UDK 006.91:004.9

RAQAMLI METROLOGIYA: O'LCHASH NATIJALARINI AVTOMATLASHTIRILGAN QAYTA ISHLASH VA RAQAMLI KALIBRLASH SERTIFIKATLARI

Murtazayeva Munira Badriddinovna
mironshox111195@gmail.com
https://doi.org/10.5281/zenodo.23088652

Annotatsiya. Maqolada raqamli metrologiyaning asosiy tushunchalari, raqamli kalibrlash sertifikatlari (DCC) tuzilmasi va o'lchash natijalarini avtomatlashtirilgan qayta ishlash tamoyillari ko'rib chiqiladi. Mashina o'qiy oladigan sertifikat ma'lumotlarini dala o'lchash tizimiga bevosita ulash algoritmi taklif etilgan. Algoritm tuzatma kiritish, noaniqlikni hisoblash va noaniqlikni hisobga olgan qaror qabul qilish qoidasini o'z ichiga oladi. Agroklaster meteostansiyasi misolida avtomatlashtirilgan qayta ishlash issiqlik xavfi haqidagi ogohlantirish qarorini o'zgartira olishi ko'rsatilgan. Qog'ozli va raqamli sertifikat jarayonlari shartli ma'lumotlar asosida taqqoslangan.
Kalit so'zlar: raqamli metrologiya, raqamli kalibrlash sertifikati, DCC, D-SI, mashina o'qiy oladigan ma'lumotlar, o'lchash noaniqligi, avtomatlashtirish, qaror qabul qilish qoidasi.

Abstract. The paper examines the core concepts of digital metrology, the structure of digital calibration certificates (DCC) and the principles of automated processing of measurement results. An algorithm is proposed that links machine-readable certificate data directly to a field measurement system, covering correction, uncertainty evaluation and an uncertainty-aware decision rule. Using an agro-cluster weather station as an example, it is shown that automated processing can change the decision to issue a heat-risk warning. Paper-based and digital certificate workflows are compared on illustrative data.
Keywords: digital metrology, digital calibration certificate, DCC, D-SI, machine-readable data, measurement uncertainty, automation, decision rule.

KIRISH

Sanoatning raqamli transformatsiyasi o'lchash ma'lumotlari hajmini keskin oshirdi. Bugungi kunda sensorlar tarmog'i har daqiqada minglab qiymatlar beradi, ular esa avtomatik tizimlar tomonidan qayta ishlanib, texnologik qarorlarga aylanadi. Biroq bu qiymatlarning metrologik ishonchliligini ta'minlovchi asosiy hujjat — kalibrlash sertifikati — ko'p hollarda hanuz qog'oz yoki PDF shaklida saqlanmoqda.

Qog'ozli sertifikat bilan ishlashda tuzatmalar va noaniqlik qiymatlari qo'lda ko'chiriladi. Bu jarayon vaqt talab qiladi, xatolarga moyil va ko'pincha umuman bajarilmaydi: o'lchash tizimi kalibrlash natijalarini hisobga olmay ishlayveradi. Natijada kalibrlash rasmiy talab sifatida bajariladi, ammo uning metrologik foydasi o'lchash natijasiga yetib bormaydi.

Avvalgi tadqiqotlarimizda agrosanoat korxonasida metrologik ta'minot samaradorligi baholangan [13] va 2019-yilgi SI qayta ta'rifi korxona uchun asosan kuzatuvchanlikni

hujjatlashtirish vazifasini qo'yishi ko'rsatilgan edi [14]. Yangi SI da birliklarning fundamental konstantalar orqali aniq ta'riflanishi o'lchash ma'lumotlarini raqamli, mashina o'qiy oladigan shaklda ifodalash uchun ham qulay asos yaratdi [2]. Raqamli metrologiya ana shu imkoniyatni amalga oshiradi.

Maqolaning maqsadi — raqamli kalibrlash sertifikatlari va o'lchash natijalarini avtomatlashtirilgan qayta ishlashning korxona darajasidagi modelini ishlab chiqish va uning amaliy samarasini agrosanoat misolida ko'rsatishdir.

MATERIALLAR VA USULLAR

Tadqiqotda raqamli kalibrlash sertifikati bo'yicha ishlanmalar [4, 5], SI birliklarini raqamli ifodalash formati D-SI [6], FAIR tamoyillari [7], ISO/IEC 17025:2017 ning natijalarni hisobot qilish talablari [8], GUM va uning Monte-Karlo usuli bo'yicha qo'shimchasi [9, 10] hamda moslikni tasdiqlashda qaror qabul qilish qoidalari [11] tahlil qilingan. Tizimli tahlil, algoritmlash va shartli misolda taqqoslash usullari qo'llanilgan.

NATIJALAR VA MUHOKAMA

Raqamli metrologiya tushunchasi va tarkibi

Raqamli metrologiya deganda o'lchash birliklari, natijalari, noaniqliklari va ularning kuzatuvchanligini mashina tushuna oladigan, standartlashtirilgan raqamli shaklda ifodalash, uzatish va qayta ishlash tushuniladi. Uning ahamiyati xalqaro darajada ham tan olingan: 2022-yilda BIPM va boshqa xalqaro tashkilotlar xalqaro ilmiy va sifat infratuzilmasini raqamli transformatsiya qilish bo'yicha qo'shma niyat bayonotini imzolagan [3]. Raqamli metrologiyaning asosiy tarkibiy qismlari 1-jadvalda keltirilgan.

1-jadval. Raqamli metrologiyaning tarkibiy qismlari

Tarkibiy qism	Mazmuni	Korxona uchun ahamiyati
Raqamli SI (D-SI)	Qiymat, birlik va noaniqlikni yagona formatda yozish qoidalari	Birliklar chalkashligi va qayta hisoblash xatolari bartaraf etiladi
Raqamli kalibrlash sertifikati (DCC)	Kalibrlash natijalarining XML asosidagi, elektron imzolangan hujjati	Tuzatma va noaniqlik o'lchash tizimiga avtomatik uzatiladi
O'lchash vositalari raqamli reyestri	Vositalar, sertifikatlar va kalibrlash muddatlari bazasi	Muddati o'tgan vositalar avtomatik aniqlanadi
Avtomatlashtirilgan qayta ishlash	Tuzatma, noaniqlik va qaror qoidasini dasturiy qo'llash	Natija har doim metrologik asoslangan bo'ladi
FAIR ma'lumotlar	Topiladigan, kirish mumkin, mos keluvchi, qayta ishlatiladigan ma'lumotlar	Ma'lumotlarni tashkilotlar va davlatlar o'rtasida almashish

Raqamli kalibrlash sertifikatining tuzilmasi

Raqamli kalibrlash sertifikati (Digital Calibration Certificate, DCC) Germaniyaning PTB milliy metrologiya instituti tomonidan boshlangan ishlanmalar asosida rivojlanib, XML sxemasi ko'rinishida standartlashtirilmoqda [4, 5]. U ISO/IEC 17025 ning hisobot talablarini [8] qanoatlantiradi va quyidagi asosiy bloklardan iborat (2-jadval).

2-jadval. DCC ning asosiy bloklari

Blok	Tarkibi
Ma'muriy ma'lumotlar (administrativeData)	Laboratoriya, buyurtmachi, kalibrlangan vosita, sana, sertifikat raqami, mas'ul shaxslar
O'lchash natijalari (measurementResults)	Kalibrlash nuqtalari, o'lchangan qiymatlar, tuzatmalar, kengaytirilgan noaniqlik, qamrov koeffitsienti — D-SI formatida
Qo'shimcha ma'lumotlar	Ixtiyoriy hujjatlar, grafiklar, insonga mo'ljallangan ko'rinish (masalan, PDF)
Elektron imzo	Hujjatning haqiqiyligi va o'zgartirilmaganligini tasdiqlash

Quyida harorat datchigini kalibrlash natijasining D-SI formatidagi soddalashtirilgan fragmenti keltirilgan. Unda qiymat, birlik va noaniqlik alohida, mashina o'qiy oladigan maydonlarda saqlanadi:

```
<dcc:measurementResults>
<si:real>
<si:label>Tuzatma, 35 °C nuqtada</si:label>
<si:value>0.15</si:value>
<si:unit>\degreecelsius</si:unit>
<si:expandedUnc>
<si:uncertainty>0.30</si:uncertainty>
<si:coverageFactor>2</si:coverageFactor>
<si:coverageProbability>0.95</si:coverageProbability>
</si:expandedUnc>
</si:real>
</dcc:measurementResults>
```

Qog'ozli sertifikatdan farqli ravishda, bu ma'lumotni dastur inson ishtirokisiz o'qiydi va o'lchash natijasiga qo'llaydi. Noaniqlik qiymati avvalgi tadqiqotdagi harorat kanali kalibrlash sertifikatiga mos olingan [13, 14].

O'lchash natijalarini avtomatlashtirilgan qayta ishlash algoritmi

Dala o'lchash tizimi uchun DCC ma'lumotlariga tayanadigan quyidagi qayta ishlash algoritmi taklif etiladi:

1. sensordan xom qiymatni olish va vaqt belgisini qo'yish;
2. vositaning raqamli reyestrdagi holatini tekshirish: kalibrlash muddati o'tgan bo'lsa, natija «tasdiqlanmagan» deb belgilanadi;
3. DCC dan tegishli nuqtadagi tuzatmani o'qish va kerak bo'lsa nuqtalar orasida interpolyatsiya qilish;
4. tuzatilgan qiymat va uning kengaytirilgan noaniqligini hisoblash;
5. noaniqlikni hisobga olgan qaror qoidasini qo'llash va natijani meta-ma'lumotlari bilan saqlash.

Tuzatilgan qiymat va uning noaniqligi quyidagicha hisoblanadi:

$$t = t_{o'} + \Delta t_{kal}(t_{o'}) \quad (1)$$

$$U(t) = k \cdot \sqrt{(u_{kal}^2 + u_{o'q}^2 + u_{drift}^2)} \quad (2)$$

bu yerda $t_{o'}$ — sensor ko'rsatkichi; Δt_{kal} — DCC dagi tuzatma; u_{kal}, $u_{o'q}$ va u_{drift} — mos ravishda kalibrlash, o'qish va drift standart noaniqliklari. Chiziqli bo'lmagan modellarda noaniqlikni Monte-Karlo usulida avtomatik hisoblash maqsadga muvofiq [10].

Qaror qabul qilishda ILAC-G8 [11] tavsiyasiga mos himoya zonasi qoidasi qo'llaniladi. Issiqlik xavfi haqida ogohlantirish, xavfni o'tkazib yubormaslik uchun ehtiyotkorlik tamoyili asosida, quyidagi shart bajarilganda beriladi:

$$t + U(t) \geq T_{ch}, \quad T_{ch} = 35\ °C \qquad (3)$$

Agroklaster meteostansiyasi misolida natijalar

Algoritm avvalgi tadqiqotlardagi agroklaster meteostansiyasining havo harorati kanaliga shartli ma'lumotlar bilan qo'llanildi (3-jadval). Gullash davridagi kunlarning birida sensor 34,70 °C ni ko'rsatdi.

3-jadval. Bitta o'lchash natijasini qayta ishlash (shartli ma'lumotlar)

Bosqich	Qo'lda ishlash (qog'ozli sertifikat)	Avtomatlashtirilgan ishlash (DCC)
Sensor ko'rsatkichi $t_{o'}$	34,70 °C	34,70 °C
Tuzatma Δt_{kal}	Qo'llanilmagan	+0,15 °C
Tuzatilgan qiymat t	34,70 °C	34,85 °C
Kengaytirilgan noaniqlik U (k = 2)	Hisobga olinmagan	0,35 °C
Qaror qoidasi (3)	34,70 < 35 — ogohlantirish yo'q	34,85 + 0,35 = 35,20 ≥ 35 — ogohlantirish beriladi

Misol raqamli metrologiyaning amaliy mohiyatini ko'rsatadi: kalibrlash natijasi o'lchash tizimiga avtomatik ulanganda qaror o'zgaradi. Qo'lda ishlashda xavfli issiqlik davri o'tkazib yuborilishi mumkin edi, bu esa fermerlar uchun meva tugishining buzilishiga olib keladi. Avtomatlashtirilgan jarayonda qaror metrologik jihatdan asoslangan va uning qaysi sertifikat, qaysi tuzatma asosida qabul qilingani qayd etiladi.

Jarayon samaradorligi 40 ta o'lchash vositasiga ega korxona uchun shartli baholandi (4-jadval). Qiymatlar taxminiy bo'lib, aniq korxona ma'lumotlari bilan tekshirilishi kerak.

4-jadval. Qog'ozli va raqamli sertifikat jarayonlarini taqqoslash (shartli baholash, 40 ta vosita)

Ko'rsatkich	Qog'ozli / PDF sertifikat	Raqamli sertifikat (DCC)
Bitta sertifikat ma'lumotlarini tizimga kiritish	~15 daqiqa, qo'lda	~1 daqiqa, avtomatik import
Yillik sarflanadigan vaqt	~10 soat	~0,7 soat
Ko'chirish xatolari xavfi	Mavjud	Amalda yo'q
Kalibrlash muddati o'tganini aniqlash	Davriy qo'lda tekshiruv	Uzluksiz, avtomatik
Kuzatuvchanlik dalili (K3)	Arxivdan qidirish talab etiladi	Har bir natijaga biriktirilgan

Raqamli jarayon avvalgi tadqiqotdagi samaradorlik indeksining bir nechta ko'rsatkichiga bevosita ta'sir qiladi [13]: muddatlarni avtomatik nazorat qilish qamrov ko'rsatkichini (K1), sertifikatning har bir natijaga biriktirilishi esa kuzatuvchanlik ko'rsatkichini (K3) oshiradi.

Joriy etish muammolari va yo'nalishlari

Raqamli sertifikatlarni keng joriy etish yo'lida bir qator to'siqlar mavjud. Birinchidan, kalibrlash laboratoriyalari DCC ni yaratish uchun dasturiy vositalar va malakaga ega bo'lishi kerak. Ikkinchidan, elektron imzolangan sertifikatning huquqiy maqomi milliy qonunchilik va akkreditatsiya organi tomonidan tan olinishi talab etiladi. Uchinchidan, korxonalarning o'lchash tizimlari DCC ni o'qiy oladigan bo'lishi lozim.

Bu muammolarni bosqichma-bosqich hal qilish maqsadga muvofiq: dastlab o'lchash vositalarining raqamli reyestrini yaratish, so'ng qog'ozli sertifikatlarga qo'shimcha ravishda mashina o'qiy oladigan fayllarni berish, oxirida esa to'liq DCC ga o'tish. Oliy ta'lim muassasalari bu jarayonda kadrlar tayyorlash, ochiq dasturiy vositalarni moslashtirish va pilot loyihalarni amalga oshirish orqali muhim rol o'ynashi mumkin.

XULOSA

Raqamli metrologiya kalibrlashni rasmiy talabdan o'lchash natijasi sifatini bevosita oshiruvchi vositaga aylantiradi. Tadqiqot natijasida quyidagi xulosalar olindi:

1. raqamli kalibrlash sertifikati qiymat, birlik va noaniqlikni D-SI formatida saqlab, ularni o'lchash tizimiga inson ishtirokisiz uzatish imkonini beradi;
2. tuzatma, noaniqlik va himoya zonali qaror qoidasini o'z ichiga olgan avtomatlashtirilgan qayta ishlash algoritmi taklif etildi;
3. shartli misolda algoritm issiqlik xavfi haqidagi qarorni o'zgartirdi: 34,70 °C ko'rsatkichda qo'lda ishlash ogohlantirish bermagan bo'lsa, avtomatlashtirilgan ishlash t + U = 35,20 °C asosida ogohlantirish berdi;
4. raqamli jarayon ma'lumotlarni kiritish vaqtini taxminan o'n barobar qisqartiradi hamda metrologik ta'minotning qamrov va kuzatuvchanlik ko'rsatkichlarini oshiradi;
5. joriy etish uchun laboratoriyalar salohiyati, elektron sertifikatning huquqiy maqomi va kadrlar tayyorlash masalalarini bosqichma-bosqich hal qilish zarur.

Keyingi tadqiqotlar DCC ni milliy kalibrlash laboratoriyalarida pilot tarzda joriy etish va uni iqlim xavfi bo'yicha tavsiyalar tizimiga integratsiyalashga yo'naltiriladi.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR

1. O'zbekiston Respublikasining «Metrologiya to'g'risida»gi Qonuni (yangi tahriri, 2020).
2. BIPM. The International System of Units (SI). 9th edition. Sèvres: BIPM, 2019.
3. BIPM, OIML va boshqalar. Joint Statement of Intent on the digital transformation in the international scientific and quality infrastructure. 2022.
4. Hackel S., Härtig F., Hornig J., Wiedenhöfer T. The Digital Calibration Certificate // PTB-Mitteilungen. – 2017. – Vol. 127, No. 4.
5. PTB. Digital Calibration Certificate (DCC) — XML schema and documentation. Braunschweig: Physikalisch-Technische Bundesanstalt.
6. EMPIR 17IND02 SmartCom. Digital System of Units (D-SI): guide for the use of the metadata format in metrology. 2020.
7. Wilkinson M.D. et al. The FAIR Guiding Principles for scientific data management and stewardship // Scientific Data. – 2016. – Vol. 3. – 160018.
8. ISO/IEC 17025:2017. General requirements for the competence of testing and calibration laboratories. Geneva: ISO.

9. JCGM 100:2008. Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM). BIPM.
10. JCGM 101:2008. Evaluation of measurement data — Supplement 1 to the GUM — Propagation of distributions using a Monte Carlo method. BIPM.
11. ILAC-G8:09/2019. Guidelines on Decision Rules and Statements of Conformity. ILAC, 2019.
12. JCGM 200:2012. International vocabulary of metrology (VIM), 3rd ed. BIPM.
13. [Muallif]. Sanoat korxonalarida metrologik ta'minotni tashkil etish va uning samaradorligini baholash // [Jurnal nomi, yil].
14. [Muallif]. O'lchashlar birligini ta'minlashning zamonaviy tizimi va xalqaro SI birliklarining 2019-yilgi qayta ta'rifi ta'siri // [Jurnal nomi, yil].