Metrologiya 4.0 sharoitida aqlli o‘lchash vositalari, iot texnologiyalari va raqamli kalibrlashning integratsiyalashgan modeli

R. Ummatov;B. Yo‘ldoshev
QDU,Aniq fanlar va muhandislik fakulteti, Muhandislik texnologiyalari kafedrasi,
E-mail: rustamummatov07@gmail.com

Annotatsiya.
Maqolada Sanoat 4.0 konsepsiyasi doirasida metrologik jarayonlarni raqamlashtirishning metodik asoslari tahlil qilinadi. Aqlli o‘lchash vositalari va buyumlar interneti (IoT) orqali shakllanadigan ma’lumotlar oqimi, o‘lchash natijalarining metama’lumotlari, metrologik kuzatiluvchanlik hamda raqamli kalibrlash sertifikati (DCC) imkoniyatlari tizimli ko‘rib chiqiladi. Laboratoriya o‘lchash vositalarini identifikatsiyalash va rejalashtirilgan kalibrlash muddatlarini nazorat qilish uchun QR-Metrolog reyestriga asoslangan integratsiyalashgan konseptual model taklif etiladi. Ma’lumotlar yaxlitligi, o‘lchash noaniqligi, axborot xavfsizligi va mas’ul mutaxassis qarorining o‘rni ajratib ko‘rsatiladi. Modelni baholash uchun pilot sinov ko‘rsatkichlari tavsiya etiladi.

Kalit so‘zlar: Metrologiya 4.0, aqlli sensor, IoT, raqamli kalibrlash, DCC, metrologik kuzatiluvchanlik, QR-kod.

Аннотация.
В статье рассматриваются методические основы цифровизации метрологических процессов в условиях Индустрии 4.0. Анализируются интеллектуальные средства измерений, потоки данных Интернета вещей (IoT), метрологическая прослеживаемость и цифровые сертификаты калибровки (DCC). Предложена концептуальная модель, объединяющая мониторинг измерений и реестр QR-Metrolog для идентификации приборов и контроля плановых сроков калибровки. Особое внимание уделено неопределённости измерений, целостности данных и разграничению автоматических предупреждений и решений уполномоченного специалиста. Определены показатели для будущей пилотной проверки модели.

Ключевые слова: Метрология 4.0, интеллектуальный датчик, IoT, цифровая калибровка, DCC, прослеживаемость, QR-код.

Abstract.
This paper examines methodological foundations for the digital transformation of metrology in the context of Industry 4.0. It discusses smart measuring instruments, Internet of Things (IoT) data flows, metrological traceability, and digital calibration certificates (DCCs). An integrated conceptual model is proposed, combining measurement monitoring with the QR-Metrolog register for instrument identification and scheduled calibration tracking. Measurement uncertainty, data integrity, information security, and the distinction

between automated alerts and authorized metrological decisions are emphasized. Evaluation indicators are specified for future pilot testing; no unverified experimental performance claims are made.

Keywords: Metrology 4.0, smart sensor, IoT, digital calibration, DCC, metrological traceability, QR code.

Kirish

Sanoat va transport infratuzilmasini modernizatsiya qilish jarayonida o‘lchash natijalarining ishonchliligi mahsulot sifati, texnologik xavfsizlik va resurslardan samarali foydalanishning muhim shartiga aylanmoqda. Sensorlar ma’lumotlarni uzluksiz to‘plashi, masofadan uzatishi va raqamli platformalarda aks ettirishi mumkin. Biroq tarmoqqa ulangan asbobdan olingan ma’lumotning o‘zi hali uning metrologik jihatdan asoslanganligini kafolatlamaydi. Buning uchun asbob identifikatsiyasi, o‘lchov birligi, kalibrlash tarixi, noaniqlik va natijaning kelib chiqishiga oid ma’lumotlar o‘zaro bog‘langan bo‘lishi lozim.

Metrologiya 4.0 tushunchasi aynan shu talablarni raqamli o‘lchash muhitiga tatbiq etishga qaratilgan yondashuvni ifodalaydi; u alohida sertifikatlash standarti emas. 2022-yilda O‘lchov va tarozilar bosh konferensiyasining 27-yig‘ilishida qabul qilingan 2-rezolyutsiya SI birliklari, qiymatlari va noaniqligini mashina qayta ishlay oladigan shaklda ifodalovchi raqamli infratuzilmani rivojlantirish vazifasini ta’kidlagan [1]. Shunday sharoitda IoT texnologiyalari va kalibrlash ma’lumotlarini uyg‘unlashtirish amaliy-metodik ahamiyat kasb etadi.

Tadqiqot maqsadi va metodlari

Tadqiqotning maqsadi aqlli o‘lchash vositalari, IoT axborot almashinuvi, raqamli kalibrlash hujjatlari va QR-kodli inventar reyestrini yagona boshqaruv zanjirida birlashtiruvchi konseptual modelni asoslashdan iborat. Tadqiqotda ilmiy-metodik manbalarni tahlil qilish, funksional dekompozitsiya, ma’lumotlar oqimini modellashtirish hamda shartli o‘quv ssenariylarini taqqoslash usullaridan foydalanildi. Mazkur ish qurilmalar bilan o‘tkazilgan yakuniy tajriba bayonnomasi emas; texnik yechim va keyingi pilot baholash uchun uslubiy asosni ifodalaydi.

Aqlli o‘lchash vositalari va iot ma’lumotlar oqimi

Aqlli o‘lchash vositasi fizik signalni qayd etish bilan bir qatorda natijani raqamli qayta ishlash, vaqt tamg‘asi bilan saqlash, diagnostika va tashqi tizimlarga uzatish funksiyalariga ega bo‘lishi mumkin. Masalan, harorat datchigi me’yordan chetlanish yoki signalning uzilishini kuzatishi mumkin. Lekin displeyda ko‘rsatilgan kasr xonalari soni o‘lchash aniqligi yoki noaniqligini bevosita ifodalamaydi. Diapazon, takrorlanuvchanlik, ekspluatatsiya sharoiti va kalibrlash natijalari birgalikda baholanishi kerak.

Loyiha uchun quyidagi funksional ketma-ketlik taklif etiladi: sensor → signalni qayta ishlash va vaqtni qayd etish → lokal shlyuz → himoyalangan aloqa → ma’lumotlar bazasi → kuzatuv paneli → mas’ul mutaxassis qarori. Shlyuz tarmoq uzilganda yozuvlarni vaqtincha saqlashi va aloqa tiklangach sinxronlashtirishi ko‘zda tutiladi. Natija yozuviga kamida qurilma IDsi, qiymat, SI birligi, vaqt mintaqasi bilan birga vaqt belgisi, qurilmaning kalibrlashga oid havolasi

va ma’lumot manbasi biriktiriladi. Shu tariqa o‘lchash qiymati uning kontekstidan ajralib qolmaydi.

Masalan, o‘quv laboratoriyasi uchun 20–25 °C harorat oralig‘i shartli chegaraviy mezon deb belgilansa, 26 °C qiymat panelda ogohlantirish yuzaga keltirishi mumkin. Ammo bunday xabar avtomatik ravishda materialning yaroqsizligini yoki datchikning sozligini tasdiqlamaydi. Yakuniy baholashda datchikning joylashuvi, noaniqlik, kalibrlash holati va amaldagi texnologik talab hisobga olinadi.

Raqamli kalibrlash, dcc va kuzatiluvchanlik

Metrologik kuzatiluvchanlik o‘lchash natijasini hujjatlashtirilgan, uzilmagan kalibrlashlar zanjiri orqali tegishli etalonga bog‘lash imkoniyatini bildiradi. Har bir bo‘g‘in noaniqlikka hissa qo‘shadi. Shu sababli raqamli monitoring tizimi qiymat bilan birga unga tegishli kalibrlash hujjatini va natijaning noaniqligi haqidagi ma’lumotni ko‘rsatishi zarur. ISO/IEC 17025:2017 sinov va kalibrlash laboratoriyalarining kompetentligi va izchil faoliyatiga doir umumiy talablarni belgilaydi [2].

Digital Calibration Certificate (DCC) - kalibrlash natijalarini faqat ko‘rish uchun mo‘ljallangan hujjat sifatida emas, balki mashina o‘qiy oladigan tuzilmali ma’lumot tarzida taqdim etish yondashuvidir. PTB tomonidan rivojlantirilayotgan DCC yechimida XML asosidagi ma’lumot tuzilmasidan foydalaniladi [3]. Uning nazariy ustunligi — asbob identifikatori, natija, o‘lchov birligi, noaniqlik va boshqa rekvizitlarni axborot tizimlari o‘rtasida qayta ishlash imkoniyatidir. Shu bilan birga, oddiy PDF, elektron jadval yoki QR-kod DCC maqomini o‘z-o‘zidan olmaydi; hujjatning kelib chiqishi, mazmuni va yaxlitligi tekshirilishi kerak.

O‘quv misolida harorat qiymati 25,1 °C, kengaytirilgan noaniqlik U = 0,2 °C va qamrov koeffitsiyenti k = 2 deb olinishi mumkin. Raqamli tizim bu uch parametrni bir-biridan ajratmasdan qayd etishi lozim. Bunda U/k nisbatidan foydalanish faqat tegishli noaniqlik modeli va shartlar asosida izohlanadi. Kalibrlash davriyligini aniqlashda esa asbob turi, foydalanish intensivligi, oldingi tarix va xavflar inobatga olinadi; barcha qurilmalarga yagona qat’iy interval berish metodik jihatdan asoslanmagan [4].

QR-metrolog asosidagi integratsiyalashgan model

QR-Metrolog o‘quv-amaliy modeli o‘lchash vositalari reyestrini raqamlashtirish uchun asos sifatida tanlandi. Taklif etilgan tizimda har bir asbobga noyob inventar identifikatori biriktiriladi; kartochkada asbob nomi va modeli, seriya raqami, joylashuvi, mas’ul shaxs, kalibrlash qaydi, hujjat rekviziti va navbatdagi rejalashtirilgan sana saqlanadi. QR-kod kartochkani tez topish uchun xizmat qiladi; u sertifikatning o‘rnini bosmaydi va foydalanishga avtomatik ruxsat bermaydi.

Rejalashtirilgan muddatni kuzatish uchun $d = t_k - t_\beta$ ifodasi kiritiladi. Bu yerda t_k - mas’ul shaxs belgilagan keyingi kalibrlash sanasi, t_β - joriy mahalliy kalendar sana, d esa kunlar farqi. O‘quv modelida $d < 0$ bo‘lsa «muddat o‘tgan», $0 \le d \le 7$ bo‘lsa «tezkor ogohlantirish», $8 \le d \le 30$ bo‘lsa «yaqinlashmoqda», $d > 30$ bo‘lsa «rejada» belgisi beriladi. Yetti va o‘ttiz kunlik chegaralar faqat loyihaviy sozlamalardir, universal normativ talab emas.

Bunda ikki mustaqil holatni farqlash talab etiladi: (1) kalibrlashni rejalashtirish indikatori; (2) asbobdan foydalanishga oid mutaxassis tomonidan tasdiqlangan qaror. Ikkinchi holat sertifikat, tekshiruv natijalari, xavfsizlik cheklovlari va tegishli metodikaga asosan shakllanadi. Integratsiya rivojlanganda elektron kartochka sertifikatni qidirish, DCCga mos maydonlarni ko‘rsatish va audit yozuvlarini saqlash imkoniyatlari bilan to‘ldirilishi mumkin.

Xavflar, nazorat choralari va baholash mezonlari

Raqamli tizimdan foydalanishda eskirgan kalibrlash ma’lumotini ishlatish, vaqt tamg‘asining noto‘g‘ri bo‘lishi, aloqa uzilishi, ruxsatsiz tahrir hamda avtomatik ogohlantirishni rasmiy metrologik qaror bilan adashtirish xavflari mavjud. Ularni kamaytirish uchun foydalanuvchi rollari, kirishni nazorat qilish, ma’lumot uzatishda himoya, zaxira nusxa, o‘zgarishlar jurnali va versiyalarni boshqarish tavsiya etiladi. OIML D 31:2023 dasturiy boshqariladigan o‘lchash vositalaridagi metrologik jihatdan ahamiyatli dasturiy funksiyalar va xavfsizlik masalalariga yondashuv beradi [5].

Pilot tekshiruvni dastlab 5–10 ta namunaviy asbob bilan boshlash mumkin. Baholash indikatorlari sifatida to‘liq to‘ldirilgan elektron kartochkalar ulushi, kalibrlash tarixini topish vaqti, sana chegaralaridagi ogohlantirishlarning to‘g‘riligi, takroriy IDlarning aniqlanishi, QR-kod skanerlanganda tegishli kartochka ochilishi hamda ma’lumot eksportining butligi taklif etiladi. Olingan ko‘rsatkichlar qog‘oz reyestr bilan bir xil vazifalar asosida taqqoslangandagina amaliy samaradorlik haqida xulosa chiqarish mumkin. Mazkur maqolada bunday pilot sinov yakunlangan deb da’vo qilinmaydi.

Xulosa

Metrologiya 4.0 sharoitida ma’lumotlar oqimini avtomatlashtirish natijaning ishonchliligini ta’minlovchi jarayonlardan ajralmasligi kerak. Aqlli sensorlar va IoT tarmog‘i o‘lchashlarni uzluksiz kuzatishga ko‘maklashsa, kuzatiluvchanlik, noaniqlik va tekshiriladigan kalibrlash hujjatlari ularning metrologik mazmunini belgilaydi. DCC tuzilmali natijalar almashinuvining istiqbolli yo‘nalishidir. QR-Metrolog modeli esa laboratoriya asboblarini aniqlash, tarixni topish va reja sanalarini kuzatish uchun bosqichma-bosqich joriy etiladigan o‘quv-amaliy yechim sifatida taklif etiladi. Keyingi tadqiqotlarda prototipni real ma’lumotlar bilan pilot baholash, muhofazalangan ma’lumot almashinuvi va qarorlarni hujjatlashtirish mexanizmlarini sinash maqsadga muvofiq.

Foydalanilgan adabiyotlar

1 BIPM. Resolution 2 of the 27th CGPM (2022): On the global digital transformation and the International System of Units. https://www.bipm.org/en/-/resolution-cgpm-27-2

2 ISO/IEC 17025:2017. General requirements for the competence of testing and calibration laboratories. ISO. https://www.iso.org/standard/66912.html

3 Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) / DKD. Digital Calibration Certificate (DCC): Inhalt und Zielsetzung des DCC. https://www.dkd.ptb.de/dcc/inhalt-und-zielsetzung-des-dcc