanlik, o‘lchash noaniqligi, kalibrlash, SI birliklari, ISO/IEC 17025, raqamli metrologiya, Industry 4.0, qoidalarga asoslangan validatsiya, ma’lumotlar yaxlitligi, laboratoriya axborot tizimi.

Аннотация: Для калибровочных лабораторий Узбекистана разработан машиночитаемый минимальный профиль DCC-UZ, предназначенный для параллельного использования с существующими PDF-отчётами. Профиль связывает результат измерения, единицу СИ, u_c, k, U, прослеживаемость и целостность данных. На 40 корректных и 80 синтетических сертификатах с одной контролируемой ошибкой структурная проверка выявила 37,5 % ошибок, а валидатор на основе правил - 98,75 %; все 40 корректных записей приняты. Показатели относятся только к данному синтетическому набору и восьми типам ошибок.

Ключевые слова: цифровой калибровочный сертификат, DCC-UZ, метрологическая прослеживаемость, неопределённость измерений, калибровка, единицы СИ, ISO/IEC 17025, цифровая метрология, Индустрия 4.0, валидация на основе правил, целостность данных, лабораторная информационная система.

Abstract: A machine-readable minimal DCC-UZ profile is developed for calibration laboratories in Uzbekistan to operate in parallel with existing PDF reports. The profile links the measurement result, SI unit, u_c, k, U, traceability, and data-integrity fields. In tests with 40 conforming and 80 synthetic certificates containing one controlled error each, structure-only validation detected 37.5% of errors and the rule-based validator 98.75%; all 40 conforming records were accepted. These figures apply only to this synthetic dataset and the eight injected error classes.

Keywords: digital calibration certificate, DCC-UZ, metrological traceability, measurement uncertainty, calibration, SI units, ISO/IEC 17025, digital metrology, Industry 4.0, rule-based validation, data integrity, laboratory information system.

Kirish. Sanoat, energetika, tibbiyot, qurilish va oziq-ovqat tarmoqlarida qabul qilinadigan qarorlarning ishonchliligi o‘lchash natijalarining sifatiga bog‘liq. Kalibrlash sertifikati o‘lchash vositasining ko‘rsatishi, unga tegishli tuzatma, o‘lchash noaniqligi, qo‘llanilgan etalonlar va metrologik kuzatuvchanlik zanjirini hujjatlashtiradi. Amaliyotda bunday ma’lumotlar ko‘pincha PDF yoki qog‘oz shaklida uzatiladi. Hujjat inson uchun o‘qilishi qulay bo‘lsa-da, undagi qiymatlarni laboratoriya axborot tizimi, korxonaning resurslarni boshqarish platformasi yoki ishlab chiqarish nazorati tizimiga qayta kiritish talab etiladi. Bu jarayonda o‘nli ajratgich, birlik belgisi, sertifikat raqami, noaniqlik yoki amal qilish muddati kabi maydonlarda xato paydo bo‘lishi mumkin.

Industry 4.0 sharoitida o‘lchash natijasi alohida hujjat emas, balki raqamli qiymat yaratish zanjirining bir qismidir. Aqlli ishlab chiqarish sensorlar, hisoblash platformalari, aloqa tarmoqlari, ma’lumotga asoslangan modellar va avtomatik boshqaruvni yagona muhitda birlashtiradi [10; B.312-314]. Shuning uchun kalibrlash ma’lumotlari ham mashinada o‘qiladigan, semantik jihatdan bir ma’noli va avtomatik tekshiriladigan ko‘rinishda bo‘lishi lozim. Metrologiyaning raqamli transformatsiyasi katta hajmdagi ma’lumotlarni tahlil qilish, ra-

qamli metrologik xizmatlar, aloqa tizimlari va virtual o‘lchash jarayonlari bilan bog‘liq asosiy yo‘nalishlarni qamrab oladi [1; B.2-3].

Raqamli kalibrlash sertifikati (Digital Calibration Certificate, DCC) kalibrlash natijalarini standartlashtirilgan va mashinada talqin qilinadigan tuzilma orqali almashishga qaratilgan yondashuvdir. DCC konsepsiyasida inson o‘qiydigan hisobot bilan birga qiymat, birlik, noaniqlik, kuzatuvchanlik va identifikatsiya ma’lumotlari tizimlar tomonidan bevosita qayta ishlanishi mumkin [5; B.2-6]. Bu yondashuv qo‘lda ma’lumot kiritishdagi uzilishlarni kamaytiradi, sertifikatni avtomatik qabul qilish, o‘lchash vositasining holatini baholash va qayta kalibrlash muddatini boshqarishni tezlashtiradi.

Metrologik kuzatuvchanlik natijani hujjatlashtirilgan uzluksiz kalibrlashlar zanjiri orqali belgilangan etalonga bog‘laydi; zanjirning har bir bo‘g‘ini o‘lchash noaniqligiga hissa qo‘shadi [12; B.14]. Faqat yuqori darajadagi etalonda kalibrlangan vositadan foydalanishning o‘zi kuzatuvchanlik da’vosini avtomatik ravishda isbotlamaydi. O‘lchash jarayoni, qo‘llanilgan usul, etalon identifikatori, uning amal qilish holati va noaniqlik ma’lumotlari birgalikda hujjatlashtirilishi kerak [12; B.20]. Shu sababli DCC ma’lumot modeli oddiy elektron blank emas, balki kuzatuvchanlik dalillarini raqamli shaklda bog‘lovchi metrologik obyekt bo‘lishi lozim.

O‘zbekistonda kalibrlash ma’lumotlarini raqamlashtirish uchun xalqaro DCC ishlanmalarini to‘g‘ridan-to‘g‘ri ko‘chirishning o‘zi yetarli emas. Asosiy ilmiy muammo shundaki, sertifikat strukturaviy jihatdan to‘liq bo‘lsa ham birlik, noaniqlik, kuzatuvchanlik va o‘lchash kontekstidagi metrologik nomuvofiqliklarni avtomatik aniqlash usuli yetarlicha aniqlashtirilmagan. Mahalliy LIMS yechimlari, o‘zbek va rus tillaridagi hujjatlar hamda milliy etalonlarga havola berish tartibini hisobga oluvchi minimal profil ham zarur. Shu sababli tadqiqot maqsadi ISO/IEC 17025 hisobot mazmunini DCC-UZ profiliga xaritalash va strukturaviy tekshiruvni metrologik qoidalar bilan birlashtirgan validatsiya yondashuvini sintetik sinovda baholashdan iborat. Ilmiy yangilik $U=k\cdot u_c$ izchilligi, birlik-kattalik mosligi, etalon amal qilish holati, yaxlitlash va muhit shartlarini bitta sertifikat obyektida o‘zaro bog‘liq qoidalar sifatida tekshirishidadir.

Adabiyotlar tahlili. Raqamli metrologiya bo‘yicha tadqiqotlar o‘lchash ma’lumotlarini mashinada qayta ishlash uchun birliklar, kattaliklar va metama’lumotlarning yagona semantikasini talab qiladi. Brown va hammualliflar SI tizimi uchun raqamli ramka o‘lchash birliklarini faqat matn belgisi sifatida emas, balki tizimlararo almashishga yaroqli formal obyekt sifatida ifodalashi kerakligini ko‘rsatgan [2; B.1-2]. Chalk va hammualliflar esa SI ma’lumotlari FAIR, ya’ni topiladigan, foydalanish mumkin bo‘lgan, o‘zaro ishlaydigan va qayta foydalaniladigan tamoyillarga muvofiq taqdim etilishini xalqaro ilmiy ma’lumot almashinuvi uchun zarur deb hisoblaydi [3; B.1-2].

Kattalik va birliklarni raqamli tizimlarda to‘g‘ri ifodalashning murakkabligi bir xil belgining turli kontekstlarda boshqa ma’noda ishlatilishi, prefiks va o‘lchamlar o‘rtasidagi farq, o‘nli ajratgich hamda kodlash bilan bog‘liq. Hall va Kuster metrologik dasturlarda qiymatning o‘zi bilan birga kattalik turi, birlik va ularning mashinada tekshiriladigan identifikatori saqlanishi kerakligini asoslaydi [6; B.1] [7; B.1-2]. Bu qoida DCC-UZ profilida o‘lchanadigan kattalik, qiymat va birlik uchligini ajralmas ma’lumot birligi sifatida qabul qilishga asos bo‘ldi.

Eichstädt, Keidel va Tesch raqamli davr metrologiyasini o‘lchash natijalari,

hisoblash modellari va raqamli xizmatlar o‘rtasidagi ishonchni ta’minlash vazifasi bilan izohlaydi [4; B.1-2]. Xiong va hammualliflar metrologik ma’lumot uchun ko‘p qatlamli raqamli ramka taklif qilib, ma’lumot obyektlarining identifikatsiyasi va semantik bog‘lanishi keyingi avtomatlashtirishning zarur sharti ekanini ko‘rsatadi [13; B.1-2]. Raqamli hujjatda faqat maydon nomi bo‘lishi yetarli emas; qiymatning qaysi o‘lchash nuqtasiga, qaysi asbobga, qaysi usulga va qaysi etalonga tegishli ekanligi aniq bog‘lanishi kerak. Yaqin yo‘nalishdagi IoT-sensorlar bo‘yicha amaliy tadqiqotlarda ham sensor ma’lumotining ishonchliligi kalibrlash, o‘lchash noaniqligi va ma’lumot yaxlitligini birgalikda nazorat qilish bilan bog‘langan [17; B.1377-1385]. Bu holat DCC-UZda metrologik va yaxlitlik metama’lumotlarini bitta raqamli obyekt doirasida bog‘lash zaruratini qo‘llab-quvvatlaydi.

DCC bo‘yicha PTB tajribasida XML asosidagi ochiq tuzilma kalibrlash piramidasining milliy metrologiya institutidan sanoatdagi foydalanuvchigacha bo‘lgan bo‘g‘inlarini raqamli bog‘lash vositasi sifatida qaraladi [5; B.2-6]. Mashinada talqin qilinadigan sertifikat ma’lumotlarni xatosiz uzatish, qayta foydalanish, audit izini saqlash va media uzilishlarini kamaytirishga xizmat qiladi [5; B.14-15]. Biroq strukturaviy formatning mavjudligi metrologik mazmunning to‘g‘riligini o‘z-o‘zidan kafolatlamaydi. Masalan, XML sxema “expandedUncertainty” maydonida son borligini tekshirishi mumkin, lekin bu son qamrov koeffitsienti va kombinatsiyalangan standart noaniqlik bilan matematik jihatdan mos ekanini alohida semantik qoida tekshiradi.

ISO/IEC 17025:2017 laboratoriya natijalarini aniq, ravshan, bir ma’noli va xolis tarzda, zarur ma’lumotlar bilan hisobot qilishni talab etadi [8; B.14-16]. Raqamli sertifikat shu talablarning texnologik ifodasi bo‘lib, unda laboratoriya va buyurtmachi identifikatsiyasi, usul, o‘lchash vositasi, natija, birlik, noaniqlik, qaror qoidasi zarur bo‘lgan holatlarda muvofiqlik bayonoti va tasdiqlovchi shaxs ma’lumotlari saqlanishi lozim. DCC-UZ profili ISO/IEC 17025 hisobot mazmunini almashtirmaydi; aksincha, mazkur ma’lumotlarni strukturalangan ko‘rinishga keltiradi.

O‘lchash noaniqligini raqamli muhitda uzatish uchun o‘lchanadigan kattalik (measurand)ning aniq ta’rifi va o‘lchash modeli asosiy ahamiyatga ega. JCGM GUM-6:2020 maqsadli noaniqlikni hisobga olgan holda o‘lchanadigan kattalikni amaliy maqsadlar uchun bir qiymatli qilib belgilash, zarur bo‘lsa harorat, bosim, vaqt va joy shartlarini ko‘rsatishni tavsiya qiladi [9; B.7]. Demak, raqamli sertifikatdagi “temperature” yoki “voltage” kabi umumiy nomlar yetarli emas; o‘lchash nuqtasi, diapazon, mos yozuvlar va muhit shartlari ham bog‘lanishi kerak. Ushbu tamoyil turli o‘lchash sohalaridagi amaliy ishlarda ham kuzatiladi: MEMS akselerometrlarini kalibrlashda noaniqlik bahosi kalibrlash modeli va etalon zanjiri bilan bog‘langan [14; B.140-144], optik quvvat o‘lchash zanjirida GUMga asoslangan parametrik model tizimning qaytgan nur ta’siriga sezgirligini miqdoriy baholash uchun qo‘llangan [15], kimyoviy o‘lchashlarda esa noaniqlikni qayta tiklashda kirish ma’lumotlarining kelib chiqishi va dalil darajasini alohida ko‘rsatish zarurligi asoslangan [16].

Raqamli egizaklar bo‘yicha yangi metrologik tadqiqotlar virtual va fizik obyekt o‘rtasidagi ma’lumot oqimiga ham noaniqlik va kuzatuvchanlik talablari qo‘llanishini ko‘rsatmoqda. Maculotti va hammualliflar virtual tajriba va raqamli egizaklarda fizikdan virtualga hamda virtualdan fizikka o‘tish kanallarining noaniqlik hissalarini baholash zarurligini asoslagan [11; B.337-340]. DCC mazkur tizimlar uchun kalibrlash holatini va sensorning noaniqlik parametrlarini

mashinada o‘qiladigan shaklda yetkazuvchi ishonchli kirish manbai bo‘lishi mumkin. Sensor oqimlarini virtual model bilan uzluksiz sinxronlashtiruvchi amaliy raqamli egizak arxitekturalari ham bunday mashinada o‘qiladigan metama’lumotlarga ehtiyojni kuchaytiradi [18; B.1049-1056].

Adabiyotlar tahlili uchta bo‘shliqni ko‘rsatdi. Birinchidan, xalqaro DCC sxemalari mavjud bo‘lsa-da, O‘zbekiston laboratoriyalari uchun mavjud PDF jarayonidan bosqichma-bosqich o‘tishga mos minimal profil tavsiflanmagan. Ikkinchidan, ko‘p ishlarda format va almashish imkoniyati yoritiladi, ammo birlik, noaniqlik va kuzatuvchanlik bog‘lanishlarini qoidaviy tekshirish samarasi nazoratli xatolar to‘plamida alohida baholanmagan. Uchinchidan, laboratoriyaning texnik yetukligiga mos joriy etish ketma-ketligi zarur. Ushbu ishning ilmiy hissasi DCC-UZ minimal profili, metrologik tekshiruv qoidalari va strukturaviy hamda qoidaviy validatsiyani bir tajriba dizaynida bog‘lashdan iborat.

Metodologiya. Tadqiqot dizayn-fan (design science) yondashuvi asosida bajarildi. Tadqiqot obyekti - kalibrlash sertifikatini shakllantirish, ichki tekshirish va axborot tizimiga uzatishdagi raqamli ma’lumot oqimi; predmeti - DCC-UZ maydonlari va ularning metrologik bog‘lanishlarini avtomatik tekshiruvchi qoidalar. Joriy prototip SI birliklarida ifodalanadigan skalyar sonli kalibrlash natijalariga qaratildi; kalibrlash egri chiziqlari, ko‘p o‘lchamli signallar va xom ma’lumot fayllari validatsiyasi ish doirasiga kiritilmadi. ISO/IEC 17025, JCGM GUM-6 va 2020–2024-yillardagi tegishli manbalar asosida majburiy elementlar, ularning turlari, bog‘lanishlari va tekshiruv qoidalari shakllantirildi. Yakunda profilning xato aniqlash qobiliyati nazoratli sintetik to‘plamda baholandi.

DCC-UZ profili to‘rtta mantiqiy qatlamga ajratildi: ma’muriy-identifikatsion qatlam; o‘lchash natijalari qatlami; noaniqlik va kuzatuvchanlik qatlami; ma’lumot yaxlitligi hamda o‘zaro ishlash qatlami. Har bir qatlam uchun majburiy va shartli maydonlar belgilandi. Minimal profil laboratoriyada mavjud PDF hisobotni birdaniga bekor qilishni talab qilmaydi: inson o‘qiydigan ko‘rinish saqlanadi, strukturalangan ma’lumot esa unga parallel raqamli obyekt sifatida yaratiladi. Bu yondashuv joriy LIMS tizimlariga bosqichma-bosqich integratsiya qilish uchun tanlandi.

1-jadval. DCC-UZ minimal profilining ma’lumot qatlamlari

Qatlam	Asosiy ma’lumot elementlari	Metrologik vazifa	Holati
1. Ma’muriy-identifikatsion	Sertifikat ID; versiya; laboratoriya; buyurtmachi; asbob ishlab chiqaruvchisi, turi, seriya raqami; berilgan sana	Hujjat va obyektni bir qiymatli identifikatsiya qilish	Majburiy
2. O‘lchash natijalari	O‘lchanadigan kattalik (measurand); o‘lchash nuqtasi; qiymat; SI birligi; tuzatma; usul; muhit shartlari	Natijani kontekst bilan birga mashinada talqin qilish	Majburiy
3. Noaniqlik va kuzatuvchanlik	u_c; k; U; qamrov ehtimoli; noaniqlik byudjeti; etalon ID; kalibrlash zanjiri; amal qilish muddati	Noaniqlik izchilligi va etalonga bog‘lanishni isbotlash	Majburiy/ shartli
4. Yaxlitlik va o‘zaro ishlash	Sxema versiyasi; birlik kodi; til; vaqt tamg‘asi; elektron imzo; xesh; ilovalar havolasi	O‘zgartirishni aniqlash, audit va tizimlararo almashish	Majburiy/ shartli

Profilning metrologik yadrosi natija va noaniqlik o‘rtasidagi bog‘lanishni saqlaydi. Agar laboratoriya kengaytirilgan noaniqlikni qamrov koeffitsienti orqali ifodalasa, sertifikatda kombinatsiyalangan standart noaniqlik u_c, qamrov koeffitsienti k va kengaytirilgan noaniqlik U alohida raqamli maydonlarda beriladi. Ularning asosiy izchillik munosabati quyidagicha:



1)

Validator sertifikatda keltirilgan U qiymatini hisoblangan k·u_c qiymati bilan taqqoslaydi. Sonlarni yaxlitlash natijasidagi juda kichik tafovutlarni xato deb belgilamaslik uchun nisbiy chetlanish mezoni qo‘llanildi:



2)

Bu yerda ε nolga bo‘lishni oldini oluvchi juda kichik musbat son. Mazkur tajribada δ_U ≤ 1 % bo‘lsa, qiymatlar o‘zaro mos deb qabul qilindi. Ushbu 1 % chegara sintetik sinov uchun tanlangan operatsion mezon bo‘lib, universal metrologik talab sifatida talqin qilinmaydi. Qamrov ehtimoli, birlik kodi, o‘lchanadigan kattalik tavsifi, etalonning amal qilish sanasi va muhit shartlari alohida qoidalar bilan tekshirildi.

Strukturaviy to‘liqlik T majburiy maydonlarning nechta qismi mavjudligi orqali baholandi:



3)

Biroq T = 100 % bo‘lishi sertifikatning metrologik jihatdan to‘g‘ri ekanini anglatmaydi. Masalan, barcha maydonlar mavjud bo‘lib, birlik kodi noto‘g‘ri, U va k·u_c mos kelmasligi yoki etalon sertifikati o‘lchash sanasidan oldin amal qilishdan chiqqan bo‘lishi mumkin. Shu sababli ikki bosqichli tekshiruv tanlandi: birinchi bosqichda sxema va ma’lumot turlari, ikkinchi bosqichda metrologik semantika va biznes qoidalari tekshirildi.

2-jadval. DCC-UZ avtomatik validatsiya qoidalari

Kod	Tekshiruv qoidasi	Tekshirish usuli	Natija
R1	Sertifikat, laboratoriya va asbob identifikatorlari mavjud va yagona	Majburiy maydon + format + dublikat nazorati	Qabul/rad
R2	Sana ISO 8601 formatida va mantiqiy ketma-ketlikda	YYYY-MM-DD; berish sanasi ≥ kalibrlash sanasi	Qabul/rad
R3	O‘lchanadigan kattalik va birlik kodi semantik lug‘atga mos	Miqdor-birlik mosligi va ruxsat etilgan SI kodi	Qabul/ogohlantirish
R4	Kengaytirilgan noaniqlik izchil	δ_U ≤ 1 % bo‘yicha U va k·u_c taqqoslanadi	Qabul/rad
R5	Qamrov koeffitsienti va ehtimoli ko‘rsatilgan	Sonli diapazon va majburiy maydon nazorati	Qabul/rad
R6	Kuzatuvchanlik havolasi va etalon amal qilishi to‘g‘ri	Etalon ID, sertifikat sanasi, amal qilish muddati	Qabul/rad
R7	Natijani yaxlitlash noaniqlik razryadiga mos	Natija va U o‘nli razryadlarini qoidaviy solishtirish	Qabul/ogohlantirish
R8	Muhit shartlari usul chegarasida	Harorat/namlikni usul metama’lumoti bilan solishtirish	Qabul/rad
R9	Fayl yaxlitligi tasdiqlangan	Xesh va elektron imzo holati	Qabul/rad
R10	Sxema va lug‘at versiyalari ko‘rsatilgan	Versiya mosligi va eskirish nazorati	Qabul/ogohlantirish

Eksperimental sinov uchun 120 ta sintetik sertifikat yaratildi. Ulardan 40 tasi barcha qoidalarga mos nazorat yozuvlari, 80 tasi esa aynan bitta nazoratli xato kiritilgan yozuvlar bo‘ldi. Sakkiz xato turi teng taqsimlandi: majburiy maydonning yo‘qligi; sana yoki ma’lumot turi xatosi; noaniq birlik kodi; U va k·u_c nomuvofiqligi; qamrov ehtimolining yo‘qligi; muddati o‘tgan kuzatuvchanlik havolasi; noto‘g‘ri yaxlitlash; muhit shartlarining usul chegarasidan chiqishi. R9 va R10ni to‘liq tekshirish tashqi ishonch xizmati va versiyalar reyestrini talab qilgani sababli ular statistik sinovga kiritilmadi, faqat tegishli maydonlarning mavjudligi tekshirildi. Har bir yozuv avval strukturaviy sxema, so‘ng DCC-UZ qoidalari bilan tekshirildi. Ushbu tajriba qoidalarning nazorat ostidagi xatolarga reaksiyasini baholaydi; real laboratoriyalardagi xatolar chastotasini modellashtirmaydi.



4)

5)

6)

Natijalarni baholashda xato sertifikatni aniqlash sezgirligi, to‘g‘ri sertifikatni qabul qilish xosligi va umumiy aniqlik hisoblandi. Haqiqiy musbat TP validator aniqlagan xato sertifikatlar, soxta manfiy FN o‘tkazib yuborilgan xato sertifikatlar, haqiqiy manfiy TN to‘g‘ri qabul qilingan mos sertifikatlar va soxta musbat FP asossiz rad etilgan mos sertifikatlar sifatida belgilandi. Taklif etilgan DCC-UZ arxitekturasi va ma’lumot oqimi 1-rasmda ko‘rsatilgan.

1-rasm. DCC-UZ arxitekturasi va ma’lumot oqimi (muallif ishlanmasi)



Natijalar. DCC-UZ profilida o‘lchash natijasi alohida son sifatida emas, sertifikat IDsi, o‘lchash vositasi, usul, measurand, birlik, noaniqlik va etalon bilan bog‘langan yozuv sifatida saqlanadi. Shu bog‘lanish LIMSda asbobning kalibrlash tarixini avtomatik shakllantirish, sertifikat holatini tekshirish va natijani ishlab chiqarish nazorati tizimiga qayta qo‘lda kiritmasdan uzatish imkonini beradi. Amaliy jihatdan bu “PDFni ochish - qiymatni ko‘chirish - boshqa tizimga kiritish - qayta tekshirish” zanjiridagi qo‘lda bajariladigan bosqichlarni kamaytiradi.

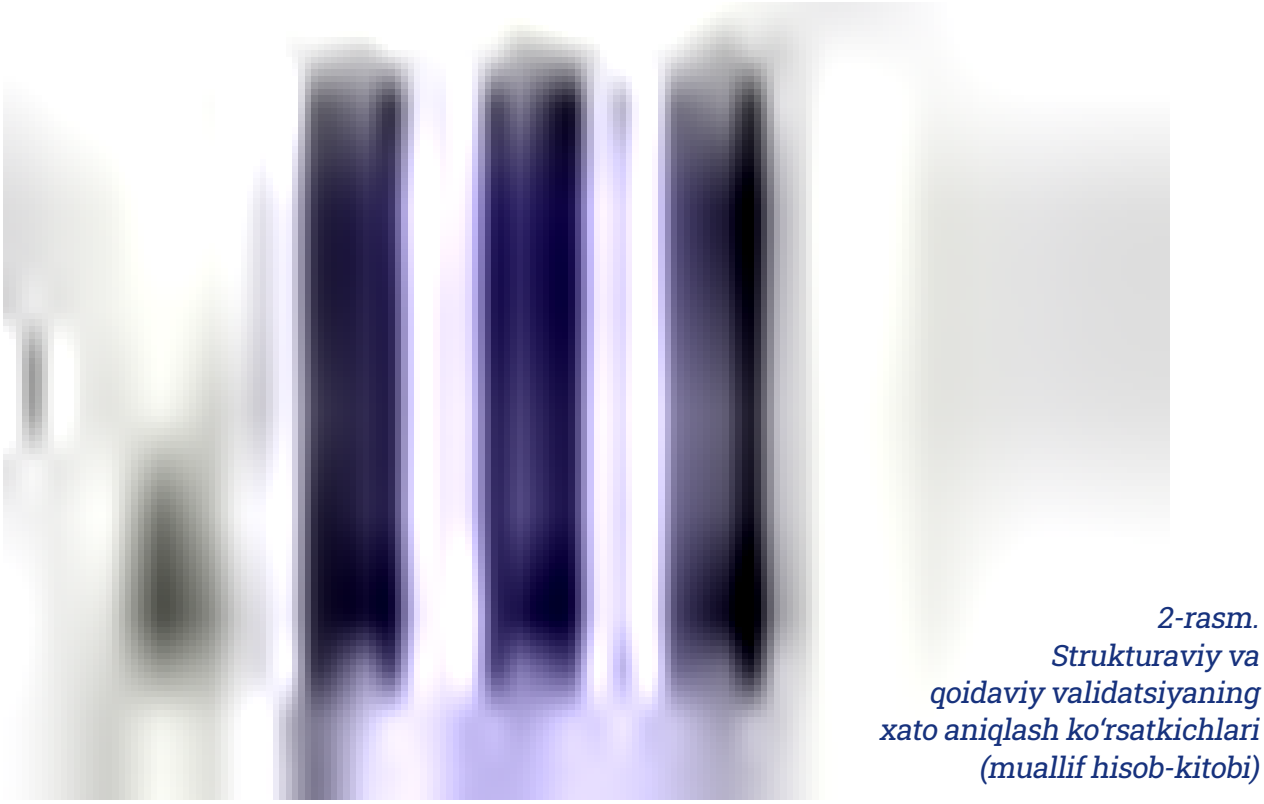
120 ta sintetik yozuv bo‘yicha strukturaviy sxema tekshiruvi 80 ta xato sertifikatdan 30 tasini aniqladi. Bu 37,5 % sezgirlikka teng. Sxema asosan majburiy maydonning yo‘qligi, noto‘g‘ri sana turi va qamrov ehtimoli maydonining mavjud

emasligini aniqladi. Birlikning semantik nomuvofiqligi, noaniqlik tenglamasidagi xato, etalon amal qilishining tugashi, natijani yaxlitlash va muhit chegarasidan chiqish kabi xatolar esa barcha zarur maydonlar mavjud bo‘lganligi sababli strukturaviy tekshiruvdan o‘tib ketdi.

Ushbu sintetik sinov to‘plami doirasida DCC-UZ qoidaviy validatori strukturaviy va metrologik tekshiruvlarni birlashtirib, 80 ta xato yozuvdan 79 tasini aniqladi; sezgirlik 98,75 % bo‘ldi. 40 ta mos yozuvning barchasi qabul qilindi (xoslik 100 %), umumiy aniqlik esa 119/120, ya’ni 99,17 % ni tashkil etdi. O‘tkazib yuborilgan yagona yozuv yaxlitlash chegarasiga yaqin holat bo‘lib, belgilangan tolerans ichida qoldi. Bu natija “qabul-ogohlantirish-rad” uch darajali holatning chegaraviy yozuvlarni ekspert ko‘rib chiqishiga yo‘naltirish uchun maqsadga muvofiqligini ko‘rsatadi. Ko‘rsatkichlar real laboratoriya populyatsiyasi uchun baho emas, balki ushbu sakkiz nazoratli xato sinfi bo‘yicha ichki sinov natijasidir. Hisob-kitoblar va konfuziya matritsasi 2-rasmda jamlangan.

3-jadval.
Sintetik xatolarni aniqlash natijalari

Xato kodi va turi	Yozuvlar soni	Faqat sxema aniqladi	DCC-UZ jami aniqladi	Aniqlash, %
E1. Majburiy maydon yo‘q	10	10	10	100
E2. Sana/ma’lumot turi noto‘g‘ri	10	10	10	100
E3. Birlik kodi noaniq	10	0	10	100
E4. U ≠ k·u_c	10	0	10	100
E5. Qamrov ehtimoli yo‘q	10	10	10	100
E6. Etalon havolasi muddati o‘tgan	10	0	10	100
E7. Yaxlitlash nomuvofiq	10	0	9	90
E8. Muhit usul chegarasidan tashqarida	10	0	10	100
Jami	80	30	79	98,75



2-rasm.
Strukturaviy va qoidaviy validatsiyaning xato aniqlash ko‘rsatkichlari (muallif hisob-kitobi)

Olingan natijalar strukturaviy moslik va metrologik mazmun mosligi bir xil tekshiruv emasligini ko‘rsatdi. Strukturaviy daraja maydonlar va ma’lumot turlarining mavjudligini nazorat qiladi; metrologik daraja esa birlikning o‘lchanadigan kattalikka mosligi, U-k·u_c bog‘lanishi, kuzatuvchanlik zanjirining amaldaligi va o‘lchash shartlarining usul talablariga muvofiqligini tekshiradi. XML yoki JSON sxemasining o‘zi ma’lumot almashishni ta’minlaydi, biroq barcha maydonlar mavjud bo‘lgan semantik xatoni to‘xtatmasligi mumkin. Shu sababli DCC-UZda qoidaviy metrologik tekshiruv sxemaga qo‘shimcha nazorat qatlamidir.

Noaniqlik bo‘yicha DCC-UZ faqat yakuniy U qiymatini emas, u_c, k, qamrov ehtimoli va ularning o‘zaro bog‘lanishini ham uzatadi. Bu qabul qiluvchi tizimga natijaning ichki izchilligini qayta tekshirish, zarur bo‘lsa qaror qoidasi bilan solishtirish yoki raqamli egizak modeliga sensorning noaniqlik parametrlarini avtomatik kiritish imkonini beradi. To‘liq noaniqlik byudjeti har bir almashuvda oshkor qilinishi shart bo‘lmasligi mumkin, ammo minimal profil darajasida u_c, k va U o‘rtasidagi matematik moslik tekshirilishi kerak. Ushbu nazoratlar uchun ishlab chiqilgan konseptual interfeys 3-rasmda berilgan; u amaldagi dasturiy mahsulotning real skrinshoti emas.

3-rasm.
DCC-UZ validatorining konseptual laboratoriya interfeysi (muallif maketi)



Kuzatuvchanlik qoidasi etalon identifikatori va uning kalibrlash sertifikatiga havolani saqlash bilan cheklanmaydi. DCC-UZ etalon sertifikatining amal qilish davri, kalibrlash sanasi va zarur bo‘lsa yuqori bo‘g‘in identifikatorini bog‘lashni nazarda tutadi. Kelajakda milliy reyestr yoki ishonchli ma’lumot xizmati bilan integratsiya etilganda validator havolaning haqiqiyligini real vaqt rejimida tekshirishi mumkin. Hozirgi minimal profil esa laboratoriya ichidagi ma’lumotlar bazasida etalon holatini tekshirish uchun yetarli maydonlarni belgilaydi.

Ma’lumot yaxlitligi uchun sertifikat faylining kriptografik xeshi va vakolatli shaxsning elektron imzosi alohida element sifatida kiritildi. Xesh sertifikat tarkibidagi ruxsatsiz o‘zgarishni aniqlaydi, elektron imzo esa kelib chiqish va tasdiqlashni dalillaydi. Bu mexanizmlar kalibrlash natijasining metrologik

to‘g‘riligini o‘z-o‘zidan kafolatlamaydi, ammo ishonch zanjirining axborot xavfsizligi qismini mustahkamlaydi.

4-jadval.
An’anaviy PDF sertifikat va DCC-UZ profilining funksional taqqoslanishi

Mezon	An’anaviy PDF/ qog‘oz	DCC-UZ strukturalangan profil	Kutiladigan amaliy natija
O‘qish va talqin qilish	Asosan inson tomonidan	Inson va axborot tizimi tomonidan	Ma’lumotni qayta kiritish kamayadi
Birlik va kattalik	Matn ko‘rinishida, turlicha yozilishi mumkin	Kodlangan o‘lchanadigan kattalik-qiymat-birlik bog‘lanishi	Semantik xatolar kamayadi
Noaniqlik	Ko‘pincha yakuniy U matn/jadvalda	u_c, k, U, ehtimol va bog‘lanish qoidalari	Avtomatik izchillik nazorati
Kuzatuvchanlik	Sertifikat raqami va matnli bayonot	Etalon ID, havola, sana va holat	Zanjirni avtomatik audit qilish
Yaxlitlik	Fayl/parol yoki qo‘lda imzo	Xesh, elektron imzo, vaqt tamg‘asi	O‘zgarishni aniqlash va kelib chiqishni tasdiqlash
Tizimlararo almashish	Ko‘chirish yoki OCR	API/XML/JSON orqali to‘g‘ridan-to‘g‘ri	Media uzilishi va vaqt sarfi kamayadi
Versiya boshqaruvi	Fayl nomi va papka tartibiga bog‘liq	Sxema, sertifikat va o‘zgartirish versiyasi	Audit izining aniqligi oshadi

Muhokama. Taqqoslashdan ko‘rinadiki, kalibrlash sertifikatini elektron PDF shaklida saqlash bilan DCC joriy etish bir xil jarayon emas. DCC-UZning amaliy farqi - asosiy metrologik maydonlarning tizim tomonidan ajratib olinadigan va qoidalarga ko‘ra tekshiriladigan tuzilmada berilishidir. Skanerlangan yoki elektron imzolangan PDF digitization natijasi bo‘lishi mumkin; ma’lumotlar LIMS, ERP yoki boshqa tizimlar tomonidan semantik talqin qilinmasa, jarayonlararo digitalization to‘liq yuzaga chiqmaydi. Hackel va hammualliflar ham kalibrlashda digitization, digitalization va raqamli transformatsiyani farqlab, avtomatik ma’lumot almashuvining keyingi foydalanishga ta’sirini ko‘rsatgan [5; B.8-12].

DCC-UZ yopiq milliy format sifatida emas, xalqaro DCC ishlanmalariga moslashuvchi minimal joriy etish profili sifatida qaraladi. Aks holda mahalliy sxemaning alohida rivojlanishi kelgusidagi tizimlararo almashuvni cheklashi mumkin. Shu sababli profil elementlari PTB DCC sxemasidagi tegishli obyektlarga xaritalanishi, birlik identifikatorlari xalqaro lug‘atlarga bog‘lanishi va sertifikat IDlari doimiy identifikatorlar bilan to‘ldirilishi ko‘zda tutiladi. Bu yondashuv ISO/IEC 17025 hisobot mazmunini almashtirmaydi, balki uni mashinada qayta ishlanadigan shaklga o‘tkazadi.

Joriy etishning birinchi bosqichida laboratoriya mavjud PDF sertifikat bilan parallel ravishda strukturalangan qo‘shimcha fayl yaratadi. Bu bosqichda sertifikat shabloni, asbob reyestri va etalon ma’lumotlar bazasidan avtomatik to‘ldirish yo‘lga qo‘yiladi. Ikkinchi bosqichda ichki validator majburiy maydon, birlik, noaniqlik va kuzatuvchanlikni tekshiradi. Uchinchi bosqichda sertifikat buyurtmachining LIMS, ERP yoki sifat boshqaruvi tizimiga API orqali uzatiladi. To‘rtinchi bosqichda milliy reyestrlar, akkreditatsiya ma’lumotlari va ishonch xizmatlari bilan integratsiya ko‘zda tutiladi.

Laboratoriya darajasida asosiy tashkiliy muammo ma’lumot mas’uliyatini aniqlashdir. Metrolog noaniqlik va kuzatuvchanlik mazmuniga, axborot texnologiyalari mutaxassisi sxema va integratsiyaga, sifat menejeri esa versiya, audit va tasdiqlash jarayoniga javob beradi. Ushbu rollar aniq ajratilmasa, raqamli sertifikat texnik loyiha sifatida qolib ketishi yoki metrologik talablar yetarlicha ifodalan-

masligi mumkin. DCC-UZni joriy etish uchun metrologiya, dasturiy injiniring va axborot xavfsizligi kompetensiyalarining birgalikdagi boshqaruvi zarur.

Avtomatik validatsiya laboratoriya mutaxassisining professional hukmini almashtirmaydi. Qoidalar takrorlanuvchi va formal tekshiruvlarni tezlashtiradi, lekin o‘lchanadigan kattalikning to‘g‘ri tanlanganligi, metodning maqsadga muvofiqligi yoki noodatiy ta’sir omillarini to‘liq baholash ekspert vakolatida qoladi. Shuning uchun validator natijalari “qabul”, “ogohlantirish” va “rad” holatlarida berilishi taklif qilindi. Ogohlantirish holati chegaraviy yaxlitlash, odatiy bo‘lmagan birlik yoki qo‘shimcha tushuntirish talab qiladigan kuzatuvchanlik zanjirini inson ko‘rib chiqishiga yo‘naltiradi.

Tadqiqotning asosiy cheklovi - validatsiya to‘plamining sintetikligi va prototip doirasining skalyar sonli kalibrlash natijalari bilan chegaralanganidir. Shu sababli 98,75 % sezgirlik real laboratoriyalar uchun umumiy ishlash ko‘rsatkichi emas; u aynan 80 ta nazoratli xato yozuvi va sakkiz xato sinfiga nisbatan ichki sinov natijasidir. Real sertifikatlarda bir nechta xato bir vaqtda uchrashi, formatlar turlicha bo‘lishi va ayrim ma’lumotlar erkin matnda berilishi mumkin. Keyingi bosqichda harorat, elektr kattaliklari, massa va bosim laboratoriyalaridan anonimlashtirilgan sertifikatlar bilan tashqi validatsiya o‘tkazish, soxta ogohlantirishlar ulushi, xatolar kombinatsiyasi va operator vaqtiga ta’sirini baholash zarur.

Raqamli egizak va avtomatik ishlab chiqarish tizimlarida DCC-UZning qo‘llanishi alohida istiqbolga ega. Sensorning kalibrlash funksiyasi, U qiymati va amal qilish holati mashinada o‘qiladigan ko‘rinishda bo‘lsa, raqamli egizak modeli kirish ma’lumotining metrologik sifatini baholashi mumkin. Bunday integratsiya raqamli egizak natijalarida noaniqlikni tarqatish (propagatsiya) va kuzatuvchanlikni saqlash bo‘yicha yangi metrologik ramkalar bilan uyg‘unlashadi [11; B.337-340]. Metrologik kuzatuvchanlik va noaniqlik ma’lumotlarining raqamli zanjiri 4-rasmda ko‘rsatilgan.

4-rasm. Metrologik kuzatuvchanlik va noaniqlikning DCC-UZ bo‘yicha raqamli zanjiri (muallif ishlanmasi)



Xulosa. Ishda O‘zbekiston kalibrlash laboratoriyalarida mavjud PDF hisobot bilan parallel joriy etishga mo‘ljallangan DCC-UZ minimal profili shakllantirildi. Profil identifikatsiya, natija, noaniqlik-kuzatuvchanlik va yaxlitlik qatlamlarini mashinada o‘qiladigan obyektga birlashtiradi. Asosiy ilmiy hissa - strukturaviy sxema tekshiruvini U=k·u_c izchilligi, birlik-kattalik mosligi, etalonning amal qilish holati, yaxlitlash va muhit shartlarini qoidaviy tekshirish bilan birlashtirishdir.

120 ta sintetik sertifikat bilan o‘tkazilgan ichki sinovda strukturaviy sxema 80 ta xato yozuvning 30 tasini (37,5 %) aniqladi. DCC-UZ qoidaviy validatori 79 ta xato yozuvni aniqladi (98,75 %), 40 ta mos yozuvning barchasini qabul qildi va 119/120 (99,17 %) umumiy aniqlikka erishdi. Bu qiymatlar real sanoat ko‘rsatkichi emas; ular faqat mazkur sintetik to‘plam va sakkiz nazoratli xato turi doirasiga tegishli. Tajriba formatga moslik metrologik to‘g‘rilikni o‘z-o‘zidan kafolatlamasligini ko‘rsatdi.

Amaliy joriy etishni mavjud PDF sertifikatlarni birdaniga bekor qilishdan emas, parallel strukturalangan fayl, ichki validator va LIMS integratsiyasidan boshlash maqsadga muvofiq. Keyingi bosqichlarda elektron imzo, milliy etalonlar reyestri, akkreditatsiya ma’lumotlari va buyurtmachi tizimlari bilan avtomatik almashish qo‘shilishi mumkin. Real laboratoriya sertifikatlari asosidagi tashqi validatsiyadan so‘nggina modelning turli o‘lchash sohalariga ko‘chiriluvchanligi va amaliy samaradorligi haqida kengroq xulosa chiqarish mumkin.

Foydalanilgan adabiyotlar ro‘yxati

1. Barbosa C.R.H., Sousa M.C., Almeida M.F.L., Calili R.F. Smart Manufacturing and Digitalization of Metrology: A Systematic Literature Review and a Research Agenda // Sensors. 2022. Vol. 22, No. 16. Article 6114. https://doi.org/10.3390/s22166114.

2. Brown R.J.C., Janssen J.T., Wright L. Why a Digital Framework for the SI? // Measurement. 2022. Vol. 187. Article 110309. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.110309.

3. Chalk S.J., Coppa D.N., Flamenco F. et al. International Development of the SI in FAIR Digital Data // Measurement: Sensors. 2021. Vol. 18. Article 100293. https://doi.org/10.1016/j.measen.2021.100293.

4. Eichstädt S., Keidel A., Tesch J. Metrology for the Digital Age // Measurement: Sensors. 2021. Vol. 18. Article 100232. https://doi.org/10.1016/j.measen.2021.100232.

5. Hackel S., Schönhals S., Gloger B. et al. Digitization versus Digitalization & Digital Transformation in the Field of Calibrations and Their Subsequent Use. Braunschweig: Physikalisch-Technische Bundesanstalt, 2024. 29 p. https://doi.org/10.7795/120.20240126.

6. Hall B.D., Kuster M. Metrological Support for Quantities and Units in Digital Systems // Measurement: Sensors. 2021. Vol. 18. Article 100102. https://doi.org/10.1016-/j.measen.2021.100102.

7. Hall B.D., Kuster M. Representing Quantities and Units in Digital Systems // Measurement: Sensors. 2022. Vol. 23. Article 100387. https://doi.org/10.1016/j.measen.2022.100387.

8. ISO/IEC 17025:2017. General Requirements for the Competence of Testing and Calibration Laboratories. Geneva: International Organization for Standardization, 2017. 30 p.

9. JCGM GUM-6:2020. Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement -

Part 6: Developing and Using Measurement Models. Sèvres: Bureau International des Poids et Mesures, 2020. 103 p. https://doi.org/10.59161/JCGMGUM-6-2020.

10. Lu Y., Xu X., Wang L. Smart Manufacturing Process and System Automation: A Critical Review of the Standards and Envisioned Scenarios // Journal of Manufacturing Systems. 2020. Vol. 56. P. 312-325. https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2020.06.010.

11. Maculotti G., Marschall M., Kok G. et al. A Shared Metrological Framework for Trustworthy Virtual Experiments and Digital Twins // Metrology. 2024. Vol. 4, No. 3. P. 337-363. https://doi.org/10.3390/metrology4030021.

12. Possolo A., Bruce S.S., Watters R.L. Jr. Metrological Traceability: Frequently Asked Questions and NIST Policy. NIST Technical Note 2156. Gaithersburg, MD: National Institute of Standards and Technology, 2021. 42 p. https://doi.org/10.6028/NIST.TN.2156.

13. Xiong X., Zhu Y., Li J., Duan Y., Fang X. A Digital Framework for Metrological Information // Measurement: Sensors. 2021. Vol. 18. Article 100122. https://doi.org/10.1016/j.measen.2021.100122.

14. Mamatov A., Sotvoldiyev X., Talipov M., Shaumarov S., Gafarbayli K., Bekmirzaev D. Metrological Calibration and Uncertainty Evaluation of MEMS Accelerometers for Structural Health Monitoring in Seismic Regions // Vibroengineering Procedia. 2026. Vol. 62. P. 140-144. https://doi.org/10.21595/vp.2026.26360.

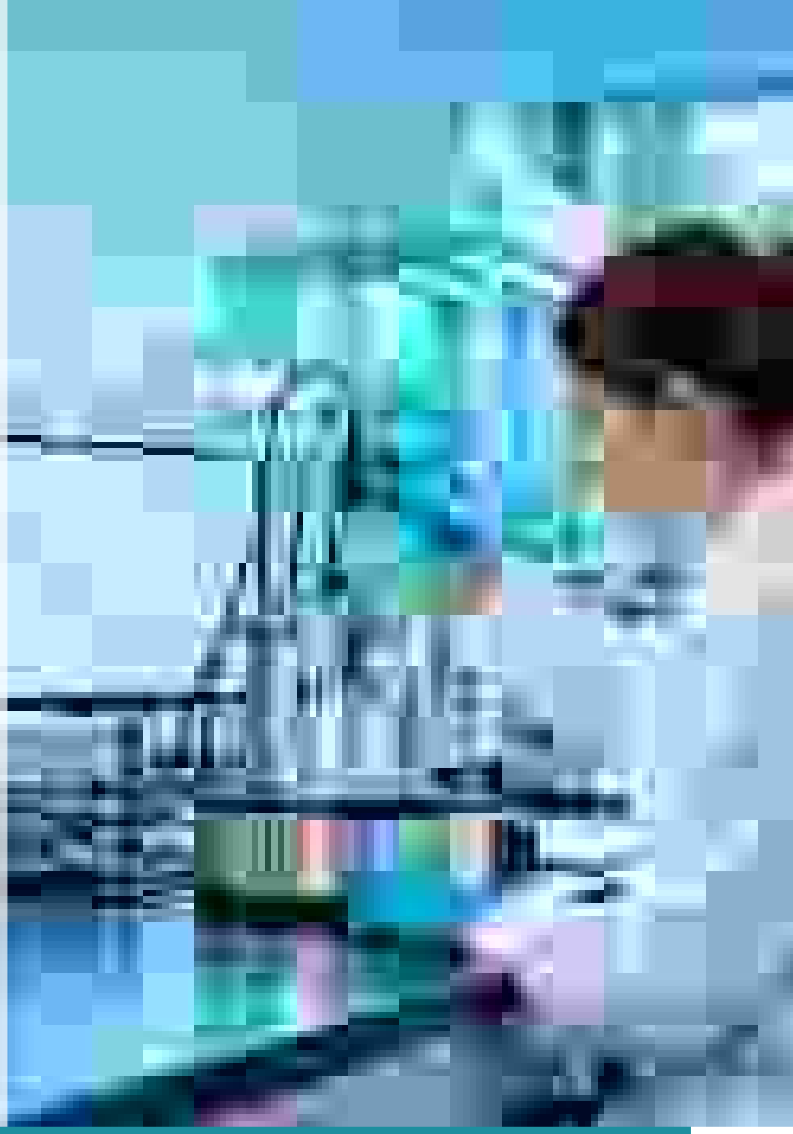
15. Mamatov A. A Reciprocity-Aware GUM Assessment of Mode-Selective Back-Reflection Suppression in Mid-Infrared Laser Power Measurement Using a Bulk-Dirac-Semimetal Photonic Spin Hall Multilayer // Results in Optics. 2026. Vol. 24. Article 101088. https://doi.org/10.1016/j.rio.2026.101088.

16. Mamatov A., Isroilova S., Nurdinova R.A., Mamasodikova N. et al. An Evidence-Graded Metrological Framework for Reconstructing Measurement Uncertainty from Published LC-MS/MS and ICP-OES Validation Data in Plant Matrices // Journal of Chemical Metrology. 2026. Vol. 20, No. 1. Article e26053940. https://doi.org/10.25135/jcm.2605-3940.

17. Mamatov A., Sotvoldiev K., Rustamov U., Boymirzaev A., Obidov J. et al. A Framework for Metrological Assurance and Standardization of IoT Sensors to Mitigate Cybersecurity Risks // Proceedings of International Conference on Applied Innovation in IT. 2026. Vol. 14, No. 4. P. 1377-1385.

18. Mamatov A., Madmarova U., Isroilova S., Ibrokhimov J., Nurmatov M. et al. An LSTM-Based Digital Twin for Predictive Energy Optimization in University Campus Buildings // Proceedings of International Conference on Applied Innovation in IT. 2026. Vol. 14, No. 4. P. 1049-1056.

SUYUQLIKLARNING SOLISHTIRMA ELEKTR O‘TKAZUVCHANLIGINI O‘LCHASHDA O‘ZBEKISTON RESPUBLIKASINING MILLIY BIRLAMCHI ETALONI



Hamroqulov G‘ofurjon Xolyigitovich
Kimyo fanlari doktori, Toshkent kimyo-texnologiya instituti professori
E-mail: khamrakulovtkti@gmail.com

Hamroqulov Mahmud G‘ofurjonovich
PhD, Toshkent kimyo-texnologiya instituti dotsenti
E-mail: hamroqulov0305@gmail.com

Xo‘jaqulov Dostonbek Abdurashid o‘g‘li
O‘zbekiston milliy metrologiya instituti etalon saqlovchisi
E-mail: khujakulov@nim.uz

Sunnatullayev Shaxzod Begzod o‘g‘li
O‘zbekiston milliy metrologiya instituti mutaxassisi
E-mail: waxzodchik1999@gmail.com

Nig‘matova Mohinur Jamshid qizi
O‘zbekiston milliy metrologiya instituti mutaxassisi
E-mail: mohinurnigmatova05@gmail.com

Annotatsiya. Ushbu maqolada suyuqliklarning solishtirma elektr o‘tkazuvchanligini aniqlash, saqlash va yuqori aniqlikdagi o‘lchash vositalariga uzatishda qo‘llaniladigan konduktivlikning birlamchi milliy etaloni ko‘rib chiqilgan. Konduktometrik tahlilning nazariy asoslari, elektr o‘tkazuvchanlikka ta’sir etuvchi omillar, jumladan, eritma konsentratsiyasi, dissotsiyalanish darajasi, kimyoviy tarkib va haroratning ta’siri yoritilgan. Konduktometrik yacheykaning ekvivalent elektr sxemasi hamda o‘lchash jarayonida yuzaga keladigan qutblanish, sig‘im va harorat ta’sirlarining o‘lchash aniqligiga ta’siri tahlil qilingan. Shuningdek, O‘zbekiston Respublikasining suyuqliklar solishtirma elektr o‘tkazuvchanligi bo‘yicha milliy birlamchi etaloni, uning tarkibi, o‘lchash diapazoni va qo‘llash sohalari bayon etilgan. Etalon yordamida o‘lchash jarayoni, haroratni barqarorlashtirish, chastotaviy bog‘liqlikni aniqlash hamda o‘lchash noaniqligini hisoblash masala-

lari ko‘rib chiqilgan. Mazkur etalon suv sifati, farmatsevtika, oziq-ovqat, neft-kimyo, qishloq xo‘jaligi, ekologiya va sanoat texnologiyalarida qo‘llaniladigan o‘lchash vositalarining metrologik ta’minotini yaxshilashga xizmat qiladi.

Kalit so‘zlar: konduktivlik, solishtirma elektr o‘tkazuvchanlik, konduktometriya, birlamchi etalon, milliy etalon, konduktometrik yacheyka, elektr o‘tkazuvchanlik, elektrolit, standart namuna, harorat, o‘lchash noaniqligi, metrologiya, RLC ko‘prigi, Naykvist diagrammasi, suv sifati.

Аннотация. В данной статье рассмотрены вопросы определения, хранения и передачи единицы удельной электрической проводимости жидкостей высокоточным средствам измерений с использованием национального первичного эталона проводимости. Освещены теоретические основы кондуктометрического анализа, а также влияние основных факторов на электрическую проводимость, включая концентрацию раствора, степень диссоциации, химическую природу вещества и температуру. Проанализирована эквивалентная электрическая схема кондуктометрической ячейки и влияние поляризационных, ёмкостных и температурных эффектов на точность измерений. Также представлены национальный первичный эталон удельной электрической проводимости жидкостей Республики Узбекистан, его состав, диапазон измерений и области применения. Рассмотрены процесс проведения измерений с использованием эталона, стабилизация температуры, определение частотной зависимости и оценка неопределённости измерений. Данный эталон способствует совершенствованию метрологического обеспечения средств измерений, применяемых в области контроля качества воды, фармацевтики, пищевой промышленности, нефтехимии, сельского хозяйства, экологии и промышленных технологий.

Ключевые слова: кондуктивность, удельная электрическая проводимость, кондуктометрия, первичный эталон, национальный эталон, кондуктометрическая ячейка, электрическая проводимость, электролит, стандартный образец, температура, неопределённость измерений, метрология, RLC-мост, диаграмма Найквиста, качество воды.

Abstract. This article considers the determination, maintenance and dissemination of the unit of electrical conductivity of liquids to high-accuracy measuring instruments using the national primary conductivity standard. The theoretical principles of conductometric analysis and the influence of key factors on electrical conductivity, including solution concentration, degree of dissociation, chemical nature of the substance and temperature, are discussed. The equivalent electrical circuit of a conductometric cell and the effects of polarization, capacitance and temperature on measurement accuracy are analyzed. The national primary standard of electrical conductivity of liquids of the Republic of Uzbekistan, its composition, measurement range and fields of application are also described. The measurement procedure using the standard, temperature stabilization, determination of frequency dependence and evaluation of measurement uncertainty are considered. The standard contributes to improving the metrological assurance of measuring instruments used in water quality control, pharmaceuticals, food industry, petrochemicals, agriculture, ecology and industrial technologies.

Keywords: conductivity, electrical conductivity, conductometry, primary standard, national standard, conductometric cell, electrical conductivity, electrolyte, standard sample, temperature, measurement uncertainty, metrology, RLC bridge, Nyquist diagram, water quality.

Kirish. Konduktivlik (solishtirma elektr o'tkazuvchanlik) kattaligini birlamchi etalon asosida aniqlash

So'nggi yillarda suv sifati toza ichimlik suvi, distillangan suv, dorivor va biologik suv, energetik qozonlar, akvakultura hamda boshqa sohalarda dolzarb masalaga aylandi.

Konduktometrik tahlil usuli solishtirma elektr o'tkazuvchanlikning konsentratsiyaga bog'liqligiga asoslangan.

Kislotalar, tuzlar va ishqorlarning suvli eritmalarining elektr o'tkazuvchanligi eritilgan modda molekulalarining ionlarga dissotsiyalanganligi bilan belgilanadi. Elektr o'tkazuvchanlik quyidagi omillarga bog'liq:

- eritmadagi moddaning konsentratsiyasiga;
- uning dissotsiyalanish darajasiga;
- moddaning kimyoviy tabiatiga;
- eritmaning haroratiga.

Eritmalarni konduktometrik tahlil qilish usulining asoschisi K**o**lraush (Kohlrausch) hisoblanadi. U 1869-yilda elektr o'tkazuvchanlikni o'lchash nazariyasi va usullarini ishlab chiqqan.

Tadqiqotchilar eritmaning elektr xossalariga katta e'tibor qaratganlar va so'nggi yillarda eritmaning elektr o'tkazuvchanligini (EC) o'lchash uchun ko'plab usullar taklif etilgan.

Elektr o'tkazuvchanlikni (EC) o'lchashda keng qo'llaniladigan usullar quyidagilardan iborat:

- elektrodli konduktometriya;
- elektromagnit konduktometriya;
- ultratovushli o'lchash usuli;

O'lchash mexanizmi bilan bog'liq cheklovlar sababli, elektromagnit va ultratovushli usullar odatda elektr o'tkazuvchanligi yuqori bo'lgan eritmalarni o'lchashda qo'llaniladi [1; C. 20].

Elektrodli elektr o'tkazuvchanlikni o'lchash usuli elektrolitik o'tkazuvchanlik prinsipiga asoslanadi. Ushbu usul elektrod konstruksiyasining soddaligi va keng o'lchash diapazoni bilan ajralib turadi. Shu sababli u eritmalarning elektr o'tkazuvchanligini (EC) o'lchashda keng qo'llaniladigan usullardan biri hisoblanadi.

Konduktometrik yacheykani parallel ulangan rezistor va kondensator zanjiriga ekvivalent deb qarash mumkin. Bu (A)-rasmda ko'rsatilgan. Bunda R_l1 va R_l2 elektrodlarning ulanish simlari qarshiligini, R_1 va R_2 esa kimyoviy qutblanish va konsentratsion qutblanish natijasida yuzaga keladigan qutblanish qarshiliklarini ifodalaydi. Ular Faradey qarshiliklari deb ham ataladi. C_p — ulanish simlarining sig'imi.

A) Elektr o'tkazuvchanlik yacheykasining ekvivalent sxemasi

Konduktometrik yacheykaning soddalashtirilgan elektr sxemasi (B)-rasmda ko'rsatilgan. Unda R_x — konduktometrik yacheykaning qarshiligi, C_x esa konduktometrik yacheykaning elektr sig'imini bildiradi.

(B) Elektr o‘tkazuvchanlik yacheykasining soddalashtirilgan modeli

Mahalliy va xorijiy tadqiqotchilar tomonidan konduktometrik elektrodlar yordamida elektr o‘tkazuvchanlikni (EC) o‘lchashning ko‘plab usullari ishlab chiqilgan. Biroq konduktometrik elektrod orqali EC ni o‘lchash usullarida bir qator kamchiliklar mavjud [2; P. 69].

Birinchidan, o‘lchash natijalariga R_1 va R_2 qutblanish qarshiliklari muqarrar ravishda ta’sir qiladi. Bu ta’sir, ayniqsa, yuqori konsentratsiyali eritmalarni o‘lchashda sezilarli bo‘ladi.

Ikkinchidan, 1(A)-rasmda ko‘rsatilganidek, C_x sig‘imining qiymati ham o‘lchash natijasiga ta’sir ko‘rsatadi.

Uchinchidan, eritmaning harorati ionlanish, eruvchanlik, ionlarning migratsiya tezligi, eritmaning qovushqoqligi va hajmiy kengayishiga ta’sir qilishi mumkin. Bu omillar, o‘z navbatida, EC ni o‘lchash aniqligiga ta’sir qiladi .

Harorat oshganda, eritmaning qovushqoqligi kamayadi, elektr maydoni ta’sirida ionlarning harakati tezlashadi va natijada eritmaning elektr o‘tkazuvchanligi o‘zgaradi.

Shunday qilib, konduktometrik elektrod asosida EC ni o‘lchashda qutblanish effekti, sig‘im effekti va harorat ta’sirini imkon qadar kamaytirish yoki bartaraf etish zarur [3; P. 45].

Hozirda “O’zbekiston milliy metrologiya instituti” davlat muassasasi Fizik-kimyoviy, optik-fizikaviy va harorat kattaliklarini bo‘limida birlamchi konduktometr etaloni mavjud.

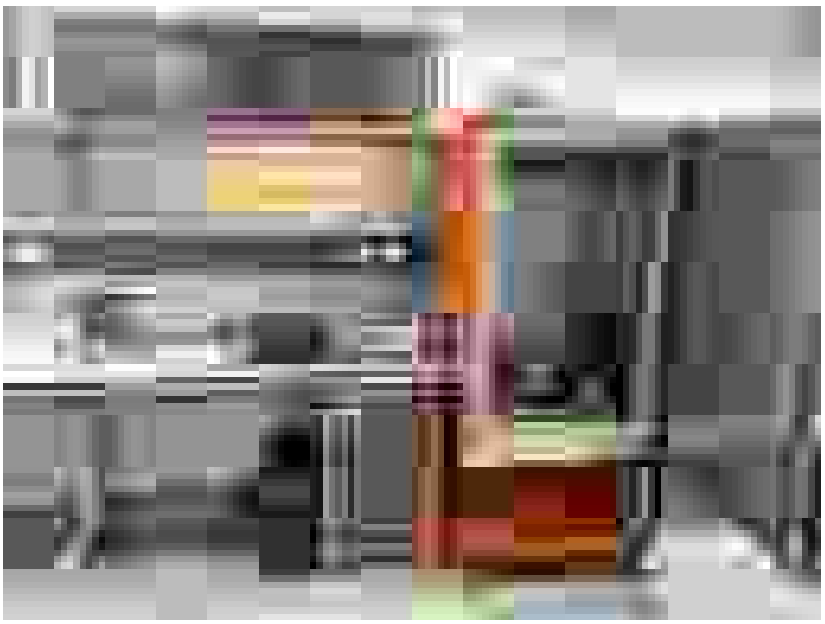
Qo’llash doirasi:

Solishtirma elektr o‘tkazuvchanlik birligini hosil qilish, saqlash, ikkilamchi va namunaviy o’lchash vositalari hamda quyidagi sohalarda qo’llaniladigan yuqori aniqlikdagi o’lchash vositalariga uzatish:

- neft kimyo sanoati;
- farmosevtika;
- oziq-ovqat sanoati;
- qishloq xo’jaligi;
- ekologiya;
- suv sifati;
-sanoat texnologiyasi;
- hududiy metroligiya markazlari, koxona, tashkilot va tadbirkorlik sub’ektlarining metrologik xizmatlari.

Suyuqliklarning solishtirma elektr o‘tkazuvchanligi milliy boshlang‘ich etaloni o’lchash chegarasi 0,005 dan 20 S/m gacha bo’lgan O’zbekiston Respublikasidagi eng yuqori aniqlikga ega bo’lgan kompleks uskuna jamlanmasi hisoblanadi.

1- rasm. Suyuqliklarning solishtirma elektr o‘tkazuvchanligi milliy birlamchi etaloni



Etalon tarkibi:

1. Elektr o'tkazuvchanlikning birlamchi o'lchash yacheykasi, uning o'rta qismlarida uzunlik va ichki diametrning o'lchangan qiymatlari mavjud.
2. Pt100 qarshilik termometri — Sensit TG12.
3. MKT 50 o'zgartirgichi — Anton Paar.
4. Havo termostati.
5. Keysight E4980L RLC ko'prigi, u 1 kΩ va 10 kΩ etalon rezistorlar yordamida kalibrlanadi. Mazkur rezistorlarning chastotaviy xarakteristikasi hisoblab chiqilgan bo'lib, u milliy qarshilik etaloniga metrologik jihatdan kuzatiluvchan hisoblanadi.
6. LabVIEW va Microsoft Office dasturiy ta'minotlari o'rnatilgan shaxsiy kompyuter (**ПК**).

1)Yig'ilgan **elektr o'tkazuvchanlikning birlamchi etalon o'lchash yacheykasi** o'rta qismi bilan birgalikda oldindan tayyorlangan **elektrolitik elektr o'tkazuvchanlikning birlamchi standart namunasi** bilan to'ldiriladi. Yacheyka havo termostatiga joylashtiriladi va kerakli **25 °C haroratgacha** qizdiriladi. Havo termostatidagi o'lchangan haroratning og'ishi **±0,01 °C** dan oshmaydigan holatga erishilgunga qadar yacheyka termostatda ushlab turiladi.

Harorat Pt100 Sensit TG12 qarshilik termometri yordamida aniqlanadi va Anton Paar MKT 50 o'zgartirgichi orqali o'lchanadi. O'lchash ma'lumotlari o'zgartirgichdan shaxsiy kompyuterga (**ПК**) uzatiladi.

Chastotaviy xarakteristikalarni avtomatik o'lchash uchun dastur LabVIEW muhitida ishlab chiqilgan bo'lib, ma'lumotlarni eksport qilish uchun MS Excel dasturidan foydalaniladi. Dasturning to'g'ri ishlashi uchun dastlab bir nechta komponentlarni o'rnatish talab etiladi. Avvalo "LabVIEW Runtime Engine", so'ngra "NI-VISA" drayverlari o'rnatiladi.

O'lchash jarayonida dastur bir vaqtning o'zida haroratni ham qayd etadi. Yacheyka Keysight E4980L o'zgaruvchan tok RLC ko'prigiga ulanadi. Haroratning barqaror holatga kelishidan so'ng "Z-spektroskopiya" o'lchash quyi dasturi ishga tushiriladi.

O'lchash natijalarining aniqligini oshirish maqsadida o'lchashdan oldin OPEN va SHORT turidagi korreksiyalar amalga oshiriladi yoki tegishli qarshiliklarni o'lchash orqali ko'prikning sezgirligi tuzatiladi.

2) O'lchash dasturida kerakli chastota o'rnatiladi va **20 Hz dan 10 kHz gacha bo'lgan chastota diapazonida, 1,0 V kuchlanish** darajasida chastotaviy bog'liqlik o'lchanadi [4; P. 23].

O'lchashlar chastotaning barcha qiymatlari bo'yicha bir tekis taqsimlangan holda amalga oshirilishi kerak. O'lchashlar yakunlangandan so'ng yacheyka havo termostatidan chiqariladi va qismlarga ajratiladi.

O'lchangan impedansning mavhum qismining uning haqiqiy qismiga bog'liqlik grafigi – Naykvist diagrammasi quriladi.

Shuningdek, impedansning mavhum qismi nolga yaqin bo'lgan holat uchun berilgan chastotada impedansning haqiqiy qismining 1/f qiymatiga bog'liqlik grafigi quriladi va navbatma-navbat chizilgan regressiya to'g'ri chizig'ining x o'qi bilan kesishish nuqtasi (Z_2) hisoblanadi.

3) So'ngra yacheyka **ikkinchi o'rta qism** bilan yig'iladi va ayni shu eritma bilan to'ldiriladi. Shundan keyin barcha o'lchashlar takroran amalga oshiriladi (**Z_1**).

4) O'lchash natijasi (1) va (2)-tenglamalarga muvofiq hisoblanadi.

1) $\Delta_0 = Z_1 - Z_2$

2) $K = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}$

O'lchash noaniqligini hisoblash

O‘lchashning kombinatsiyalangan standart noaniqligi ucu_c quyidagi munosabat asosida hisoblanadi:



uA noaniqligi — elektrolitik elektr o‘tkazuvchanlikka ega bo‘lgan bitta eritma uchun o‘lchash natijalarining o‘rtacha qiymatining tanlanma standart og‘ishi hisoblanadi.

 3)

Agar takroriy o‘lchashlar soni 10 tadan kam bo‘lsa va tajriba asosida uAu_A ni asoslangan tarzda baholash imkoniyati mavjud bo‘lmasa, tuzatilgan noaniqlik uAu_A quyidagi munosabat asosida hisoblanadi:

 4)

Bu yerda k — takroriy o‘lchashlar soniga bog‘liq bo‘lgan tuzatish koeffitsiyenti bo‘lib, uning qiymatlari 1-jadvalda keltirilgan.

1-jadval. Takroriy o‘lchashlar sonining turli qiymatlari uchun tuzatish koeffitsiyentlari qiymatlari

O‘lchashlar soni n	2	3	4	5	6	7	8	9
Tuzatish koeffitsiyenti k	7,0	2,3	1,7	1,4	1,3	1,3	1,2	1,2

u noaniqlik kirish o‘zgaruvchilarining u_i noaniqliklari asosida quyidagi bog‘lanish yordamida hisoblanadi:

 5)

Bu yerda:

– mm — kirish o‘zgaruvchilarining soni;

–  — sezgirlik koeffitsiyenti.

Birlamchi yacheykada o‘lchangan kirish kattaliklari uchun (12)-tenglama quyidagi ko‘rinishga ega:

$$u_B^2(\kappa) = \left(\frac{\partial \kappa}{\partial d}\ u_d\right)^2 + \left(\frac{\partial \kappa}{\partial l}\ u_l\right)^2 + \left(\frac{\partial \kappa}{\partial RL}\ u_{RL}\right)^2 + \left(\frac{\partial \kappa}{\partial RS}\ u_{RS}\right)^2 + \left(\frac{\partial \kappa}{\partial RL\infty}\ u_{RL}\infty\right)^2 + \left(\frac{\partial \kappa}{\partial RS\infty}\ u_{RS\infty}\right)^2 + \left(\frac{\partial \kappa}{\partial t}\ u_{\Delta t}\right)^2 + \left(\frac{\partial \kappa}{\partial t}\ u_t\right)^2 + \left(\frac{\partial \kappa}{\partial x_{CO_2}}\ u_{CO_2}\right)^2$$

6)

Bu yerda:

– u_d — yacheyka diametrini aniqlash noaniqligi, mm;

– u_l — yacheyka uzunligini aniqlash noaniqligi, mm;

– u_{RL} — o‘rta (uzun) qismning qarshiligini aniqlash noaniqligi, **Ω**;

– u_{RS} — o‘rta qismsiz (qisqa) qismning qarshiligini aniqlash noaniqligi, **Ω**;

– $u_{RL\infty}$ — o‘rta (uzun) qism bilan qarshilikni ekstrapolyatsiya qilish noaniqligi, **Ω**;

– $u_{RS\infty}$ — o‘rta qismsiz (qisqa) qism qarshiligini ekstrapolyatsiya qilish noaniqligi, **Ω**;

– $u_{\Delta T}$ — o‘lchash davomida haroratning o‘zgarishi bilan bog‘liq harorat noaniqligi, ° C;

– u_T-termometr noaniqligi, ° C;

– u_{CO2}— o‘lchash vaqtida havodagi CO_2 miqdorini aniqlash noaniqligi, **μmol/mol** [5; P. 18].

Xulosa. O‘tkazilgan tahlillar natijasida suyuqliklarning solishtirma elektr o‘tkazuvchanligini yuqori aniqlikda o‘lchashda milliy birlamchi etalonning muhim metrologik ahamiyatga ega ekanligi aniqlandi. Elektr o‘tkazuvchanlik qiymatiga eritmaning konsentratsiyasi, dissotsiyalanish darajasi, kimyoviy tarkibi va harorati kabi omillar sezilarli ta’sir ko‘rsatishi, shuningdek, konduktometrik yacheykadagi qutblanish va sig‘im effektlari o‘lchash natijalarining aniqligiga ta’sir qilishi ko‘rsatildi.

O‘zbekiston Respublikasining suyuqliklarning solishtirma elektr o‘tkazuvchanligi bo‘yicha milliy birlamchi etaloni 0,005–20 S/m o‘lchash diapazonida yuqori aniqlikdagi o‘lchashlarni amalga oshirish imkonini beradi. Etalon tarkibiga birlamchi o‘lchash yacheykasi, Pt100 qarshilik termometri, MKT 50 o‘zgartirgichi, TB4-CA havo termostati , Keysight E4980L RLC ko‘prigi hamda ma’lumotlarni qayta ishlash uchun dasturiy vositalar kiradi.

Tadqiqotda o‘lchash jarayonida haroratni 25 °C atrofida ±0,01 °C aniqlikda barqarorlashtirish, 20 Hz–10 kHz chastota diapazonida o‘lchashlarni amalga oshirish hamda OPEN va SHORT korreksiyalaridan foydalanish o‘lchash natijalarining ishonchliligini oshirishga xizmat qilishi ko‘rsatildi. Olingan ma’lumotlar asosida Naykvist diagrammasini qurish va tegishli hisoblashlarni amalga oshirish orqali yacheykaning elektr parametrlarini aniqlash imkoniyati mavjud.

Shuningdek, o‘lchash noaniqligini baholashda takroriy o‘lchash natijalari, yacheyka geometrik o‘lchamlari, qarshiliklarni aniqlash, haroratning o‘zgarishi, termometr noaniqligi va havodagi CO_2 miqdorini aniqlash bilan bog‘liq noaniqliklar hisobga olinishi zarurligi belgilandi.

Umuman olganda, milliy birlamchi konduktivlik etalonidan foydalanish O‘zbekistonda solishtirma elektr o‘tkazuvchanlik birligini hosil qilish, saqlash va yuqori aniqlikdagi o‘lchash vositalariga uzatishning metrologik izchilligini ta’minlaydi. Mazkur etalon suv sifati, farmatsevtika, oziq-ovqat, neft-kimyo, qishloq xo‘jaligi, ekologiya va sanoat texnologiyalarida qo‘llaniladigan o‘lchash vositalarining metrologik ta’minotini takomillashtirishga xizmat qiladi.

Foydalanilgan adabiyotlar ro‘yxati:

1. Бикулов А.М., Лепявко А.П., Серова Т.Б. Поверка средств физико-химических измерений. – М.: АСМС, 2005.С.20-22.

2. G. K. White, in Thermal Conductivity, Vol. I, edited by R. P. Tye (Academic, London, 1969). P.69.

3. OIML R 56, Elektrolitlarning elektr o‘tkazuvchanligini qayta hosil qiluvchi standart eritmalar, 1981-yil. P. 45-46.

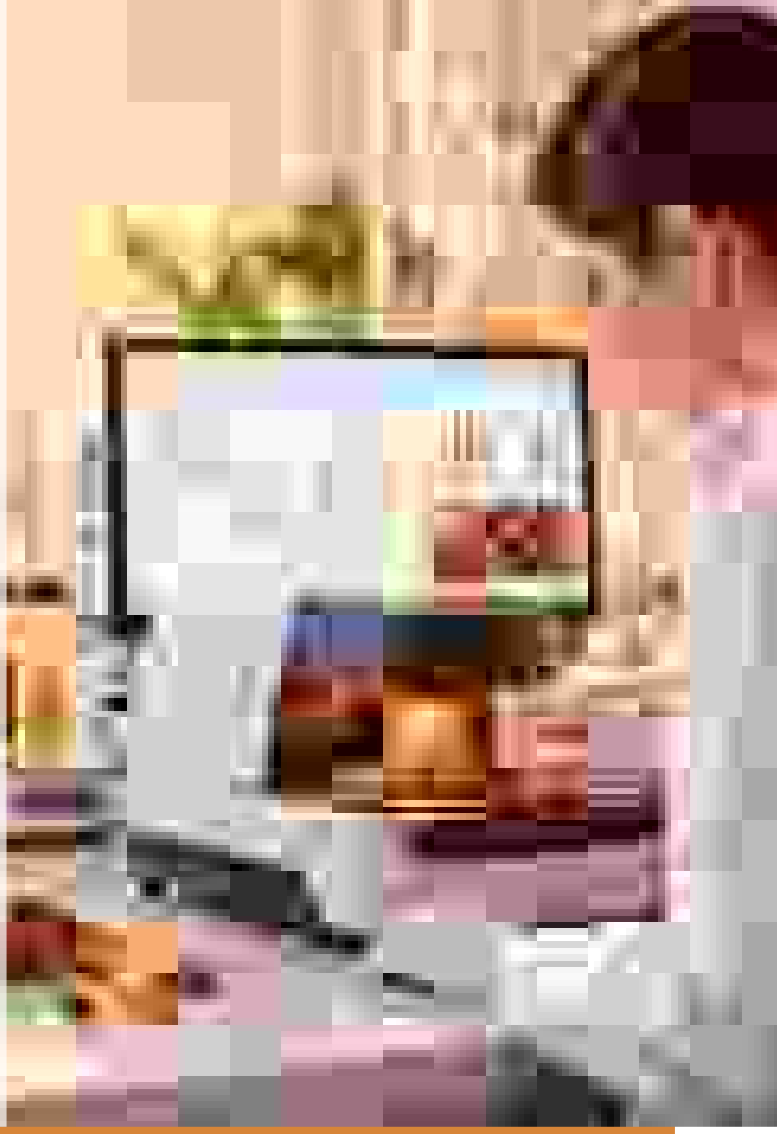
4. OIML R 68, O‘lchash yacheykalarini kalibrlash usuli, 1985-yil, P.23-24.

5. JCGM 104:2009. O‘lchash ma’lumotlarini baholash – “O‘lchash noaniqligini ifodalash bo‘yicha qo‘llanma” va unga tegishli hujjatlarga kirish. P.18.

6. Agilent HP 4284A RLC ko‘prigi uchun o‘lchash dasturiy ta’minoti bo‘yicha qo‘llanma, CMI, 2015-yil.

7. EA-4/02 M:2022. Kalibrlash jarayonida o‘lchash noaniqligini baholash, 2022-yil.

KISHMISH UZUM NAMLIGINI INFRAQIZIL SPEKTROSKOPIK USULDA O‘LCHASH: ZAMONAVIY USULLAR VA METROLOGIK YONDASHUVLAR TAHLILI



Latipov Baxodir Aminbaevich
O‘zbekiston Milliy metrologiya instituti
doktoranti

E-mail: bahodir-latipov@inbox.ru

Annotatsiya: Ushbu maqolada kishmish uzum namligini yaqin infraqizil (NIR) spektroskopiya yordamida tezkor va buzmasdan o‘lchashning ilmiy hamda metrologik asoslari tahlil qilinadi. Suvning NIR yutilish xususiyatlari, spektral qayta ishlash, PLS kalibrlash, tashqi validatsiya, o‘lchash xatoligi va noaniqlik manbalari ko‘rib chiqilib, metrologik ishonchli o‘lchash tizimini shakllantirish bo‘yicha yondashuv taklif etiladi.

Kalit so‘zlar: kishmish, uzum, namlik, infraqizil spektroskopiya, NIR, NIRS, namlikni o‘lchash, metrologiya, o‘lchash noaniqligi, kalibrlash, PLSR, chemometrics, referens usul, buzmasdan nazorat qilish.

Аннотация: В статье проанализированы научные и метрологические основы быстрого и неразрушающего измерения влажности изюма методом ближней инфракрасной (NIR) спектроскопии. Рассмотрены характеристики поглощения воды, спектральная предобработка, PLS-калибровка, внешняя валидация, погрешность измерения и источники неопределенности. Предложен подход к формированию метрологически надежной системы измерения влажности изюма.

Ключевые слова: изюм, виноград, влажность, инфракрасная спектроскопия, NIR, NIRS, измерение влажности, метрология, неопределенность измерения, калибровка, PLSR, хемометрика, референсный метод, неразрушающий контроль.

Abstract: This article analyzes the scientific and metrological foundations of rapid and nondestructive moisture measurement in raisins using near-infrared (NIR) spectroscopy. Water absorption features, spectral preprocessing, PLS calibration, external validation, measurement error, and uncertainty sources are considered. An approach is proposed for developing a metrologically reliable raisin moisture measurement system.

Keywords: raisins, grape, moisture, infrared spectroscopy, NIR, NIRS, moisture measurement, metrology, measurement uncertainty, calibration, PLSR, chemometrics, reference method, nondestructive testing.

Kirish. Kishmish ishlab chiqarishda namlik yakuniy mahsulotning saqlanishi, teksturasi, massa almashinuvi va texnologik barqarorligiga bevosita ta'sir qiladigan asosiy ko'rsatkichlardan biridir. Namlikning ortiqcha yoki yetarli darajada kamaytirilmasligi mahsulotning saqlash barqarorligiga salbiy ta'sir ko'rsatishi mumkin. Shu sababli ishlab chiqarish jarayonida namlikni tez, ishonchli va mahsulotni buzmasdan aniqlashga ehtiyoj mavjud.

An'anaviy gravimetrik usullar yuqori metrologik maqomga ega bo'lsa-da, ularning asosiy kamchiligi o'lchashning nisbatan uzoq davom etishi va namunani quritish, tortish kabi operatsiyalarni talab qilishidir. NIR spektroskopiya esa qisqa vaqt ichida, reagentlarsiz va ko'pincha namuna tayyorlashni minimallashtirgan holda ma'lumot olish imkonini beradi [1; B.315; 2; B.176]. Huxsollning kishmish bo'yicha tadqiqotlari NIR diffuz qaytish va transmissiya yondashuvlarining namlik bilan bog'liq ko'rsatkichlarni baholashdagi salohiyatini ko'rsatgan [3; B.75], [4; B.5].

Shu bilan birga, NIR o'lchash vositasi oddiy optik sensor sifatida emas, balki "o'lchash obyekti–optik signal–matematik model–referens qiymat–metrologik baholash" zanjiri sifatida qaralishi lozim. Zamonaviy sharhlar NIRda spektral shovqin, yorug'lik sochilishi, matritsa ta'siri, kalibrlashni boshqa asbobga ko'chirish va modelning umumlashuvchanligi muammolarini alohida qayd etadi [1; B.315; 2; B.176].

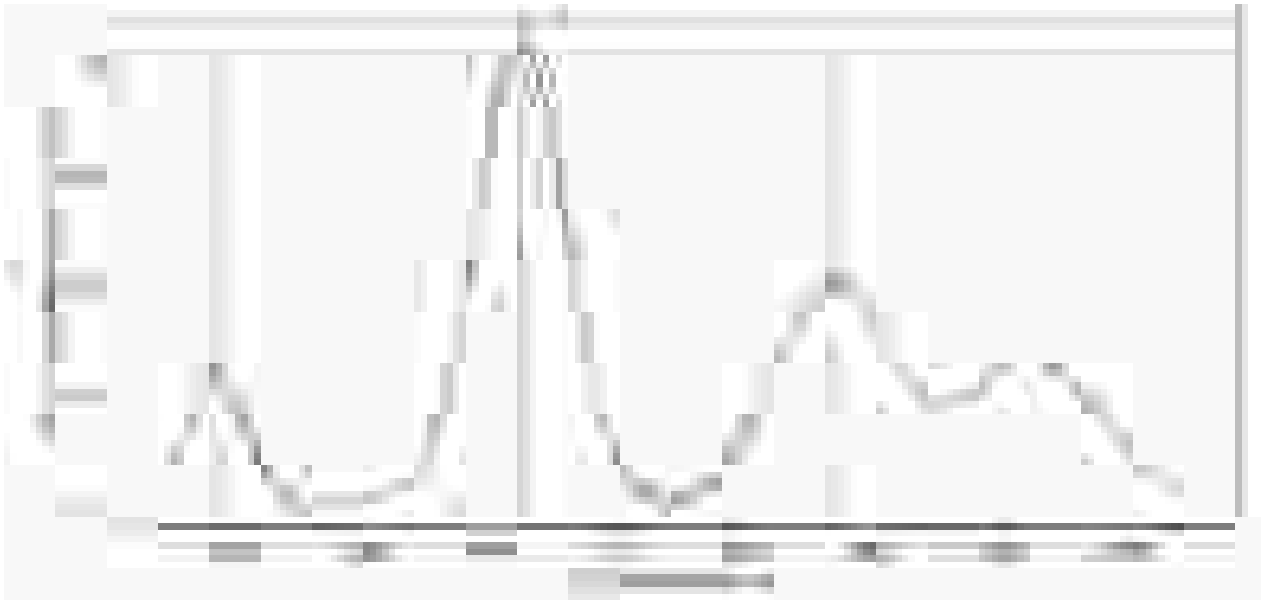
Maqolaning maqsadi – kishmish uzum namligini NIR/IR spektroskopik usulda o'lchash bo'yicha ilmiy adabiyotlarni metrologik nuqtayi nazardan tizimlashtirish, amaldagi yondashuvlarning afzallik va cheklovlarini aniqlash

Adabiyotlar tahlili. 1. NIR usulining fizik asoslari. NIR spektroskopiyada odatda

760–2500 nm diapazondagi elektromagnit nurlanishdan foydalaniladi. Ushbu sohada O–H, C–H va N–H bog‘larining yuqori tartibli overtone va kombinatsion tebranishlari namoyon bo‘ladi [[5; B.1814], [7; B.195]. Suvning NIR spektridagi xususiyatlari namlikni miqdoriy baholash uchun fizik asos yaratadi. Ayniqsa 970 va 1450 nm atrofidagi zonalar suv bilan bog‘liq signallarning muhim qismini tashkil etadi; quritilgan xurmo bo‘yicha hyperspectral tadqiqotda aynan shu zonalar namlik modeli uchun ajratilgan [8; B.1409].

Aquaphotomics yondashuvi suvning faqat miqdorini emas, balki uning molekulyar muhitini ham spektral grafik orqali tavsiflashga imkon beradi [9; B.133], [10; B.603]. Kishmish kabi biologik matritsada suvning bog‘langan va erkin holatlari, shakarlar va hujayra strukturasining o‘zaro ta’siri spektrga ta’sir qilishi mumkin. Shu sababli metrologik model faqat bitta to‘lqin uzunligiga emas, balki ma’lum spektral interval va ko‘p o‘zgaruvchili kalibrlashga tayanishi maqsadga muvofiq.

1-rasm. Suv bilan bog‘liq NIR yutilish zonalarining konseptual ko‘rinishi.



2. Kishmish namligini NIR yordamida aniqlash bo‘yicha tadqiqotlar. Kishmish uchun bevosita NIR tadqiqotlari nisbatan erta boshlangan. Huxsoll NIR diffuz qaytish tahlilini California Seedless Raisins namunalarida namlik va suv faolligini baholashga qo‘llagan [3; B.75]. Tadqiqotda butun va maydalangan namunalar, muvozanatlangan va muvozanatlanmagan holatlar ko‘rib chiqilgan. Natijalar NIR kalibrlashining namlik bilan bog‘liq ko‘rsatkichlarni bashorat qilish salohiyatini ko‘rsatgan, biroq vakuum-pech usuli bilan aniqlangan namlik uchun aniq kalibrlashga katta namunalar to‘plami zarurligi qayd etilgan [3; B.75].

Huxsoll, Bolin va Mackey tomonidan olib borilgan boshqa ishda NIT (near-infrared transmittance) yordamida kishmish sifati va namligini baholash imkoniyati ko‘rsatilgan [4; B.5]. Bu natija kishmishning optik xususiyatlari namlik va boshqa sifat parametrlarini birgalikda ifodalashi mumkinligini ko‘rsatadi. Shu bilan birga, metrologik nuqtayi nazardan NIT/NIR signalining geometrik konfiguratsiyasi, mahsulotning qalinligi, bulk density va yuzaning optik holati o‘lchash natijasiga ta’sir qilishi mumkin.

3. Quritilgan mevalar va oziq-ovqatlarda NIR yondashuvlari. Quritilgan o‘riklarda FT-NIR va PLS-R asosidagi

tadqiqot namlikni yuqori bashorat qilish mumkinligini ko‘rsatgan: mualliflar namlik uchun $R^2p=0.986$ va RMSEP = 1.22% ko‘rsatkichlarini hisobot qilgan [11; B.469]. Bu natija kishmish uchun ham shunga o‘xshash kalibrlash strategiyasini sinash mumkinligini ko‘rsatadi, biroq boshqa mahsulotdagi aniqlikni kishmishga bevosita ko‘chirish mumkin emas; matritsa va namlik diapazoni qayta kalibrlashni talab qiladi.

Quritilgan xurmo bo‘yicha hyperspectral imaging tadqiqotida PLSR qo‘llanib, suv bilan bog‘liq 971 va 1452 nm zonalari ajratilgan va optimal kalibrlash modelida $R^2=0.9673$ natija olingan [8; B.1409]. Ushbu ish NIR spektrni tasviriy ma’lumot bilan birlashtirish namlik taqsimotini kuzatishda istiqbolli ekanini ko‘rsatadi.

Boshqa oziq-ovqat matritsalarida ham NIR namlikni on-line yoki masofadan nazorat qilish uchun qo‘llangan. Masalan, quritish jarayonidagi fermentlangan kolbasalarda turli NIR asboblari taqqoslanib, PLS modellarining o‘lchash geometriyasi va spektral diapazoniga sezgirligi ko‘rsatilgan [12; B.1752]. Bu holat kishmish o‘lchagichini loyihalashda asbobning faqat spektral diapazonini emas, balki optik geometriyasini ham metrologik tavsif sifatida baholash zarurligini anglatadi.

4. Chemometrics va kalibrlash. NIR spektrlarining ko‘p o‘lchovliligi va fizik-kimyoviy omillarning o‘zaro ustma-ust tushishi PLS, PCR, SVR va ANN kabi matematik usullardan foydalanishni talab qiladi[5; B.1814], [7; B.195]. Spektral oldindan ishlov berishda SNV, MSC, Savitzky–Golay silliqlash va hosilalar keng qo‘llanadi. Ammo preprocessingning haddan tashqari ko‘pligi signalni sun’iy ravishda “yaxshilab”, modelning tashqi validatsiyadagi haqiqiy xatosini yashirishi mumkin [6; B.70036], [13; B.2742].

5. Metrologik muammo va ilmiy bo‘shliq. Adabiyotlar tahlili asosida uchta asosiy ilmiy-metrologik bo‘shliq ajratildi. Birinchidan, kishmish uchun NIR namlik kalibrlashlari mavjud bo‘lsa-da, o‘lchash vositasining to‘liq metrologik tavsiflari bir tizimda kam yoritilgan. Ikkinchidan, model aniqligi ko‘pincha R^2 va RMSEP bilan ifodalanadi, holbuki o‘lchash noaniqligi va uning manbalarini komponentlar bo‘yicha ajratish metrologik qarorlar uchun zarur. Uchinchidan, turli nav, quritish darajasi, harorat va namlik taqsimotining modelga ta’siri hamda kalibrlashning vaqt bo‘yicha barqarorligi alohida sinovdan o‘tkazilishi kerak.

1-jadval.
Asosiy tadqiqotlarning qiyosiy tahlili

Manba	Obyekt	Usul	Model/ko‘rsatkich	Metrologik ahamiyati
Huxsoll [3; B.75]	Kishmish	NIR diffuse reflectance	Namlik va aw kalibrlashi	Kishmish uchun bevosita ilmiy asos; katta namuna zarur
Huxsoll et al. [4; B.5]	Kishmish	NIT	Namlik/sifat prognozi	Transmissiya geometriyasi imkoniyati
Sarie et al. [11; B.469]	Quritilgan o‘rik	FT-NIR	PLS-R; R^2 p =0.986	Quritilgan meva uchun yuqori bashorat salohiyati
Cho et al.[8; B.1409]	Quritilgan xurmo	SWIR hyperspectral	PLSR; $R^2=0.9673$	971/1452 nm suv zonalari
Collell et al. [12; B.1752]	Fermentlangan kolbasa	NIR, turli asboblar	PLS; R^2p va RMSEP	Asbob konfiguratsiyasining ta’siri
Ezenarro & Schorn-García [6; B.70036]	Oziq-ovqat NIRS	Tizimli sharh	Cross/external validation	Validatsiya qat’iyligi
Dai et al. [5; B.1814]	Oziq-ovqatlar	NIR	PLS/SVM/ANN va preprocessing	Kalibrlash transferi va model robustligi

Metodologiya. Ushbu maqola eksperimental natijalarni va adabiyotlar tahlili hamda metrologik metodologiyani ishlab chiqishga yo'naltirilgan. Shuning uchun quyidagi natijalar "taklif etilayotgan o'lchash arxitekturasi" va "adabiyotlar asosidagi tahliliy natijalar" sifatida talqin qilinadi.

2-rasm. Kishmish namligini NIR asosida o'lchashning taklif etilayotgan metrologik zanjiri.



1. Tavsiya etilayotgan o'lchash tizimi

Taklif etilayotgan tizimda namuna yuzasidan qaytgan yoki namuna orqali o'tgan NIR nurlanish detektor tomonidan raqamlashtiriladi. Olingan spektr xom holatda modelga uzatilmaydi; avval shovqin, baseline drift va sochilish effektlarini kamaytiruvchi preprocessing bajariladi. Keyin referens usulda aniqlangan namlik qiymatlari bilan spektral o'zgaruvchilar orasida kalibrlash modeli quriladi.

2. Namlikni referens usulda aniqlash

Metrologik kalibrlash uchun referens qiymat mustaqil usul bilan olinishi kerak. Namlikning massaviy ulushi umumiy ko'rinishda quyidagicha ifodalanadi:

(1)

bu yerda

m_0 – nam [illegible] ıg'ich massasi,

m_1 – quritilgandan keyingi massasi.

Referens usulning o'zi ham noaniqlikka ega. Shu sababli NIR modelining xatosi referens qiymatning noaniqligidan mustaqil ravishda talqin qilinmasligi kerak. Amaliy tadqiqotda namuna olish, tortish, quritish harorati va davomiyligi, desikatsiya hamda tarozining kalibrlanishi noaniqlik byudjetiga kiritiladi.

3. NIR absorbans va Beer–Lambert modeli

Optik signalni tushuntirish uchun absorbans quyidagicha ifodalanadi:

$$A(\lambda)=Log_{10}()= \varepsilon(\lambda)\, c\, l \qquad (2)$$

бу ерда:

A(λ)-absorbans (o'lchovsiz kattalik);

Io (λ)-tushuvchi nurlanish intensiviligi (boshlang'ich intensivlik),

1(λ)-o'lchangan (o'tgan yoki qaytgan) nurlanish intensiviligi;

ε(λ)-spektral sezgirlik koeffitsiyenti (molyar yutilish koeffitsiyenti), L-mol^{-1}-cm^{-1};

C- analitik komponent konsentratsiyasi, mol·L^{-1};

l-optik yo'l uzunligi, cm.

Real biologik matritsada sochilish va komponentlararo bog'lanish tufayli ushbu tenglama bevosita bir o'zgaruvchili model sifatida yetarli emas; shu sababli multivariat kalibrlash zarur [5; B.1814], [7; B.195].

4. PLS kalibrlash modeli

NIR spektr matritsasi X va referens namlik vektori y o'rtasidagi bog'lanish PLS orqali quyidagicha umumlashtirilishi mumkin:

$$X = T P^T + E; \quad (3)$$

$$y = T q + f; \quad (3)$$

$$\hat{y} = b_0 + \Sigma(b_j X_j) \quad (4)$$

Bu yerda:
X-NIR spektr ma'lumotlar matritsasi (n × p);
y -referens namlik qiymatlari vektori (n × 1);
T -latent o'zgaruvchilar (skorlar) matritsasi (n × a);
P - yuklamalar (loading) matritsasi (p × a);
q - y vektori uchun regressiya koeffitsiyentlari vektori (a × 1);
E - X matritsasining qoldiq (rezidual) matritsasi (n × p);
f - y vektorining qoldiq (rezidual) vektori (n × 1);
y - PLS modeli yordamida hisoblangan (prognoz qilingan) namlik qiymati;
bo - erkin had (intersept);
bj - j-o'zgaruvchiga mos regressiya koeffitsiyenti;
X - j-o'zgaruvchi (spektral kanal/intensivlik);
n - namunalar soni;
p- o'zgaruvchilar (to'lqin uzunliklari) soni;
a latent o'zgaruvchilar soni.

Model parametrlarining optimal o'zgaruvchilar soni faqat kalibrlashdagi moslik bilan emas, balki cross-validation va alohida tashqi validatsiya bilan tanlanishi kerak [6].

5. Spektral preprocessing

1. Savitzky–Golay silliqlash — yuqori chastotali shovqinni kamaytirish.
2. SNV — sochilish va namuna fizik holatidan keladigan multiplikativ effektlarni kamaytirish.
3. MSC — multiplikativ va additiv sochilish komponentlarini kompensatsiya qilish.
4. Birinchi yoki ikkinchi hosila — baseline siljishini kamaytirish va spektral xususiyatlarni ajratish.
5. Preprocessing variantlarini tashqi validatsiya orqali taqqoslash.
6. Metrologik tavsiflarni baholash

Asosiy ko'rsatkichlar quyidagicha aniqlanishi mumkin:

$e_i = \hat{y}_i - y_i;$
$RMSEP = \sqrt{[\Sigma(\hat{y}_i - y_i)^2 / n]};$
$MAE = (1/n)\ \Sigma|\hat{y}_i - y_i|$
$R^2 = 1 - \Sigma(\hat{y}_i - y_i)^2 / \Sigma(y_i - \bar{y})^2$

Metrologik baholashda bundan tashqari o'rtacha bias, takrorlanuvchanlik standart og'ishi, qayta tiklanuvchanlik, kalibrlashning vaqt bo'yicha drift ko'rsatkichi va o'lchash noaniqligi hisobga olinadi. Noaniqlikning umumiy modeli konseptual tarzda:

$$u_{c(y)} = \sqrt{(u_{ref^2} + u_{spec^2} + u_{cal^2} + u_{rep^2} + u_{temp^2} + u_{sample^2} + \ldots)}.$$

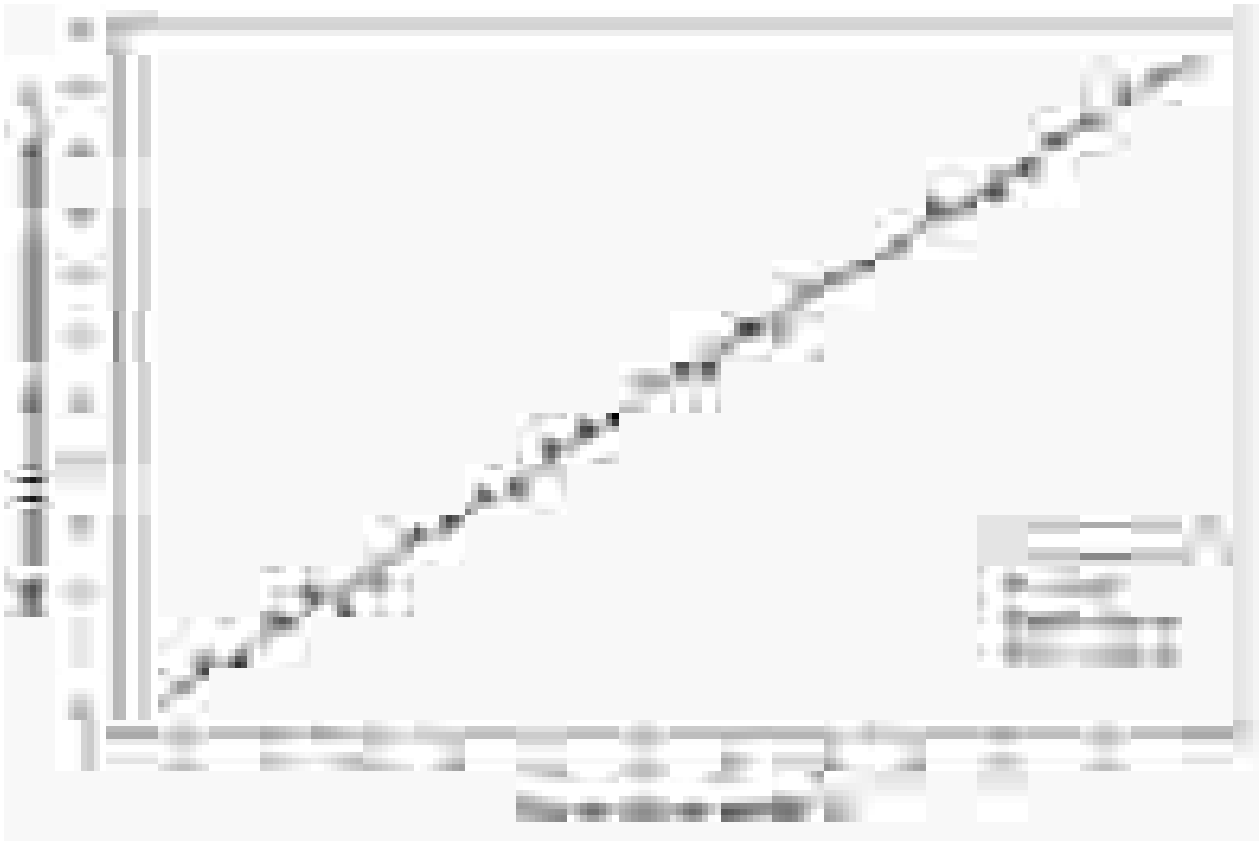
Kengaytirilgan noaniqlik odatda $U = k \cdot u_c$ ko'rinishida ifodalanadi; bu yerda **k** — qamrov koeffitsienti. Aniq **k** qiymati tanlangan ishonch darajasi va erkinlik darajalariga bog'liq.

3-rasm. Noaniqlik manbalarining konseptual byudjeti.



Natijalar. Adabiyotlar sintezi natijasida kishmish namligini NIR asosida o'lchash uchun ilmiy asoslangan quyidagi xulosalar olindi. Birinchidan, kishmishning o'zida NIR namlik tahlili avvaldan ko'rsatilgan [3; B.75], [4; B.5], shuning uchun yangi tadqiqotning yangiligi "NIRni birinchi marta qo'llash" emas. Ikkinchidan, quritilgan mevalardagi FT-NIR/PLS va hyperspectral tadqiqotlar yuqori bashorat aniqligiga erishish mumkinligini ko'rsatadi [8; B.1409], [11; B.469]. Uchinchidan, metrologik nuqtayi nazardan model aniqligi va o'lchash aniqligi aynan bir tushuncha emas; referens usulning noaniqligi, namuna heterogenligi, harorat, optik geometriya va kalibrlash driftini alohida nazorat qilish zarur[5; B.1814], [6; B.70036].

4-rasm. NIR kalibrlash munosabatining konseptual ko'rinishi.



2-jadval. Taklif etilayotgan NIR o'lchash vositasi uchun metrologik tavsiflar

Tavsif	Baholash mezoni	Tadqiqotda tavsiya etiladigan yondashuv
Aniqlik	RMSEP, MAE, bias	Mustaqil tashqi test to'plami
Takrorlanuvchanlik	s_r	Bir xil namuna, qisqa vaqt oralig'i, bir operator
Qayta tiklanuvchanlik	s_R	Turli kun/operator/namuna seriyasi
Sezgirlik	Δsignal/ΔW	Namlik diapazoni bo'yicha kalibrlash grafigi
Linearlik/model mosligi	R^2, residuals	Qoldiq tahlili + tashqi validatsiya
Barqarorlik	Drift	Vaqt bo'yicha nazorat namunasi
Noaniqlik	u_c, U	Komponentli noaniqlik byudjeti
Kalibrlash transferi	SEP/BIAS	Ikkinchi asbob yoki ikkinchi partiyada tekshirish

Muhokama. Kishmish namligini NIR orqali o'lchashda asosiy ilmiy muammo signalning mavjudligi emas, balki signalni metrologik jihatdan izchil o'lchashga aylantirishdir. NIR spektri mahsulotning namligidan tashqari shakar miqdori, zichlik, sirt tuzilishi, rang, harorat va geometrik joylashuvdan ham ta'sirlanadi. Shu sababli oddiy bir nuqtali regressiya ko'pincha universal o'lchash vositasi uchun yetarli emas.

Adabiyotlarda PLSR keng qo'llanadi va yuqori R^2 qiymatlari olinadi[8; B.1409], [11; B.469], [12; B.1752]. Biroq R^2ning o'zi metrologik yaroqlilik mezoni bo'la olmaydi. Masalan, model kalibrlash to'plamiga juda moslashib qolsa, tashqi namunalar uchun xatolik oshishi mumkin. 2025-yildagi tizimli sharh ham aynan shu muammoni ko'rsatib, tashqi validatsiya va aniq hisobot berish zarurligini ta'kidlaydi [6; B.70036].

Kishmish uchun taklif etilayotgan tadqiqotda namlik diapazoni mahsulotning real texnologik holatlarini qamrab olishi, nav va quritish sharoitlari bo'yicha namuna qatlamlari hosil qilinishi, referens namlik mustaqil usul bilan aniqlanishi va NIR modeli tashqi namunalar bilan tekshirilishi lozim. Shu bilan birga, optik geometriya — diffuse reflectance, transmittance yoki interactance — alohida eksperimental omil sifatida baholanishi kerak.

Yuqoridagi tahlil shuni ko'rsatadiki, dissertatsiya doirasidagi ilmiy yangilikni NIR usulining o'zidan ko'ra, kishmish namligini o'lchashga moslashtirilgan optik o'lchash tizimi, kalibrlash modeli va metrologik ta'minotning integratsiyasida shakllantirish maqsadga muvofiq.

Xulosa. Kishmish uzum namligini infraqizil spektroskopik usulda o'lchash namlikni tezkor, kontaktsiz va buzmasdan nazorat qilish imkonini beruvchi samarali usul hisoblanadi. Adabiyotlar tahlili spektral ma'lumotlarni matematik qayta ishlash va kalibrlash modellaridan foydalanish o'lchash aniqligini oshirish imkonini berishini ko'rsatdi. Tadqiqot natijasida spektral signal, kalibrlash modeli, harorat va namuna heterojenligi kabi omillar o'lchash natijasiga sezilarli ta'sir qilishi aniqlandi. Shu sababli kishmish namligini infraqizil usulda aniqlashda optimal spektral diapazonni tanlash, matematik modelni takomillashtirish va o'lchash noaniqligini kamaytirish usulning ishonchliligini oshirishning asosiy yo'nalishlari sifatida belgilandi.

Adabiyotlar ro'yxati

1. Huxsoll, C. C. (2000). Assessment of near infrared (NIR) diffuse reflectance analysis for measuring moisture and water activity in raisins. Journal of Food Processing and Preservation, 24(4), 315–333. https://doi.org/10.1111/j.1745-4549.2000.tb00422.x

2. Huxsoll, C. C., Bolin, H. R., & Mackey, B. E. (1995). Near infrared analysis potential for grading raisin quality and moisture. Journal of Food Science, 60(1), 176–180. https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1995.tb05632.x

3. Zhang, G., & McCarthy, M. J. (2007). Theory and application of near infrared reflectance spectroscopy in determination of food quality. Trends in Food Science & Technology, 18(2), 72–83. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2006.09.003

4. Bradley, R. L. (2019). Assessment of moisture content measurement methods of dried food products in small-scale operations in developing countries: A review. Trends in Food Science & Technology. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.04.006

5. Dai, L., Luo, D., Zhang, J., Chen, Y., & Li, C. (2026). Near-Infrared Spectroscopy in Food Analysis: Applications, Chemometric Strategies, and Technological Advances. Foods, 15(10), 1814. https://doi.org/10.3390/foods15101814

6. Ezenarro, J., & Schorn-García, D. (2025). How Are Chemometric Models

Validated? A Systematic Review of Linear Regression Models for NIRS Data in Food Analysis. Journal of Chemometrics, 39(6). https://doi.org/10.1002/cem.70036

7. Tsenkova, R., Kovacs, Z., & Kubota, Y. (2015). Aquaphotomics: Near Infrared Spectroscopy and Water States in Biological Systems. Subcellular Biochemistry, 71, 189–211. https://doi.org/10.1007/978-3-319-19060-0_8

8. Cho, J.-S., Choi, J.-Y., & Moon, K.-D. (2020). Hyperspectral imaging technology for monitoring of moisture contents of dried persimmons during drying process. Food Science and Biotechnology, 29(10), 1407–1412. https://doi.org/10.1007/s10068-020-00791-x

9. Szulc, J., Gozdecka, G., & Poćwiardowski, W. (2020). The application of NIR spectroscopy in moisture determining of vegetable seeds. Czech Journal of Food Sciences, 38(2), 131–136. https://doi.org/10.17221/57/2019-CJFS

10. Collell, C., Gou, P., Arnau, J., & Comaposada, J. (2011). Non-destructive estimation of moisture, water activity and NaCl at ham surface during resting and drying using NIR spectroscopy. Food Chemistry, 129(2), 601–607. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2011.04.073

11. Collell, C., Gou, P., Arnau, J., Muñoz, I., & Comaposada, J. (2012). NIR technology for on-line determination of superficial a(w) and moisture content during the drying process of fermented sausages. Food Chemistry, 135(3), 1750–1755. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2012.06.036

12. Sarie, Y., et al. (2018). Rapid, simultaneous and non-destructive assessment of the moisture, water activity, firmness and SO2 content of the intact sulphured-dried apricots using FT-NIRS and chemometrics. Talanta, 186, 467–472. https://doi.org/10.1016/j.talanta.2018.05.007

13. Muncan, J., & Tsenkova, R. (2019). Aquaphotomics—From Innovative Knowledge to Integrative Platform in Science and Technology. Molecules, 24(15), 2742. https://doi.org/10.3390/molecules24152742

14. Escobar, M., et al. (2022). Preprocessing NIR Spectra for Aquaphotomics. Molecules, 27(20), 6795. https://doi.org/10.3390/molecules27206795

15. Malvandi, A., Feng, H., & Kamruzzaman, M. (2022). Application of NIR spectroscopy and multivariate analysis for non-destructive evaluation of apple moisture content during ultrasonic drying. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 269, 120733. https://doi.org/10.1016/j.saa.2021.120733

16. Jannok, P., Kamitani, Y., & Kawano, S. (2014). Development of a common calibration model for determining the Brix value of intact apple, pear and persimmon fruits by near infrared spectroscopy. Journal of Near Infrared Spectroscopy, 22(5). https://doi.org/10.1255/jnirs.1130

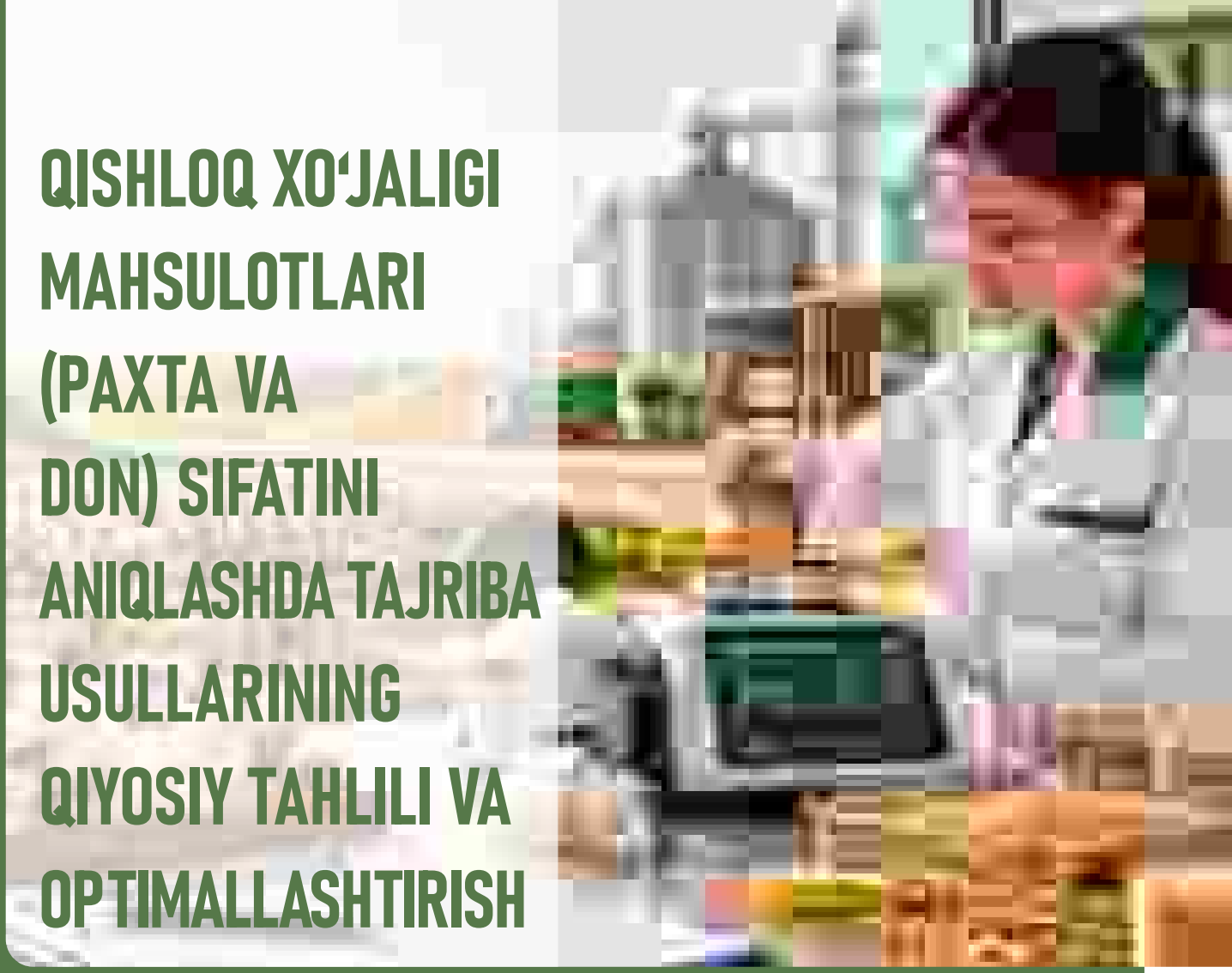
17. Bobba, S., Zinfollino, N., & Fissore, D. (2022). Evaluation of the robustness of a novel NIR-based technique to measure the residual moisture in freeze-dried products. Journal of Pharmaceutical Sciences, 111(5), 1437–1450. https://doi.org/10.1016-/j.xphs.2021.10.015

18. Fan, M., Zhao, Y., Liu, Y., Cai, W., & Shao, X. (2015). Aquaphotomics of Near Infrared Spectroscopy. Progress in Chemistry, 27(2–3), 242–250. https://doi.org/10.7536/PC140803

19. Talens, P., et al. (2022). Review: The evolution of chemometrics coupled with near infrared spectroscopy for fruit quality evaluation. NIR spectroscopy and chemometrics literature review. Journal of Near Infrared Spectroscopy, 30(1). https://doi.org/10.1177/09670335211057235

20. "Rapid determination of water content in an inter-species model using near-infrared spectroscopy." (2026). Journal of Food Composition and Analysis, 154, 109195. https://doi.org/10.1016/j.jfca.2026.109195

QISHLOQ XO‘JALIGI MAHSULOTLARI (PAXTA VA DON) SIFATINI ANIQLASHDA TAJRIBA USULLARINING QIYOSIY TAHLILI VA OPTIMALLASHTIRISH



Shukurullayeva Ruhshona Adhamjon qizi
Toshkent irrigatsiya va qishloq xo‘jaligini mexanizatsiyalash muhandislari instituti Milliy tadqiqot universiteti “Metrologiya va standartlashtirish va sifatni boshqarish” yo‘nalishi 4-bosqich talabasi

E-mail: ruhshona@gmail.com

Murodova Sarvinoz Fahriddin qizi
O‘zbekiston milliy metrologiya instituti 1-bosqich doktoranti

E-mail: murodovas638@gmail.com

Kalandarov Palvan Iskandarovich
Toshkent irrigatsiya va qishloq xo‘jaligini mexanizatsiyalash muhandislari instituti Milliy tadqiqot universiteti professori

E-mail: eest_uz@mail.ru

Annotatsiya. Maqolada strategik xomashyo hisoblangan paxta va don mahsulotlarining sifatini aniqlashda qo‘llaniladigan asosiy tajriba usullari: gravimetrik, elektr (konduktometrik), dielkometrik va optik usullar ilmiy jihatdan tahlil qilingan. Har bir metodning fizik prinsiplari, xatolik darajasi va ekspressligi baholangan. Tadqiqot davomida usullarni sifat mezonlari bo‘yicha optimallashtirish va ko‘p parametrli matematik modellari ishlab chiqildi. Ishlab

chiqarish va qabul qilish punktlari uchun eng qulay va samarali usul sifatida harorat va zichlik bo‘yicha korreksiyalanuvchi dielkometrik metod tavsiya etilgan.

Kalit so‘zlar: paxta, don sifati, namlik, gravimetrik usul, dielkometrik metod, optik datchik, matematik model, optimallashtirish, o‘lchov xatoligi, harorat kompensatsiyasi.

Abstract. The article scientifically analyzes the main experimental methods used to determine the quality of cotton and grain products, which are considered strategic raw materials: gravimetric, electrical (conductometric), dielectric, and optical methods. The physical principles, error rate, and expressiveness of each method were evaluated. During the study, methods were optimized according to quality criteria and multi-parameter mathematical models were developed. The dielectric method, which is corrected for temperature and density, is recommended as the most convenient and effective method for production and reception points.

Keywords: cotton, grain quality, moisture, gravimetric method, dielcometric method, optical sensor, mathematical model, optimization, measurement error, temperature compensation.

Kirish. Qishloq xo‘jaligi mahsulotlari, xususan, paxta va donni saqlash hamda qayta ishlash sanoatida ularning sifatini texnik reglamentlarga muvofiq baholash o‘ta muhim vazifadir. Paxta tolasi va donning texnologik xususiyatlarini belgilovchi asosiy sifat ko‘rsatkichi bu — namlik miqdori (W, %) hisoblanadi. Yuqori namlik mahsulotning chirishiga, o‘zidan issiqlik chiqarib yonishiga va tola xossalarining yomonlashishiga olib keladi. Shu bois, ushbu mahsulotlarning sifatini laboratoriya va dala sharoitida tez, aniq va mahsulotga shikast yetkazmasdan (non-destructive) o‘rganadigan tajriba usullarini tahlil qilish va optimalini tanlash dolzarb ilmiy-amaliy ahamiyatga ega.

1. Tajriba usullari va ularning fizik asoslari

1.1. Gravimetrik (termogravimetrik) usul

Bu usul standart (arbitraj) metod hisoblanib, mahsulot namunasini quritish shkafida qat’iy belgilangan haroratda (105-130) to‘liq quritish va undagi suv massasining kamayishini tortishga asoslanadi. Namlik quyidagi formula bo‘yicha hisoblanadi:

$$W = \frac{m_1 - m_2}{m_1 - m_0} \cdot 100\% \quad (1)$$

Bu yerda: m_0 — bo‘sh buks massasi, g; m_1 — quritishdan oldingi namunali buks massasi, g; m_2 — quritilgandan keyingi namunali buks massasi, g. Baholash: Eng yuqori aniqlikka ega (0.1-0.2%), ammo jarayon juda uzoq davom etadi (2-6 soat), shu sababli uni tizimli avtomatlashtirilgan tezkor nazoratga tatbiq etib bo‘lmaydi [1.B.107.]

2.2. Elektr (konduktometrik) usul

Mahsulotning elektr o‘tkazuvchanligi (G) yoki solishtirma qarshiligi (ρ) uning namligiga bog‘liqligiga asoslanadi. Quruq don va paxta dielektrik xususiyatga ega bo‘lsa, undagi erkin suv miqdori ortishi bilan elektr o‘tkazuvchanlik oshadi:

(2)

Baholash: Oddiy va arzon asboblar ishlatiladi. Biroq, mahsulotning zichligi, harorati va namunaning elektrodlarga tegish bosimi o'lchov natijasiga kuchli xatolik kiritadi (1.5-2.0%).

2.3. Dielkometrik (sig'im) usuli

Usul paxta va donning nisbiy dielektrik sindiruvchanligi ε suvning dielektrik sindiruvchanligiga ($\varepsilon_{H2O} \approx 80$) bog'liq ravishda o'zgarishiga asoslanadi. Namuna sig'im datchigi (kondensator plitalari) orasiga joylashtiriladi. Kondensatorning elektr sig'imi (C) quyidagicha ifodalanadi:

(3)

Bu yerda ε_0 — elektr doimiysi, S — plita yuzasi, d — plitalar orasidagi masofa. Mahsulot namligi ortishi bilan datchik sig'imi (C) oshib boradi.

Baholash: Tezkorlik juda yuqori (<5 soniya), mahsulotga shikast yetkazilmaydi, xatolik darajasi past (0.5%) [2.B.105].

2.4. Optik (Infraqizil) usul

Mahsulot yuzasidan qaytgan yoki undan o'tgan yaqin infraqizil (YaIQ, 800-2500 nm) spektridagi yorug'lik to'lqinlarining yutilish intensivligi o'rganiladi. Yutilish darajasi Buger-Lambert-Ber qonuniga bo'ysunadi:

(4)

Baholash: Masofadan turib, konveyerda harakatlanayotgan mahsulotni uzluksiz o'lchash imkonini beradi. Ammo asbob-uskunalar juda qimmat va mahsulot yuzasining rangi hamda fraksiyasi natijaga ta'sir qiladi [3.B.181-182.]

3. Dielkometrik usulning matematik modellari

Paxta va don ko'p komponentli, g'ovak-kapillyar tizimlar bo'lganligi sababli, ularning umumiy dielektrik sindiruvchanligi (ε_{sum}) quruq mahsulot skeleti (ε_m), suv (ε_W) va havo (ε_a) aralashmasidan iborat.

3.1. Strukturaviy model

Mahsulotning hajmiy namligini hisoblashda modifikatsiyalashgan Lixtenekker tenglamasidan foydalaniladi:

(5)

Bu yerda V_m, V_w, V_a — mos ravishda quruq modda, suv va havoning hajmiy ulushlaridir. Namlik miqdori (W) ortishi bilan ε_{sum} ning o'zgarishi kubik model orqali ifodalanadi:

(6)

Bu yerda a_i — paxta navi yoki don turiga bog'liq konstruktiv koeffitsientlar.

3.2. Ko'p parametrli korreksiyalash modeli

Real o'lchovlarda dielektrik o'tkazuvchanlik faqat namlikka emas, balki mahsulotning harorati (T) va namunaning zichligiga (ρ) ham bog'liq. Xatolikni yo'qotish uchun quyidagi ko'p parametrli model qo'llaniladi:

(7)

Harorat ta'sirini kompensatsiya qilish uchun harorat koeffitsienti (a_T) hisobga olinadi:

(8)

4. Datchik va o'lchash tizimining blok-sxemasi

O'lchash jarayonida datchik sig'imini yuqori aniqlikdagi raqamli signalga aylantirish va ko'p parametrli korreksiyani amalga oshirish uchun quyidagi blok-sxema ishlab chiqildi:

1-rasm. Ko‘p parametrli korreksiyalash funksiyasiga ega bo‘lgan dielkometrik namlik o‘lchagich tizimining funksional-strukturaviy blok-sxemasi.



Ushbu blok-sxema paxta va don mahsulotlarining namligini real vaqt rejimida yuqori aniqlikda o‘lchash jarayonini ifodalaydi. Bunda bir vaqtning o‘zida uchta birlamchi o‘zgartirgich (sig‘im, harorat va zichlik datchiklari) orqali fizik ko‘rsatkichlar qabul qilinadi va signallarni normallash bloklari hamda ARO‘ (Analog-raqamli o‘zgartirgich) yordamida raqamli ko‘rinishga keltiriladi. Mikroprotsessorli boshqaruv tizimi ichiga kiritilgan ko‘p parametrli matematik model algoritmi harorat va zichlik omillari keltirib chiqaradigan qo‘shimcha xatoliklarni avtomatik ravishda korreksiyalaydi, bu esa yakuniy natijaning mutlaq xatoligini minimal darajaga **(± 0.45%)** tushirishni ta’minlaydi.

5. Natijalar va ularning tahlili

Olib borilgan tajribalar va qiyosiy tahlillar asosida to‘rtta usulning texnik-iqtisodiy ko‘rsatkichlari 1-jadvalda tizimlashtirildi.

1-jadval.
Paxta va don namligini aniqlash usullarining qiyosiy tavsifi

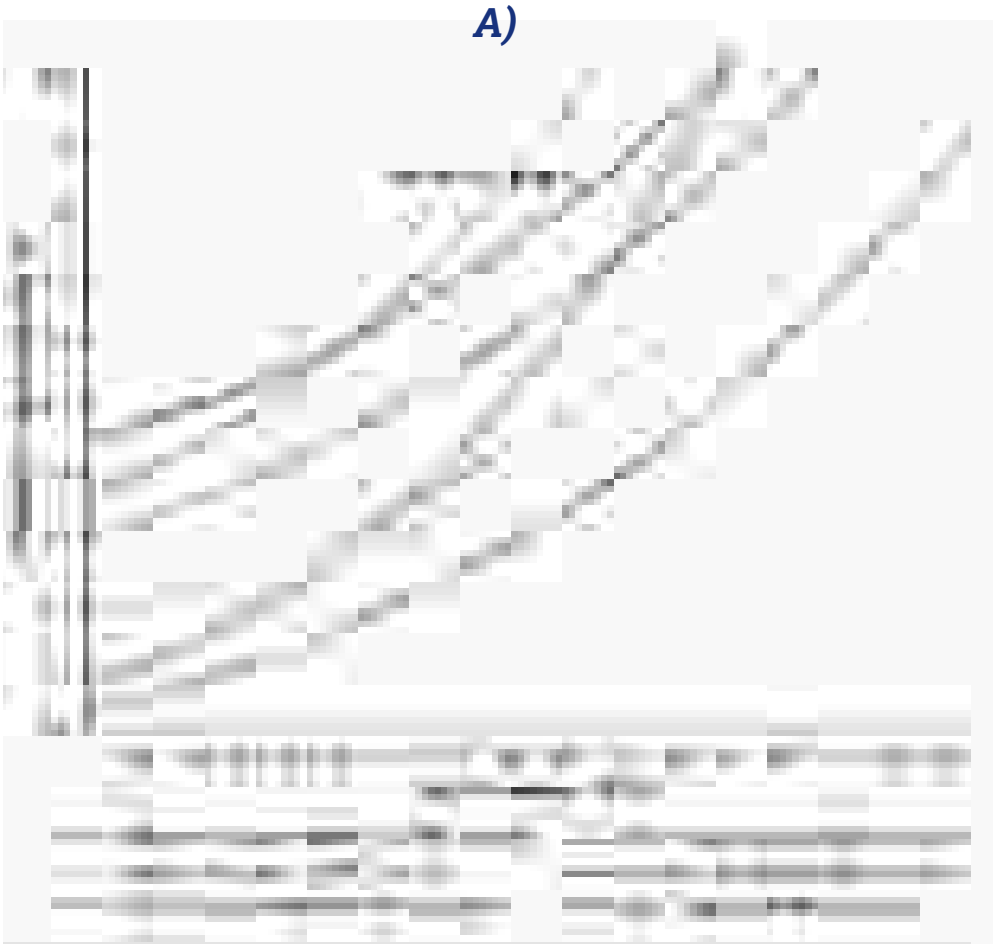
Baholash mezonlari / Usullar	Gravimetrik metod	Elektr (qarshilik)	Dielkometrik metod	Optik (IQ-spektr)
O‘lchov vaqti (Tezkorlik)	2 - 6 soat	10 - 20 soniya	**3 - 5 soniya**	1 - 2 soniya
Mutlaq xatolik (, %)	**0.15%**	1.8%	**0.45%**	0.75%
Namunaga ta’siri	Mahsulot buziladi	Qisman shikastlanadi	**Shikastlanmaydi**	Shikastlanmaydi
Uskunaning qiymati	O‘rtacha	Past	**Maqbul (Arzon)**	Juda yuqori
Avtomatlashtirish imkoni	Mavjud emas	O‘rtacha	**Yuqori**	Juda yuqori

Tajribalardan olingan statik ma'lumotlar asosida uchta parametrning (Namlik, Harorat, Zichlik) mahsulotning dielektrik o'tkazuvchanligiga ta'siri 2-jadvalda keltirilgan.

2-jadval.
Paxta va donning fizik parametrlariga ko'ra ning o'zgarishi

Mahsulot turi	Namlik (W, %)	Harorat (T,)	Zichlik (, g/sm^3)	Dielektrik o'tkazuvchanlik ()
Don (Bug'doy)	10.0	20.0	0.75	3.2
Don (Bug'doy)	14.0	20.0	0.75	4.8
Don (Bug'doy)	14.0	40.0	0.75	5.3
Don (Bug'doy)	18.0	20.0	0.82	7.1
Paxta (I-nav)	8.0	20.0	0.30	2.1
Paxta (II-nav)	12.0	20.0	0.30	3.9
Paxta (III-nav)	12.0	35.0	0.35	4.6

*2-rasm. Paxta va don namligining (W, %) mahsulot nisbiy dielektrik o'tkazuvchanligiga **(ε)** bog'liqlik grafigi (turli harorat va zichlik sharoitlarida).*





Grafikdan ko'rinib turibdiki (2-rasm, A), mahsulot tarkibidagi namlik 14% dan oshganda dielektrik o'tkazuvchanlik **(ε)** chiziqli bo'lmagan eksponensial qonuniyat asosida keskin o'sishni boshlaydi. Bu holat g'ovak-kapillyar muhitdagi suv molekulalarining "bog'langan" holatdan faol "erkin" holatga o'tishi va suvning yuqori dielektrik doimiysi **(ε ≈ 80)** tizim umumiy sig'imiga kuchli ta'sir ko'rsatishi bilan izohlanadi. Shuningdek, haroratning (T = 40°C) va zichlikning **(ρ)** ortishi grafik chiziqlarini yuqoriga siljitadi. Bu esa o'lchov xatoligini kamaytirish uchun mikroprotsessor dasturiga harorat va vazn bo'yicha ko'p parametrli korreksiyalovchi matematik modelni kiritish zarurligini ilmiy jihatdan isbotlaydi.

Qishloq xo'jaligi mahsulotlari (don va paxta) tarkibidagi namlik miqdori (W) ortishi bilan ularning dielektrik o'tkazuvchanligi (ε) qat'iy ravishda oshib boradi (2–rasm, B). Bu holat quruq mahsulot dielektrik doimiysining pastligi (2.0-3.0) va suvning dielektrik sindiruvchanligi juda yuqoriligi (ε_{H2O} 80) bilan izohlanadi. Namlik ko'tarilganda mahsulot kapillyarlarida "erkin suv" miqdori ko'payadi va tizimning umumiy elektr sig'imini keskin oshiradi.

5. Muhokama va optimallashtirish

Matematik modellar va grafiklardan ko'rinib turibdiki, namlik 14% dan oshganda dielektrik o'tkazuvchanlikning (ε) o'sish gradienti keskin kuchayadi. Bu mahsulot kapillyarlarida "bog'langan" suv molekulalarining "erkin" suv holatiga o'tishi bilan izohlanadi.

Harorat va zichlik omillari modelga korreksiya sifatida kiritilmasa, namlik o'lchovidagi sof xatolik 1.5\% - 2.2% gacha yetishi mumkin. Yuqorida keltirilgan ko'p parametrli matematik model (W=f(ε,T,ρ) ± 0.45% gacha kamaytirish imkonini beradi. Dielkometrik usul o'zining arzonligi, yuqori tezkorligi va namunani buzmasligi bilan paxta va don qabul qilish punktlari uchun eng optimal metod deb topildi.

Qishloq xo'jaligida davom etayotgan tarkibiy o'zgarishlar jarayonida, qishloq xo'jaligi ishlab chiqarishini tashkil

etishning asosiy shakllari etib, fermer va dehqon xo'jaliklari tanlab olindi. Fermer xo'jaliklarini rivojlantirishni rag'batlantirish bo'yicha chora-tadbirlarni amalga oshirish ularning barqaror va samarali rivojlanishida muhim omil hisoblanadi [4. B.3-4].

Xulosa. Paxta va don mahsulotlarining sifatini nazorat qilish tizimlarini optimallashtirishda tajriba usullarining roli beqiyos. Olib borilgan ilmiy tadqiqot va qiyosiy tahlillar asosida quyidagi xulosalarga kelindi:

1. Gravimetrik usul yuqori aniqlikka ega bo'lsa-da, davom etish vaqti uzoqligi bois ishlab chiqarish tezkorligini ta'minlay olmaydi. Optik metod esa masofaviy va konveyerli o'lchovlar uchun mos, ammo yuqori tannarx va yuza fraksiyasiga bog'liqlik cheklovlariga ega.

2. Paxta va don singari g'ovak-kapillyar tuzilishga ega mahsulotlarning namligi va sifatini ommaviy nazorat qilishda dielkometrik (sig'im) usuli eng optimal, qulay va tezkor (3-5 soniya) metod hisoblanadi.

3. Tadqiqotda taklif etilgan ko'p parametrli matematik model va ishlab chiqilgan harorat-zichlik kompensatsiyali datchik tizimining blok-sxemasi o'lchov xatoligini 0.45% gacha kamaytirishga, jarayonni to'liq avtomatlashtirishga va mahsulot sifatini real vaqt rejimida barqaror boshqarishga imkon beradi.

Foydalanilgan adabiyotlar ro'yxati:

1. Kalandarov, P.I., Turkmenov, Kh. I., Abdukadyrov, A.A., Kutybaeva, A.E., Marksuly, S. Grain moisture control in the technological process of drying based on the dielcometric method. BIO Web of Conferences, 2024, 108, 06005 https://doi.org/10.1051/bioconf/202410806005

2. Nelson S.O. Dielectric properties of agricultural products and food materials // Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy. - 2015. - Vol. 50, No. 1. - P. 15-32.

3. A. Karimov. M. M. Ismanov. Paxtani namligini optoelektron oʻlchagichlar yordamida aniqlash va xatoliklarni tahlil qilish. Scientific Journal of Mechanics and Technology 6-jild, 2-son, 2025.

4. Nasimov B.V. "O'zbekiston Respublikasida qishloq xo'jaligini innovatsion rivojlanish samaradorligi". "Iqtisodiyot va innovatsion texnologiyalar" ilmiy elektron jurnali. № 4, iyul-avgust, 2018 yil. https://iqtisodiyot.tsue.uz/sites/default/files/maqolalar/25_Nasimov.pdf

SANOAT KORXONALARINING EKSPORT RAQOBATBARDOSHLIGINI OSHIRISHDA METROLOGIYANING O‘RNI



Suleymanova Shoira Alavxanovna
Xalqaro Nordik universiteti
“Iqtisodiyot va biznesni boshqarish”
kafedrasi dotsenti

E-mail:
sh.suleymanova@nordicuniversity.org

Abdujalilova Xusnidabonu Kozimjon qizi
Xalqaro Nordik universiteti
magistri

E-mail:
abdujalilovahusnida@gmail.com

Annotatsiya. Maqolada sanoat korxonalarining eksport raqobatbardoshligini oshirishda metrologiya va o‘lchashlar birliligini ta’minlash tizimining o‘rni tahlil qilingan. Xalqaro tadqiqotlar asosida metrologiyaning tranzaksiya xarajatlarini kamaytirish, mahsulot sifatini isbotlash va texnik to‘siqlarni yengish orqali eksportga ta’sir ko‘rsatish mexanizmlari ochib berilgan. O‘zbekistonning sifat infratuzilmasi global indeksidagi o‘rni, akkreditatsiya va metrologiya sohasidagi xalqaro tan olinish bosqichlari hamda 2024-yildagi eksport tarkibi rasmiy manbalar asosida ko‘rib chiqilgan. To‘qimachilik eksportining qisqarishi asosida o‘lchash va sinov natijalarining xalqaro tan olinishi masalasi alohida tahlil qilingan. Korxonalar, sinov laboratoriyalari va davlat organlari uchun amaliy takliflar ishlab chiqilgan.

Kalit so‘zlar: metrologiya, o‘lchashlar birliligi, sifat infratuzilmasi, akkreditatsiya, kalibrlash, eksport raqobatbardoshligi, texnik to‘siqlar, sanoat korxonasi.

Аннотация. В статье анализируется роль метрологии и системы обеспечения единства измерений в повышении экспортной конкурентоспособности промышленных предприятий. На основе международных исследований раскрыты механизмы влияния метрологии на экспорт через снижение транзакционных издержек, подтверждение качества продукции и преодоление технических барьеров. По официальным источникам рассмотрены позиции Узбекистана в Глобальном индексе инфраструктуры качества, этапы международного признания в области аккредитации и метрологии, а также структура экспорта 2024 года. На примере сокращения текстильного экспорта отдельно проанализирован вопрос международного признания результатов измерений и испытаний. Разработаны практические предложения для предприятий, испытательных лабораторий и государственных органов.

Ключевые слова: метрология, единство измерений, инфраструктура качества, аккредитация, калибровка, экспортная конкурентоспособность, технические барьеры, промышленное предприятие.

Abstract. The article analyses the role of metrology and the system for ensuring the uniformity of measurements in enhancing the export competitiveness of industrial enterprises. Drawing on international studies, it explains how metrology affects exports by reducing transaction costs, proving product quality and overcoming technical barriers to trade. Using official sources, it examines Uzbekistan's position in the Global Quality Infrastructure Index, the stages of international recognition in accreditation and metrology, and the structure of exports in 2024. The decline in textile exports is used to examine the international recognition of measurement and test results. Practical recommendations are proposed for enterprises, testing laboratories and government bodies.

Keywords: metrology, uniformity of measurements, quality infrastructure, accreditation, calibration, export competitiveness, technical barriers, industrial enterprise.

Kirish. Xalqaro savdoda mahsulot narxi va sifati bilan bir qatorda uning oʻlchanadigan xususiyatlari isbotlanishi ham raqobat omiliga aylangan. Xaridor mahsulotning oʻlchami, tarkibi, mustahkamligi yoki xavfsizligi haqidagi ma'lumotga faqat ushbu ma'lumot ishonchli oʻlchash va sinov natijasiga tayanganda ishonadi. AQSh Savdo vazirligi tahliliga koʻra, 2015-yilda AQSh tovar eksportining 92 foizi, 2014-yilda esa jahon tovar eksportining 93 foizi Jahon savdo tashkilotiga bildirilgan texnik reglamentlar bilan potentsial bogʻliq boʻlgan [1; P.5]. Bu nisbat texnik talablarga javob bera olmagan eksportchi uchun bozorning deyarli toʻliq yopilishi mumkinligini anglatadi. Texnik talablarga muvofiqlikni isbotlashning asosi esa oʻlchash natijalarining aniqligi va ularning xalqaro miqyosda tan olinishidir. Shu sababli metrologiya bugun texnik masaladan koʻra savdo va raqobat masalasiga aylanmoqda.

Oʻzbekiston uchun mavzu ikki sababga koʻra dolzarb. 2024-yilda mamlakat eksporti 26,94 mlrd dollarni tashkil etib, 8,4 foizga oʻsgan, ammo toʻqimachilik eksporti 1,99 mlrd dollarga tushib, 3,7 foizga qisqargan [2; P.1]. Toʻqimachilik

mahsulotlari xaridorlari gazlama zichligi, rang turg‘unligi, kirishish darajasi va kimyoviy tarkib bo‘yicha qat’iy o‘lchash natijalarini talab qiladi, shuning uchun tarmoq raqobatbardoshligi o‘lchash infratuzilmasiga bevosita bog‘liq. Shu bilan bir vaqtda davlat 2026-yil 16 fevraldagi PF-25-son farmon bilan texnik jihatdan tartibga solish sohasidagi islohotlarni jadallashtirish choralarini belgilagan [3; B.6]. Farmon doirasida 19 ta yangi yuqori aniqlikdagi milliy o‘lchov etalonini xarid qilish va milliy kalibrlash hamda o‘lchash imkoniyatlarini 2,5 baravar oshirish mo‘ljallangan [4; P.2]. Bu choralar korxonalar darajasida eksport natijasiga qanday aylanishi esa hali yetarli o‘rganilmagan. Maqolaning maqsadi metrologiyaning eksport raqobatbardoshligiga ta’sir mexanizmlarini aniqlash va O‘zbekiston sanoat korxonalari uchun amaliy takliflar ishlab chiqishdan iborat.

Mavzuga oid adabiyotlar tahlili. Metrologiyaning iqtisodiy o‘rnini tizimli tahlil qilgan ishlardan biri P. Svann tomonidan Buyuk Britaniya Milliy o‘lchash idorasi uchun tayyorlangan hisobotdir [5; P.45]. Muallif o‘lchashning iqtisodiyotga ta’sirini unumdorlikning oshishi, innovatsiyalarni qo‘llab quvvatlash, tranzaksiya xarajatlarining kamayishi va keng ijtimoiy foyda kanallari orqali tushuntiradi. Svann standartlar savdo o‘sishi uchun zarur bo‘lganini ta’kidlab, “trade is a powerful force for economic efficiency” (savdo iqtisodiy samaradorlikning kuchli omilidir) degan xulosaga keladi [5; P.45]. Shu bilan bir qatorda muallif o‘lchashning iqtisodiy qiymatini to‘liq miqdoriy baholash juda qiyinligini ochiq tan oladi. Bu e’tirof metrologiya bilan eksport o‘rtasidagi bog‘liqlikni o‘rganishda ehtiyotkorlik zarurligini ko‘rsatadi. Muallif Svann taklif etgan kanallar tasnifini maqola uchun nazariy asos sifatida qabul qiladi, chunki u eksport bilan bog‘liq mexanizmlarni aniq ajratish imkonini beradi.

Miqdoriy baholashga A. Link urinib ko‘rgan. U AQSh Standartlar va texnologiyalar milliy instituti o‘tkazgan kalibrlash sinovlari soni bilan mamlakatning ko‘p omilli unumdorligi o‘rtasidagi bog‘liqlikni o‘rganib, kalibrlash sinovlarining 10 foizga oshishi ko‘p omilli unumdorlikning 0,32 dan 0,38 foizgacha oshishi bilan bog‘liq ekanini aniqlagan [6; P.152]. Muallifning o‘zi bu natija sababiy emas, korrelyatsion ekanini va haqiqiy ta’sir kamaytirib ko‘rsatilgan bo‘lishi mumkinligini qayd etgan. Svann va Link yondashuvlarini solishtirsak, birinchisi ta’sir kanallarini sifat jihatdan, ikkinchisi esa ulardan birini miqdoriy jihatdan baholaydi. Ikkala ish ham rivojlangan iqtisodiyot ma’lumotlariga tayanadi, shuning uchun ularning xulosalarini rivojlanayotgan mamlakatga ko‘chirishda ehtiyotkorlik talab etiladi. Muallif fikricha, O‘zbekiston sharoitida metrologiyaning ta’siri unumdorlikdan ko‘ra bozorga kirish to‘siqlarini pasaytirish orqali sezilarliroq namoyon bo‘lishi kutiladi.

Standartlar va texnik talablarning savdoga ta’siri bo‘yicha empirik adabiyotni P. Svann OECD uchun alohida umumlashtirgan [7; P.14]. Ushbu sharhda xalqaro standartlar odatda savdoni rag‘batlantirishi, milliy o‘ziga xos talablar esa ayrim hollarda savdoga to‘siq bo‘lishi ko‘rsatilgan. Qonunlashtiruvchi metrologiyaning iqtisodiy foydasini J. Birch Xalqaro qonunlashtiruvchi metrologiya tashkiloti uchun tayyorlagan hisobotida tahlil qilgan va o‘lchash vositalari ustidan davlat nazorati savdo tomonlari o‘rtasidagi ishonchni ta’minlashini asoslagan [8; P.23]. Jahon banki uchun tayyorlangan M. Keller-

mann qo'llanmasida esa sifat infratuzilmasi, ya'ni standartlashtirish, metrologiya, akkreditatsiya va muvofiqlikni baholash yagona tizim sifatida ko'rib chiqilgan va global bozorlarga chiqish uchun islohotlar ketma ketligi taklif qilingan [9; P.38]. Ushbu ishlar metrologiyani alohida emas, sifat infratuzilmasining boshqa elementlari bilan birgalikda baholash zarurligini tasdiqlaydi.

Mahalliy adabiyotda bu masala ko'proq standartlashtirish va ishlab chiqarishda sifatni nazorat qilish nuqtai nazaridan yoritilgan. Sh. Suleymanova va hammualliflari standartlashtirishning O'zbekiston iqtisodiy rivojlanishidagi strategik o'rnini ko'rib chiqqan [10; P.15]. To'qimachilik korxonalarida gazlama nuqsonlarini aniqlash uchun texnik vositalarni tanlash masalasi ham oldingi tadqiqotda tahlil qilingan [11; P.106], bu esa o'lchash vositalari sifati mahsulot sifati bilan bevosita bog'liq ekanini ko'rsatadi. To'qimachilik eksportini oshirish omillari [12; P.28] va sanoat korxonalarining innovatsion salohiyatini baholash bosqichlari [13; B.6] bo'yicha ishlar ham mavzuga yaqin. Biroq ushbu ishlarda metrologiyaning eksport raqobatbardoshligiga ta'siri alohida obyekt sifatida o'rganilmagan. Maqola ana shu bo'shliqni to'ldirishga qaratilgan.

Tadqiqot metodologiyasi. Tadqiqotda tizimli yondashuv, hujjatlarni tahlil qilish, qiyosiy tahlil va ikkilamchi statistik ma'lumotlarni tahlil qilish usullaridan foydalanildi. Ma'lumot manbalari sifatida O'zbekiston Respublikasi qonunchilik hujjatlari, O'zbekiston milliy metrologiya instituti va Xalqaro laboratoriyalarni akkreditatsiyalash hamkorligi (ILAC) rasmiy ma'lumotlari, Global sifat infratuzilmasi indeksi (GQII) natijalari [14; B.5], 2024-yilgi tashqi savdo statistikasi hamda xalqaro ilmiy nashrlar olindi. Korxonalar darajasidagi metrologik xarajatlar va eksport natijalari haqida ochiq ma'lumot mavjud bo'lmagani sababli ekonometrik baholash o'tkazilmadi. Muallif bu cheklovni ochiq qayd etadi va olingan xulosalarni sababiy bog'liqlik emas, asoslangan mantiqiy mexanizm sifatida taqdim etadi. Maqolada keltirilgan barcha raqamlar manbalari bilan ko'rsatilgan, muallif hisob kitoblari alohida qayd etilgan.

Tahlil va natijalar. Metrologiyaning eksportga ta'sirini tushunish uchun avvalo uning sifat infratuzilmasidagi o'rnini aniqlash kerak. Eksport qilinayotgan mahsulot xorijiy bozor talablariga mos ekanini sinov laboratoriyasi tasdiqlaydi, laboratoriya natijasining ishonchliligini esa uning o'lchash vositalarining kalibrlanganligi va milliy etalonlarga kuzatuvchanligi ta'minlaydi. Milliy etalonlarning xalqaro tan olinishi esa O'lchovlar va og'irliklar xalqaro qo'mitasining o'zaro tan olish kelishuvi (CIPM MRA) orqali amalga oshiriladi. Laboratoriyaning malakasi akkreditatsiya orqali tasdiqlanadi va akkreditatsiya organi ILAC kelishuvini imzolagan bo'lsa, uning natijalari boshqa imzolovchi mamlakatlarda ham tan olinadi. Bu zanjirning birorta bo'g'ini uzilsa, eksportchi mahsulotini xorijda qayta sinovdan o'tkazishga majbur bo'ladi. Qayta sinov qo'shimcha xarajat va vaqt yo'qotishini anglatadi, bu esa narx raqobatbardoshligini pasaytiradi. Metrologiya funksiyalari va ularning eksport raqobatbardoshligiga ta'sir kanallari 1-jadvalda keltirilgan.

1-jadval

Metrologiya funksiyalarining eksport raqobatbardoshligiga ta’sir kanallari

Metrologiya funksiyasi	Eksportdagi ta’sir kanali	Korxona uchun natija
Milliy etalonlar va ularning xalqaro tan olinishi (CIPM MRA)	O‘lchash natijalarining xorijda tan olinishi	Xorijda qayta kalibrlash zaruratining kamayishi
O‘lchash vositalarini kalibrlash	Sinov natijalarining aniqligi va kuzatuvchanligi	Mahsulot partiyalarining rad etilish xavfi pasayadi
Laboratoriyalarni akkreditatsiyalash (ILAC MRA)	Sinov bayonnomalarining o‘zaro tan olinishi	Qayta sinov xarajati va muddatining qisqarishi
Qonunlashtiruvchi metrologiya	Savdo tomonlari o‘rtasidagi ishonch	Miqdor va o‘lchov bo‘yicha nizolarning kamayishi
Ishlab chiqarishda o‘lchash nazorati	Mahsulot parametrlarining barqarorligi	Sifat talablari qat’iy bo‘lgan bozorlarga chiqish

Manba: [5, 7, 8, 9] asosida muallif ishlanmasi.

1-jadval ma’lumotlari shuni ko‘rsatadiki, metrologiya eksportga bevosita emas, sinov, sertifikatlash va sifat nazorati zanjiri orqali ta’sir qiladi. Shu sababli metrologiya xarajatlarining samarasini eksport natijasida baholash uchun zanjirning barcha bo‘g‘inlarini birgalikda ko‘rib chiqish kerak.

O‘zbekistonda ushbu zanjirning institutsional asoslari so‘nggi yillarda izchil shakllantirildi. 1993-yilda qabul qilingan “Metrologiya to‘g‘risida”gi Qonunga 2020-yilda xalqaro talablarga muvofiqlashtirish maqsadida o‘zgartish va qo‘shimchalar kiritildi [15; B.3]. 2021-yilda texnik jihatdan tartibga solish sohasida davlat boshqaruvi tubdan takomillashtirildi [16; P.2], 2023-yilda esa o‘lchash vositalarini qiyoslash sohasiga xususiy sektor jalb qilindi [17; P.1]. Xalqaro tan olinish bosqichlari ham izchil davom etdi. Asosiy me’yoriy va institutsional voqealar 2-jadvalda keltirilgan.

2-jadval

O‘zbekistonda metrologiya va akkreditatsiya sohasidagi asosiy me’yoriy va institutsional voqealar

Sana	Voqea	Ahamiyati
1993-yil 28 dekabr	“Metrologiya to‘g‘risida”gi Qonun qabul qilindi	O‘lchashlar birliligini ta’minlashning huquqiy asosi yaratildi
2018-yil 19 mart	O‘ZAKK ILACga hamkor a’zo sifatida qo‘shildi	Xalqaro akkreditatsiya tizimiga integratsiya boshlandi
2020-yil 7 aprel	O‘RQ-614-son Qonun bilan “Metrologiya to‘g‘risida”gi Qonun yangilandi	Qonun xalqaro talablarga muvofiqlashtirildi
2021-yil 2 iyun	PF-6240-son farmon qabul qilindi	Texnik jihatdan tartibga solish sohasida davlat boshqaruvi isloh qilindi
2022-yil 14 sentyabr	O‘ZAKK ILAC MRA imzolovchisi va to‘liq a’zosi bo‘ldi	Sinov va kalibrlash natijalari o‘zaro tan olinadigan bo‘ldi
2023-yil 26 oktyabr	O‘RQ-872-son Qonun qabul qilindi	O‘lchash vositalarini qiyoslashga xususiy sektor jalb qilindi
2025-yil iyun	Milliy metrologiya instituti CIPM MRA logotipidan foydalanish huquqini oldi	Kalibrlash sertifikatlari xalqaro miqyosda tan olina boshladi
2026-yil 16 fevral	PF-25-son farmon qabul qilindi	19 ta yangi etalon xarid qilish va imkoniyatlarni 2,5 baravar oshirish belgilandi

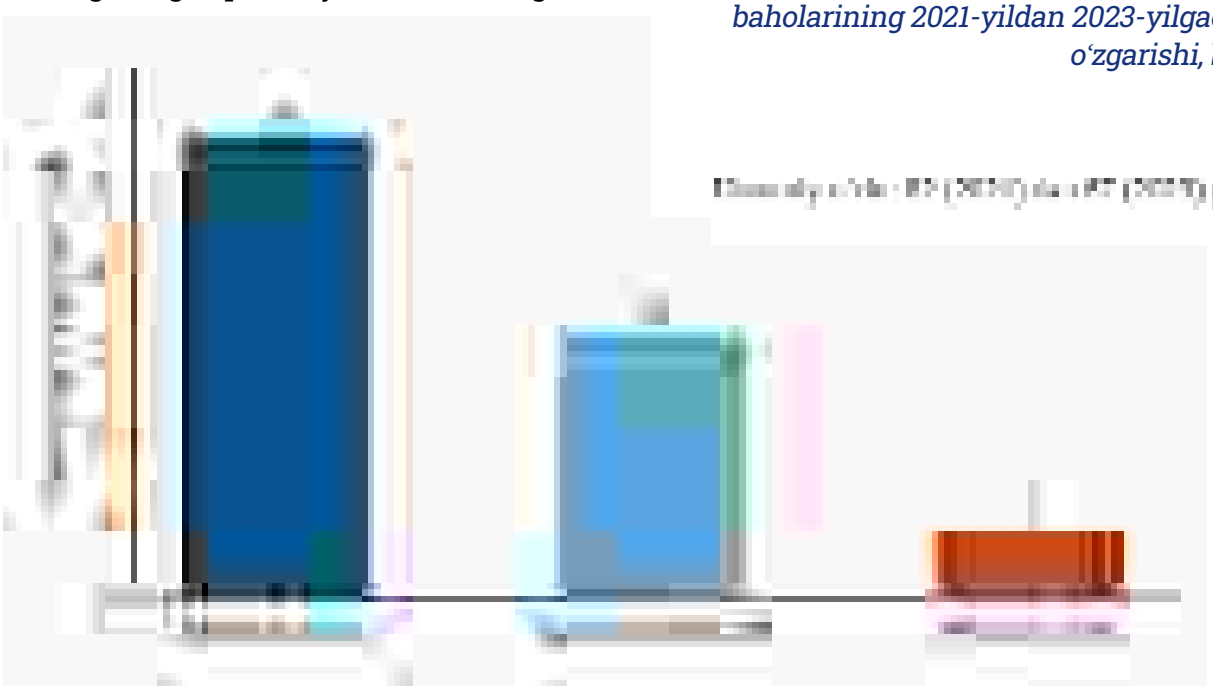
Manba: [15, 18, 16, 17, 19, 3, 4] asosida muallif tomonidan tuzilgan.

2-jadval ma'lumotlari shuni ko'rsatadiki, 2022-yilda akkreditatsiya tizimi, 2025-yilda esa milliy metrologiya instituti xalqaro tan olinish darajasiga chiqqan. Bu ikki voqea o'rtasidagi uch yillik farq zanjirning metrologik bo'g'ini akkreditatsiya bo'g'inidan ortda qolganini ko'rsatadi.

Akkreditatsiya sohasidagi natija eksportchi uchun amaliy ahamiyatga ega. O'zbekiston akkreditatsiya markazi (O'ZAKK) 2018-yilda ILACga hamkor a'zo sifatida qo'shilgan, 2020-yilda assotsiativ a'zo bo'lgan va 2022-yil 14-sentabrda ISO/IEC 17025 standarti bo'yicha sinov va kalibrlash laboratoriyalarini akkreditatsiyalash sohasida ILAC kelishuvini imzolagan [18; P.3]. To'rt yildan sal ko'proq vaqt ichida hamkor a'zolikdan to'liq a'zolikka o'tish xalqaro tajribada nisbatan qisqa muddat hisoblanadi. Bu voqeadan so'ng akkreditatsiyalangan mahalliy laboratoriya bergan sinov bayonnomasi kelishuvni imzolagan boshqa mamlakatlarda tan olinishi uchun huquqiy asos paydo bo'ldi. Biroq laboratoriya natijasining texnik ishonchliligi hamon uning o'lchash vositalari qanday etalonlarga kuzatuvchan ekaniga bog'liq. Milliy etalonlarning xalqaro tan olinishi kechikkan davrda mahalliy laboratoriyalar kalibrlash uchun xorijiy markazlarga murojaat qilishga majbur bo'lgan. Bunday holat qisqa muddatda xarajatni oshiradi, uzoq muddatda esa milliy metrologik mustaqillikni zaiflashtiradi. Muallif fikricha, 2022-yildagi akkreditatsiya natijasi eksportga ta'sirini to'liq ko'rsatishi uchun metrologik bo'g'in bilan uyg'unlashishi kerak edi. Bu bo'yicha aniq muammo laboratoriyalarning kalibrlash xizmatlariga bo'lgan ehtiyoji mamlakat ichida to'liq qondirilmaganligidir. Shu sababli O'zbekiston milliy metrologiya instituti eksportbop tarmoqlar laboratoriyalari eng ko'p foydalanadigan o'lchash turlari bo'yicha CMC qatorlarini ustuvor ravishda kengaytirishi, natijada xorijiy kalibrlash xarajatlarini qisqartirishi maqsadga muvofiq.

Xalqaro reytinglar ushbu notekislikni miqdoriy jihatdan tasdiqlaydi. Global sifat infratuzilmasi indeksida O'zbekiston 2021-yilda 82 o'rinda bo'lgan va 2023-yilda 185 mamlakat orasida 67 o'ringa ko'tarilgan [20; B.134]. Indeksning tarkibiy qismlari bo'yicha o'zgarish 1-rasmda keltirilgan.

1-rasm. O'zbekistonning Global sifat infratuzilmasi indeksi tarkibiy qismlari bo'yicha baholarining 2021-yildan 2023-yilgacha o'zgarishi, ball



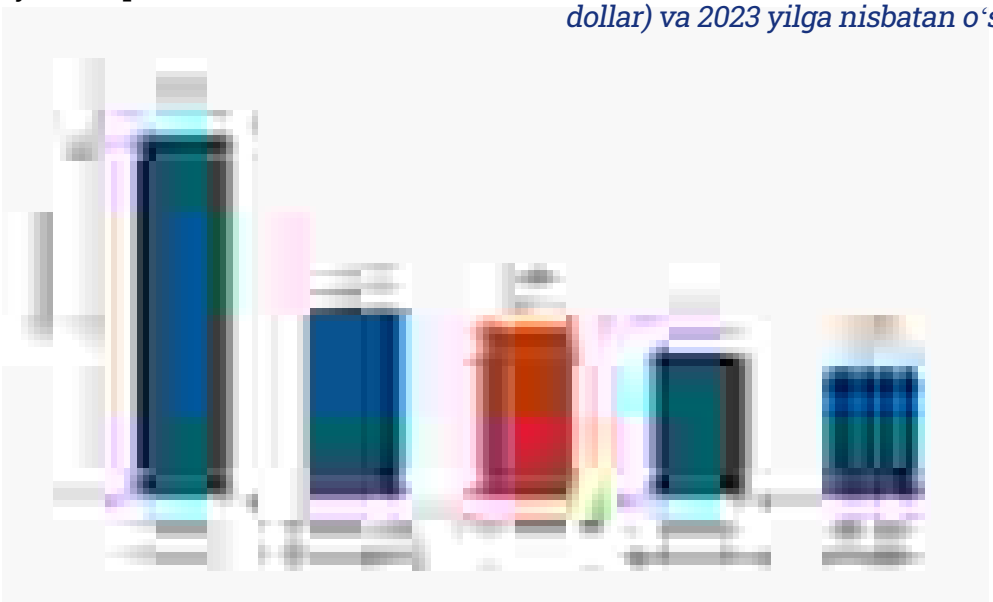
Manba: O‘zbekiston milliy metrologiya instituti ma’lumotlari asosida muallif tomonidan tuzilgan [20].

1-rasm ma’lumotlari shuni ko‘rsatadiki, ikki yil ichida akkreditatsiya bo‘yicha baho 28 ballga, standartlashtirish bo‘yicha 16 ballga oshgan, metrologiya bo‘yicha esa atigi 4 ballga oshgan. Akkreditatsiya bahosining o‘sishi metrologiyadagidan 7 baravar yuqori bo‘lib, bu ikki bo‘g‘in o‘rtasidagi tafovut chuqurlashganini anglatadi.

Metrologiya bahosining sekin o‘sishi sababini milliy metrologiya institutining o‘zi aniq ko‘rsatgan. Institut ma’lumotiga ko‘ra, Xalqaro o‘lchovlar va og‘irliklar byurosining (BIPM) kalibrlash va o‘lchash imkoniyatlari ma’lumotlar bazasida O‘zbekiston qatorlarining yo‘qligi metrologiya bo‘yicha past natijaning sababi bo‘lgan va institut 17 ta CMC qatorini olish uchun xalqaro solishtirishlarda ishtirok etgan [20; B.134]. 2025-yilda institut CIPM MRA logotipidan o‘z sertifikatlarida foydalanish huquqini olgan [19; P.22], bu esa metrologik bo‘g‘indagi tafovut qisqara boshlaganini ko‘rsatadi. Akkreditatsiya va metrologiya natijalarini solishtirganda ularning o‘sish sur’atlari orasidagi nisbat sezilarli, akkreditatsiya qisqa muddatda tashkiliy islohotlar bilan yaxshilanishi mumkin, metrologiya esa qimmat etalon bazasi va ko‘p yillik xalqaro solishtirishlarni talab qiladi. Bu bog‘liqlik mustahkam, chunki u institutning o‘z baholashi va GQII ma’lumotlari bilan bir vaqtda tasdiqlanadi. Qisqa muddatda tafovut eksportchilar uchun kalibrlash xizmatlari qimmatligi va kechikishi shaklida namoyon bo‘ladi. Uzoq muddatda esa PF-25-son farmon bilan rejalashtirilgan 19 ta yangi etalon va imkoniyatlarning 2,5 baravar oshishi [4; P.2] bu tafovutni qisqartirishi kutiladi, ammo natija etalonlar xalqaro solishtirishdan o‘tgandan keyingina to‘liq namoyon bo‘ladi. Aniq muammo sanoat korxonalarining yangi imkoniyatlar haqida yetarli xabardor emasligidir. Shu sababli Texnik jihatdan tartibga solish agentligi tarmoq uyushmalari bilan birgalikda yangi etalonlar asosida ko‘rsatiladigan kalibrlash xizmatlari reyestrini e’lon qilishi, natijada korxonalar xorijiy markazlar o‘rniga mahalliy xizmatlardan foydalanishi maqsadga muvofiq.

Metrologiyaning eksportga ta’sirini tarmoqlar kesimida baholash uchun eksport tarkibini ko‘rib chiqish zarur. 2024-yilgi eksportning asosiy tovar guruhlari bo‘yicha hajmi va o‘sishi 2-rasmda keltirilgan.

2-rasm. 2024-yilda O‘zbekiston eksportining asosiy tovar guruhlari bo‘yicha hajmi (mlrd dollar) va 2023 yilga nisbatan o‘sishi (foiz)



Manba: Statistika agentligi ma'lumotlari asosida muallif tomonidan tuzilgan [2].

2-rasm ma'lumotlari shuni koʻrsatadiki, kimyo mahsulotlari eksporti 29,1 foizga, oziq ovqat mahsulotlari 22,4 foizga oʻsgan, toʻqimachilik eksporti esa 3,7 foizga qisqargan. Eng tez oʻsgan va qisqargan guruhlar oʻrtasidagi farq 32,8 foiz punktni tashkil etadi.

Toʻqimachilik eksportining qisqarishini faqat metrologiya bilan izohlash notoʻgʻri boʻlardi, chunki unga tashqi talab, narx raqobati va xomashyo narxi ham ta'sir qiladi. Shunga qaramay, tarmoq mahsulotlarining xaridorlari koʻp sonli oʻlchanadigan parametrlar boʻyicha sinov natijalarini talab qilishi metrologik omilning ulushi boshqa tarmoqlarga nisbatan yuqoriligini koʻrsatadi. Kimyo va oziq ovqat mahsulotlari ham laboratoriya sinovlariga bogʻliq, ammo ularning eksporti oʻsgani metrologiya yagona hal qiluvchi omil emasligini tasdiqlaydi. Ushbu qiyos bogʻliqlikning bahsli ekanini ochiq koʻrsatadi, oʻlchash infratuzilmasi zarur shart, lekin yetarli shart emas. Oldingi tadqiqotda toʻqimachilik korxonalarida innovatsion texnologiyalarni, jumladan, nazorat va oʻlchash uskunalarini jalb qilishdagi muammolar koʻrsatilgan edi [20; B.134], bu esa tarmoqda oʻlchash vositalarining yangilanishi sekin borayotganini taxmin qilishga asos beradi. Qisqa muddatda bu holat mahsulot partiyalarining xaridor tomonidan rad etilishi xavfini oshiradi. Uzoq muddatda esa yuqori qoʻshilgan qiymatli segmentga, ya'ni texnik talablari qat'iy boʻlgan bozorlarga chiqish imkoniyatini cheklaydi. Aniq muammo toʻqimachilik korxonalari laboratoriyalarida ISO/IEC 17025 boʻyicha akkreditatsiyalangan sinov sohalarining tor ekanligidir. Shu sababli Oʻzbekiston toʻqimachilik va tikuv trikotaj sanoati uyushmasi a'zo korxonalar uchun gazlama parametrlari boʻyicha umumiy foydalanishdagi akkreditatsiyalangan laboratoriyalar tarmogʻini rivojlantirishi, natijada xorijda qayta sinov xarajatlari kamayishi maqsadga muvofiq.

Xalqaro tajriba bilan solishtirish natijalarni yanada aniqlashtiradi. Svann xalqaro standartlar va ularga muvofiqlikni isbotlash savdoni koʻpaytirishini koʻrsatgan dalillarni umumlashtirgan [7; P.14], Kellermann esa sifat infratuzilmasi islohotini eksportchilarning real ehtiyojlaridan boshlashni tavsiya qilgan [9; P.38]. Bu ikki yondashuvni Oʻzbekiston tajribasi bilan solishtirsak, mamlakatda islohotlar koʻproq institutlar va xalqaro a'zolikdan boshlangani, korxonalar ehtiyojini oʻrganish esa keyingi bosqichda qolgani koʻrinadi. 92 va 93 foizlik koʻrsatkichlar [1; P.5] texnik talablar deyarli barcha eksport tovarlarini qamrab olishini koʻrsatgani hisobga olinsa, korxonalar ehtiyojidan kelib chiqmagan islohot uning samarasini kechiktiradi. Muallif bu xulosani mustahkam deb hisoblaydi, chunki u ikki mustaqil xalqaro manba va mahalliy institutsional ma'lumotlar bilan tasdiqlanadi. Ammo korxonalar ehtiyojini miqdoriy oʻlchovchi soʻrov ma'lumotlari mavjud emas, bu esa keyingi tadqiqot uchun vazifa boʻlib qoladi. Aniq muammo eksportchi korxonalarning metrologik ehtiyojlari tizimli oʻrganilmaganligidir. Shu sababli Texnik jihatdan tartibga solish agentligi Eksportni ragʻbatlantirish agentligi bilan birgalikda yiliga bir marta eksportchilar oʻrtasida metrologik ehtiyojlar soʻrovini oʻtkazishi, natijada etalon va kalibrlash xizmatlarini rivojlantirish ustuvorliklari eksport talabiga moslashtirilishi maqsadga muvofiq.

Xulosa va takliflar. Tadqiqot natijalari metrologiya eksport raqobatbardoshligiga sinov, sertifikatlash va sifat nazorati zanjiri orqali ta'sir qilishini koʻrsatdi. Jahon tovar eksportining 93 foizi texnik reglamentlar bilan bogʻliq ekani bu zanjirning ahamiyatini tasdiqlaydi. Oʻzbekistonda soʻnggi yillar-

da akkreditatsiya tizimi xalqaro tan olinishga erishgan, metrologik bo‘g‘in esa undan ortda qolgan va bu tafovut 2021-yildan 2023-yilgacha GQII tarkibiy baholarida aniq namoyon bo‘lgan. 2025-yildagi CIPM MRA tan olinishi va 2026-yildagi farmon bilan belgilangan choralar tafovutni qisqartirishi kutiladi. To‘qimachilik eksportining qisqarishi o‘lchash infratuzilmasi zarur, ammo yetarli shart emasligini ko‘rsatdi.

Ushbu natijalar asosida quyidagi takliflar ilgari suriladi. Milliy metrologiya instituti eksportbop tarmoqlar laboratoriyalari eng ko‘p foydalanadigan o‘lchash turlari bo‘yicha CMC qatorlarini ustuvor kengaytirishi, Texnik jihatdan tartibga solish agentligi esa yangi etalonlar asosidagi kalibrlash xizmatlari reyestrini e’lon qilishi kerak. To‘qimachilik tarmog‘ida umumiy foydalanishdagi akkreditatsiyalangan laboratoriyalar tarmog‘ini rivojlantirish xorijda qayta sinov xarajatlarini qisqartiradi. Eksportchilar o‘rtasida har yili metrologik ehtiyojlar so‘rovini o‘tkazish islohot ustuvorliklarini korxonalar talabiga moslashtirish imkonini beradi. Sanoat korxonalarining o‘zi esa o‘lchash vositalarini muntazam kalibrlashni xarajat emas, eksport bozoriga kirish sharti sifatida rejalashtirishi lozim. Keyingi tadqiqotlarda korxonalar darajasidagi ma’lumotlar asosida metrologik xarajatlar va eksport natijalari o‘rtasidagi bog‘liqlikni ekonometrik baholash rejalashtirilgan.

Foydalanilgan adabiyotlar ro‘yxati

1. Okun-Kozlowicki J. Standards and Regulations: Measuring the Link to Goods Trade. Washington: U.S. Department of Commerce, International Trade Administration, P.5, 2016. URL: https://www.trade.gov/sites/default/files/2021-04/Standards%20and%20Regulations%20Measuring%20the%20Link%20to%20Goods%20Trade_0.pdf.

2. Uzbekistan’s foreign trade turnover hit $66 billion in 2024//Kun.uz. P.1, URL: https://kun.uz/en/news/2025/01/21/uzbekistans-foreign-trade-turnover-hit-66-billion-in-2024 (murojaat sanasi: 03.10.2026).

3. O‘zbekiston Respublikasi Prezidentining “Texnik jihatdan tartibga solish sohasidagi islohotlarni ilg‘or xalqaro amaliyot asosida jadallashtirish chora-tadbirlari to‘g‘risida”gi 2026-yil 16 fevraldagi PF-25-son farmoni // Qonunchilik ma’lumotlari milliy bazasi, B.6, URL: https://lex.uz/uz/docs/-8053023.

4. Uzbekistan Moves Up 18 Positions in the Global Quality Index: What Changes Are Expected in the Sector? //O‘zbekiston milliy metrologiya instituti. P.2, URL: https://nim.uz/2026/03/27/uzbekistan-moves-up-18-positions-in-the-global-quality-index-what-changes-are-expected-in-the-sector/.

5. Swann G.M.P. The Economics of Metrology and Measurement: Report for the National Measurement Office, Department for Business, Innovation and Skills. Innovative Economics Limited, 2009. P.45, URL: https://assets.publishing.service.gov.uk/media/5a7c32ece5274a25a91411ea/prof-swann-report-econ-measurement-revisited-oct-09.pdf.

6. Link A.N. The economics of metrology: an exploratory study of the impact of measurement science on U.S. productivity // Economics of Innovation and New Technology. 2023. Vol. 32, № 2. P.152, DOI: 10.1080/10438599.2021.1895905.

7. Swann G.M.P. International Standards and Trade: A Review of the Empirical Literature // OECD Trade Policy Papers. № 97. Paris: OECD Publishing, P.14, 2010.

8. Birch J. Benefit of Legal Metrology for the Economy and Society: OIML E002. Paris: International Organization of Legal Metrology, P.23, 2003.

9. Kellermann M. Ensuring Quality to Gain Access to Global Markets: A Reform Toolkit. Washington, DC: World Bank, P.38, 2019.

10. Suleymanova Sh., Abdujalilova H.K., Nishonov V.X. Strategic role of standardization in the economic development of Uzbekistan // Oʻzbekiston 2030 strategiyasi: amalga oshirilayotgan islohotlar tahlili, muammolar va yechimlar: respublika ilmiy-amaliy konferensiyasi materiallari toʻplami. Toshkent: Xalqaro Nordik universiteti, P.15, 2025.

11. Suleymanova Sh.A. The role of tourism in increasing textile exports // World Economics & Finance Bulletin. 2024. Vol. 39. P.106.

12. Harmes-Liedtke U., Oteiza Di Matteo J.J. Global Quality Infrastructure Index Report 2023. Duisburg: Mesopartner, Analyticar, P.28, 2024.

13. Oʻzbekiston Respublikasining "Metrologiya toʻgʻrisida"gi 1993-yil 28 dekabrdagi 1004-XII-son Qonuni (2020-yil 7 apreldagi OʻRQ-614-son Qonun tahririda) // Qonunchilik ma'lumotlari milliy bazasi. B.6, URL: https://lex.uz/docs/-99877 .

14. Oʻzbekiston Respublikasi Prezidentining "Texnik jihatdan tartibga solish sohasida davlat boshqaruvini tubdan takomillashtirish toʻgʻrisida"gi 2021-yil 2 iyundagi PF-6240-son farmoni // Qonunchilik ma'lumotlari milliy bazasi. B.5, URL: https://lex.uz/docs/-5443205.

15. Oʻzbekiston Respublikasining "Oʻlchash vositalarini qiyoslashdan oʻtkazish sohasiga xususiy sektor jalb qilinishi munosabati bilan "Metrologiya toʻgʻrisida"gi Oʻzbekiston Respublikasi Qonuniga oʻzgartirish va qoʻshimchalar kiritish haqida"gi 2023-yil 26 oktyabrdagi OʻRQ-872-son Qonuni // Qonunchilik ma'lumotlari milliy bazasi. B.3, URL: https://lex.uz/docs/-6645330.

16. ILAC welcomes O'ZAKK, Uzbekistan // International Laboratory Accreditation Cooperation. P.2, URL: https://ilac.org/latest_ilac_news/ilac-welcomes-ozakk-uzbekistan/.

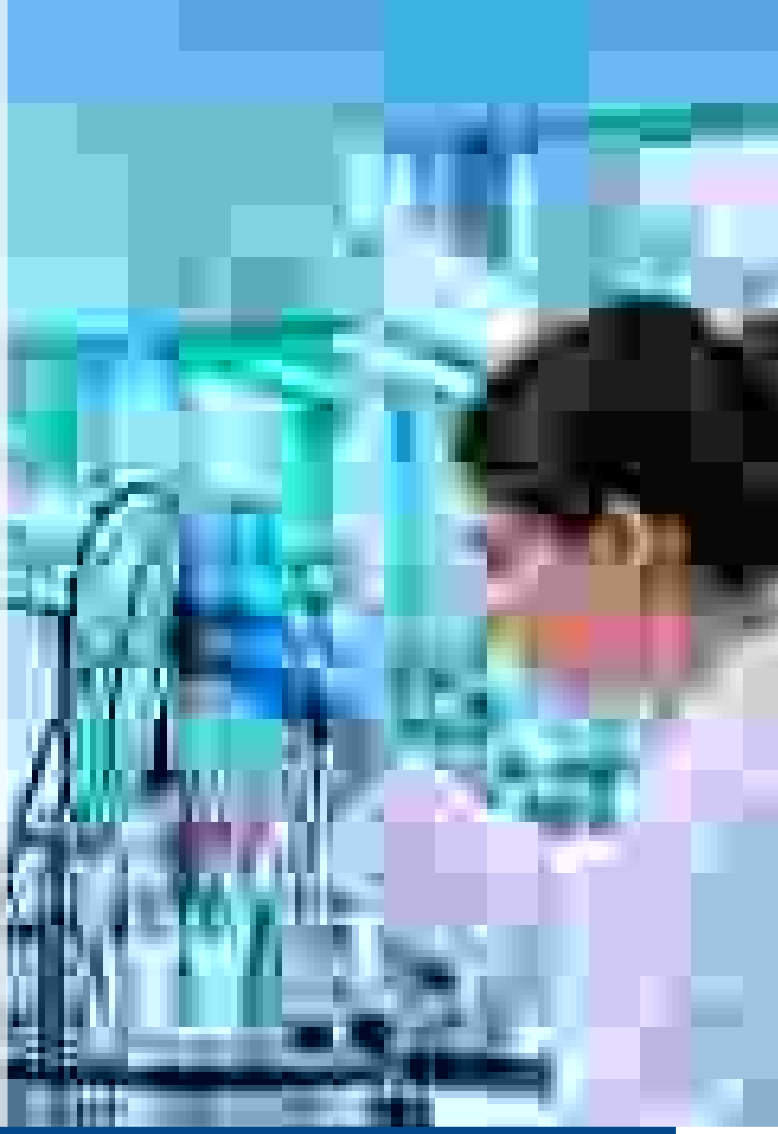
17. International Recognition! // Oʻzbekiston milliy metrologiya instituti. P.1, URL: https://nim.uz/2025/06/26/international-recognition/ .

18. Uzbekistan is rising in the Global Quality Infrastructure Index // Oʻzbekiston milliy metrologiya instituti. P.3, URL: https://nim.uz/2024/01/15/uzbekistan-is-rising-in-the-global-quality-infrastructure-index/.

19. Abdujalilova Kh. K., Suleymanova Sh. A., Nishonov V.X., "Strategic role of national metrology infrastructure in economic development of Uzbekistan". Management, marketing and finance international scientific journal (2025, July) volume 2, issue 6, P.22, https://doi.org/10.5281/zenodo.15974077

20. Abdujalilova X.K., Suleymanova Sh.A., Nishonov V.X., "Standartlashtirish va metrologiyaning savdo va investitsiya muhitidagi nazariy jihatlari". "Ilmiy sinov va sifat nazorati" ilmiy-texnik jurnali, 2026-yil, 1-son, B.134, Mart.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ОЦЕНКИ НЕОПРЕДЕЛЁННОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН В УСЛОВИЯХ ДЕФИЦИТА ИНФОРМАЦИИ



Машарипов Шодлик Машарипович
PhD, доцент кафедры “Метрология, техническое регулирование, стандартизация и сертификация”, Ташкентский государственный технический университет имени Ислама Каримова

E-mail: shodlik29081986@mail.ru

Аннотация. В статье рассматриваются теоретические и методологические основы оценки неопределённости измерений физико-химических величин – pH, влажности материала и кинематической вязкости жидкости – в условиях дефицита информации. Проведён анализ методов оценки составляющих неопределённости типов A и B по GUM (JCGM 100:2008), приведены практические расчёты и рекомендации по выбору закона распределения для составляющих типа B. В исследовании определены направления развития методологии оценки неопределенности измерений в условиях ограниченной информации.

Ключевые слова: неопределённость измерений, физико-химические величины, pH, влажность, кинематическая вязкость, GUM, составляю-

щие неопределённости типов A и B, расширенная неопределённость, метрология, дефицит информации.

Annotatsiya. Ushbu maqolada fizik-kimyoviy kattaliklar – pH, materialning namligi va suyuqlikning kinematik qovushqoqligi – uchun o'lchov noaniqligini baholashning nazariy va metodologik asoslari ko'rib chiqiladi. Ma'lumot yetishmasligida GUM (JCGM 100:2008) asosida A va B toifa noaniqliklarni baholash metodlari tahlil qilinib, real o'lchov misollarida amaliy hisob-kitoblar va B toifa uchun taqsimot qonunini tanlash tavsiyalari keltiriladi. Tadqiqotda axborot cheklangan sharoitda o'lchash noaniqligini baholash metodologiyasini rivojlantirish yo'nalishlari aniqlab olingan.

Kalit so'zlar: o'lchov noaniqlighi, fizik-kimyoviy kattaliklar, pH, namlik, kinematik qovushqoqlik, GUM, A va B toifa noaniqlik, kengaytirilgan noaniqlik, metrologiya, ma'lumot yetishmasligi.

Abstract. This paper addresses the theoretical and methodological foundations for evaluating measurement uncertainty of physico-chemical quantities – pH, material moisture content, and kinematic viscosity of liquids – under conditions of limited information, applying Type A and Type B methods per GUM (JCGM 100:2008), with worked examples and distribution-law selection guidance for Type B. The study defines the directions for developing the methodology for assessing measurement uncertainty under conditions of limited information.

Keywords: measurement uncertainty, physico-chemical quantities, pH, moisture content, kinematic viscosity, GUM, Type A and Type B uncertainty, expanded uncertainty, metrology, information deficit.

Введение. Физико-химические измерения занимают центральное место в системах управления качеством промышленной продукции, экологического мониторинга и научных исследований. Такие величины, как активность водородных ионов (pH), влажность материалов и кинематическая вязкость жидкостей, являются ключевыми параметрами технологических процессов в фармацевтике, пищевой промышленности, нефтехимии и строительной отрасли [1; B.12].

Международный стандарт ISO/IEC 17025:2017 устанавливает требование, согласно которому все результаты измерений, предоставляемые калибровочными и испытательными лабораториями, должны сопровождаться обоснованной оценкой неопределённости [2; B.7]. Тем не менее практика показывает, что в условиях дефицита статистической информации – ограниченного числа наблюдений, неполной характеристики источников погрешностей или отсутствия сертифицированных эталонных материалов – корректное применение классических алгоритмов оценки представляет значительную методологическую сложность [3; B.45].

Проблема усугубляется неоднородностью применяемых подходов: в то время как европейские метрологические институты активно внедряют байесовские методы и метод

Монте-Карло (MCM) [4; B.22], в большинстве развивающихся стран, в том числе в Узбекистане, основным рабочим инструментом остаётся GUM-формализм в его классической редакции [5; B.3]. Настоящая работа направлена на систематизацию методологических подходов и их иллюстрацию на конкретных примерах физико-химических измерений.

Обзор литературы. Наряду с классическим GUM-формализмом за последние годы активно развиваются альтернативные подходы к оцениванию неопределённости в условиях малых выборок. Систематический обзор [11] показывает, что традиционные статистические методы GUM сталкиваются с существенными ограничениями на малых наборах данных — смещением оценок, некорректностью допущений о законе распределения и недостаточной статистической устойчивостью, — и обобщает предлагаемые альтернативы: байесовский вывод, методы на основе теории информации и подходы, использующие оценки Ходжеса–Лемана. В работе [12] выполнено прямое сопоставление GUM, GUM-S1 (Монте-Карло) и байесовского подхода для микрорасходометрии, показавшее расхождение оценок при выраженной асимметрии распределений. Аналогичное сравнение классических (GUM) и альтернативных методов для средств измерений температуры выполнено в [13]. Данные работы подтверждают актуальность продолжения исследований по адаптации методов оценивания неопределённости к условиям информационного дефицита, которым посвящена настоящая статья.

Концепция неопределённости измерений формализована в "Руководстве по выражению неопределённости измерений" (GUM, JCGM 100:2008) [6; B.1]. Согласно GUM, суммарная стандартная неопределённость uc(y) выходной величины Y = f(X1, ..., XN) определяется законом распространения неопределённости:

$$u^2c(y) = \Sigma_i (\partial f/\partial x_i)^2 \cdot u^2(x_i) + 2 \Sigma_i \Sigma_{j>i} (\partial f/\partial x_i)(\partial f/\partial x_j) \cdot u(x_i, x_j) \quad (1)$$

где $c_i = \partial f/\partial x_i$ — коэффициенты чувствительности, $u(x_i, x_j)$ — ковариация входных величин. При отсутствии корреляций выражение (1) сводится к стандартному квадратичному суммированию.

Составляющая неопределённости типа А оценивается статистически по серии повторных наблюдений. Стандартное отклонение среднего (стандартная неопределённость типа А):

$$u_A(\bar{x}) = s(\bar{x}) = s / \sqrt{n} = \sqrt{[\Sigma(x_i - \bar{x})^2 / n(n-1)]} \quad (2)$$

Составляющая неопределённости типа В основана на априорной информации: технических характеристиках средств измерений, нормативных документах, данных изготовителя. Для прямоугольного закона распределения (наиболее консервативный случай при дефиците информации):

$$u_B(x) = a / \sqrt{3} \quad (3)$$

где a — полуширина интервала возможных значений. Расширенная неопределённость:

$$U = k \cdot u_c(y) \quad (4)$$

Коэффициент охвата k = 2 соответствует уровню доверия ≈ 95 % при нормальном распределении; при малом числе степеней свободы рекомендуется использовать значения коэффициента Стьюдента tv,95.

В условиях дефицита информации ($n < 6$) применяется подход эффективного числа степеней свободы Уэлча–Саттертуэйта:

$$\nu_{eff} = u^4_c(y) / \Sigma_i [c_i^4 u^4(x_i) / \nu_i] \quad (5)$$

Результаты. 3.1. Оценка неопределённости измерения pH. Измерение pH является одним из наиболее распространённых физико-химических измерений; при этом оно отличается многоуровневой структурой источников неопределённости. Рассмотрим практический пример измерения pH водного раствора с помощью pH-метра ИПГ-200 (класс точности 0,02 pH).

Таблица 1.
Результаты повторных измерений pH водного раствора (n = 5)

№	1	2	3	4	5
x_i (pH)	6,84	6,87	6,82	6,85	6,86

Среднее значение: $\bar{x} = 6{,}848$ pH. Среднеквадратическое отклонение серии: $s = 0{,}0192$ pH. Стандартная неопределённость типа A: $u_A = 0{,}0192 / \sqrt{5} = 0{,}0086$ pH.

Составляющие неопределённости типа B: (а) от калибровки буферных растворов: $u_B1 = 0{,}01 / \sqrt{3} = 0{,}00577$ pH; (б) от разрешения прибора ($\Delta = 0{,}01$ pH): $u_B2 = 0{,}005 / \sqrt{3} = 0{,}00289$ pH; (в) от температурной коррекции ($\Delta T = \pm 0{,}5$ °C, коэф. 0,0017 pH/°C): $u_B3 = 0{,}00085 / \sqrt{3} = 0{,}00049$ pH.

Суммарная стандартная неопределённость:

$$u_c = \sqrt{(0{,}0086^2 + 0{,}00577^2 + 0{,}00289^2 + 0{,}00049^2)} = 0{,}0108 \text{ pH}$$

Поскольку $n = 5 < 6$ (условия дефицита информации), коэффициент охвата определён по формуле Уэлча–Саттертуэйта (5): при бесконечном числе степеней свободы для составляющих типа B эффективное число степеней свободы $\nu_{eff} = u_c^4 \cdot \nu A / u_A^4 \approx 9$, откуда $t_{0{,}95}(9) = 2{,}26$. Расширенная неопределённость ($k = t_{0{,}95}(9) = 2{,}26$): $\mathbf{U = \pm 0{,}024}$ **pH**. Результат: pH = 6,848 ± 0,024 ($\nu_{eff} \approx 9$; $k = 2{,}26$; $P \approx 95$ %).

3.2. Оценка неопределённости измерения влажности материала. Влажность W определяется гравиметрическим методом (сушильный шкаф + аналитические весы). Модель измерения:

$$W = (m_1 - m_2) / m_2 \times 100\ \% \quad (6)$$

где m_1 — масса пробы до сушки, m_2 — масса после сушки.

Таблица 2.
Бюджет неопределённости измерения влажности строительного песка (n = 5)

Источник неопределённости	Значение	Тип	Закон	$u(x_i)$, %	c_i	$c_i \cdot u(x_i)$, %
Повторяемость взвешиваний (A)	$\bar{s} = 0{,}025$ %	A	Норм.	0,0112	1	0,0112
Точность аналитических весов	0,0001 г	B	Прям.	0,0041	2,0	0,0082
Неравномерность нагрева шкафа	±0,5 °C	B	Прям.	0,0058	1	0,0058
Неоднородность пробы	±0,05 %	B	Прям.	0,0289	1	0,0289
Суммарная u_c(W)	—	—	—	—	—	0,0316
Расширенная U (k=2)	—	—	—	—	—	0,063 %

Коэффициент чувствительности к показаниям весов рассчитан по модели (6): $c_i = \partial W/\partial m_1 = 100/m_2 \approx 100/50 = 2{,}0$ %/г (при массе высушенной пробы $m_2 \approx 50$ г); коэффициент по m_2 близок по модулю ($\partial W/\partial m_2 \approx -2{,}04$ %/г) и даёт тот же вклад в неопределённость.

Измеренная влажность строительного песка: **W = 2,14 ± 0,063 % (k = 2; P ≈ 95 %)**. Доминирующим источником является неоднородность пробы, что подчёркивает необходимость статистически обоснованного планирования отбора проб.

3.3. Оценка неопределённости измерения кинематической вязкости жидкости. Кинематическая вязкость v определяется с применением стеклянного капиллярного вискозиметра (ГОСТ 33-2016). Расчётная формула:

$$\nu = C \cdot t \quad (7)$$

где C — константа вискозиметра (мм²/с²), t — время истечения (с). Для масла ИГП-30 при T = 40 °C:

Таблица 3. Результаты измерения времени истечения масла ИГП-30 (вискозиметр Убеллоде, n = 5)

№	1	2	3	4	5	$\bar{x}$, с
t, с	312,4	313,1	312,8	312,6	313,0	312,78

Стандартное отклонение серии: s = 0,286 с. Стандартная неопределённость типа A: u_A(t) = 0,286 / √5 = 0,128 с.

Составляющие неопределённости типа B для времени истечения: дискретность отсчёта секундомера (Δ = 0,01 с): u_disc(t) = 0,005 / √3 = 0,00289 с. Комбинированная неопределённость времени истечения: u(t) = √(0,128² + 0,00289²) = 0,128 с.

Для константы вискозиметра (C = 0,09843 мм²/с²; u_B(C) = 0,00015 / √3 = 0,0000866 мм²/с²):

Дополнительно учтена систематическая составляющая от температурной нестабильности термостата: при допуске ГОСТ 33-2016 ΔT = ±0,02 °C (u(T) = 0,02/√3 = 0,0116 °C) и температурном коэффициенте вязкости масла ИГП-30 при 40 °C dv/dT ≈ 0,02·v ≈ 0,616 мм²/(с·°C): u_B(T) = 0,616 × 0,0116 = 0,0071 мм²/с.

$$u_c(\nu) = \sqrt{[(t \cdot u_B(C))^2 + (C \cdot u(t))^2 + u_B(T)^2]} = \sqrt{[(312{,}78 \cdot 0{,}0000866)^2 + (0{,}09843 \cdot 0{,}128)^2 + 0{,}0071^2]}$$

$$= \sqrt{(0{,}02709^2 + 0{,}01260^2 + 0{,}0071^2)} = \sqrt{(9{,}43 \cdot 10^{-4})} = 0{,}0307 \text{ мм}^2/\text{с}$$

Результат: **v = 30,79 ± 0,061 мм²/с (k = 2; v_{eff} ≈ 140; P ≈ 95 %)**. Относительная расширенная неопределённость составляет 0,20 %, что соответствует требованиям ГОСТ 33-2016 (допуск ≤ 0,35 %); при этом учёт систематических факторов (дискретность секундомера, температурная нестабильность термостата) заметно приближает результат к границе допуска по сравнению с оценкой, учитывающей только повторяемость времени истечения.

Обсуждение. Сравнительный анализ трёх рассмотренных видов измерений позволяет выявить принципиальные закономерности формирования бюджета неопределённости для физико-химических величин (Таблица 4).

Таблица 4.
Сравнительный анализ характеристик неопределённости для различных физико-химических величин

Величина	Метод/ср-во	U (k=2)	Отн. U, %	Домин. источник	v_{eff}	ГУМ-соотв.
pH раствора	pH-метр ИПГ-200	±0,024 pH	0,35	Калибровка буф.	9	Да
Влажность, %	Гравим. метод	±0,063 %	2,95	Неоднор. пробы	8	Да
Кин. вязкость	Вискозиметр Убб.	±0,061 мм²/с	0,20	Калибровка С	≈140	Да

Таблица 4 наглядно демонстрирует, что относительная расширенная неопределённость существенно варьируется в зависимости от природы измеряемой величины и метода измерения. Измерение влажности гравиметрическим методом характеризуется наибольшей относительной неопределённостью (2,95 %), причём доминирующим источником является неоднородность пробы — составляющая, не зависящая от метрологических характеристик средства измерений и определяемая исключительно способом отбора проб [7; B.18].

Для условий дефицита информации (малое число наблюдений) ключевое значение приобретает корректный выбор закона распределения при оценке составляющих типа B [9,10]. В Таблице 5 приведено сравнение значений неопределённости типа B для одного и того же источника при различных допущениях о законе распределения.

Таблица 5.
Влияние выбора закона распределения на значение u_B (пример: предел допускаемой погрешности ±0,05 pH)

Закон распределения	Обоснование применения	u_B, pH	Доля от a	Рекоменд.
Прямоугольный	Нет данных о распред.	0,02887	57,7 %	При дефиц. инф.
Треугольный	Сумма двух равном. вел.	0,02041	40,8 %	Умеренная инф.
Нормальный (2σ)	Достаточная стат. база	0,02500	50,0 %	При полной инф.
U-образный	Доминируют сист. эффекты	0,03536	70,7 %	Спец. случаи

Из Таблицы 5 следует, что неверное предположение о законе распределения может привести к занижению неопределённости на 28–44 % по сравнению с консервативной оценкой. В соответствии с рекомендациями GUM, при отсутствии достаточной статистической информации следует использовать прямоугольное распределение как наиболее информационно нейтральное согласно принципу максимальной энтропии [8; B.36].

Сравнение методов GUM и Монте-Карло (MCM, JCGM 101:2008) для нелинейных моделей показывает, что при симметричных входных распределениях и умеренной нели-

нейности результаты обоих методов совпадают с точностью до второго порядка малости. Однако для измерения влажности, где модель (6) является нелинейной функцией двух масс, МСМ обеспечивает более точную оценку асимметрии функции распределения выходной величины [4; B.25].

Заключение. На основании проведённого анализа сформулированы следующие выводы.

1. GUM-формализм (JCGM 100:2008) обеспечивает корректную оценку неопределённости измерений физико-химических величин при условии соблюдения процедуры идентификации всех значимых источников погрешностей и обоснованного выбора законов распределения.

2. В условиях дефицита информации (n < 6) прямоугольное распределение является наиболее консервативным и методологически обоснованным выбором для составляющих типа B; применение формулы Уэлча–Саттертуэйта обязательно для корректного определения коэффициента охвата.

3. Для pH доминирующим источником неопределённости является качество буферных растворов для калибровки (52 % от суммарной дисперсии); для влажности — неоднородность пробы (83 %); для кинематической вязкости — калибровка постоянной вискозиметра C (≈78 % от суммарной дисперсии).

4. Внедрение разработанного методологического подхода в практику испытательных лабораторий Узбекистана позволит привести результаты физико-химических измерений в соответствие с требованиями ISO/IEC 17025:2017 и улучшить взаимное признание результатов в рамках ILAC MRA.

Список использованной литературы:

1. Машарипов Ш. М. Научно-практические основы оценки неопределённости измерений физико-химических величин и вопросы установления метрологической прослеживаемости. Монография. Под редакцией д.т.н., проф. Р.К.Азимов. – Т.: “Fan va texnologiyalar nashriyot-matbaa uyi”, 2024. – 220 стр.
2. Исматуллаев П.Р., Матякубова П.М., Машарипов Ш.М. Исследование метрологические характеристики физико-химических средств измерений и способы повышения точности экспериментальных работ: Монография. – Т.: “Fan va texnologiyalar nashriyot-matbaa uyi”, 2021.– 192 стр.
3. Машарипов Ш.М. Диэлькометрический измеритель влажности / Патент на изобретение № IAP 07570. Зарегистрирован в государственном реестре изобретений Республики Узбекистан, в г. Ташкент 21.12.2023 г.
4. SH.M.Masharipov., P.M.Matyaqubova, A New Method Of Determination Of Intercalibration Intervals Of Measuring Instruments Of Physico-Chemical Quantities Taking Into Account The Uncertainty Of Measurements// Chemical Technology, Control and Management: Vol. 2024, N5-6 (119-120, Special Issue), WCIS-2024, ISSN 1815-4840, E-ISSN 2181-1105, pp. 118-123 (05.00.00, №12, Scopus, OAK ning 04.10.24 yildagi 362/5-son Qarori)
5. Masharipov, S.M. Development and Metrological Investigations of the Characteristics of a Primary Transducer of Moisture of Materials. J Eng Phys Thermophy **98**, 772–778 (2025). https://doi.org/10.1007/s10891-025-03157-4 (Scopus Q3)
6. ISO/IEC 17025:2017. General requirements for the competence of testing and calibration laboratories. – Geneva: ISO, 2017. – 30 p.
7. JCGM 100:2008. Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM). – BIPM, IEC, IFCC, ILAC, ISO, IUPAC, IUPAP, OIML, 2008. – 134 p.
8. JCGM 101:2008. Evaluation of measurement data — Supplement 1 to the ‘Guide to the expression of uncertainty in measurement’ — Propagation of distributions using a Monte Carlo method. – BIPM, 2008. – 90 p.
9. Ellison S.L.R., Williams A. (Eds.). Eurachem/CITAC Guide: Quantifying Uncertainty in Analytical Measurement. 3rd ed. – EURACHEM/CITAC, 2012. – 133 p.
10. ГОСТ Р ИСО 5725-1–2002. Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Часть 1: Основные положения и определения. – М.: Стандартинформ, 2002. – 43 с.
11. Xia H., Ding Y., Chen W., Zhang J., Li H., Zhao H., Song R. Measurement uncertainty evaluation with small samples: A review and prospect // Measurement. – 2025. (Elsevier, ScienceDirect, in press).
12. Batista E., Álvares M., Martins R.F., Ogheard F., Geršl J., Godinho I. Uncertainty calculation methodologies in microflow measurements: Comparison of GUM, GUM-S1 and Bayesian approach // Biomedical Engineering / Biomed. Tech. (Berl). – 2023. – Vol. 68, № 1. – P. 29–38.
13. Hernández-Vásquez J.D., Jutínico-Alarcon A.L., Simanca-Celedon E.A., Romero Acuña A., Orozco-Lozano W., Villate-Fonseca M., Campuzano M.J. Comparison of Different Methods to Evaluate Measurement Uncertainty in Bimetallic Thermometers Used in Industrial Equipment // International Journal of Technology. – 2023. – Vol. 14, № 2. – P. 374–386.

GUM-BASED ANALYSIS OF ULTRASOUND-INDUCED HEATING AS AN INFLUENCE QUANTITY IN MAGNETIC SUSCEPTIBILITY MEASUREMENTS OF MANGANESE-DOPED SILICON



Kazakov Tolibjon Oybek ugli
Specialist, Geometric and Mechanical Quantities Department,
Uzbekistan National Institute of Metrology (UzNIM)
M.Sc. in Electronics and Nanoelectronics (MEPhI–TDTU joint programme)

E-mail: tolibjon1282@gmail.com

Abstract: The paper analyses how ultrasound-induced sample heating affects SQUID measurements of the magnetic moment of dilute Mn^{2+} in silicon. An SI Curie–Brillouin model is combined with metrological characteristics of SQUID magnetometers from scientific literature and with GUM-based uncertainty evaluation. Assuming, as an upper bound, an effective concentration of magnetically active Mn^{2+} equal to the equilibrium solubility limit (10^{16} cm^{-3}), the paramagnetic susceptibility at 300 K is $(3.0 \pm 1.2)\times10^{-9}$, only 7.5×10^{-4} of the host diamagnetism, and the moment change for 10 K heating (2×10^{-12} $A\cdot m^2$) lies below instrument sensitivity. Under the assumed conditions, a practically resolvable heating response is obtained near 5 K, whereas at 10 K the signal remains below the practical resolution; near 5 K the non-thermal residual can be bounded with an expanded uncertainty of 7.6–17.9 percentage points, and

this bound falls below the thermal change itself only with near-intrinsic magnetometer performance.

Keywords: manganese-doped silicon; Si:Mn; magnetic susceptibility; Curie law; Brillouin function; SQUID magnetometry; ultrasound; influence quantity; sample heating; diamagnetic background; GUM; uncertainty budget; measurement planning.

Annotatsiya: Maqolada ultratovush ta'sirida namunaning qizishi kremniydagi suyultirilgan Mn^{2+} magnit momentini SQUID yordamida o'lchashga qanday ta'sir qilishi tahlil qilindi. SI birliklaridagi Kyuri–Brillyuen modeli SQUID magnitometrlarining ilmiy adabiyotlarda keltirilgan metrologik tavsiflari va GUM asosidagi noaniqlikni baholash bilan birlashtirildi. Magnit faol Mn^{2+}ning samarali konsentratsiyasi yuqori chegara sifatida muvozanatdagi eruvchanlik chegarasiga (10^{16} sm^{-3}) teng deb olinganda, 300 K dagi paramagnit qabul qiluvchanlik $(3{,}0 \pm 1{,}2)\times10^{-9}$ bo'lib, matritsa diamagnetizmining atigi $7{,}5\times10^{-4}$ qismini tashkil etadi, 10 K qizishdagi moment o'zgarishi (2×10^{-12} A·m²) esa asbob sezgirligidan past. Qabul qilingan shartlarda qizish ta'sirini amalda 5 K atrofida ajratish mumkin, 10 K da esa signal amaliy ajratish qobiliyatidan past qoladi; 5 K atrofida notermik qoldiq 7,6–17,9 foiz punkt kengaytirilgan noaniqlik bilan chegaralanishi mumkin; bu chegara termik o'zgarishning o'zidan faqat asbobning sezgirligiga yaqin ishlaganda kichik bo'ladi.

Kalit so'zlar: marganets bilan legirlangan kremniy; Si:Mn; magnit qabul qiluvchanlik; Kyuri qonuni; Brillyuen funksiyasi; SQUID-magnitometriya; ultratovush; ta'sir etuvchi kattalik; namunaning qizishi; diamagnit fon; GUM; noaniqlik budjeti; o'lchashni rejalashtirish.

Аннотация: В статье проанализировано влияние нагрева образца ультразвуком на SQUID-измерения магнитного момента разбавленного Mn^{2+} в кремнии. Модель Кюри–Бриллюэна в единицах СИ объединена с метрологическими характеристиками SQUID-магнитометров из научной литературы и оценкой неопределённости по GUM. Если в качестве верхней оценки принять эффективную концентрацию магнитно-активных Mn^{2+} равной пределу равновесной растворимости (10^{16} $см^{-3}$), парамагнитная восприимчивость при 300 K составляет $(3{,}0 \pm 1{,}2)\times10^{-9}$, лишь $7{,}5\times10^{-4}$ от диамагнетизма матрицы, а изменение момента при нагреве на 10 K (2×10^{-12} А·м²) ниже чувствительности прибора. В принятых условиях отклик на нагрев становится практически разрешимым вблизи 5 K, тогда как при 10 K сигнал остаётся ниже практического разрешения; вблизи 5 K нетепловой остаток может быть ограничен расширенной неопределённостью 7,6–17,9 процентного пункта, причём ниже самого теплового изменения эта граница опускается лишь при чувствительности прибора, близкой к собственной.

Ключевые слова: кремний, легированный марганцем; Si:Mn; магнитная восприимчивость; закон Кюри; функция Бриллюэна; SQUID-магнитометрия; ультразвук; влияющая величина; нагрев образца; диамагнитный фон; GUM; бюджет неопределённости; планирование измерений.

1. Introduction. Semiconductors doped with transition-metal ions combine charge transport with a localized magnetic response and remain a subject of sustained interest for spintronic and sensor concepts [22; P.323], [7; P.187]. In silicon, interstitial manganese is a deep-level impurity that can exist in four charge states (Mn^{-}, Mn^{0}, Mn^{+}, Mn^{2+}) with levels spread across the band gap [6; P.223], [12; P.1440]; the magnetic moment carried by a Mn centre therefore depends on the position of the Fermi level. The equilibrium solubility of Mn in Si is low: the tracer data of Senk and Borchardt [19; P.477] give approximately 10^{16} cm^{-3} at 1200 °C, so that higher Mn contents found near the surface of diffusion-doped samples [21; P.130] must be expected to reside largely in precipitated or clustered phases rather than as isolated paramagnetic centres.

Ultrasound interacts with a semiconductor not only through heating. In p-type Si, MHz-range ultrasound with intensities of the order of 1 W/cm^2 stimulates defect reactions near room temperature, such as the dissociation of Fe–B pairs and an enhanced pairing of Cr and Fe with boron [3; P.647], [14; P.13133], and ultrasonic propagation is an established probe of spin–lattice coupling in magnetic materials [8; P.094403]. Interstitial Mn belongs to the same group of fast-diffusing 3d transition-metal impurities in Si as Fe and Cr and, like them, forms pairs with boron [12; P.1440]; acoustically stimulated processes involving Mn centres are therefore to be expected.

The evidence cited above comes from electrical measurements (minority-carrier diffusion length, current–voltage characteristics), which respond to the charge state and recombination activity of defects. A magnetic measurement would probe the spin state of the Mn centres directly, but it faces two metrological obstacles. First, the paramagnetic signal of isolated Mn in Si is limited by the low solubility and is superimposed on the much larger diamagnetism of the host crystal. Second, the absorbed acoustic power heats the sample, and a paramagnet responds to heating through the Curie law; ultrasonic loading can moreover heat a crystal non-uniformly, with a local temperature rise around dislocations and other extended defects, as demonstrated for $Hg_{1-x}Cd_xTe$ [17; P.375]. In the terminology of the GUM, the sample temperature is an influence quantity [9, §3.1.5, §4.1.3]: unless its effect is quantified and corrected, it cannot be distinguished from any non-thermal effect that is sought. The author is not aware of a published analysis that quantifies these obstacles for Si:Mn against documented magnetometer performance. Without such an analysis, a change of the magnetic moment observed under ultrasound cannot be attributed to a non-thermal mechanism, and an experiment may be designed under conditions in which the effect lies below the detection limit. The present work provides this analysis before an experiment is undertaken.

The aims of this work are: (i) to formulate an SI-consistent model of the paramagnetic moment of dilute Mn^{2+} in Si and of its response to ultrasound-induced heating; (ii) to compare the expected signal with the diamagnetic background of the silicon host and with the performance of commercial SQUID magnetometers as documented experimentally by Sawicki et al. [18]; (iii) to evaluate, according to the GUM [9], whether and under which conditions a non-thermal effect of ultrasound could be detected; and (iv) to test how sensitive these conclusions are to the assumed input values, thereby specifying the requirements for a future measurement.

2. Methodology

2.1 Physical model

For non-interacting magnetic centres with spin S and isotropic g-factor, in the linear (low-field) regime, the static volume susceptibility in SI units is given by the Curie law:

$$x_p(T) = \mu_0 \cdot n \cdot g^2 \cdot \mu_B^2 \cdot S(S+1) / (3k_B \cdot T) \qquad (1)$$

where n is the concentration of magnetically active Mn^{2+} centres (not the nominal Mn content), μ_0 the magnetic constant, μ_B the Bohr magneton and k_B the Boltzmann constant. Outside the linear regime, i.e. when $x = g\mu_B \cdot S \cdot B_0/(k_B \cdot T)$ is not small, the paramagnetic moment of a sample of volume V is calculated with the full Brillouin function $B_S(x)$:

$$m_p = n \cdot g \cdot \mu_B \cdot S \cdot B_S(x) \cdot V \qquad (2)$$

The model is applied under four explicitly stated conditions. First, the centres are dilute and non-interacting, which restricts n to values not exceeding the equilibrium solubility limit of about 10^{16} cm^{-3} (10^{22} m^{-3}) [19; P.477]. Non-equilibrium processing such as ion implantation can produce higher nominal Mn contents, but then Mn–Mn interactions and precipitation become important and Eqs. (1)–(2) no longer apply. Second, all paramagnetic Mn is taken to be in the Mn^{2+} state ($3d^5$, S = 5/2); for interstitial Mn this requires the Fermi level to lie below the Mn^{+}/Mn^{2+} level at E_v + 0.30 eV [6; P.223]. Because interstitial Mn is itself a double donor [6; P.223], this implies p-type material in which the acceptor concentration exceeds about twice the Mn concentration. In other material the effective values of n and S are smaller and the model gives an upper bound. Third, the ion is in an orbital S-state (L = 0), for which g is close to 2.00 and nearly isotropic [2]. Fourth, all quantities refer to the static (DC) response: in AC measurements, spin–lattice relaxation causes a dispersion of x from its isothermal to its adiabatic value [5; P.507], and since the spin–lattice relaxation time of Mn^{2+} in Si is not known to the author, AC measurements are excluded. At 300 K and B_0 = 2 T, x = 0.022 and Eq. (2) differs from the Curie law by only −0.005 %; at 5 K Eq. (2) must be used.

The effect of ultrasound is represented through the sample temperature:

$$T = T_0 + \Delta T, \qquad \Delta T = \beta \cdot I_{us} \qquad (3)$$

where T_0 is the ambient temperature, I_{us} the incident ultrasonic intensity and β a heating coefficient ($K \cdot m^2/W$) determined by the absorbed fraction of acoustic power and by the heat exchange of the sample with its surroundings. It therefore depends on the ultrasonic frequency, the sample geometry, the acoustic coupling and the thermal boundary conditions, and is not a material constant. It is assumed that on the time scale of a DC measurement (seconds) the spin system is in thermal equilibrium with the lattice, so that heating acts on the paramagnetic moment only through T. This assumption is plausible at room temperature but requires verification at cryogenic temperatures, where spin–lattice relaxation slows down and the spin temperature may lag behind the lattice temperature. In the Curie regime the fractional change is

$$r \equiv m_p(T_0 + \Delta T)/m_p(T_0) - 1 = -\Delta T/(T_0 + \Delta T) \qquad (4)$$

which is independent of n, g, S and of the charge-state fraction; at low temperature r is obtained from Eq. (2). A magnetometer, however, measures the total moment of the sample, which also contains the diamagnetic moment of the silicon host, $m_{dia} = x_{dia} \cdot V \cdot B_0/\mu_0$. From the handbook molar susceptibility of silicon, -3.9×10^{-6} cm^3/mol at 298 K [20; P.E110], with molar mass 28.09 g/mol, density 2.33 g/cm^3

and the factor 4π for conversion from CGS to SI, $x_{dia} \approx -4.1\times10^{-6}$. A larger magnitude, -2.29×10^{-7} cm³/g (-6.7×10^{-6} in SI), has been reported for an undeformed n-Si crystal [4]; since real crystals may deviate from the handbook value, the diamagnetic susceptibility of the actual material should be determined on the undoped reference sample. The quantity to be resolved is the change $\Delta m = r\cdot m_p$.

2.2 Parameters and instrument performance

Instrument parameters are taken from the systematic study of artefacts and detection limits of commercial SQUID magnetometers (MPMS XL, 5 T) by Sawicki et al. [18]. The sample size is limited to 5 mm along the direction of travel, which keeps the systematic error of the point-dipole evaluation below about 3 % [18, §II.A]. At fields above about 25 kOe (2.5 T), distortions of the measured signal limit the compensation of a large background to about 99–99.5 % of the total signal [18, §II.C.4]; at weak fields the field reproducibility is better than 0.05 % [18, §II.C.2]. Under everyday conditions, relative changes of 10^{-7} emu (10^{-10} A·m²) can be resolved [18, §III], while the manufacturer's specified intrinsic sensitivity is 5×10^{-9} emu (5×10^{-12} A·m²) [18, §IV]. For consistency with the cited sources, concentrations are given in cm⁻³ (1 cm⁻³ = 10^6 m⁻³) and instrument figures also in emu (1 emu = 10^{-3} A·m²); all calculations were performed in SI units. These are performance figures of the instrument, not standard uncertainties; in the budget of Table 5 they are converted into standard uncertainties of a single reading by a Type B judgement [9, §4.3], taking them conservatively at face value. Table 1 lists all parameters. The temperature rises ΔT = 10 K (at 300 K) and ΔT = 1 K (at 5–10 K) are illustrative scenario values; because ΔT is measured directly in the proposed protocol, the heating coefficient β does not enter the uncertainty analysis. Because β is specific to the experimental arrangement, it must be determined in situ, by recording ΔT as a function of I_{us} with the sample thermometer before the magnetic measurements.

Table 1 – Model and instrument parameters

Parameter	Symbol	Value	Source / status
Temperature	T_0	300 K; 5–10 K	room / cryogenic scenario
Spin, g-factor	S, g	5/2, 2.00	Mn^{2+} S-state ion [2]
Mn^{2+} concentration	n	10^{14}–10^{16} cm⁻³	≤ solubility limit [19]
Host susceptibility	x_{dia}	-4.1×10^{-6}	CRC handbook [20], converted to SI
Sample	V	5×5×0.5 mm³	size limit [18, §II.A]
Field	B_0	2 T (300 K); 0.5–1 T (5–10 K)	below 2.5 T [18, §II.C.4]
Practically resolvable change	m_{res}	10^{-10} A·m²	[18, §III]
Intrinsic sensitivity (specification)	m_{int}	5×10^{-12} A·m²	[18, §IV]
Field reproducibility	–	better than 5×10^{-4}	weak fields only [18, §II.C.2]
Background compensation	–	99–99.5 %	fields above 2.5 T [18, §II.C.4]
Heating	ΔT	10 K (300 K); 1 K (5–10 K)	illustrative

2.3 Uncertainty evaluation

Standard uncertainties of input quantities that are not obtained from repeated observations are evaluated by Type B methods [9, §4.3]. For uncorrelated inputs, the combined standard uncertainty follows the law of propagation of uncertainty [9, §5.1.2]:

$$u_c^2(y) = \Sigma_i c_i^2 \cdot u^2(x_i), \qquad c_i = \partial f / \partial x_i \qquad (5)$$

and the expanded uncertainty is $U = k \cdot u_c$ with $k = 2$, which corresponds to a level of confidence of about 95 % when the output distribution is approximately normal [9, §6.3.3]. Two measurands are considered: (A) the predicted susceptibility x_p, and (B) the non-thermal residual

$$\delta = r_{meas} - r_{th}(\Delta T_{meas}) \qquad (6)$$

i.e. the difference between the measured fractional change and the thermal change calculated with the measured temperature rise. A non-thermal effect of ultrasound can be claimed only if $|\delta|$ exceeds its expanded uncertainty. All calculations were implemented in Python (NumPy, Matplotlib); the script is available from the author on request.

3. Results

3.1 Room temperature

Table 2 gives, for 300 K and $B_0 = 2$ T, the paramagnetic susceptibility, its ratio to the host diamagnetism, the paramagnetic moment of the sample and its change for heating by 1 K and 10 K. The value for 10^{17} cm^{-3} exceeds the solubility limit and is shown for comparison only.

*Table 2 – Paramagnetic susceptibility and moment of Si:Mn at $T_0 = 300$ K ($B_0 = 2$ T, $V = 12.5$ mm³); * above the solubility limit*

n, cm^{-3}	x_p	$x_p/\lvert x_{dia}\rvert$	m_p, A·m²	$\lvert\Delta m\rvert$, $\Delta T = 1$ K	$\lvert\Delta m\rvert$, $\Delta T = 10$ K
10^{14}	3.0×10^{-11}	7.5×10^{-6}	6.1×10^{-13}	2.0×10^{-15}	2.0×10^{-14}
10^{15}	3.0×10^{-10}	7.5×10^{-5}	6.1×10^{-12}	2.0×10^{-14}	2.0×10^{-13}
10^{16}	3.0×10^{-9}	7.5×10^{-4}	6.1×10^{-11}	2.0×10^{-13}	2.0×10^{-12}
10^{17} *	3.0×10^{-8}	7.5×10^{-3}	6.1×10^{-10}	2.0×10^{-12}	2.0×10^{-11}

In the Curie regime r depends only on the heating and the ambient temperature (Fig. 1a): for $\Delta T = 10$ K it is −4.8 %, −3.2 % and −2.4 % at 200, 300 and 400 K, respectively. At the solubility limit and for heating by 10 K, the expected change $\Delta m = 2.0\times10^{-12}$ A·m² is 0.39 of the intrinsic sensitivity and 0.02 of the practical resolution of the magnetometer (Table 1). Because the static background cancels in the difference between readings with ultrasound off and on, resolving it requires the diamagnetic moment of the host, $m_{dia} = -8.1\times10^{-8}$ A·m², to remain stable between the two readings to 2.4×10^{-5} of its value. The stability of the background at 2 T is not quantified in [18]; the closest figure reported there is a field reproducibility better than 0.05 % at weak fields [18, §II.C.2]. Even if this value is taken as an optimistic estimate for 2 T (the author's assumption, not a value from [18]), the requirement is about twenty times stricter. Even the value for 10^{17} cm^{-3} remains below the practical resolution. The thermal response of isolated Mn^{2+} in Si is therefore not measurable by DC SQUID magnetometry at room temperature, and no statement about a non-thermal effect is possible under these conditions.

Table 3 gives the uncertainty budget for the predicted susceptibility at $n = 10^{16}$ cm^{-3} and 300 K. The relative standard uncertainty of n (20 %) is an assumed Type B value typical of dopant concentrations determined by independent analysis. The result is $x_p = (3.0 \pm 1.2)\times10^{-9}$ ($k = 2$).

Table 3 – Uncertainty budget for x_p ($n = 10^{16}$ cm^{-3}, $T_0 = 300$ K)

Input x_i	Estimate	$u(x_i)/x_i$	$\lvert c_i \rvert$ (relative)	Contribution, %
n	10^{16} cm^{-3}	20 %	1	20.0
g	2.00	0.5 %	2	1.0
T_0	300 K	0.33 %	1	0.33
Combined $u_c(x_p)/x_p$				20.0
Expanded U (k = 2)				40.1

3.2 Cryogenic temperatures

Because m_p grows approximately as 1/T and the fractional change for a given ΔT grows as well, the signal increases strongly at low temperature (Fig. 1b). Table 4 compares the room-temperature case with three cryogenic operating points for n = 10^{16} cm^{-3}, calculated with Eq. (2).

Table 4 – Feasibility of resolving the heating response ($n = 10^{16}$ cm^{-3}, V = 12.5 mm^3); required background stability = $|\Delta m|/|m_{dia}|$, i.e. the relative stability of the diamagnetic background required between readings with ultrasound off and on

T_0, B_0, ΔT	x	m_p, A·m²	$\lvert\Delta m\rvert$, A·m²	$\lvert\Delta m\rvert/m_{res}$	Required background stability
300 K, 2 T, 10 K	0.022	6.1×10^{-11}	2.0×10^{-12}	0.02	2.4×10^{-5}
10 K, 0.5 T, 1 K	0.17	4.5×10^{-10}	4.1×10^{-11}	0.41	2.0×10^{-3}
5 K, 0.5 T, 1 K	0.34	9.0×10^{-10}	1.5×10^{-10}	1.5	7.3×10^{-3}
5 K, 1 T, 1 K	0.67	1.7×10^{-9}	2.7×10^{-10}	2.7	6.7×10^{-3}

At 5 K the change exceeds the practically resolvable change. This criterion denotes detection rather than precise measurement: since two readings are compared, $|\Delta m| = 2.7\times10^{-10}$ A·m² at 1 T corresponds to only about 1.9 standard uncertainties when the practically resolvable change is taken as the standard uncertainty of a single reading (Table 5). The background must remain stable between the two readings to about 7×10^{-3} of its value. This is less stringent than the weak-field reproducibility of better than 5×10^{-4} reported in [18, §II.C.2]; the stability at 0.5–1 T over the duration of the measurement is not quantified in [18] and must be verified for the instrument used. The accuracy with which the static background is subtracted enters separately, as the scale uncertainty of the paramagnetic moment (Tables 5 and 6). At 10 K the signal is below the practically resolvable change and would require extensive averaging or larger heating.

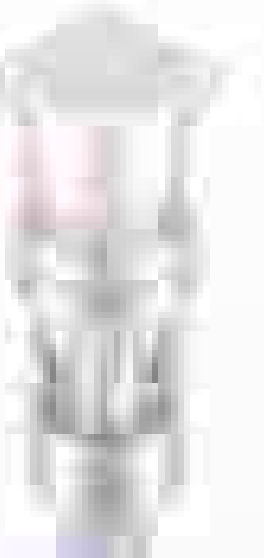


Figure 1 *– (a) Fractional change of the paramagnetic susceptibility versus heating in the Curie regime, Eq. (4); (b) moment change for ΔT = 1 K versus temperature at B_0 = 0.5, 1 and 2 T (n = 10^{16} cm^{-3}, Eq. (2)), compared with the practical resolution and intrinsic sensitivity of a commercial SQUID magnetometer [18]; circles mark the operating points of Table 4 (5 K and 10 K) and the 300 K, 2 T case of Table 2*

Table 5 gives the uncertainty budget for the non-thermal residual δ at the operating point 5 K, 1 T, ΔT = 1 K, where the thermal change is r_{th} = −15.6 %. The magnetometer contribution is evaluated for two cases, taking as the standard uncertainty of a single reading either the practically resolvable change or, assuming extensive averaging, the intrinsic sensitivity; both are Type B judgements based on the performance figures of [18]. The paramagnetic moment m_p must be obtained by background subtraction (assumed 20 %, contributing $|r_{th}|\cdot 0.20$), and the thermometry contribution uses u(ΔT) = 0.1 K with the sensitivity coefficient $|\partial r/\partial \Delta T|$ = 0.132 K^{-1} obtained from Eq. (2). The stability of the diamagnetic background between the two readings is included with the relative value s = 5×10^{-4}, the weak-field reproducibility reported in [18, §II.C.2] (its use at 1 T is the author's assumption); it contributes $\sqrt{2}\cdot s$ times the ratio of the diamagnetic to the paramagnetic moment.

Table 5 – Uncertainty budget for the non-thermal residual δ (n = 10^{16} cm^{-3}, T_0 = 5 K, B_0 = 1 T, ΔT = 1 K); pp – percentage points

Source	Practical resolution, pp	Intrinsic sensitivity, pp
Magnetometer (two readings)	8.12	0.41
Paramagnetic moment m_p (20 %)	3.12	3.12
Sample thermometry (0.1 K)	1.32	1.32
Background stability (s = 5×10^{-4})	1.64	1.64
Combined $u_c(\delta)$	8.95	3.79
Expanded U (k = 2)	17.9	7.6

With the practical resolution, U(δ) = 17.9 percentage points exceeds the thermal change itself (15.6 %); with near-intrinsic performance it falls to 7.6 percentage points and is then dominated by the determination of m_p, together with the stability of the background between readings.

3.3 Sensitivity to the assumed input values

Two inputs of the analysis are assumed rather than taken from measurement: the relative standard uncertainty of the Mn^{2+} concentration, u(n)/n = 20 %, and the achievable background compensation. Their influence was tested by recalculating the affected results.

Concentration. In Table 3, n enters with a sensitivity coefficient of 1 and dominates the budget, so that the expanded relative uncertainty of x_p is practically 2·u(n)/n: 20 %, 40 %, 60 % and 100 % for u(n)/n = 10 %, 20 %, 30 % and 50 %. The uncertainty of x_p does not, however, propagate into the measurand δ, because r is independent of n (Eq. (4); at 5 K n also cancels in the ratio of Eq. (2)). What matters for δ is the absolute value of n: a smaller effective concentration of isolated Mn^{2+}, e.g. because part of the Mn is in other charge states, reduces m_p and increases the relative weight of both the magnetometer and the background contributions. Pairing with boron changes the paramagnetic moment rather than removing it: in the Mn–B pair, identified by EPR as an interstitial Mn^{2+} ion next to a substitutional B^- ion [10; P.695], Mn retains the $^6S_{5/2}$ ground state but acquires a strong trigonal zero-field splitting [11; P.3678], so that at 5 K its magnetization is not described by Eq. (2).

Background compensation. At room temperature the conclusion of Section 3.1 is independent of the assumed background stability: the expected change is below the intrinsic sensitivity (0.39 m_{int}) and fifty times below the practical resolution, so that at the solubility limit it could not be resolved even with perfect compensation. The effective Mn^{2+} concentration would have to reach about 2.6×10^{16} cm^{-3} to exceed the intrinsic sensitivity and about 5×10^{17} cm^{-3} to exceed the practical resolution; both values are above the equilibrium solubility limit. At 5 K the relative uncertainty of m_p obtained by background subtraction can be written as $u(m_p)/m_p = c\cdot|m_{dia}|/m_p$, where c is the residual fraction of the background after compensation and $|m_{dia}|/m_p = 23$ at 1 T. The value of 20 % assumed in Table 5 thus corresponds to $c \approx 8.6\times10^{-3}$, i.e. to a compensation of about 99.1 %, within the range of 99–99.5 % reported in [18, §II.C.4] for high fields; a compensation of 99.5 % would give about 12 %. Table 6 shows U(δ) for combinations of c and the effective concentration n.

*Table 6 – Sensitivity of U(δ) to the effective Mn^{2+} concentration n and to the residual background fraction c (T_0 = 5 K, B_0 = 1 T, ΔT = 1 K, u(ΔT) = 0.1 K, s = 5×10^{-4}); * linear propagation becomes unreliable when $u(m_p)/m_p$ exceeds about 30 %*

n, cm^{-3}	c	$u(m_p)/m_p$, %	U(δ), pp (practical resolution)	U(δ), pp (intrinsic sensitivity)
1×10^{16}	8.6×10^{-3}	20.0	17.9	7.6
1×10^{16}	2×10^{-3}	4.6	16.8	4.5
1×10^{16}	5×10^{-4}	1.2	16.8	4.3
5×10^{15}	8.6×10^{-3}	40.0*	35.5	14.4
5×10^{15}	5×10^{-4}	2.3	33.3	7.3
2×10^{15}	8.6×10^{-3}	100*	88.6	35.6
2×10^{15}	5×10^{-4}	5.8	82.9	17.2

With the practical resolution, U(δ) is governed by the magnetometer term and is almost insensitive to c; it exceeds the thermal change $|r_{th}|$ = 15.6 % for every concentration up to the solubility limit (U(δ) = $|r_{th}|$ at n ≈ 1.2×10^{16} cm^{-3}). With near-intrinsic performance, U(δ) remains below $|r_{th}|$ for n ≥ 5×10^{15} cm^{-3} at c = 8.6×10^{-3} and for n ≥ 2×10^{15} cm^{-3} at c = 5×10^{-4}. The feasibility conclusion of Section 3.2 therefore rests on two conditions that must be verified experimentally: near-intrinsic magnetometer performance and an effective Mn^{2+} concentration close to the solubility limit.

4. Discussion. The first result is a matter of scale. Because the solubility of Mn in Si limits the concentration of isolated paramagnetic centres to about 10^{16} cm^{-3} [19; P.477], the Mn contribution to the susceptibility at room temperature cannot exceed about 7.5×10^{-4} of the host diamagnetism. Sawicki et al. [18, §II.A] further point out that small-gap substrates such as Si show temperature-dependent paramagnetic contributions of their own after subtraction of the diamagnetism; under ultrasonic heating these would change together with the Mn signal. A reference sample of undoped Si of identical geometry, exposed to identical heating, is therefore an indispensable part of any measurement.

The second result concerns feasibility. With published performance data of commercial SQUID magnetometers [18], the thermal response of isolated Mn^{2+} in Si cannot be resolved at 300 K, and claims of ultrasound-induced changes of x in such material at room temperature cannot be supported by DC SQUID magnetometry. Under the assumed conditions a measurement becomes feasible only at cryogenic temperatures and moderate fields (0.5–1 T): among the operating points considered, the heating response is practically resolvable near 5 K but not at 10 K. Near 5 K the paramagnetic signal is larger by a factor of about 29 at 1 T (15 at 0.5 T) than at 300 K and 2 T, and the required background stability lies within the documented weak-field reproducibility of the instrument, but must be verified at the fields and time scales of the measurement.

Heating is an unavoidable effect of ultrasound on the paramagnetic moment; it is fully described by Eqs. (2)–(4) once ΔT is known and must be accounted for before any other mechanism is considered. Because ultrasonic heating can be localized at dislocations and other extended defects, as demonstrated for $Hg_{1-x}Cd_xTe$ [17; P.375], a sensor on the sample surface may underestimate the temperature of the volume that carries the moment; samples with low dislocation density and a verified temperature uniformity are therefore preferred. A direct resonant spin–phonon process (acoustic paramagnetic resonance) requires the ultrasonic frequency to match the spin resonance frequency $g\mu_B \cdot B_0/h$, which is 14–56 GHz for the fields of 0.5–2 T considered here; it is therefore excluded for MHz ultrasound, but may become relevant at very low fields. Acoustically induced changes in Si can be reversible and disappear when the ultrasound is switched off [13; P.545]; the moment must therefore be measured in situ during exposure rather than by comparing states before and after treatment. Non-thermal effects of the kind that ultrasonic studies reveal in other magnetic materials [8; P.094403] can be claimed only if |δ| exceeds its expanded uncertainty (Tables 5 and 6).

A further constraint follows from the mobility of interstitial Mn. Its diffusion coefficient near room temperature, $D = 2.4\times10^{-3}\cdot\exp(-0.72\ eV/k_BT)$ cm^2/s [12; P.1440], together with a Coulomb capture radius of about 9.5 nm ($r = 2e^2/(4\pi\varepsilon_0 \cdot 11.7 \cdot kT)$ for charges +2e and −e in Si at 300 K; the author's estimate), gives an

estimated Mn–B pairing time of about 24 min at 300 K for a boron concentration of 3×10^{16} cm^{-3} and about 7 min for 10^{17} cm^{-3}, in agreement with the association time constant measured by Roth et al., which gives 25 min and 7.5 min for the same concentrations [16; P.103716]. Ultrasound may shorten these times further, as observed for Cr and Fe in p-type Si [3; P.647], [14; P.13133]. In the p-type material required for the Mn^{2+} state, isolated interstitial Mn is therefore metastable at room temperature: a low-temperature measurement must be preceded by prompt cooling of the sample after preparation, and the time evolution of the moment without ultrasound must be recorded as a separate drift term. The Mn–B pair retains the Mn^{2+} $^6S_{5/2}$ state with a trigonal fine-structure splitting comparable to the X-band Zeeman energy [10; P.695], [11; P.3678], i.e. of the order of 0.5 K (the author's estimate). Pairing therefore changes the susceptibility only marginally at room temperature, unless it also changes the charge state of Mn, but significantly at 5 K. At 5 K interstitial Mn is immobile, so that no further pairing occurs during the measurement.

The differential design of measurand B has a metrological advantage: n, g, S, the charge-state fraction and the absolute calibration factor of the magnetometer all cancel in r in the Curie regime, so that the result does not depend on the least well-known material parameters. A more direct test is a temperature-stabilized protocol with three configurations: (i) ultrasound off; (ii) ultrasound on with free heating; and (iii) ultrasound on with the sample temperature held at T_0 by active feedback. In configuration (iii) the thermal contribution is removed physically rather than by calculation, and any remaining change of the moment is a candidate non-thermal effect. This protocol is recommended as the primary design of a follow-up experiment.

The moment reported by a SQUID magnetometer is metrologically traceable only through calibration against a reference material of certified moment. The standard reference materials of NIST are bulk ferromagnets – a Ni sphere (SRM 772a) and an yttrium iron garnet sphere (SRM 2853) – with moments of the order of 10^{-3} $A\cdot m^2$ and 76 $\mu A\cdot m^2$, respectively, specified at about 400 kA/m [15; P.1]. These moments exceed the paramagnetic moments considered here (6×10^{-11}–2×10^{-9} $A\cdot m^2$ at n = 10^{16} cm^{-3}, Tables 2 and 4) by four to seven orders of magnitude, so that a traceable absolute measurement of m_p requires, in addition, a verification of the instrument linearity between the calibration and measurement ranges, as demonstrated for a vibrating-sample magnetometer in [15, §2.2]. The differential measurand r is less demanding: the calibration factor cancels in the ratio, and an interlaboratory comparison of magnetometer measurements on thin-film samples found a spread of 6 % in absolute moments but only 3 % in moment ratios [15, Appendix A]. The traceability of r then rests mainly on the linearity of the instrument over the small change Δm and on the calibration of the sample thermometer, which determines r_{th} through ΔT; the value $u(\Delta T)$ = 0.1 K used in Table 5 presupposes such a calibration.

The analysis has the following limitations. Instrument parameters refer to the MPMS XL systems studied in [18] and should be replaced by the specification and verified performance of the instrument actually used. The values u(n)/n = 20 % and the background-subtraction uncertainty of 20 % are assumed; their influence is quantified in Section 3.3. The model gives an upper bound when part of the Mn is in charge states other than Mn^{2+} [6; P.223], [12; P.1440]; Mn clusters and silicide precipitates, which are likely in samples with high surface Mn

content [21; P.130], [1; P.443], have a magnetic response not described by Eqs. (1)–(2). The assumption of equilibrium between the spin system and the lattice must be verified at low temperature. An in-situ experiment also introduces error sources that are not included in Tables 5 and 6: the transducer, its electrodes and leads have a magnetic moment of their own that moves with the sample and may change on heating; RF drive currents can interfere with the SQUID; and mounting the transducer can change the centring of the sample. These contributions must be determined experimentally, e.g. by repeating configuration (i) with the transducer mounted on the undoped reference sample, and added to the background-stability term before the results of Table 6 are applied. Measuring the sample temperature inside a SQUID cryostat at 5 K is likewise technically demanding and has not been analysed here. Finally, a microscopic model of direct spin–phonon coupling would require the spin–lattice coupling constants and relaxation time of Mn^{2+} in Si [5; P.507], which are not available; it is left for future work.

5. Conclusion. An SI-consistent Curie–Brillouin model of dilute Mn^{2+} in silicon was combined with published performance data of commercial SQUID magnetometers to analyse ultrasound-induced heating as an influence quantity, and the predictions were evaluated according to the GUM. At the solubility limit of about 10^{16} cm^{-3} the paramagnetic susceptibility at 300 K is $x_p = (3.0 \pm 1.2)\times10^{-9}$ ($k = 2$), only 7.5×10^{-4} of the host diamagnetism. Heating by 10 K changes the moment of a 12.5 mm^3 sample by 2×10^{-12} $A\cdot m^2$, below the intrinsic sensitivity and fifty times below the practical resolution of the instrument; the effect is therefore not measurable at room temperature.

Under the assumed conditions, at about 5 K and 0.5–1 T the heating response of 1 K exceeds the practically resolvable change, and the non-thermal residual can be bounded with an expanded uncertainty of 7.6–17.9 percentage points, depending on the achieved magnetometer performance; with the practical resolution this bound exceeds the thermal change itself, so that a non-thermal effect could be detected only with near-intrinsic performance. These figures define the minimum requirements for a future experiment — cryogenic operation, prompt cooling of the sample to prevent Mn–B pairing, an undoped reference sample, measurement of the sample temperature, and preferably active temperature stabilization during ultrasonic exposure. The room-temperature conclusion does not depend on the assumed background compensation. At 5 K, near-intrinsic magnetometer performance keeps $U(\delta)$ below the thermal change itself only if the effective Mn^{2+} concentration is at least about 5×10^{15} cm^{-3}, or about 2×10^{15} cm^{-3} if the background is compensated to 5×10^{-4} of its value; with the practical resolution, $U(\delta)$ exceeds the thermal change at any concentration up to the solubility limit.

References:

1. Abduraxmanov B.A., Kushiyev G.A., Kazakov T.O. Technological stages of diffusion of manganese intermediate atoms from the gas phase to silicon // Current Problems of Fundamental and Applied Physics: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference, Part I. – Namangan: NamDTU, 2026. – P. 443.
2. Abragam A., Bleaney B. Electron Paramagnetic Resonance of Transition Ions. – Oxford: Clarendon Press, 1970.
3. Bell R.E., Ostapenko S., Lagowski J. Ultrasound defect engineering of transition metals via metal-acceptor pairs in silicon // MRS Proceedings. – 1995. – Vol. 378. – P. 647. – DOI: 10.1557/PROC-378-647.
4. Brodovoi A.V., Kolesnichenko V.G., Skorokhod V.V., Solonin S.M., Kolesnik S.P., Brodovoi V.A., Zykov G.A., Zinets O.S. Conditions of arising and nature of the dislocation magnetism of deformed silicon crystals // Proceedings of SPIE. – 1999. – Vol. 3890. – DOI: 10.1117/12.368365.
5. Casimir H.B.G., du Pré F.K. Note on the thermodynamic interpretation of paramagnetic relaxation phenomena // Physica. – 1938. – Vol. 5, No. 6. – P. 507. – DOI: 10.1016/S0031-8914(38)80164-6.
6. Czaputa R., Feichtinger H., Oswald J. Energy levels of interstitial manganese in silicon // Solid State Communications. – 1983. – Vol. 47, No. 4. – P. 223. – DOI: 10.1016/0038-1098(83)90549-5.
7. Dietl T., Ohno H. Dilute ferromagnetic semiconductors: Physics and spintronic structures // Reviews of Modern Physics. – 2014. – Vol. 86. – P. 187.
8. Hong X., Schiffer M., Schwarze B.V., Uhlarz M., Jin X., Yao W., Janssen L., Zherlitsyn S., Büchner B., Li Y., Sun Y., Hess C. Direct probe of magnetic field effects on phonons by ultrasound propagation in a quasi-two-dimensional honeycomb magnet $Na_2Co_2TeO_6$ // Physical Review B. – 2025. – Vol. 112, No. 9. – Art. 094403. – DOI: 10.1103/kw7z-226c.
9. JCGM 100:2008. Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM 1995 with minor corrections). – Sèvres: BIPM, 2008 (corrected version 2010). – DOI: 10.59161/JCGM100-2008E.
10. Kreissl J., Gehlhoff W. EPR investigation of manganese–boron pairs in silicon // physica status solidi (b). – 1982. – Vol. 112. – P. 695. – DOI: 10.1002/pssb.2221120241.
11. Kreissl J., Irmscher K., Gehlhoff W., Omling P., Emanuelsson P. Electron-paramagnetic-resonance identification of the manganese-gallium pair in silicon // Physical Review B. – 1991. – Vol. 44, No. 8. – P. 3678. – DOI: 10.1103/PhysRevB.44.3678.
12. Nakashima H., Hashimoto K. Deep impurity levels and diffusion coefficient of manganese in silicon // Journal of Applied Physics. – 1991. – Vol. 69, No. 3. – P. 1440. – DOI: 10.1063/1.347285.
13. Olikh O.Ya. Reversible influence of ultrasound on γ-irradiated Mo/n-Si Schottky barrier structure // Ultrasonics. – 2015. – Vol. 56. – P. 545. – DOI: 10.1016/j.ultras.2014.10.008.
14. Olikh O.Ya., Kostylyov V., Vlasiuk V., Korkishko R., Chupryna R. Intensification of iron–boron complex association in silicon solar cells under acoustic wave action // Journal of Materials Science: Materials in Electronics. – 2022. – Vol. 33, No. 16. – P. 13133. – DOI: 10.1007/s10854-022-08252-3.
15. Pappas D.P., Halloran S.T., Owings R.R., da Silva F.C.S. Development of a thin film magnetic moment reference material // Journal of Research of the National

Institute of Standards and Technology. – 2008. – Vol. 113, No. 1. – P. 1. – DOI: 10.6028/jres.113.002.

16. Roth T., Rosenits P., Diez S., Glunz S.W., Macdonald D., Beljakowa S., Pensl G. Electronic properties and dopant pairing behavior of manganese in boron-doped silicon // Journal of Applied Physics. – 2007. – Vol. 102. – Art. 103716.

17. Savkina R.K., Smirnov A.B., Tetyorkin V.V., Krolevec N.M. Ultrasonically stimulated temperature rise around dislocation: extended defect mapping and imaging // The European Physical Journal – Applied Physics. – 2004. – Vol. 27. – P. 375.

18. Sawicki M., Stefanowicz W., Ney A. Sensitive SQUID magnetometry for studying nanomagnetism // Semiconductor Science and Technology. – 2011. – Vol. 26, No. 6. – Art. 064006. – DOI: 10.1088/0268-1242/26/6/064006.

19. Senk D., Borchardt G. Solubility and diffusivity of manganese in silicon at high temperatures // Mikrochimica Acta. – 1983. – Vol. 80, No. 5. – P. 477. – DOI: 10.1007/BF01202026.

20. Weast R.C. (ed.) CRC Handbook of Chemistry and Physics. – Boca Raton: Chemical Rubber Company Publishing, 1984. – P. E110. – ISBN 0-8493-0464-4.

21. Zikrillaev N.F., Abdurakhmanov B.A., Kushiev G.A., Kazakov T.O. Investigation of the influence of diffusion doping conditions on the magnetic ordering of silicon doped with Mn and Ge // Fotonika va energetika muammolari va rivojlanish istiqbollari: Respublika ilmiy-amaliy anjumani materiallari. – Urganch: UrDU, 2026. – P. 129. – (In Russian).

22. Žutić I., Fabian J., Das Sarma S. Spintronics: Fundamentals and applications // Reviews of Modern Physics. – 2004. – Vol. 76. – P. 323.



NEFT VA NEFT MAHSULOTLARI SATHINI LAZERLI SATH O‘LCHAGICH BILAN O‘LCHASHLARNI BAJARISH USLUBIYOTINI ISHLAB CHIQISH



Саидорипов Лазизбек Фурқатжонович
O‘zbekiston Respublikasi Vazirlar Mahkamasi huzuridagi
O‘zbekiston texnik jihatdan tartibga solish agentligi direktorining birinchi o‘rinbosari

E-mail: saidoripov@standart.uz

Annotatsiya. Maqolada neft va neft mahsulotlari sathini lazerli sath o‘lchagich bilan o‘lchashlarni bajarish uslubiyoti ishlab chiqilgan va uni takomillashtirish natijalari keltirilgan. Uslubiyot o‘lchash tenglamasi, qabul traktining G·Kgeom energetik mezoni bo‘yicha o‘lchash kanalini tanlash, gaz fazasidagi uglevodorod bug‘larining refraktsion ta’sirini tayanch reper yordamida kompensatsiyalash hamda natijaga matematik-statistik ishlov berishni o‘z ichiga oladi. Etalonga bog‘langan stendda 3400 ta kuzatish bo‘yicha o‘tkazilgan tajribada lazer-televizion o‘lchagichning 0–185 mm diapazonda darajalash nuqtalaridagi keltirilgan sistematik xatoligi 0,13 % ni tashkil etdi. Noaniqlik GUM va Monte-Karlo usullari bo‘yicha baholandi: U = 1,02 mm (k = 2). Sirtni akustik qo‘zg‘atish shaffof suyuqliklar uchun ekvivalent qaytarish koeffitsiyentini 4,9–6,7 marta oshirdi.

Kalit so'zlar: lazerli sath o'lchagich, neft mahsulotlari, o'lchashlarni bajarish uslubiyoti, qaytarish koeffitsiyenti, darajalash tavsifi, o'lchash noaniqligi, GUM, Monte-Karlo usuli.

Аннотация. Разработана и усовершенствована методика выполнения измерений уровня нефти и нефтепродуктов лазерным уровнемером: выбор канала по критерию G·Kгеом, компенсация рефракции паров углеводородов, двухступенчатая градуировка. По 3400 наблюдениям приведённая погрешность в диапазоне 0–185 мм составила 0,13 %, расширенная неопределённость – 1,02 мм (k = 2).

Ключевые слова: лазерный уровнемер, нефтепродукты, методика выполнения измерений, неопределённость измерений, градуировка.

Abstract. A measurement procedure for the level of crude oil and petroleum products with a laser level gauge is developed and improved: channel selection by the G·Kgeom criterion, compensation of hydrocarbon-vapour refraction, and two-stage calibration. From 3400 observations, the reduced error over 0–185 mm was 0.13 % and the expanded uncertainty was 1.02 mm (k = 2).

Keywords: laser level gauge, petroleum products, measurement procedure, measurement uncertainty, calibration.

Kirish. Rezervuarlardagi neft va neft mahsulotlarini tovar hisobiga olishning aniqligi sathni o'lchash vositalarining metrologik tavsiflari bilan belgilanadi. OIML R 85 [1], ISO 4266-1 [2] va API MPMS 3.1B [3] hujjatlarida avtomatik sath o'lchagichning yo'l qo'yiladigan eng katta xatoligi asbobning o'zi uchun ±1 mm, rezervuarga o'rnatilgan holatda ±4 mm etib me'yorlangan. Vertikal tsilindrik rezervuarda sath xatoligi ΔH hajmiy xatolikka quyidagicha o'tadi:

$$\Delta V = \frac{\pi D^2}{4} \Delta H, \qquad (1)$$

bu yerda D – rezervuar diametri. D = 10 m da 1 mm sath xatoligi 0,0785 m³ hajmiy xatolikka teng. Shu sababli GOST 8.595-2004 [4] bo'yicha o'lchash uslubiyotining o'zi ham metrologik asoslanishi kerak.

Radarli sath o'lchagichlar aniq, biroq qimmat va dielektrik singdiruvchanligi past mahsulotlarda ularning signali zaiflashadi [5]. Lazerli masofa o'lchash usullari arzon va kontaktsiz, lekin diffuz qaytaruvchi qattiq nishonlar uchun ishlab chiqilgan [6–8]. Suv sirtida lazerli o'lchash noaniqligi sirt holatiga kuchli bog'liq ekani tajribada qayd etilgan [9]. Sirt tebranishini akustik qo'zg'atish g'oyasi [10] da taklif qilingan, lekin uning metrologik bahosi berilmagan. Respublikamizda lazerli masofa o'lchagich bilan hajm va massani o'lchash [11] hamda sath o'lchash usullarini tasniflash [12] bo'yicha ishlar bajarilgan. Shunga qaramay, neft mahsulotlari uchun lazerli sath o'lchagich bilan o'lchashlarni bajarish uslubiyoti – o'lchash shartlari, kanalini tanlash, tuzatishlar, natijaga ishlov berish va noaniqlikni baholash tartibi – tizimli ishlab chiqilmagan.

Neft mahsulotlarining optik xususiyatlari bir xil emasligi sababli yagona lazerli o'lchash kanali barcha suyuqliklar uchun birdek barqaror natija bermaydi. Shaffof mahsulotlarda qaytgan signal-

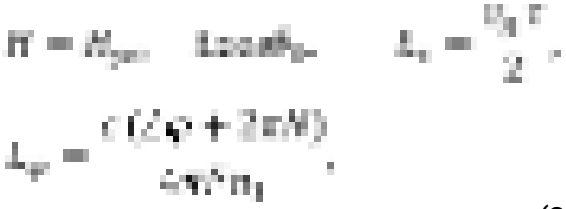
ning qabul qilish aperturasiga tushishi, gaz fazasidagi uglevodorod bug‘larining nur tarqalishiga ta’siri va o‘lchash kallagining geometrik og‘ishi hisobga olinishi lozim. Shu nuqtai nazardan, lazerli sath o‘lchashning faqat asbobiy yechimi emas, balki kanal tanlash mezoni, tuzatishlarni kiritish, darajalash hamda statistik-metrologik baholashni yagona tartibda birlashtiruvchi o‘lchash uslubiyoti muhim ahamiyat kasb etadi [13–18].

O‘lchash natijalarining ishonchliligini ta’minlash uchun takroriy kuzatishlar sonini asoslash, tasodifiy va sistematik xatoliklarni ajratish, darajalash modeli qoldiqlarini tekshirish hamda noaniqlik byudjetini shakllantirish zarur. Bu vazifalarni bajarishda ko‘p martalik o‘lchash natijalarini statistik qayta ishlash qoidalari [19–24] va o‘lchash noaniqligini baholash bo‘yicha GUM hamda Monte-Karlo yondashuvlari [25, 26] uslubiy asos bo‘lib xizmat qiladi. Shuningdek, laboratoriya stendida aniqlangan metrologik tavsiflarni sanoat rezervuarlaridagi ish sharoitlariga to‘g‘ridan-to‘g‘ri tatbiq etishdan oldin ularning qo‘llanish chegaralarini belgilash talab etiladi.

Maqolaning maqsadi – neft va neft mahsulotlari sathini lazerli sath o‘lchagich bilan o‘lchashlarni bajarish uslubiyotini ishlab chiqish, uni tajribada tekshirish va aniqlikni cheklovchi omillarni bartaraf etish orqali takomillashtirish.

MATERIALLAR VA USULLAR

1. O‘lchash tenglamalari va uslubiyotning nazariy asosi. Vaqt-impulsli va fazaviy kanallarda sath kallakdan sirtgacha bo‘lgan masofa L orqali aniqlanadi:



(2)

bu yerda H_{ust} – o‘lchash modulining o‘rnatilish balandligi; θ_1 – optik o‘qning vertikaldan og‘ishi; $v_g = c/n_g$ – gazdagi guruhiy tezlik; τ – nurning ikki tomonlama tarqalish vaqti; $\Delta\varphi$ – fazalar farqi; F – modulyatsiya chastotasi; N – butun davrlar soni; n_1 – gaz fazasining sinish ko‘rsatkichi.

Lazerli usulni cheklovchi asosiy omil – shaffof mahsulotlar sirtidan qaytish koeffitsiyentining kichikligi. Normal tushishda Frenel formulasiga ko‘ra [13]:



(3)

bunda suv uchun $G_0 \approx 0{,}020$, benzin va kerosin uchun 0,030...0,034, seriyali masofa o‘lchagichlar esa $G \geq 0{,}04$ talab qiladi. Ko‘zgusimon sirtdan qaytgan dasta aperturaga qisman tushgani uchun energetik zahira G va geometrik qabul qilish koeffitsiyenti K_{geom} ko‘paytmasi bilan aniqlanadi:



(4)

bu yerda Φ_0 – nurlanish quvvati; K_{opt} – optik trakt o‘tkazish koeffitsiyenti; α – gaz fazasidagi so‘nish koeffitsiyenti; P_{min} – minimal aniqlanadigan quvvat (ishlab chiqilgan qabul trakti uchun P_{min} = 0,56 μW). (4) dan kanalini tanlash mezoni kelib chiqadi: $G \cdot K_{geom} \geq 6{,}2 \cdot 10^{-3}$ da to‘g‘ridan-to‘g‘ri kanal (dizel, mazut, xom neft), kichik qiymatlarda sirtni 5...10 Hz da qo‘zg‘atuvchi lazer-akustik kanal (benzin, kerosin), qiya sirtda lazer-televizion kanal qo‘llaniladi (1-rasm).

Rezervuar gaz fazasidagi uglevodorod bug‘lari sinish ko‘rsatkichini oshiradi [14]. AP-42 [15] bo‘yicha gaz fazasining o‘rtacha to‘yinishini hisobga olib, masofa xatoligi uchun quyidagi ifoda olindi:



(5)

bu yerda p_v – mahsulotning bug‘ bosimi; p – gaz fazasining bosimi; ΔN_b – bug‘

va havo refraktivliklari farqi; $b_{to'y} \approx 0{,}0252$ $kPa^{-1} \cdot m^{-1}$. L = 10 m da (5) bo'yicha xatolik benzin uchun to'yingan gaz fazasida 4,23 mm, o'rtacha sharoitda 0,42 mm, xom neft uchun 1,35 va 0,27 mm bo'ladi. Bug' kontsentratsiyasi ish rejimiga bog'liq bo'lgani uchun uslubiyotga asbobdan ma'lum L_r masofadagi tayanch reper bo'yicha tuzatish kiritildi [16]:

(6)

(7)

bu yerda $L_{r,o'lch}$ – repergacha o'lchangan masofa; $L_{o'lch}$ – sirtgacha o'lchangan masofa.

Lazer-televizion kanalda sirtga kamera o'qiga parallel to'rtta lazer nuri yo'naltiriladi va sath belgilar tasviri bo'yicha hisoblanadi [17, 18]. Informativ parametr – diagonallar yig'indisi $S = L_{ac} + L_{bd}$ (px):

(8)

(9)

bu yerda Z_0 – nol belgidan kamera proyektsiya markazigacha masofa; a_k – belgilar kvadratining tomoni; f_{px} – piksellardagi fokus masofasi. To'rt belgi bo'yicha sirt tekisligini eng kichik kvadratlar usulida (EKK) tiklash kallak 10° og'ganda yuzaga keladigan 4,26 mm xatolikni bartaraf etadi (sonli modellashtirish).

2. O'lchashlarni bajarish uslubiyoti. Uslubiyotning tuzilmasi 1-rasmda keltirilgan.

1-rasm. Lazerli sath o'lchagich bilan o'lchashlarni bajarish uslubiyotining tuzilmaviy sxemasi



O'lchash shartlari. Optik o'q vertikalligi 0,5° dan yaxshi aniqlikda o'rnatiladi. Kameraning avtoekspozitsiyasi, avtofokusi va oq balansi o'chiriladi, chunki ular tasvir masshtabini o'zgartiradi. Yoritilganlik tebranishi 50 % dan oshmasligi

kerak. Kuzatishlar sirt tinchlangandan keyin (kamida 60 s) boshlanadi, gaz fazasining harorati va bosimi qayd etiladi.

Kuzatishlar soni. Talab etilgan ishonch oralig‘i ε uchun kuzatishlar soni quyidagi ifoda bo‘yicha aniqlanadi [19]:



(10)

Sirt tebranishlari uchun σ = 1,5 mm va ε = 0,3 mm da $n_{min} \approx 98$ chiqadi. Lazer-televizion kanal uchun σ = 3,3 mm va ε = 0,66 mm da ham $n_{min} \approx 98$. Shu sababli har bir o‘lchashda n = 100 ta kuzatish qabul qilindi.

Natijaga ishlov berish tartibi. Har bir seriya uchun o‘rtacha qiymat, o‘rtacha kvadratik og‘ish (O‘KO) va o‘rtachaning O‘KOsi hisoblanadi:

$$\bar{H} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} H_i, \; s = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(H_i - \bar{H})^2},$$

Qo‘pol xatoliklar Grabbs mezoni bo‘yicha chiqarib tashlanadi [20]. Taqsimotning normalligi Shapiro–Uilk mezoni bo‘yicha tekshiriladi [21]. Darajalash nuqtalari bo‘yicha dispersiyalarning bir jinsliligi Koxren mezoni bo‘yicha baholanadi [22]:



(12)

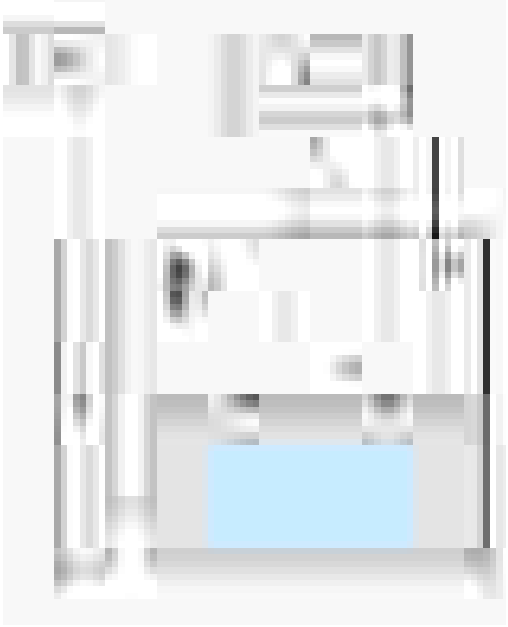
n = 100 va α = 0,05 da $T_{Gr,kr}$ = 3,384. N = 11 nuqta uchun $C_{K,kr}$ = 0,126. Hisoblar DGU 63328 dasturida bajariladi. Natija $H = \bar{H} \pm U$ (k = 2, P ≈ 0,95) ko‘rinishida bayonnomaga yoziladi.

NATIJALAR (RESULTS)

3. Tajriba stendi va tajribalar rejasi

O‘lchashlar uzunlik birligining davlat etaloniga quyidagi zanjir orqali bog‘langan: davlat birlamchi etaloni → 1-razryadli oxirgi o‘lchovlar → «UzTest» DMda darajalangan mikrometrik ko‘tarish mexanizmi (0–250 mm, ±0,05 mm) → sath o‘lchagich namunasi. Lazer-televizion namuna Logitech C270 kamerasi va to‘rtta lazer modulidan iborat (2-rasm); sig‘imning ichki sirti qora mat qoplamali.

2-rasm. Lazer-televizion sath o‘lchagichning sinov stendi



1 – o‘lchash kallagi: kamera + 4 lazer moduli
2 – suyuqlikli sig‘im (ichki sirti qora mat)
3 – mikrometrik ko‘tarish mexanizmi (0–250 mm, ±0.05 mm)
4 – sirtdagi lazer belgilari (A, B, C, D)
5 – harorat va yoritilganlik datchiklari
6 – EHM: LabVIEW, DGU 63328, DGU 54373

Tajribalar rejasi GOST R 8.736-2011 [19] va eksperimentlarni rejalashtirish tamoyillari asosida tuzildi. Reja beshta seriyadan iborat bo‘lib, jami 3400 ta kuzatishni o‘z ichiga oldi: to‘g‘ridan-to‘g‘ri usul (5 ta suyuqlik, 500 kuzatish); lazer-akustik usul (suv va benzin, qo‘zg‘atishsiz va f_a = 10 Hz da, 400 kuzatish); lazer-televizion darajalash (11 nuqta, 1100 kuzatish); mustaqil tekshiruv seriyasi (shu nuqtalar teskari tartibda, 1100 kuzatish); qiyalik sinovi (0° va ±10°, 300 kuzatish).

4. Tajriba natijalariga matematik-statistik ishlov berish

Qaytarish koeffitsiyenti va akustik qo‘zg‘atish. Qaytarish koeffitsiyentlari tayanch nishonga nisbatan ±10 % noaniqlik bilan aniqlandi (1-jadval).

1-jadval. Suyuqliklar uchun o'lchangan qaytarish koeffitsiyentlari va o'lchash xatoliklari (n = 100)

Suyuqlik	G (qo'zg'atishsiz)	Gekv (fa = 10 Hz)	ΔH, mm	O'lchash kanali
Suv (shaffof)	0,030	0,200	±1,0	lazer-akustik
Benzin (shaffof)	0,038	0,185	±1,0	lazer-akustik
Dizel yoqilg'isi	0,052	0,058	±1,0	to'g'ridan-to'g'ri
Mazut	0,060	–	±1,0	to'g'ridan-to'g'ri
Xom neft (to'q rangli)	0,055	–	±1,0	to'g'ridan-to'g'ri

Akustik qo'zg'atish ekvivalent koeffitsiyentni suv uchun 6,7 ± 1,1 marta, benzin uchun 4,9 ± 0,8 marta (k = 2) oshirdi va uni 0,04 bo'sag'asidan yuqoriga ko'tardi. Natijada shaffof mahsulotlar ±1,0 mm xatolik bilan o'lchandi; sirt ±10° og'ganda xatolik ±2,5 mm gacha ortdi, N = 100 oynali o'rtachalash uni ±1,5 mm gacha kamaytirdi.

Lazer-televizion o'lchagichni darajalash natijalari 2-jadvalda keltirilgan.

2-jadval. Lazer-televizion sath o'lchagichni darajalash va tekshirish natijalari (e_i – kvadratik model qoldig'i; ΔH_i – tekshiruv seriyasidagi chetlanish)

H, mm	0	20	40	60	80	100	120	140	160	170	185
S, px	987,6	1054,2	1135,7	1213,4	1293,4	1392,5	1492,2	1623,2	1730,9	1817,1	1932,6
ei, mm	−0,88	0,73	−0,64	0,15	1,54	0,15	0,48	−2,54	0,93	−0,73	0,82
ΔHi, mm	0,00	0,18	0,21	0,19	0,22	0,20	0,24	0,21	0,18	0,20	0,22
ΔHi−0,205	–	−0,025	0,005	−0,015	0,015	−0,005	0,035	0,005	−0,025	−0,005	0,015

2-jadval ma'lumotlari bo'yicha uchta model EKK bilan baholandi: chiziqli model, (8) ga mos giperbolik model va kvadratik model:

$$H = a_0 + a_1 S + a_2 S^2, \qquad (13)$$

$$a = (X^T X)^{-1} X^T H, \quad \varepsilon_i = H_i - \hat{H}_i, \quad s_q^2 = \frac{\sum \varepsilon_i^2}{n-3},$$

bu yerda X – reja matritsasi; C – koeffitsiyentlar kovariatsiya matritsasi; s_q – qoldiq O'KO. Modellarning sifati determinatsiya koeffitsiyenti, Fisher mezoni va Styudent mezoni bo'yicha baholandi [23]:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (H_i - \hat{H}_i)^2}{\sum (H_i - \bar{H})^2}, \quad t_j = \frac{b_j}{s_q \sqrt{C_{jj}}},$$

$$F = \frac{R^2 / (m-1)}{(1-R^2)/(n-m)}, \quad \text{LOO-RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} \left(H_i - \hat{H}_{(-i)}\right)^2}, \qquad (14)$$

Natijalar 3-jadval va 3-rasmda keltirilgan (LOO-RMSE – «bittasini chiqarib tashlash» kross-validatsiyasi xatoligi).

3-jadval. Darajalash modellarining regression tahlili (N = 11)

Model	Koeffitsiyentlar ± standart xatolik	R^2	RMSE, mm	emax, mm	LOO-RMSE, mm	F
Chiziqli	b0 = −180,5 ± 11,7; b1 = 0,1953 ± 0,0080	0,98503	7,35	12,34	9,60	592
Giperbolik (8)	Z0 = 374,9 ± 6,1; kS = (3,769 ± 0,081)·105	0,99588	3,85	6,77	5,11	2177
Kvadratik (13)	a0 = −369,0 ± 10,1; a1 = 0,4668 ± 0,0144; a2 = (−9,34 ± 0,49)·10−5	0,99967	1,08	2,54	1,53	1,23·104

3-rasm. Lazer-televizion sath o‘lchagichning darajalash tavsifi (a), uch model qoldiqlari (b) va noaniqlikning Monte-Karlo usuli bo‘yicha taqsimoti (v)



Chiziqli model $R^2 < 0{,}99$ mezonini qanoatlantirmaydi, qoldiqlari parabolik – bu (8) dagi giperbolik bog‘lanish belgisi. Giperbolik model parametrlari nazariy $Z_0 = 376{,}1$ mm va $k_S = 3{,}785 \cdot 10^5$ px·mm bilan 0,3–0,4 % doirasida mos keldi, lekin qoldiqlari tizimli (±6,8 mm). Kvadratik modelda koeffitsiyentlarning Styudent statistikalari $(-36{,}6;\ 32{,}5;\ -19{,}0)$ $t_{0{,}975}(8) = 2{,}306$ dan o‘nlab marta katta. Shuningdek, $F = 1{,}23 \cdot 10^4 \gg F_{0{,}95}(2;\ 8) = 4{,}46$. Qoldiqlar normal taqsimotga zid emas (Shapiro–Uilk: $W = 0{,}926$; $p = 0{,}37$), avtokorrelyatsiya yo‘q (Darbin–Uotson: $d = 2{,}75$ [24]). Kross-validatsiyada RMSE 1,53 mm gacha ortdi, ya’ni model ortiqcha moslashtirilmagan.

Kvadratik modelning eng katta qoldig‘i (2,54 mm) 0,2 % (0,37 mm) chegarasidan katta; bu tugunlarga xos deterministik chetlanishlar (dog‘ shakli, spekl, mahalliy distorsiya). Shu sababli ishchi darajalash tavsifi ikki bosqichli qilib shakllantirildi: kvadratik model va har bir tugundagi e_i qoldiq bo‘yicha tuzatish jadvali.

Mustaqil tekshiruv seriyasini tahlil qilish. Tuzatilgan tavsifdan chetlanishlar 0,18...0,24 mm (10 nuqta), o‘rtachasi 0,205 mm, O‘KOsi $s_\Delta = 0{,}019$ mm. Grabbs mezoni bo‘yicha qo‘pol chetlanish yo‘q: $T_{Gr} = 1{,}84 < T_{Gr,kr}(10;\ 0{,}05) = 2{,}29$. O‘rtachaning noldan farqi Styudent mezoni bo‘yicha tekshirildi:



(15)

Demak, chetlanishlar tasodifiy emas: bu nol belgining 0,205 mm lik sistematik siljishidir. Siljish tuzatilgandan keyin qoldiqlar ±0,035 mm dan oshmadi (2-jadval). Tuzatishsiz holatda keltirilgan sis-



(16)

Shu sababli har bir tsiklda nol belgini tayanch sath bo‘yicha tuzatish uslubiyotga majburiy amal sifatida kiritildi.

5. O‘lchash noaniqligini baholash

Noaniqlik JCGM 100:2008 (GUM) bo‘yicha baholandi [25]. O‘lchash modeli $H = f(x_1, \ldots, x_m)$ uchun birlashgan va kengaytirilgan noaniqlik quyidagicha hisoblanadi:



(17)

B tip tashkil etuvchilar uchun ±a chegarali to‘g‘ri burchakli taqsimot qabul qilindi: u = a/√3. Lazer-televizion o‘lchagichning eng noqulay nuqtadagi (H = 0) byudjeti 4-jadvalda keltirilgan.

MUHOKAMA (DISCUSSION)

4-jadval

Lazer-televizion sath o‘lchagichning noaniqlik byudjeti (H = 0)

Noaniqlik manbai	Tip	Taqsimot	Chegara yoki s, mm	ui, mm	Ulush, %
Takrorlanuvchanlik (n = 100)	A	normal	3,30	0,330	41,8
Televizion kanal (belgi markazi)	B	to‘g‘ri burchakli	0,50	0,289	32,0
Uslubiy (model) noaniqlik	B	to‘g‘ri burchakli	0,30	0,173	11,5
Distorsiya korrektsiyasining qoldig‘i	B	to‘g‘ri burchakli	0,20	0,115	5,1
Harorat ta’siri (ΔT = 20 °C)	B	to‘g‘ri burchakli	0,20	0,115	5,1
Darajalash tavsifining qoldig‘i	B	normal	0,10	0,100	3,8
Namunaviy o‘lchov (mikrometrik mexanizm)	B	to‘g‘ri burchakli	0,05	0,029	0,3
ARO‘ kvantlashi	B	to‘g‘ri burchakli	0,05	0,029	0,3
Birlashgan standart noaniqlik u_c				0,510	100
Kengaytirilgan noaniqlik U (k = 2)				1,02	

To‘g‘ri burchakli tashkil etuvchilar ulushi katta bo‘lgani uchun natija JCGM 101:2008 [26] bo‘yicha Monte-Karlo usuli bilan tekshirildi (M = $2 \cdot 10^5$): O‘KO 0,510 mm, 95 % qamrov oralig‘i [−0,990; 0,993] mm chiqdi (3-v rasm). Bu GUM bo‘yicha U = 1,02 mm bilan 3 % doirasida mos keladi, demak k = 2 va normal yaqinlashuv asosli.

Lazer-akustik kanal byudjeti ikki variantda tuzildi: masofa o‘lchagich noaniqligi I variantda pasport bo‘yicha ±1,5 mm, II variantda stendda darajalangandan keyin ±0,5 mm deb olindi. I variantda birlamchi o‘zgartkich dispersiyaning 87,6 % ini tashkil etadi va U = 1,85 mm chiqadi. II variantda U = 0,90 mm (2,06 marta kichik). k = 2 Uelch–Sattertueyt formulasi bo‘yicha tekshirildi [25]:



II variantda $v_{ef} \approx 490$, $t_{0,975}(490) = 1,965$, ya’ni k = 2 dan farq 2 % dan kam. Byudjetni teskari qo‘llab 1 mm aniqlik uchun talablar olindi: δτ ≤ 6,7 ps; 100 MHz da δ(Δφ) ≤ 4,2 mrad.

6. Uslubiyotni takomillashtirish natijalari

An’anaviy yondashuvda (to‘g‘ridan-to‘g‘ri o‘lchash, chiziqli tavsif) va takomillashtirilgan uslubiyotdagi natijalar 5-jadvalda taqqoslangan.

5-jadval. O‘lchashlarni bajarish uslubiyotini takomillashtirish samarasi

Aniqlikni cheklovchi omil	An’anaviy uslubiyot	Takomillashtirilgan uslubiyot	Asos
Tavsif nochiziqliligi	chiziqli: e_{max} = 12,34 mm	kvadratik + tugun jadvali: ±0,035 mm	tajriba
Nol belgi siljishi	0,205 mm sistematik (t = 34,1)	har tsiklda tayanch sath bo‘yicha tuzatish	tajriba
Shaffof mahsulot (G < 0,04)	o‘lchab bo‘lmaydi	akustik qo‘zg‘atish: ±1,0 mm	tajriba

Aniqlikni cheklovchi omil	An’anaviy uslubiyot	Takomillashtirilgan uslubiyot	Asos
Birlamchi o‘zgartkich	pasport bo‘yicha: U = 1,85 mm	stendda darajalash: U = 0,90 mm	GUM hisobi
Bug‘lar (benzin, 10 m)	0,42…4,23 mm	tayanch reper, (6)–(7)	hisob
Qiyalik (10°)	4,26 mm	to‘rt belgi bo‘yicha tekislik	sonli model

Uslubiyot asosida kalibrlash (KU 81-2026) va qiyoslash (QU 06.345:2026) uslubiyotlari tayyorlanib, «O‘zbekiston milliy metrologiya instituti» DM tomonidan tasdiqlangan [29, 30]; statistik ishlov berish DGU 63328 [27], namunaviy o‘lchov bilan taqqoslash esa DGU 54373 [28] dasturida bajariladi.

Natijalarning qo‘llanish sohasi. Tajriba natijalari 0–185 mm diapazon uchun, bug‘siz sharoitda olingan; bug‘ ta’siri va sanoat rezervuarlariga masshtablash hisobiy baholangan. Byudjetdagi s = 3,3 mm konservativ bahodir, chunki tekshiruv seriyasidagi tarqoqlik (s_{Δ} = 0,019 mm) undan ancha kichik.

Xulosa

1. Neft va neft mahsulotlari sathini lazerli sath o‘lchagich bilan o‘lchashlarni bajarish uslubiyoti ishlab chiqildi. U o‘lchash tenglamalarini, $G \cdot K_{geom}$ mezoni bo‘yicha kanalini tanlashni, kuzatishlar sonini asoslashni, natijaga matematik-statistik ishlov berishni va noaniqlikni GUM bo‘yicha baholashni o‘z ichiga oladi.
2. Uslubiyot bug‘ refraktsiyasi (L = 10 m da 0,42…4,23 mm) va nol belgi siljishi bo‘yicha tuzatishlar hamda ikki bosqichli darajalash tavsifi kiritilishi bilan takomillashtirildi.
3. 3400 kuzatish bo‘yicha o‘tkazilgan tajribada darajalash tavsifi kvadratik model bilan tasvirlandi (R^2 = 0,99967). Tekshiruv seriyasidagi qoldiqlar ±0,035 mm dan oshmadi, keltirilgan sistematik xatolik 0,13 % ni tashkil etdi. Kengaytirilgan noaniqlik U = 1,02 mm (k = 2) Monte-Karlo usuli bilan tasdiqlandi.
4. Akustik qo‘zg‘atish shaffof suyuqliklarning ekvivalent qaytarish koeffitsiyentini 4,9–6,7 marta oshirdi va ularni ±1,0 mm xatolik bilan o‘lchash imkonini berdi. Natijalarni 2 m balandlikdagi stendda va haqiqiy gaz fazasi sharoitida tasdiqlash tadqiqotning keyingi bosqichidir.

Adabiyotlar ro‘yxati

1. OIML R 85-1&2:2008. Automatic level gauges for measuring the level of liquid in stationary storage tanks. Part 1: Metrological and technical requirements. Part 2: Metrological controls and performance tests. – Paris : OIML, 2008.

2. ISO 4266-1:2002. Petroleum and liquid petroleum products — Measurement of level and temperature in storage tanks by automatic methods — Part 1: Measurement of level in atmospheric tanks. – Geneva : ISO, 2002.

3. API MPMS Chapter 3.1B. Standard Practice for Level Measurement of Liquid Hydrocarbons in Stationary Tanks by Automatic Tank Gauging. – 2nd ed. – Washington : American Petroleum Institute, 2001.

4. ГОСТ 8.595-2004. ГСИ. Масса нефти и нефтепродуктов. Общие требования к методикам выполнения измерений. – Москва : Стандартинформ, 2005.

5. Vogt, M. Radar sensors (24 and 80 GHz range) for level measurement in industrial processes / M. Vogt // 2018 IEEE MTT-S International Conference on Microwaves for Intelligent Mobility (ICMIM). – 2018. – P. 1–4. – DOI: 10.1109/ICMIM.2018.8443505.

6. Amann, M.-C. Laser ranging: a critical review of usual techniques for distance measurement / M.-C. Amann, T. Bosch, M. Lescure, R. Myllylä, M. Rioux // Optical Engineering. – 2001. – Vol. 40, no. 1. – P. 10–19.

7. Berkovic, G. Optical methods for distance and displacement measurements / G. Berkovic, E. Shafir // Advances in Optics and Photonics. – 2012. – Vol. 4, no. 4. – P. 441–471.

8. Blais, F. Review of 20 years of range sensor development / F. Blais // Journal of Electronic Imaging. – 2004. – Vol. 13, no. 1. – P. 231–240. – DOI: 10.1117/1.1631921.

9. Fulford, J. M. Laser water-level measurement uncertainty / J. M. Fulford, J. A. González-Castro // Proceedings of the 33rd IAHR World Congress. – Vancouver, 2009.

10. Лазерно-акустический уровнемер : патент на полезную модель RU 135121 / Б. В. Скворцов, Д. И. Блинов, С. А. Борминский, А. Н. Малышева-Стройкова ; СГАУ им. С. П. Королёва. – Опубл. 27.11.2013.

11. Yusupbekov, N. R. Improving the accuracy of measuring the volume and mass of liquid product in horizontal cylindrical tanks / N. R. Yusupbekov, A. A. Yusupov, B. A. Boronov // Chemical Technology, Control and Management. – 2021. – No. 2 (98). – P. 33–40. – DOI: 10.51346/tstu-02.21.1-77-0005.

12. Матякубова, П. М. Классификация методов измерения и контроля уровня жидких сред / П. М. Матякубова, Л. Ф. Саидорипов, Х. Д. Муминов, М. Маҳмуджонов // Инновации в нефтегазовой отрасли. – 2025. – Т. 6, № 3. – С. 32–39. – DOI: 10.5281/zenodo.18612549.

13. Born, M. Principles of Optics / M. Born, E. Wolf. – 7th expanded ed. – Cambridge : Cambridge University Press, 1999. – 952 p.

14. Ciddor, P. E. Refractive index of air: new equations for the visible and near infrared / P. E. Ciddor // Applied Optics. – 1996. – Vol. 35, no. 9. – P. 1566–1573.

15. U.S. EPA. AP-42: Compilation of Air Pollutant Emission Factors. – 5th ed. – Vol. I, Chapter 7: Liquid Storage Tanks, Section 7.1: Organic Liquid Storage Tanks. – Research Triangle Park : U.S. EPA, 2020.

16. Rüeger, J. M. Electronic Distance Measurement: An Introduction / J. M. Rüeger. – 4th ed. – Berlin : Springer, 1996.

17. Zhang, Z. A flexible new technique for camera calibration / Z. Zhang // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 2000. – Vol. 22, no. 11. – P. 1330–1334.

18. Brown, D. C. Decentering distortion of lenses / D. C. Brown // Photogrammetric Engineering. – 1966. – Vol. 32, no. 3. – P. 444–462.

19. ГОСТ Р 8.736-2011. ГСИ. Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения. – Москва : Стандартинформ, 2013.

20. Grubbs, F. E. Procedures for detecting outlying observations in samples / F. E. Grubbs // Technometrics. – 1969. – Vol. 11, no. 1. – P. 1–21.

21. Shapiro, S. S. An analysis of variance test for normality (complete samples) / S. S. Shapiro, M. B. Wilk // Biometrika. – 1965. – Vol. 52, no. 3–4. – P. 591–611.

22. Cochran, W. G. The distribution of the largest of a set of estimated variances as a fraction of their total / W. G. Cochran // Annals of Eugenics. – 1941. – Vol. 11, no. 1. – P. 47–52.

23. Draper, N. R. Applied Regression Analysis / N. R. Draper, H. Smith. – 3rd ed. – New York : Wiley, 1998. – 736 p.

24. Durbin, J. Testing for serial correlation in least squares regression. II / J. Durbin, G. S. Watson // Biometrika. – 1951. – Vol. 38, no. 1–2. – P. 159–178.

25. JCGM 100:2008. Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM). – Sèvres : BIPM, 2008.

26. JCGM 101:2008. Evaluation of measurement data — Supplement 1 to the GUM — Propagation of distributions using a Monte Carlo method. – Sèvres : BIPM, 2008.

27. Rezervuardagi suyuqlik sathini nazorat qilish va o‘lchash natijalarini statistik tahlil etish dasturiy ta’minoti : EHM dasturi guvohnomasi № DGU 63328 / P. M. Matyakubova, X. D. Mo‘minov, M. M. Mahmudjonov, L. F. Saidoripov. – O‘zR Adliya vazirligi, 30.04.2026.

28. Sath o‘lchagichlarni zamonaviy usullar yordamida qiyoslash : EHM dasturi guvohnomasi № DGU 54373 / P. M. Matyakubova, A. R. Jumanazarov, L. F. Saidoripov, X. D. Mo‘minov. – O‘zR Adliya vazirligi, 29.08.2025.

29. KU 81-2026. Rezervuarlardagi neft va neft mahsulotlari sathi. Lazerli sath o‘lchagichlar. Kalibrlash uslubiyoti. – Toshkent : «O‘zbekiston milliy metrologiya instituti» DM, 2026.

30. QU 06.345:2026. Rezervuarlardagi neft va neft mahsulotlari sathi. Lazerli sath o‘lchagichlar. Qiyoslash uslubiyoti. – Toshkent : «O‘zbekiston milliy metrologiya instituti» DM, 2026.