UDK 681.518.5:006.91

ENERGETIK QURILMALARDA SMART O‘LCHASH VA METROLOGIK DIAGNOSTIKA METODIKASI

Muxriddin Baxriddinov
Buxoro davlat texnika universiteti. Buxoro, O‘zbekiston.

Annotatsiya. Maqolada energetik qurilmalarning harorat, bosim, sarf va sath parametrlarini uzluksiz o‘lchash hamda nazorat qilish tizimini takomillashtirish masalasi ko‘rib chiqilgan. Tadqiqot analitik sintez, sabab-oqibat tahlili va tajriba natijalarini ikkilamchi qayta ishlash usullarida bajarilgan. Metrologik verifikatsiya, termik kompensatsiya, LSTM asosidagi virtual analizator va diagnostik qaror qabul qilish modullarini birlashtiruvchi smart tizim taklif etilgan. Harorat tuzatmasi 0,1–2 m³/soat sarf diapazonida nisbiy xatolikni ±1,0% dan ±0,5% gacha kamaytirishi aniqlangan. Taklif etilgan tizim qiyoslash va kalibrlash oralig‘ida o‘lchash kanallaridagi drift, termik siljish, shovqin hamda nosozliklarni erta aniqlash imkonini beradi.

Kalit so‘zlar: energetik qurilma, avtomatlashtirilgan o‘lchash, smart tahlil, metrologik nazorat, harorat kompensatsiyasi, virtual analizator, LSTM, qoldiq signali, o‘lchash noaniqligi, diagnostika.

Аннотация. В статье рассматривается вопрос совершенствования системы непрерывного измерения и контроля параметров температуры, давления, расхода и уровня энергетических установок. Исследование выполнено методами аналитического синтеза, причинно-следственного анализа и вторичной обработки результатов эксперимента. Предложена смарт-система, объединяющая модули метрологической верификации, термической компенсации, виртуального анализатора на базе LSTM и диагностического принятия решений. Установлено, что температурная коррекция снижает относительную погрешность с ±1,0% до ±0,5% в диапазоне расхода 0,1–2 м3/ч. Предложенная система позволяет заранее выявлять дрифт, термические смещения, шум и неисправности в измерительных каналах в промежутке между поверкой и калибровкой.

Ключевые слова: энергетическое устройство, автоматизированное измерение, смарт-анализ, метрологический контроль, температурная компенсация, виртуальный анализатор, LSTM, остаточный сигнал, неопределенность измерений, диагностика.

Abstract. This article examines the issue of improving the system for continuous measurement and control of temperature, pressure, flow rate, and level parameters in power plants. The study was conducted using analytical synthesis, cause-and-effect analysis, and secondary processing of experimental results. A smart system has been proposed, combining modules for metrological

verification, thermal compensation, a virtual analyzer based on LSTM, and diagnostic decision-making. It has been established that temperature correction reduces the relative error from ±1.0% to ±0.5% in the flow range of 0.1–2 m3/h. The proposed system allows for the preliminary detection of drift, thermal displacements, noise, and malfunctions in measuring channels between verification and calibration.

Keywords: energy device, automated measurement, smart analysis, metrological control, temperature compensation, virtual analyzer, LSTM, residual signal, measurement uncertainty, diagnostics.

KIRISH.

Energetik qurilmalarning samarali va xavfsiz ishlashi texnologik parametrlarning ishonchli o‘lchanishiga bog‘liq bo‘lib bularga issiqlik almashinish apparatlari, bug‘ va suv konturlari, yonilg‘i uzatish tizimlari, kompressor hamda nasos agregatlarida harorat T, bosim P, sarf Q va sath L boshqaruv algoritmlarining asosiy kirish ma’lumotlarini shakllantiradi. O‘lchash kanalidagi tizimli siljish yoki kechikish rostlagich to‘g‘ri ishlagan holatda ham noto‘g‘ri boshqaruv ta’siriga, energiya sarfining ortishiga va avariyaviy holat xavfining oshishiga olib kelishi mumkin [1, 2].

An’anaviy metrologik ta’minot o‘lchash vositasini hisobga olish, qiyoslash, kalibrlash, etalongacha kuzatiluvchanlik va natija noaniqligini baholashga asoslanadi. ISO 10012:2026 o‘lchash jarayonlari va ularning natijalari yaroqliligini tashkilot miqyosida riskka asoslangan boshqarish zarurligini belgilaydi [7]. Biroq davriy nazorat ikki tekshiruv oralig‘ida paydo bo‘ladigan datchik drifti, haroratga bog‘liq siljish, signal shovqini va texnologik rejimdan tashqariga chiqishni uzluksiz aniqlamaydi.

Smart tahlil ushbu bo‘shliqni fizik datchiklardan olinadigan vaqt qatorlari, kalibrlash ma’lumotlari va virtual model hisoblagan qiymatlarni birgalikda qayta ishlash orqali to‘ldiradi. Virtual analizator o‘lchanayotgan parametrning kutiladigan qiymatini boshqa o‘zaro bog‘liq signallar asosida hisoblaydi. Fizik va virtual kanallar orasidagi tafovut esa o‘lchash vositasining metrologik holatini ifodalovchi diagnostik belgiga aylanadi [8–10].

Mavjud ishlarda metrologik ta’minot, harorat kompensatsiyasi va neyron tarmoq asosidagi virtual datchiklar ko‘pincha alohida o‘rganilgan. Ularni yagona avtomatlashtirilgan o‘lchash va nazorat arxitekturasiga birlashtirish, qarorni noaniqlik va kuzatiluvchanlik bilan bog‘lash hamda natijaning asboblar, o‘lchash va nazorat usullariga mos shaklda ifodalash zarur.

ADABIYOTLAR TAHLILI.

P.I. Kalandarov va G.I. Ikramov o‘lchash vositalarini qiyoslash, kalibrlash, metrologik kuzatiluvchanlik hamda o‘lchash noaniqligini baholashning nazariy-

ISSN 3030-3907

uslubiy asoslarini ishlab chiqqan [1]. N.R. Yusupbekov, B.I. Muhammedov va Sh.M. G‘ulomov esa texnologik jarayonlarning harorat, bosim, sarf va sath parametrlarini o‘lchash, nazorat qilish hamda avtomatik rostlash tamoyillarini tizimlashtirgan [2].

E.E. Ortiqov kichik sarflarni o‘lchashda harorat xatoligini avtomatik kompensatsiyalash va LSTM asosidagi virtual analizatordan foydalanishni taklif etgan [3]. Tajribalarda 0,1–2 m³/soat diapazonida nisbiy xatolik ±1,0% dan ±0,5% dan kichik qiymatgacha kamaytirilgan. U.A. Ruziyev tomonidan suyuqlik qovushqoqligini nazorat qilishda harorat va zichlik bo‘yicha avtomatik tuzatish kiritish algoritmi ishlab chiqilgan [4].

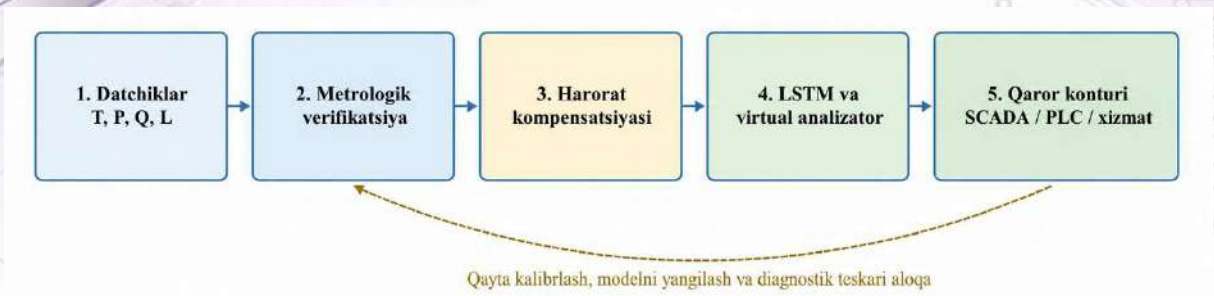
S. Hochreiter va J. Schmidhuber LSTM neyron tarmog‘ining nazariy asoslarini yaratib, vaqt qatorlaridagi inersiya, kechikish va nolinear bog‘lanishlarni modellashtirish imkoniyatini asoslagan [8]. J.M. Barcelo-Ordinas va hammualliflar sensorlarning drifti, tashqi muhit ta’siri hamda etalon ma’lumotlar yetishmasligining o‘lchash ishonchliligiga ta’sirini tahlil qilgan [9]. R. González-Herbón va hammualliflar LSTM asosidagi virtual sarf datchigini sanoat boshqaruv konturida MAE, RMSE va R^2 mezonlari bo‘yicha baholab, real vaqt tizimlarida prognoz aniqligi bilan bir qatorda hisoblash kechikishini ham hisobga olish zarurligini ko‘rsatgan [10].

Tahlillar metrologik ta’minot, termik kompensatsiya va virtual datchiklar bo‘yicha muhim ilmiy natijalar olinganini ko‘rsatadi. Biroq energetik qurilmalarning texnologik parametrlarini uzluksiz o‘lchash, xatoliklarni avtomatik kompensatsiyalash va o‘lchash kanallarining metrologik holatini real vaqt rejimida intellektual diagnostikalash funksiyalari yagona tizim doirasida yetarlicha tadqiq etilmagan. Shu sababli mazkur ishda metrologik verifikatsiya, termik kompensatsiya, LSTM asosidagi virtual analizator va diagnostik qaror qabul qilish modullarini birlashtiruvchi avtomatlashtirilgan o‘lchash va nazorat tizimini takomillashtirish ko‘zda tutilgan.

METODOLOGIYA.

Mazkur tadqiqotda taklif etilgan tizim besh o‘zaro bog‘langan funksional qatlamdan iborat. Birinchi qatlam fizik datchiklar va raqamli o‘zgartkichlardan vaqt belgisi bilan xom signallarni qabul qiladi. Ikkinchi qatlam o‘lchov birligi, diapazon, qiyoslash holati, kalibrlash koeffitsienti, signal sifati va o‘lchash noaniqligini tekshiradi. Uchinchi qatlam statik yoki dinamik harorat tuzatmasini hisoblaydi. To‘rtinchi qatlam LSTM asosidagi virtual analizator yordamida parametrning kutilayotgan qiymatini bashorat qiladi. Beshinchi qatlam esa qoldiq signali, trend, dispersiya va metrologik risk asosida operator, SCADA tizimi yoki metrologik xizmat uchun tegishli qarorni shakllantiradi. Taklif etilgan tizimning funksional arxitekturasi 1-rasmda keltirilgan.

ISSN 3030-3907



1-rasm. Energetik qurilmalar uchun smart o‘lchash va nazorat tizimining taklif etilgan arxitekturasi

Arxitekturaning har bir funksional qatlamiga tegishli kirish ma’lumotlari, bajariladigan asosiy amallar va shakllantiriladigan natijalar 1-jadvalda umumlashtirilgan.

1-jadval.

Smart tizim qatlamlarining metrologik funksiyalari

Qatlam	Kirish ma’lumoti	Asosiy amal	Chiqish natijasi
Birlamchi o‘lchash	T, P, Q, L, ijro mexanizmi holati	Sinxron o‘qish va vaqt belgisi	Xom signal va quality flag
Metrologik verifikatsiya	Pasport, qiyoslash va kalibrlash ma’lumoti	Diapazon, birlik, kuzatiluvchanlikni tekshirish	Yaroqlilik belgisi va noaniqlik
Termik kompensatsiya	Asosiy signal, muhit va elektronika harorati	Statik/dinamik tuzatish	Kompensatsiyalangan qiymat
Smart tahlil	Joriy va tarixiy vaqt qatorlari	LSTM bashorati, qoldiq va trend tahlili	Normal, ogohlantirish yoki nosozlik ehtimoli
Qaror konturi	Diagnostika va metrologik risk	Operator va xizmat algoritmi	Tekshiruv, kalibrlash, zaxira kanal yoki modelni yangilash

1-rasm va 1-jadvaldan ko‘rinadiki, taklif etilgan arxitektura o‘lchash ma’lumotlarini olishdan boshlab, ularning metrologik ishonchliligini tekshirish, tashqi ta’sirlarni kompensatsiyalash va intellektual diagnostika natijalari asosida qaror qabul qilishgacha bo‘lgan jarayonlarni yagona tizimda birlashtiradi. Natijada o‘lchash kanallaridagi drift, termik siljish, shovqin va nosozliklarni dastlabki

ISSN 3030-3907

bosqichda aniqlash hamda texnik xizmat ko‘rsatish choralarini o‘z vaqtida belgilash imkoniyati yaratiladi.

MUHOKAMA VA NATIJALAR.

Tadqiqot natijasida energetik qurilmalarning harorat, bosim, sarf va sath parametrlarini uzluksiz nazorat qilishga mo‘ljallangan besh qatlamli funksional arxitektura shakllantirildi. Taklif etilgan tuzilmaning asosiy natijasi alohida o‘lchash, kompensatsiya va diagnostika amallarini yagona metrologik axborot oqimiga birlashtirishdan iborat. Bunda fizik datchikdan olingan qiymat faqat boshqaruv signali sifatida emas, balki uning kalibrlash holati, noaniqligi, sifat belgisi va virtual model bilan muvofiqligi bilan birgalikda qayta ishlanadi. Natijada o‘lchash qiymati bilan bir qatorda uning ishonchlilik darajasini ifodalovchi diagnostik axborot ham shakllanadi.

Yuqoridagilardan kelib chiqib o‘lchash va metrologik verifikatsiya natijalari birlamchi o‘lchash qatlamida T, P, Q va L signallarining yagona vaqt shkalasida qayd etilishi turli kanallar orasidagi dinamik nomuvofiqlikni kamaytiradi. Metrologik verifikatsiya bosqichida o‘lchash diapazoni, birlik, kalibrlash koeffitsienti, qiyoslash holati va signal sifati tekshiriladi. Ushbu bosqichdan o‘tmagan qiymat boshqaruv konturiga ishonchli signal sifatida uzatilmaydi, balki tegishli sifat belgisi bilan arxivlanadi. Shunday qilib, datchikning elektr jihatdan ishlashi bilan uning metrologik jihatdan yaroqliligi o‘zaro farqlanadi.

Harorat ta’sirini hisobga olishda xam o‘lchash qiymati $y_{\text{m}}(t)$ga muhit harorati, elektron blok harorati, muhitning fizik xossalari va harorat kanalining vaqt doimiysi asosida ΔT tuzatma kiritiladi. Kompensatsiyalangan qiymat quyidagicha aniqlanadi:

$$y⍰(t) = y_{\text{m}}(t) - \Delta T[T_{\text{m}}(t), T_{\text{a}}(t), z(t), \tau T] \qquad (1)$$

Manbadagi tajriba natijalarini ikkilamchi qayta ishlash shuni ko‘rsatdiki, $0{,}1 - 2\ m^3/soat$ diapazonida harorat tuzatmasisiz sarf o‘lchash xatoligining chegaraviy qiymati $\pm 1{,}0$ ni, tuzatma kiritilgandan keyin esa $\pm 0{,}5$ dan kichik qiymatni tashkil etgan [3]. Chegaraviy modul bo‘yicha xatolikning kamida 50 ga qisqarishi harorat kanalini yordamchi parametr sifatida emas, balki o‘lchash modelining metrologik tarkibiy qismi sifatida qarash zarurligini ko‘rsatadi. Harorat kompensatsiyasi natijalarining qiyosiy tahlili 2-jadvalda keltirilgan.

ISSN 3030-3907

2-jadval.

Harorat kompensatsiyasi natijalarining tahliliy bahosi

Baholash ko‘rsatkichi	Manbadagi natija	Taklif etilgan tizim uchun ilmiy talqin
Harorat tuzatmasisiz nisbiy xatolik	−1,0% … +1,0%	Termik ta’sir o‘lchash natijasida tizimli siljish hosil qilishi mumkin
Harorat tuzatmasidan keyingi xatolik	0,1–2 m³/soatda < ±0,5%	Kompensatsiya algoritmini validatsiyalash uchun mezon
Chegaraviy xatolikning kamayishi	Kamida 50%	Termik xatolikni algoritmik kamaytirish samarasi
Natijaning qo‘llanish sohasi	Kichik sarflarni o‘lchash stendi	Bug‘, gaz va yuqori bosimli konturlar uchun qayta kalibrlash talab etiladi

2-jadval natijalari harorat bo‘yicha avtomatik tuzatish kiritilishi o‘lchash aniqligini sezilarli darajada oshirishini ko‘rsatadi. Xususan, chegaraviy nisbiy xatolikning kamida ikki baravar kamayishi kompensatsiya algoritmining metrologik samaradorligini tasdiqlaydi. Biroq keltirilgan qiymatlar kichik sarflarni o‘lchash stendida olinganligi sababli ularni barcha energetik qurilmalarga bevosita tatbiq etish mumkin emas. Bug‘, gaz, yuqori bosimli suv va boshqa issiqlik tashuvchi muhitlar uchun kompensatsiya modeli tegishli ish diapazoni, harorat, bosim va muhitning fizik xossalarini hisobga olgan holda qayta kalibrlanishi hamda tajribaviy validatsiyadan o‘tkazilishi lozim.

Harorat kompensatsiyasidan keyingi bosqichda o‘lchash kanalining joriy metrologik holati virtual analizator yordamida baholandi. Smart tahlil qatlamidagi LSTM modeli o‘zaro fizik bog‘langan vaqt qatorlari asosida nazorat qilinayotgan parametrning kutilayotgan qiymatini $\hat{y}(t)$ ko‘rinishida hisoblandi. Fizik datchikdan olingan $y(t)$ qiymat bilan virtual model bashorati orasidagi farq diagnostik qoldiq sifatida qabul qilindi:

$$r(t) = y(t) - \hat{y}(t). \qquad (2)$$

Qoldiq signalini baholashda faqat uning bir martalik maksimal qiymati emas, balki vaqt bo‘yicha o‘rtacha qiymati, dispersiyasi, o‘zgarish trendi va harorat bilan korrelyatsiyasi ham hisobga olinadi. Normal holatda qoldiq validatsiya jarayonida belgilangan ishonch chegarasida bo‘ladi. Qoldiq o‘rtacha qiymatining sekin va bir yo‘nalishda siljishi datchik driftini, dispersiyaning keskin ortishi signal shovqini yoki aloqa kanalidagi nosozlikni, qoldiqning harorat bilan barqaror

ISSN 3030-3907

bog‘lanishi esa termik kompensatsiya modelining nomuvofiqligini bildiradi. Qoldiq signalining kritik chegaradan belgilangan vaqt davomida tashqarida qolishi navbatdan tashqari tekshiruv yoki kalibrlash uchun asos bo‘ladi.

Fizik va virtual kanallarning noaniqliklari o‘zaro mustaqil deb qabul qilingan holatda diagnostik chegara quyidagi ifoda orqali aniqlanadi [5,6]:

$$r_{\lim} = k\sqrt{u_y^2 + u_{\hat{y}}^2}, \qquad (3)$$

bu yerda u_y— fizik o‘lchash kanalining standart noaniqligi; $u_{\hat{y}}$— virtual model bashoratining standart noaniqligi; k— tanlangan ishonch ehtimoliga mos qamrov koeffitsienti. Mazkur mezon diagnostik chegarani subyektiv ravishda belgilash o‘rniga uni o‘lchash noaniqligi va model validatsiyasi natijalari bilan bog‘lash imkonini beradi. Qoldiq signalining xususiyatlari asosida o‘lchash kanalining metrologik holatini baholash mezonlari 3-jadvalda keltirilgan.

3-jadval.

O‘lchash kanalining metrologik holatini diagnostikalash mezonlari

Holat	Qoldiq signalining xususiyati	Qo‘shimcha diagnostik belgi	Tavsiya etiladigan qaror
Normal	$\mid r(t) \mid \leq r_{\lim}$	Trend va dispersiya barqaror	Monitoringni davom ettirish
Drift	Qoldiqning o‘rtacha qiymati sekin va bir yo‘nalishda siljiydi	Harorat bilan bog‘liqlik kuchsiz	Navbatdan tashqari tekshiruv yoki kalibrlash
Termik siljish	$r(t)$harorat bilan tizimli ravishda o‘zgaradi	$r - T$korrelyatsiyasi barqaror	Harorat datchigi va ΔT kompensatsiya modelini tekshirish
Shovqin yoki kontakt nuqsoni	Qoldiq dispersiyasi keskin ortadi	O‘rtacha qiymat sezilarli siljimaydi	Kabel, ekranlash, elektr ta’minoti va kontaktlarni tekshirish
Model diapazonidan chiqish	Bir nechta texnologik rejimda qoldiq ortadi	Kirish parametrlarining qiymatlari modelni o‘qitish oralig‘idan tashqarida	Modelni qayta validatsiyalash yoki o‘qitish

ISSN 3030-3907

Holat	Qoldiq signalining xususiyati	Qo‘shimcha diagnostik belgi	Tavsiya etiladigan qaror
Datchik nosozligi	$\mid r(t) \mid > r_{\lim}$ va holat belgilangan vaqt davomida saqlanadi	Signalning sakrashi, uzilishi yoki bir qiymatda qolib ketishi	Zaxira kanalga o‘tish va metrologik diagnostika o‘tkazish

3-jadvaldagi mezonlar fizik datchik va virtual analizator qiymatlari orasidagi tafovutning nafaqat miqdorini, balki uning vaqt bo‘yicha rivojlanish xususiyatini ham baholash imkonini beradi. Bu esa bir xil kattalikdagi qoldiq signalining turli sabablar - datchik drifti, termik siljish, elektr shovqini, model diapazonidan chiqish yoki datchik nosozligi bilan bog‘liqligini farqlashga xizmat qiladi.

Mazkur mezonlar asosida uch darajali qaror qabul qilish mexanizmi shakllantirildi. “Normal” holatda o‘lchash qiymati tegishli sifat belgisi bilan boshqaruv konturiga uzatiladi. “Ogohlantirish” holatida qiymatni uzatish davom ettiriladi, biroq kuchaytirilgan monitoring boshlanib, operatorga diagnostik xabar beriladi. “Kritik” holatda esa metrologik xizmat xabardor qilinadi hamda zaxira kanalga o‘tish, navbatdan tashqari tekshiruv yoki kalibrlash tavsiya etiladi [12]. Natijada davriy qiyoslashlar oralig‘ida o‘lchash kanalining metrologik ishonchliligini uzluksiz nazorat qilish va nosozliklarni dastlabki bosqichda aniqlash imkoniyati yaratiladi.

Shunday qilib, natijalar taklif etilgan besh qatlamli arxitektura o‘lchash, metrologik tasdiqlash, termik kompensatsiya va intellektual diagnostikani yagona axborot-mantiqiy konturda birlashtirishini ko‘rsatdi. Ushbu yondashuv energetik qurilmalarda o‘lchash kanallarining ishonchliligini oshirish, nosozliklarni dastlabki bosqichda aniqlash va metrologik xizmat ko‘rsatishni holatga asoslangan tarzda tashkil etish uchun ilmiy-uslubiy asosni yaratadi.

XULOSA.

Tadqiqot natijasida energetik qurilmalarning harorat, bosim, sarf va sath parametrlarini uzluksiz nazorat qilishga mo‘ljallangan besh qatlamli smart o‘lchash tizimi ishlab chiqildi. Metrologik verifikatsiya, termik kompensatsiya va LSTM asosidagi virtual analizatorning yagona tizimga birlashtirilishi o‘lchash natijalarining ishonchliligini oshirdi. Harorat kompensatsiyasi 0,1–2 m³/soat diapazonida sarf o‘lchash xatoligini ±1,0% dan ±0,5% dan kichik qiymatgacha kamaytirdi. Fizik va virtual kanallar orasidagi qoldiq signalini tahlil qilish asosida datchik drifti, termik siljish, signal shovqini va nosozliklarni erta aniqlash imkoniyati yaratildi. Taklif etilgan tizim qiyoslash va kalibrlash oralig‘ida o‘lchash

ISSN 3030-3907

kanallarining metrologik holatini uzluksiz nazorat qilish hamda asoslangan diagnostik qarorlarni shakllantirishni ta’minlaydi.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR RO‘YXATI

1. Kalandarov P.I., Ikramov G.I. Metrologiya asoslari. Toshkent: TIQXMMI MTU; 2024. 289 b.
2. Yusupbekov N.R., Muhammedov B.I., G‘ulomov Sh.M. Texnologik jarayonlarni nazorat qilish va avtomatlashtirish. Toshkent: O‘qituvchi; 2011. 576 b.
3. Ortiqov E.E. Suyuq mahsulotlarning kichik sarflarini o‘lchash usuli va asboblarini takomillashtirish: texnika fanlari bo‘yicha falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi avtoreferati. Toshkent: Toshkent davlat texnika universiteti; 2025. 45 b.
4. Ruziyev U.A. Suyuq mahsulotlar sifatini ularning qovushqoqligi bo‘yicha nazorat qilish: texnika fanlari bo‘yicha falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi avtoreferati. Toshkent: Toshkent davlat texnika universiteti; 2018. 45 b.
5. Joint Committee for Guides in Metrology. JCGM 100:2008. Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement. Sèvres: BIPM; 2008. DOI: 10.59161/JCGM100-2008E.
6. Joint Committee for Guides in Metrology. JCGM 100:2008/Amd.1:2026. Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement. Amendment 1: Nonlinearity in measurement models. Sèvres: BIPM; 2026. DOI: 10.59161/PPDI3267.
7. International Organization for Standardization. ISO 10012:2026. Quality management — Requirements for measurement management systems. 2nd ed. Geneva: ISO; 2026. 46 p.
8. Hochreiter S., Schmidhuber J. Long Short-Term Memory. Neural Computation. 1997;9(8):1735–1780. DOI: 10.1162/neco.1997.9.8.1735.
9. Barcelo-Ordinas J.M., Doudou M., Garcia-Vidal J., Badache N. Self-calibration methods for uncontrolled environments in sensor networks: A reference survey. Ad Hoc Networks. 2019;88:142–159. DOI: 10.1016/j.adhoc.2019.01.008.
10. González-Herbón R., González-Mateos G., Rodríguez-Ossorio J.R., et al. Assessment and deployment of a LSTM-based virtual sensor in an industrial process control loop. Neural Computing and Applications. 2025;37:10507–10519. DOI: 10.1007/s00521-024-10560-0.
11. International Electrotechnical Commission. IEC 61511-1:2016. Functional safety — Safety instrumented systems for the process industry sector — Part 1: Framework, definitions, system, hardware and application programming requirements. 2nd ed. Geneva: IEC; 2016.

ISSN 3030-3907

12. International Organization for Standardization; International Electrotechnical Commission. ISO/IEC 17025:2017. General requirements for the competence of testing and calibration laboratories. 3rd ed. Geneva: ISO; 2017.

ISSN 3030-3907