O'LCHASH JARAYONLARI VA TIZIMLARINI BOSHQARISHDA SUN'IY INTELLEKT TEXNOLOGIYALARINI QO'LLASH

S. D. Mahkamova
Islom Karimov nomidagi Toshkent davlat texnika universiteti
«Metrologiya, texnik jihatdan tartibga solish,
standartlashtirish va sertifikatlashtirish»
kafedrasi doktoranti
tel.: +998 99 809 19 30
E-mail: saidamahkamova1227@gmail.com
https://doi.org/10.5281/zenodo.21762027

Annotatsiya. Ushbu maqolada sun'iy intellekt (SI) texnologiyalarining o'lchash jarayonlari va metrologik tizimlarni boshqarishdagi qo'llanilishi ilmiy adabiyotlarning tahliliy sharhi asosida yoritilgan. An'anaviy GUM (Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement) yondashuvining cheklovlari va uning SI asosida kengaytirilgan muqobil usullari ko'rib chiqilgan. Neyron tarmoq arxitekturalari (CNN, LSTM, GNN, BNN, PINN), Bayes yondashuviga asoslangan noaniqlikni miqdoriy baholash, virtual metrologiya, raqamli egizak va ko'p sensor ma'lumotlarini birlashtirish texnologiyalarining o'lchash tizimlariga integratsiyalashuv masalalari tahlil qilinadi. Mualliflar tomonidan o'lchov noaniqligini aleatorik va epistemik komponentlarga ajratishni GUM tasnifi bilan bog'lovchi ifoda hamda SI texnologiyalarini o'lchash tsikli bosqichlari bo'yicha tartiblashtiruvchi tasnif taklif etiladi. Tahlil qilingan manbalarda keltirilgan natijalar SI asosidagi yechimlar o'lchov aniqligi, namunalash samaradorligi va jarayon nazorati sifatini sezilarli oshirishi mumkinligini ko'rsatadi.
Kalit so'zlar: sun'iy intellekt, metrologiya, o'lchash tizimlari, neyron tarmoqlar, Bayes noaniqlik baholash, virtual metrologiya, raqamli egizak, sensor fusion, Kalman filtri, mashinaviy o'rganish, koordinatali metrologiya, adaptiv boshqaruv.

Аннотация. В статье на основе аналитического обзора научной литературы рассматривается применение технологий искусственного интеллекта (ИИ) в управлении измерительными процессами и системами. Анализируются ограничения традиционного подхода GUM, нейросетевые архитектуры, байесовская оценка неопределенности, виртуальная метрология, цифровой двойник и комплексирование данных многих датчиков. Предложены формализация разделения неопределенности на алеаторную и эпистемическую составляющие в увязке с классификацией GUM, а также классификация технологий ИИ по этапам измерительного цикла.
Ключевые слова: искусственный интеллект, метрология, измерительные системы, нейронные сети, байесовская оценка неопределенности, виртуальная метрология, цифровой двойник.

Abstract. Based on an analytical review of the scientific literature, this paper examines the application of artificial intelligence (AI) technologies in the management of measurement processes and systems. The limitations of the traditional GUM framework are analyzed together with neural network architectures, Bayesian uncertainty quantification, virtual metrology, digital twins and multi-sensor data fusion. The authors propose a formalization linking the aleatoric and epistemic decomposition of measurement uncertainty with the GUM classification, as well as a classification of AI technologies by stages of the measurement cycle.

Keywords: *artificial intelligence, metrology, measurement systems, neural networks, Bayesian uncertainty quantification, virtual metrology, digital twin.*

1. KIRISH VA MUAMMONING DOLZARBLIGI

Zamonaviy sanoat inqilobi ishlab chiqarish jarayonlarining texnologik poydevorini tubdan o'zgartirmoqda. Bu o'zgarishlar markazida o'lchash va metrologiya tizimlarining intellektuallashuvi masalasi alohida ilmiy va amaliy ahamiyat kasb etmoqda. O'lchash jarayoni sifat boshqaruvining asosi, texnologik uzluksizlikning kafolati va mahsulot raqobatbardoshligining birlamchi sharti hisoblanadi.

An'anaviy o'lchash tizimlaridagi asosiy cheklov shundaki, ular oldindan belgilangan ssenariylar uchun loyihalangan deterministik algoritmlardan foydalanadi. Bunday tizimlar ishlab chiqarish muhitining dinamik o'zgarishlariga, sensor degradatsiyasiga va murakkab geometrik konfiguratsiyalarga yetarlicha moslasha olmaydi. Aynan ushbu bo'shliqni to'ldirish uchun sun'iy intellekt texnologiyalari o'lchash tizimlariga integratsiyalanmoqda.

Sun'iy intellektning metrologiyaga tatbiqi bo'yicha so'nggi yillarda xalqaro ilmiy hamjamiyatda jiddiy tadqiqotlar olib borilmoqda. Wieczorowski va boshqalar koordinatali metrologiyada, jumladan nano masshtabda, SI ni qo'llashning yangi yondashuvini taklif etgan [1]. Barbosa va boshqalar aqlli ishlab chiqarish va metrologiyaning raqamlashtirilishi bo'yicha 2016-2022 yillarda Web of Science va Scopus bazalaridagi 160 ta maqolani qamrab olgan tizimli adabiyot tahlilini o'tkazgan [2]. Archenti va boshqalarning CIRP Annals jurnalidagi dasturiy (keynote) maqolasida integratsiyalangan metrologiya kontseptsiyasi ta'riflangan va uning kelajakdagi rivojlanish yo'nalishlari belgilangan [15].

Ushbu maqolaning maqsadi: SI texnologiyalarining o'lchash jarayonlari va tizimlarini boshqarishdagi algoritmik asoslarini, amaliy tatbiqlarini va istiqbolli yo'nalishlarini ilmiy adabiyotlar tahlili asosida tizimlashtirish, shuningdek ularning an'anaviy metrologik yondashuvlar bilan munosabatini aniqlashdir.

2. TADQIQOT METODOLOGIYASI

Maqola tavsifiy-tahliliy sharh (narrative review) janrida tayyorlangan. Manbalarni tanlashda Scopus, Web of Science va IEEE Xplore bazalarida indekslangan, asosan 2019-2025 yillarda chop etilgan maqolalarga, xalqaro metrologik hujjatlarga (JCGM) hamda soha bo'yicha dasturiy hujjatlarga tayanildi. Qidiruvda «artificial intelligence», «metrology», «virtual metrology», «uncertainty quantification», «digital twin», «sensor fusion» kalit so'zlari va ularning kombinatsiyalari qo'llanildi. Tanlangan manbalar o'lchash tsikli bosqichlari bo'yicha guruhlandi va sifat jihatidan tahlil qilindi. Maqolada keltirilgan barcha miqdoriy ko'rsatkichlar tegishli birlamchi manbalarga havola qilingan.

3. NAZARIY ASOSLAR: AN'ANAVIY VA SI ASOSIDAGI METROLOGIYA PARADIGMALARI

3.1. GUM yondashuvi va uning cheklovlari

O'lchov noaniqligini ifodalash bo'yicha qo'llanma (GUM) metrologiyada tan olingan xalqaro hujjat hisoblanadi [4]. GUM noaniqliklarni A turi (statistik tahlil) va B turi (boshqa manbalar) bo'yicha tasniflaydi va ularni kvadratik yig'indi orqali umumiy noaniqlikka birlashtiradi:

$$u_c(y) = \sqrt{[\Sigma_i \, (\partial f/\partial x_i)^2 \cdot u^2(x_i)]}$$

Bu formulada chiziqlilik taxmini qo'llaniladi, ya'ni o'lchov funksiyasi f kirish kattaliklari x_i ga nisbatan chiziqli deb hisoblanadi. Ammo zamonaviy ishlab chiqarishdagi murakkab geometrik o'lchovlar, chiziqsiz sensorlar va ko'p o'lchovli ma'lumotlar oqimlari ushbu taxminning qo'llanilish doirasini toraytiradi. Shu sababli klassik GUM yondashuvi

zamonaviy o'lchash muammolarining bir qismiga to'liq javob bera olmaydi va uni to'ldiruvchi usullar faol tadqiq etilmoqda [5, 14].

3.2. Bayes yondashuviga asoslangan noaniqlik baholash

Bayes yondashuvida noaniqlik oldindan ma'lum bilimlar va kuzatuvlar asosida yangilanuvchi ehtimollik taqsimoti sifatida ifodalanadi:

$$P(\theta|D) = P(D|\theta) \cdot P(\theta) / P(D)$$

bu yerda θ - model parametrlari, D - kuzatilgan ma'lumotlar. Bayes neyron tarmoqlari (BNN) har bir og'irlik parametriga deterministik qiymat o'rniga ehtimollik taqsimotini belgilaydi, bu esa prognoz noaniqligini to'g'ridan-to'g'ri modellashtirish imkonini beradi. Cramer, Huber va Schmitt tadqiqotida BNN asosidagi noaniqlikni miqdoriy baholash tizimi ishlab chiqilgan va sifatni bashoratlash (predictive quality) masalasida qo'llanilgan [5].

SI asosidagi o'lchovlarda noaniqlik ikki asosiy komponentga ajratiladi: (1) aleatorik noaniqlik jarayonning o'ziga xos tasodifiyligidan kelib chiqadi va kamaytirib bo'lmaydi; (2) epistemik noaniqlik bilim yetishmasligidan kelib chiqadi va qo'shimcha ma'lumot bilan kamaytirilishi mumkin [6, 17]. Ushbu farqlash klassik GUM tasnifida oshkora ko'rinishda mavjud emas va u SI usullarining metrologik tahlilga qo'shayotgan muhim nazariy hissalaridan biri hisoblanadi.

3.3. Fizika bilan bog'langan neyron tarmoqlar (PINN)

PINN neyron tarmoq yo'qotish funksiyasiga differensial tenglamalar shaklida fizik qonunlarni qo'shish orqali o'lchash modelining ishonchliligini oshiruvchi texnologiyadir:

$$L_total = L_data + \lambda \cdot L_physics$$

bu yerda L_data - kuzatilgan ma'lumotlar bilan moslik yo'qotmasi, L_physics - fizik qonunlarga muvofiqlik yo'qotmasi, λ - muvozanat koeffitsiyenti. Xu va Wang taqqoslama tahlilida fizika bilan bog'langan Bayes neyron tarmoqlari (PG-BNN) ma'lumotlar kam va shovqinli bo'lgan sharoitda odatiy neyron tarmoqlarga nisbatan barqarorroq umumlashtirish imkonini berishi ko'rsatilgan [6].

4. O'LCHASH TIZIMLARIDA QO'LLANILADIGAN ASOSIY SI TEXNOLOGIYALARI

4.1. Neyron tarmoq arxitekturalari va ularning qo'llanish sohalari

O'lchash tizimlarida turli neyron tarmoq arxitekturalari qo'llaniladi; ularning har biri muayyan o'lchash muammosiga moslashtirilgan. 1-jadvalda asosiy arxitekturalar va ularning metrologik qo'llanilish sohalari umumlashtirilgan [1, 5, 6, 8, 17].

1-jadval. Neyron tarmoq arxitekturalari va ularning o'lchash tizimlaridagi qo'llanilishi

Arxitektura	To'liq nomi	O'lchash tizimida qo'llanilish sohasi
CNN	Konvolyutsion neyron tarmoq	Yuza nuqsonlarini optik aniqlash, koordinatali o'lchash, tasvirga asoslangan nazorat
LSTM	Uzoq qisqa muddatli xotira	Vaqt qatorlari, sensor degradatsiyasini prognozlash
GNN	Grafli neyron tarmoq	Sensorlar tarmog'idagi o'zaro bog'liqliklarni modellashtirish
BNN	Bayes neyron tarmog'i	Noaniqlikni miqdoriy baholash, ishonch intervallari bilan bashorat

PINN	Fizika bilan bog'langan neyron tarmoq	Fizik qonunlar bilan cheklangan o'lchash modellari
Autoencoder	Avtokoder	Anomaliya aniqlash, belgilanmagan ma'lumotlardan xususiyat ajratish
Transformer	E'tibor mexanizmiga asoslangan arxitektura	Ko'p o'lchovli signal tahlili, holat bashorati

4.2. Virtual metrologiya (VM) texnologiyasi

Virtual metrologiya ishlab chiqarish jarayoni davomida bevosita o'lchab bo'lmaydigan yoki har bir mahsulotda o'lchash iqtisodiy jihatdan maqsadga muvofiq bo'lmagan parametrlarni jarayon ma'lumotlari asosida SI modellari yordamida baholash texnologiyasidir. Zhang, Li va Yu sharhida VM ning «nol nuqsonli ishlab chiqarish» (Zero-Defect Manufacturing) kontseptsiyasi bilan munosabati tahlil qilingan: VM tanlab olib tekshirishni onlayn va real vaqtli to'liq nazoratga aylantirish imkonini beradi [7].

VM ning matematik asosi regressor funksiyadir:

$$\hat{y}(k) = f(x_1(k), x_2(k), ..., x_n(k), u_1(k), ..., u_m(k))$$

bu yerda $\hat{y}(k)$ - k-bosqichdagi virtual o'lchov qiymati, $x_i(k)$ - jarayon sensorlaridan olingan ma'lumotlar, $u_j(k)$ - texnologik jarayon boshqaruv kirishlari. Ushbu funksiyani chuqur o'rganish modellari orqali qurish xususiyatlarni qo'lda ajratish bosqichini avtomatlashtiradi: Maggipinto va boshqalarning DeepVM yondashuvi ikki o'lchovli kirish ma'lumotlari uchun xususiyatlarni avtomatik ajratishni amalga oshiradi [19], Yang va Ge esa yirik jarayon ma'lumotlari uchun variatsion Bayes regressiyasiga asoslangan sanoat virtual sensorlarini taklif etgan [20].

Hsieh va boshqalar konvolyutsion avtokoder va ko'chirma o'rganish (transfer learning) asosidagi avtomatik VM sxemasini ishlab chiqqan; bunday yondashuv juftlangan o'quv ma'lumotlari kam bo'lgan sharoitda ham model aniqligini saqlashga xizmat qiladi [8].

4.3. Ko'p sensor ma'lumotlarini birlashtirish (Multi-Sensor Fusion, MSF)

MSF texnologiyasi turli fizik tabiatli sensorlardan keladigan ma'lumotlarni bitta izchil o'lchov natijasiga birlashtiradi. Ushbu jarayon uch darajada amalga oshiriladi.

Birinchi daraja, xom ma'lumotlar darajasi: turli sensorlardan kelgan signallar yagona fazoviy-vaqt koordinatalariga keltiriladi (sinxronizatsiya va kalibratsiya). Ikkinchi daraja, xususiyatlar darajasi: har bir sensordan ajratib olingan xususiyatlar vektorlari birlashtiriladi va umumiy xususiyatlar maydoni yaratiladi. Uchinchi daraja, qaror darajasi: mustaqil sensorlarga asoslangan xulosalar og'irliklangan birlashtirish yoki Dempster-Shafer nazariyasi orqali yakuniy xulosaga keltiriladi.

Klassik MSF algoritmlarida kengaytirilgan Kalman filtri (EKF) va uning variantlari keng qo'llaniladi. So'nggi tadqiqotlar filtrlash sxemalarini mashinaviy o'rganish bilan boyitish yo'nalishida rivojlanmoqda: Tommingas va boshqalar (2025) UWB va GNSS sensorlarini birlashtirishda har bir sensorning pozitsiyalash noaniqligini XGBoost modellari yordamida baholab, ichki va tashqi muhitlar orasidagi o'tish zonalarida uzluksiz va barqaror pozitsiyalashga erishgan [9]. Bu misol sensor noaniqligini SI yordamida adaptiv baholash birlashtirilgan yechim ishonchliligini oshirishini ko'rsatadi.

5. RAQAMLI EGIZAK TEXNOLOGIYASI VA UNING O'LCHASH TIZIMLARIGA INTEGRATSIYASI

Raqamli egizak (Digital Twin, DT) fizik tizimning dinamik virtual modeli bo'lib, real vaqtda sensorlardan ma'lumot oladi, jarayonni simulyatsiya qiladi va boshqaruv signallarini qaytaradi. O'lchash tizimlarida DT ning roli uch bosqichni qamrab oladi (2-jadval).

2-jadval. Raqamli egizakning o'lchash tizimlaridagi funksiyalari

Bosqich	Funksiya	Texnologik mexanizm	Manba
1. Tasvirlash	Fizik holatni monitoring qilish	Real vaqtli sensor ma'lumotlarini DT ga uzatish (IoT protokollari)	[3]
2. Simulyatsiya	Kelajak holatlarini bashorat qilish	Monte-Karlo simulyatsiyasi, PINN asosidagi prognoz	[10]
3. Optimizatsiya	O'lchash strategiyasini moslashtirish	Ma'lumotlarga asoslangan sifat boshqaruvi platformalari bilan integratsiya	[11]

Samadi, Ahsan va Raman tomonidan taklif etilgan MM-DT (Metrology and Manufacturing-Integrated Digital Twin) tizimi koordinatali o'lchash mashinasi (CMM) va FARO Arm qurilmalaridan olingan ma'lumotlarni sifatni real vaqtda baholash va bashoratli tahlil uchun birlamchi manba sifatida qo'llaydi. 20 ta detal ikki xil harorat sharoitida o'lchangan tajribada ansambl mashinaviy o'rganish modellari $R^2 = 0{,}91$ determinatsiya koeffitsiyentiga erishgan va o'rtacha kvadratik xato (RMSE) 1,59 mkm ni tashkil etgan [12].

DT texnologiyasining metrologik tizimlar bilan integratsiyasi o'lchash tsikli kontseptsiyasini o'zgartiradi: an'anaviy «o'lchash, tahlil, hisobot» ketma-ketligidan «uzluksiz monitoring, real vaqtda tahlil, avtomatik tuzatish» paradigmasiga o'tish kuzatilmoqda [15].

6. TAKLIF ETILAYOTGAN METODOLOGIK YONDASHUVLAR

Adabiyotlar tahlili asosida mualliflar quyidagi ikki metodologik yondashuvni taklif etadi.

1. **GUM tasnifini aleatorik-epistemik ajratish bilan bog'lovchi ifoda.** Mashinaviy o'rganish adabiyotida qabul qilingan aleatorik va epistemik komponentlarga ajratish [5, 6, 17] GUM belgilagan umumlashtirilgan noaniqlik bilan quyidagi ko'rinishda muvofiqlashtirilishi mumkin:

$$u_SI(y) = \sqrt{[u_a^2(y) + u_e^2(y)]}$$

bu yerda $u_a(y)$ - jarayon tasodifiyligidan kelib chiquvchi aleatorik komponent, $u_e(y) = f(D, M)$ - ma'lumotlar to'plami hajmi D va model murakkabligi M ga bog'liq epistemik komponent. Ushbu yozuv GUM ning A va B tur noaniqliklari bilan bevosita bir xil emas: A/B tasnifi baholash usuliga, aleatorik/epistemik tasnifi esa noaniqlikning tabiatiga asoslanadi. Taklif etilayotgan ifoda ikkala tasnifni Bayes tizimlarida birga qo'llash uchun amaliy ko'prik vazifasini bajaradi va uni GUM ga to'liq muvofiqlashtirish alohida tadqiqot mavzusi bo'lib qoladi.

2. SI texnologiyalarining o'lchash tsikli bosqichlari bo'yicha tasnifi. Mavjud adabiyotlarda SI texnologiyalari ko'pincha alohida-alohida ko'rib chiqiladi. Quyida ular o'lchash tsiklining yetti bosqichi bo'yicha tartiblashtiriladi (3-jadval). Tasnif amaliy tatbiq uchun uslubiy mo'ljal vazifasini bajaradi.

3-jadval. O'lchash tsikli bosqichlari bo'yicha SI texnologiyalarining taklif etilayotgan tasnifi

O'lchash tsikli bosqichi	Qo'llaniladigan SI texnologiyasi	Asosiy funksiya
1. Rejalashtirish	Mustahkamlantirilgan o'rganish (RL)	Optimal o'lchov nuqtalari va namunalash strategiyasini tanlash
2. Ma'lumot to'plash	Aqlli sensorlar, MSF	Ko'p sensordan izchil ma'lumot olish
3. Signalni qayta ishlash	CNN, LSTM, Kalman filtri	Shovqinni filtrlash, anomaliyalarni aniqlash
4. Noaniqlikni baholash	BNN, Monte-Karlo dropout	Aleatorik va epistemik komponentlarni ajratish
5. Virtual o'lchov	Virtual metrologiya, DT	Bevosita o'lchab bo'lmaydigan parametrlarni baholash
6. Qaror qabul qilish	Izohlanuvchan SI (XAI), ekspert tizimlar	Izohlash mumkin bo'lgan xulosalar chiqarish
7. Nazorat va qayta aloqa	Raqamli egizak, adaptiv boshqaruv	Jarayonni adaptiv boshqarish

2. **Texnik-iqtisodiy samaradorlikni kompleks baholashning kontseptual modeli.** SI asosidagi o'lchash tizimini joriy etish samarasini yagona ko'rsatkichda ifodalash uchun quyidagi kontseptual model taklif etiladi:

3.

$$E_SI = \alpha\cdot(1 - \varepsilon/\varepsilon_0) + \beta\cdot(T_0/T) + \gamma\cdot(C_0 - C)/C_0$$

bu yerda $\varepsilon/\varepsilon_0$ - nisbiy xato kamayishi, T_0/T - tezlik oshishi koeffitsiyenti, $(C_0 - C)/C_0$ - nisbiy xarajat tejamkorligi; α, β, γ - tarmoqqa xos og'irlik koeffitsiyentlari ($\alpha + \beta + \gamma = 1$) bo'lib, ular ekspert baholash yoki ko'p mezonli qarorlar qabul qilish usullari orqali aniqlanadi. Modelning empirik verifikatsiyasi, ya'ni og'irlik koeffitsiyentlarini real sanoat ma'lumotlari asosida aniqlash, mualliflarning keyingi tadqiqotlari doirasida amalga oshirilishi rejalashtirilgan.

7. SANOAT TATBIQLARI: ADABIYOTLARDA HUJJATLANGAN NATIJALAR

SI asosidagi o'lchash yechimlarining turli sohalardagi joriy etilishi ilmiy adabiyotlarda faol yoritilmoqda. 4-jadvalda tekshirilgan birlamchi manbalarda hujjatlangan ayrim natijalar keltirilgan.

4-jadval. SI asosidagi o'lchash yechimlarining adabiyotlarda hujjatlangan natijalari

Soha	Qo'llanilgan SI yondashuvi	Hujjatlangan natija	Manba
Yarimo'tkazgichlar ishlab chiqarish	Konvolyutsion avtokoder va transfer learning asosidagi avtomatik VM	Juftlangan ma'lumotlar kam sharoitida bashorat aniqligini saqlash	[8]

Yarimo'tkazgichlar ishlab chiqarish	Onlayn Gauss jarayoni (OGP) asosidagi VM va adaptiv namunalash	Ma'lumotlar siljishini kuzatgan holda zarur metrologik o'lchovlar hajmini kamaytirish	[13]
Mashinasozlikda sifat nazorati	MM-DT: metrologiya bilan integratsiyalangan raqamli egizak, ansambl ML	$R^2 = 0,91$; RMSE = 1,59 mkm (CMM va FARO Arm ma'lumotlari)	[12]
Texnik tizimlar diagnostikasi	BNN va Monte-Karlo dropout asosida qoldiq resurs (RUL) bashorati	Nuqtaviy baho o'rniga ishonch intervallari bilan bashorat	[17]
Navigatsiya va pozitsiyalash	UWB va GNSS ma'lumotlarini ML asosidagi noaniqlik baholash bilan birlashtirish	Ichki-tashqi o'tish zonalarida pozitsiyalash barqarorligini oshirish	[9]
Quyma sifatini bashoratlash	BNN asosidagi noaniqlik miqdoriy baholash	Sifat ko'rsatkichlarini noaniqlik bahosi bilan bashoratlash	[5]

7.1. Amaliy misol: yarimo'tkazgich ishlab chiqarishda virtual metrologiya

Yarimo'tkazgich sanoatida ayrim texnologik bosqichlarda qatlam qalinligini har bir mahsulot uchun real vaqtda fizik o'lchash amalda mumkin emas yoki juda qimmat. Virtual metrologiya modeli jarayon sensorlaridan (bosim, harorat, radiochastota quvvati, gaz oqimi) ma'lumot olib, o'rgatilgan model orqali qatlam qalinligini baholaydi:

$$\hat{t}(k) = f_VM(p(k), T(k), RF(k), Q(k)) \pm u_VM(k)$$

bu yerda $\hat{t}(k)$ - VM tomonidan bashorat qilingan qatlam qalinligi, u_VM(k) - unga mos noaniqlik bahosi. Han va boshqalar (2025) tadqiqotida VM usullarining taqqoslama tahlili o'tkazilgan va noaniqlik bahosidan namunalash strategiyasini boshqarishda foydalanuvchi onlayn Gauss jarayoni modeli taklif etilgan [13].

8. O'ZBEKISTON KONTEKSTIDA SI ASOSIDAGI O'LCHASH TIZIMLARINING RIVOJLANISHI

O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2024-yil 14-oktabrdagi PQ-358-son qarori bilan «Sun'iy intellekt texnologiyalarini 2030-yilga qadar rivojlantirish strategiyasi» tasdiqlangan. Mazkur strategiya iqtisodiyot tarmoqlarida, jumladan sanoatda, SI yechimlarini joriy etishni ustuvor yo'nalish sifatida belgilaydi.

Milliy metrologiya va standartlashtirish tizimida SI ning joriy etilishi quyidagi ilmiy-amaliy masalalarni hal etishni talab qiladi: birinchidan, milliy kalibratsiya laboratoriyalarida SI asosidagi noaniqlik baholash usullarini joriy etish va ularning xalqaro metrologik hujjatlar (JCGM, BIPM tavsiyalari) bilan muvofiqligini ta'minlash; ikkinchidan, metrologik izchillik zanjirini raqamli hujjatlashtirishga o'tkazish, bu O'zbekistonning xalqaro o'zaro tan olish tizimlariga integratsiyalashuviga xizmat qiladi; uchinchidan, erkin iqtisodiy zonalar va texnoparklar korxonalarida SI asosidagi ichki (inline) sifat nazorati yechimlarini bosqichma-bosqich sinovdan o'tkazish orqali mahalliy ishlab chiqarish raqobatbardoshligini oshirish.

9. ILMIY-TEXNIK MUAMMOLAR VA YECHIM YO'NALISHLARI

SI asosidagi o'lchash tizimlarini amalda keng joriy etishda bir qator ilmiy-texnik to'siqlar mavjud. Ularning zamonaviy adabiyotlarda muhokama qilinayotgan holati 5-jadvalda umumlashtirilgan.

5-jadval. Asosiy muammolar va taklif etilayotgan yechim yo'nalishlari

Muammo	Ilmiy tavsifi	Yechim yo'nalishi	Manba
Izohlanuvchanlik (XAI)	«Qora quti» modellari metrologik ishonchlilik talablarini qondirmaydi	Model xatosi va o'lchov noaniqligini ajratish, izohlash mexanizmlari (SHAP, LIME va b.)	[14]
Ma'lumot yetishmasligi	Kalibratsiya va metrologiya ma'lumotlari ko'pincha cheklangan	Transfer learning, avtokoderlar, adaptiv namunalash	[8, 13]
Real vaqt talabi	Chuqur modellar hisoblash resurslarini ko'p talab qiladi	Integratsiyalangan metrologiya arxitekturalari, hisoblashni optimallashtirish	[15]
Metrologik izchillik	Sensor tarmoqlari uchun kalibratsiya va noaniqlik tarqalishini qayta ko'rib chiqish zarur	Sensor tarmoqlari metrologiyasining fundamental asoslarini ishlab chiqish	[16]
Ma'lumotlar sifati	Sensor degradatsiyasi va kalibratsiya siljishi model aniqligini pasaytiradi	Noaniqlikni hisobga oluvchi bashorat modellari, holat monitoringi	[17]
Raqamli transformatsiya	Metrologik xizmatlarning raqamli ekotizimi hali shakllanish bosqichida	Metrologiyaning «raqamli avatari» kontseptsiyasi, raqamli kalibratsiya sertifikatlari	[18]

10. XULOSA

O'tkazilgan tahliliy sharh asosida quyidagi xulosalar chiqarildi.

1. Sun'iy intellekt texnologiyalari o'lchash jarayonlarida klassik GUM yondashuvi qamrab olmagan imkoniyatlarni ochib beradi: noaniqlikni aleatorik va epistemik komponentlarga ajratish metrologik tahlilga yangi sifat qatlamini qo'shadi, PINN va Bayes usullari esa ma'lumotlar kam sharoitida ham asoslangan baho olish imkonini beradi [5, 6, 14].

2. Taklif etilayotgan tasnif (3-jadval) SI texnologiyalarini o'lchash tsiklining yetti bosqichi bo'yicha tartiblashtiradi va amaliy tatbiq uchun uslubiy mo'ljal yaratadi.

3. Tahlil qilingan birlamchi manbalarda hujjatlangan natijalar (4-jadval) SI asosidagi yechimlar o'lchov bashorati aniqligini yuqori darajada saqlagan holda fizik o'lchovlar hajmini kamaytirishi, noaniqlikni oshkora baholashi va sifat nazoratini real vaqt rejimiga o'tkazishi mumkinligini ko'rsatadi [8, 12, 13].

4. Virtual metrologiya va raqamli egizak texnologiyalari «nol nuqsonli ishlab chiqarish» kontseptsiyasini amalga oshirishning texnologik asosiga aylanib bormoqda va bu yo'nalishda chuqurroq tadqiqotlar zarur [7, 12].

5. Izohlanuvchanlik, real vaqt talabi va xalqaro darajada standartlashtirish sohaning eng dolzarb ochiq muammolari bo'lib qolmoqda [14, 15, 16].

Kelgusi tadqiqotlar uchun ustuvor yo'nalishlar sifatida quyidagilar belgilandi: (a) taklif etilgan u_SI ifodasini GUM qo'shimchalari (JCGM 101) bilan muvofiqlashtirish metodikasini ishlab chiqish; (b) E_SI modelining og'irlik koeffitsiyentlarini real sanoat ma'lumotlari asosida empirik aniqlash; (c) O'zbekiston sanoat korxonalarida SI asosidagi inline o'lchov yechimlarini pilot rejimda joriy etish va samaradorligini ilmiy baholash.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR RO'YXATI

1. Wieczorowski M., Kucharski D., Sniatala P., Pawlus P., Krolczyk G., Gapinski B. A novel approach to using artificial intelligence in coordinate metrology including nano scale. Measurement. 2023.
2. 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.
3. Maculotti G., Genta G., Galetto M., Franceschini F. A shared metrological framework for trustworthy virtual experiments and digital twins. Metrology. 2024.
4. JCGM 100:2008. Evaluation of measurement data. Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM). Joint Committee for Guides in Metrology, 2008.
5. Cramer S., Huber M., Schmitt R.H. Uncertainty Quantification Based on Bayesian Neural Networks for Predictive Quality. Artificial Intelligence, Big Data and Data Science in Statistics, Eds. Steland A., Tsui K.-L. Cham: Springer, 2022.
6. Xu X., Wang J. Comparative Analysis of Physics-Guided Bayesian Neural Networks for Uncertainty Quantification in Dynamic Systems. Forecasting. 2025.
7. Zhang Y., Li L., Yu Q. Virtual metrology for enabling zero-defect manufacturing: a review and prospects. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2024.
8. Hsieh Y.-M., Wang T.-J., Lin C.-Y., Tsai Y.-F., Cheng F.-T. Convolutional Autoencoder and Transfer Learning for Automatic Virtual Metrology. IEEE Robotics and Automation Letters. 2022.
9. Tommingas M., Laadung T., Varbla S., Müürsepp I., Alam M.M. UWB and GNSS Sensor Fusion Using ML-Based Positioning Uncertainty Estimation. IEEE Open Journal of the Communications Society. 2025.
10. Leach R., Bointon P., Dickins A., Newton L., Thompson A., Todhunter L. Integrated Metrology: 10-Year Roadmap for Advanced Manufacturing. High Value Manufacturing Catapult, University of Nottingham, 2020.
11. Filz M.-A., Bosse J.P., Herrmann C. Digitalization platform for data-driven quality management in multi-stage manufacturing systems. Journal of Intelligent Manufacturing. 2024.
12. Samadi H., Ahsan M.M., Raman S. Metrology and manufacturing-integrated digital twin (MM-DT) for advanced manufacturing: insights from coordinate measuring machine (CMM) and FARO Arm measurements. Next Research. 2025.
13. Han X., Miller M., Moyne J., Vogl G.W., Penkova A., Jia X. A Comparative Study of Semiconductor Virtual Metrology Methods and Novel Algorithmic Framework for Dynamic Sampling. IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing. 2025.
14. Huber M., Müller T., Schmitt R.H. Differentiation between model error and measurement uncertainty in machine learning modeling for measurement processes. Measurement: Sensors. 2025.
15. Archenti A., Gao W., Donmez A., Savio E., Irino N. Integrated metrology for advanced manufacturing. CIRP Annals. 2024.
16. Eichstädt S., Vedurmudi A.P., Gruber M., Hutzschenreuter D. Fundamental aspects in sensor network metrology. Acta IMEKO. 2023.

17. Ochella S., Dinmohammadi F., Shafiee M. Bayesian neural networks for uncertainty quantification in remaining useful life prediction of systems with sensor monitoring. Advances in Mechanical Engineering. 2024.
18. Rab S., Yadav S., Haleem A., Javaid M. Digital avatar of metrology. MAPAN - Journal of Metrology Society of India. 2023.
19. Maggipinto M., Beghi A., McLoone S., Susto G.A. DeepVM: A Deep Learning-based approach with automatic feature extraction for 2D input data Virtual Metrology. Journal of Process Control. 2019.
20. Yang Z., Ge Z. Industrial Virtual Sensing for Big Process Data Based on Parallelized Nonlinear Variational Bayesian Factor Regression. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2020.