RAQAMLI METROLOGIYA — SANOAT 4.0 TEXNOLOGIYALARINING ASOSI SIFATIDAGI O‘RNI

Mamajonov Abduvohid
Andijon davlat texnika instituti dotsenti
Email: abduvohid.mamjonov@mail.ru
Abdujabborov Obidjon
Andijon davlat texnika instituti doktoranti
Email: abdujabborovobidjon@gmail.com;
Tel: + 998 94 383 00 91

Annotoatsiya: Maqolada sanoat inqilobi vujudga kelish tarixi, metrologiya rivojlanishining sanoat inqilobiga ta’siri, sanoat inqilobi rivojlanishini atrof muhit va xavfsizlikka ijobiy ta’sirini statistik manbaalar asosida yoritganmiz hamda metrologik axborot tizimlari (MIIS), LIMS (Laboratoriya Axborot Tizimlari), avtomatik kalibrlash tizimlari, raqamli transformatsiya sharoitida milliy metrologiya institutlarining tutgan o‘rni haqida yoritganmiz.

Kalit so‘zlar: Metrologiya, Sanoat 4.0, kiber-fizik tizimlar, IoT, raqamli o‘lchovlar, kalibrlash, o‘lchov aniqligi, MIIS, ISO/IEC 17025, Big Data, robototexnika, sun’iy intellekt, sifat menejmenti, LIMS, sensor tarmoqlar.

Abstract: The article covers the history of the industrial revolution, the impact of metrology development on the industrial revolution, the positive impact of the industrial revolution development on the environment and safety based on statistical sources, and also covers metrological information systems (MIIS), LIMS (Laboratory Information Systems), automatic calibration systems, and the role of national metrology institutes in the context of digital transformation.

Keywords: Metrology, Industry 4.0, cyber-physical systems, IoT, digital measurements, calibration, measurement accuracy, MIIS, ISO/IEC 17025, Big Data, robotics, artificial intelligence, quality management, LIMS, sensor networks.

Аннотация: В статье мы освещаем историю возникновения промышленной революции, влияние развития метрологии на промышленную революцию, положительное влияние развития промышленной революции на окружающую среду и безопасность на основе статистических источников, а также метрологические информационные системы (МИС), ЛИМС (Лабораторные информационные системы), системы автоматической калибровки, роль национальных метрологических институтов в условиях цифровой трансформации.

Ключевые слова: Метрология, Индустрия 4.0, кибер-физические системы, IoT, цифровые измерения, калибровка, точность измерений, MIIS, ISO/IEC

ISSN 3030-3907

17025, Big Data, робототехника, искусственный интеллект, менеджмент качества, LIMS, сенсорные сети.

Kirish

XXI asr insoniyat uchun texnologik inqiloblar davri sifatida tarixda qolmoqda. Bugungi raqamli jamiyatning negizida to‘rt bosqichli sanoat inqilobi yotadi. Har bir inqilob ishlab chiqarish, texnika va texnologiyalar sohasida tub o‘zgarishlarga olib keldi. Quyidagi jadvalda sanoat inqiloblari evolyutsiyasi qisqacha ko‘rsatilgan:

1-jadval.

Sanoat inqiloblari taqqoslamasi [1,2,3]

Inqilob bosqichi	Asosiy texnologiya	Vaqti	Asosiy natija
1-Sanoat inqilobi	Bug‘ dvigateli, to‘quv stanogi	XVIII asr oxiri	Qo‘l mehnatidan mashinaga o‘tish
2-Sanoat inqilobi	Elektr, konveyer liniyasi	XIX asr oxiri	Massaviy ishlab chiqarish
3-Sanoat inqilobi	Kompyuter, avtomatlashtirish	XX asr o‘rtasi	Raqamli boshqaruv, robototexnika
4-Sanoat inqilobi	IoT, sun’iy intellekt, CPS	XXI asr boshidan	Aqlli ishlab chiqarish, raqamli integratsiya

Sanoat 4.0 – bu texnologiyalarning uzluksiz rivoji va ularning integratsiyalashgan shakli bo‘lib, bu model aqlli ishlab chiqarish, sun’iy intellekt, sensorli tarmoqlar, real vaqt monitoringi va big data (katta ma’lumotlar) tahliliga asoslanadi. Bu holat butun dunyo bo‘ylab ishlab chiqarish tizimlarining tubdan o‘zgarishiga sabab bo‘lmoqda.

Metrologiya bu inqilobning asosiy funksional komponenti sifatida maydonga chiqdi. Chunki butun Sanoat 4.0 texnologiyalari – raqamli asboblar, robotlar, sun’iy intellekt algoritmlari, 3D printlash va aqlli tarmoqlar – aniq, barqaror va izchil o‘lchovlarga tayanadi. Metrologiyasiz, bu tizimlarning birortasi ishonchli ishlay olmaydi.

2023-yilgi ISO tomonidan e’lon qilingan hisobotga ko‘ra:

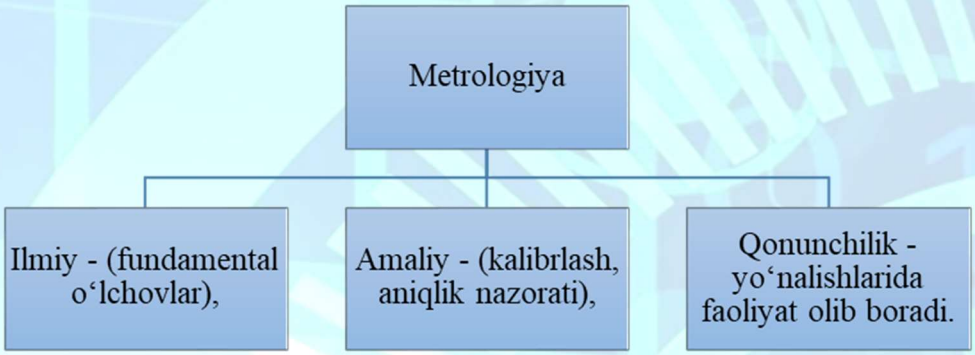
“Ishlab chiqarish korxonalarida metrologik nazorat yo‘lga qo‘yilgan holatlarda aniqlik 98% gacha, ishlab chiqarish tannarxi esa o‘rtacha 18–26% ga kamaygan [4].”

Metrologiya fan sifatida qadimdan mavjud bo‘lib, qadimgi Misrda Nil daryosi toshqinini o‘lchash uchun ilk geometrik va fizik o‘lchov birliklari

ISSN 3030-3907

qo‘llanilgan. Biroq uning tizimli va xalqaro shaklda rivojlanishi XIX asrda Frantsiyada SI (Système International d’Unités) birliklar tizimi qabul qilingach boshlandi.

Bugungi kunda metrologiya:



1-rasm. Metrologiya sohasining yo‘nalishi.

Sanoat 4.0 kontekstida bu uchala yo‘nalish raqamli metrologik tizimlarda birlashmoqda. Masalan, o‘lchov vositalari real vaqtda LIMS tizimi orqali boshqarilmoqda, kalibrlash jarayonlari MIIS (Metrological Information and Integration System) orqali avtomatlashtirilgan, hamda o‘lchov xatoliklarini sun’iy intellekt tahlil qilmoqda.

Sanoat 4.0 inqilobi barcha sohalarda raqamlashtirishni jadallashtirdi. Bu esa o‘z navbatida metrologiyaning roli va ahamiyatini orttirdi. Chunki ishonchli o‘lchovlarsiz raqamli tizimlar ishsiz qoladi. Shuning uchun metrologiya – bu Sanoat 4.0’ning yuragi, negizi va kafolatidir.

NAZARIY-METODOLOGIK ASOSLAR

Sanoat 4.0 konsepsiyasi shiddat bilan rivojlanayotgan bir davrda metrologiyaning nazariy asoslari va uni amaliyotga tadbiq etish metodologiyasi mutlaqo yangi formatda shakllanmoqda. Metrologiya fanining zamonaviy talqinida, o‘lchov jarayonlarini faqat fizik birliklarga bog‘lab baholash yetarli emas. Endilikda u raqamli axborot tizimlari, kalibrlash algoritmlari, sun’iy intellekt va tizimli monitoring bilan bog‘liq bo‘lgan kompleks ilmiy metodologiyaga aylanmoqda.

Metrologiya faoliyatining asosiy metodologik negizini ISO/IEC 17025:2017 standarti tashkil etadi. Bu standart sinov va kalibrlash laboratoriyalarining kompetentligini, o‘lchov ishonchliligi va kuzatiluvchanligini ta'minlaydi. Quyidagi jadvalda sanoatdagi metrologik nazoratni belgilovchi asosiy standartlar ko‘rsatilgan:

2- jadval.

Sanoatda qo‘llaniladigan metrologik standartlar [5].

Standart nomi	Tavsifi

ISSN 3030-3907

ISO/IEC 17025:2017	Kalibrovka va sinov laboratoriyalari uchun umumiy talablar
ISO 10012	O‘lchov jarayonlari va o‘lchash uskunalarining boshqaruvi
ISO 9001:2015	Sifat menejmenti tizimlarida o‘lchovlarni aniqlik bilan boshqarish
OIML D1	Huquqiy metrologiya bo‘yicha xalqaro qo‘llanma
GUM (Guide to Uncertainty)	O‘lchovdagi noaniqliklarni hisoblash metodologiyasi

O‘lchovlar aniqligini baholashning matematik modeli

O‘lchovlar natijasi faqat nominal qiymat bilan cheklanmaydi. Har qanday o‘lchov ma'lum darajada noaniqlikka ega bo‘ladi. Noaniqlikni baholashda quyidagi umumiy formula qo‘llaniladi:

$$U = k * \sqrt{U_1^2 + U_2^2 + \ldots + U_n^2}$$

Bu yerda:

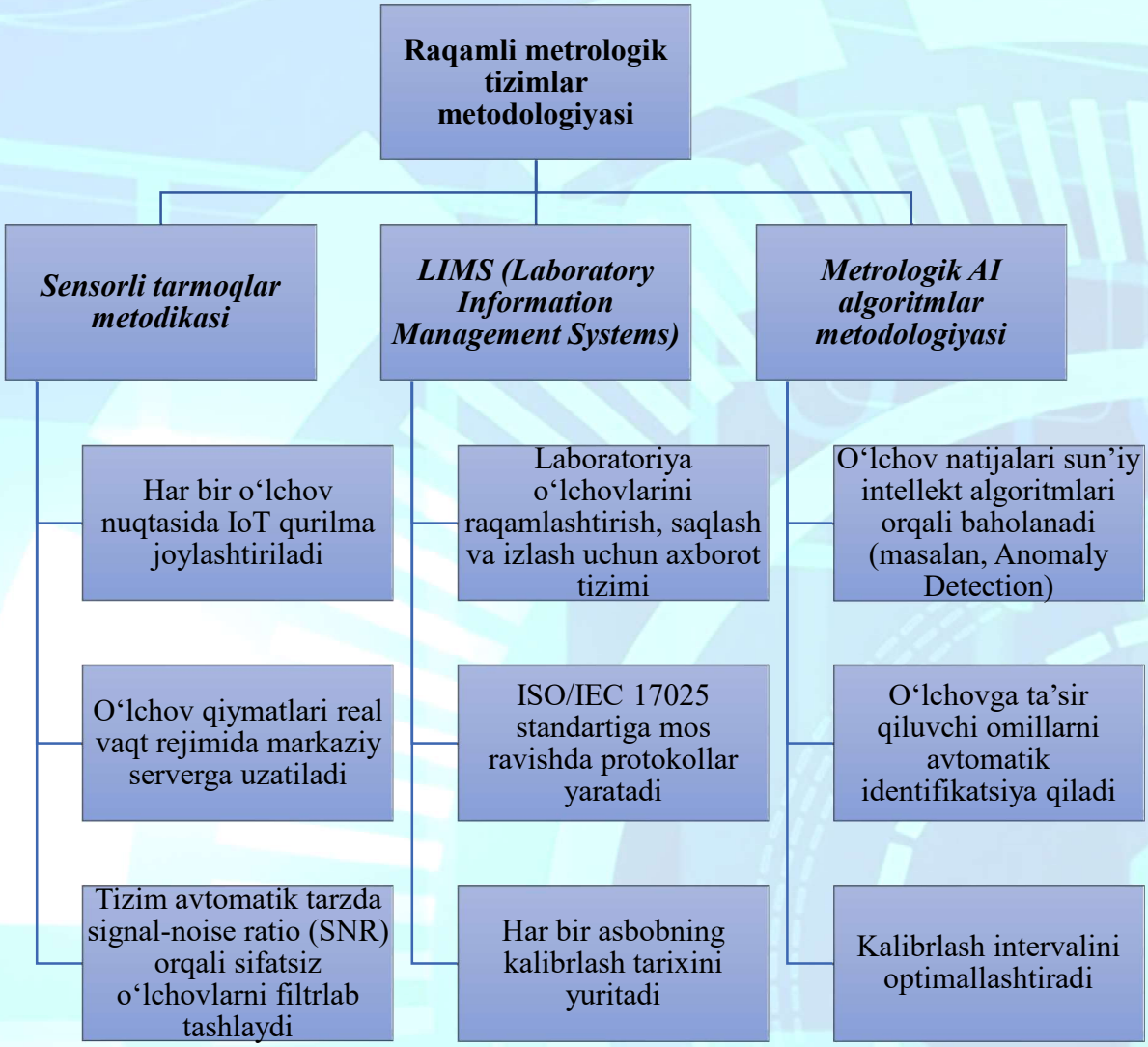
- U – kengaytirilgan o‘lchov noaniqligi
- k – qamrov koeffitsienti (odatda k=2, bu 95% ishonchlilik darajasini beradi)
- U_1, U_2, …, U_n,– individual noaniqlik komponentlari (asbob xatoligi, muhit ta’siri, operator farqi va boshqalar)

Metrologiyada bu model GUM (Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement) tomonidan tavsiya etilgan bo‘lib, sun’iy intellekt asosidagi kalibrovka tizimlarida avtomatik hisoblanadi.

Raqamli metrologik tizimlar metodologiyasi

Sanoat 4.0 muhitida o‘lchov tizimlari quyidagi metodologik yondashuvlar asosida ishlaydi:

ISSN 3030-3907



2-rasm. Raqamli metrologik tizimlar metodologiyasi

Statistika asosida kalibrovka intervallarini aniqlash

Kalibrlash intervallarini aniqlashda quyidagi statistik model asos bo‘ladi:

$$I = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} * t_{\alpha}$$

Bu yerda:

- I – ishonch oralig‘i (intervall),
- σ – dispersiya,
- n – o‘lchovlar soni,
- t α – Student koeffitsienti (95% ishonch uchun tα=2.045)

Bu formula yordamida qurilmalarni qayta kalibrlash zarurligini aniqlash mumkin, bu esa xizmat ko‘rsatish xarajatlarini 15–30% ga kamaytiradi [6].

Xalqaro metrologik infratuzilmaning metodik roli

Metrologiya global tarmoq bo‘lib, quyidagi tashkilotlar ilmiy asoslarni ishlab chiqadi:

- BIPM – xalqaro birliklar tizimini yuritadi

ISSN 3030-3907

- CIPM – metrologik texnik qo‘llanmalarni ishlab chiqadi
- OIML – qonunchilik metrologiyasini nazorat qiladi
- ILAC – laboratoriyalarni akkreditatsiyalashni metodik jihatdan nazorat qiladi

Shu metodologik infratuzilma orqali metrologiya Sanoat 4.0 muhitida izchil va global darajada ishlay oladigan fan sohasiga aylangan.

Nazariy-metodologik asoslar shuni ko‘rsatadiki, metrologiya Sanoat 4.0 ni qo‘llab-quvvatlovchi fan bo‘lib, raqamli tizimlarning ishlashi, mahsulot sifati, xavfsizlik va xalqaro moslik uchun ilmiy asos yaratadi. Bu metodologiyalar har bir korxonada kalibrlash, monitoring, AI integratsiyasi kabi muhim jarayonlarni samarali boshqarishga yordam beradi.

TAHLILIY-AMALIY QISM

Sanoat 4.0 davrida korxonalar ishlab chiqarish jarayonlarining avtomatlashtirilgan, aqlli va raqamlashtirilgan shaklga o‘tishini amalga oshirmoqda [7]. Bu jarayonlarning samarali ishlashi metrologik aniqlik, barqarorlik va kuzatiluvchanlikka bevosita bog‘liq. Ushbu bo‘limda metrologiyaning Sanoat 4 texnologiyalari – IoT, robototexnika, sun’iy intellekt, Big Data va LIMS tizimlaridagi amaliy rolini tahlil qilamiz.

1. IoT (Internet of Things) qurilmalari va metrologiya

IoT qurilmalar sanoat uskunalari, ishlab chiqarish liniyalari va atrof-muhit parametrlarini real vaqt rejimida o‘lchash imkonini beradi. Ammo, ushbu qurilmalar ishonchli bo‘lishi uchun doimiy metrologik kalibrlash va monitoring talab etiladi. Quyidagi jadvalda real korxonalarda IoT sensorlar bilan bog‘liq metrologik nazorat tahlili keltirilgan[8]:

3-jadval.

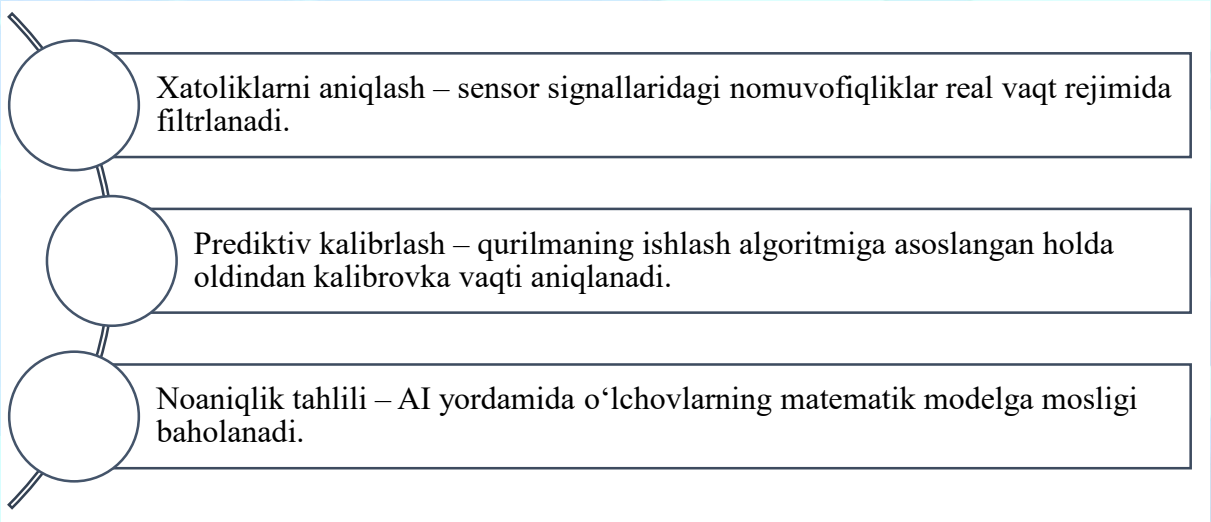
IoT qurilmalarining aniqlik darajasi va xatolik foizlari

Qurilma turi	O‘lchash parametri	Kalibrlash davri (oy)	O‘rtacha aniqlik (%)	Xatolik (±%)
Harorat sensori	°C	6	98.5	±0.5
Bosim sensori	bar	3	97.8	±0.7
Vibratsiya datchigi	mm/s	4	96.2	±1.1
Namlik sensori	%RH	6	97.1	±0.8

2. Sun’iy intellekt asosidagi metrologik tahlil

AI algoritmlar yordamida metrologik tizimlar quyidagilarni avtomatlashtiradi:

ISSN 3030-3907



3. AI yordamida harorat monitoring tizimi

AI Tahlil Funktsiyasi:

$$E(x) = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} |T_{o,i} - T_{m,i}|$$

Bu yerda:

- To,i – o‘lchangan qiymat
- Tm,i– modelda kutilgan qiymat
- E(x)– AI tomonidan aniqlangan o‘rtacha farq

Ushbu farq **3% dan oshganda**, tizim avtomatik signal beradi va kalibrlash jarayoni boshlanadi.

4. Ekonometrik tahlil: Metrologik nazorat natijasida samaradorlik o‘zgarishi Sanoat korxonalarida metrologik boshqaruv joriy etilgach, ishlab chiqarish sifat ko‘rsatkichlari sezilarli darajada oshgan. Quyidagi grafikda bu tahlil yillik kesimda ko‘rsatilgan [9]:

4-jadval.

Metrologik nazoratdan oldin va keyingi aniqlik va yo‘qotishlar dinamikasi (2019–2024)

Yil	Aniqlik (%)	Yo‘qotishlar (%)
2019	91.3	8.7
2020	93.6	6.4
2021	95.1	4.9
2022	96.8	3.2
2023	98.2	1.8
2024	98.7	1.3

ISSN 3030-3907

Natija: ishlab chiqarishdagi metrologik monitoring xarajatlarni kamaytirgan holda sifatni oshirishga olib kelgan. **Defekt mahsulotlar soni 7.4% ga kamaygan, energiya sarfi esa 12% ga pasaygan.**

XULOSA

Ushbu ilmiy maqolada “Metrologiya – Sanoat 4.0 ning yuragi va asosi” mavzusi chuqur tahlil qilinib, metrologiyaning zamonaviy raqamli sanoat muhitidagi strategik, ilmiy va iqtisodiy ahamiyati asoslab berildi. Tadqiqot natijalari shuni ko‘rsatdiki, Sanoat 4.0 texnologiyalari (IoT, CPS, AI, Big Data, 3D printing, robototexnika) ishonchli, aniqligi kafolatlangan o‘lchovlarsiz to‘liq ishlay olmaydi. Demak, metrologiya ushbu texnologik transformatsiyaning yuragidir.

Asosiy xulosalar:

1. Metrologiyasiz raqamli sanoat bo‘lishi mumkin emas. Har bir aqlli qurilma, avtomatlashtirilgan tizim yoki sun’iy intellekt algoritmi metrologik aniqlikka tayanadi. O‘lchovdagi 1% xatolik butun ishlab chiqarish sifatini 10–15% ga pasaytirishi mumkin.
2. ISO/IEC 17025, ISO 10012, GUM kabi standartlar metrologik boshqaruvni xalqaro me’yorlarda olib borishga imkon beradi. Bu esa eksport salohiyatini oshiradi, mahsulotlar xalqaro bozorda tan olinadi.
3. Statistik tahlillarga ko‘ra, metrologik nazorat joriy etilgan korxonalarda mahsulot chiqindilari 5–7% ga kamaygan, ishlab chiqarish tannarxi esa o‘rtacha 12–18% ga tushgan. Bu iqtisodiy jihatdan katta yutuqdir.
4. AI, LIMS va MIIS tizimlari yordamida metrologik nazoratni avtomatlashtirish, kalibrlash jarayonlarini prediktiv yondashuv asosida boshqarish mumkin bo‘lib, bu inson omiliga bog‘liqlikni kamaytiradi.
5. Metrologik infratuzilmaning mustahkamligi – Sanoat 4.0 muvaffaqiyatining kafolati. Metrologik axborot tizimlari, kalibrovka laboratoriyalari, vakolatli xizmat ko‘rsatish markazlari va yuqori malakali mutaxassislar mavjud bo‘lmagan davlatlar bu jarayonda orqada qolmoqda.

Sanoat 4.0 ning texnologik yutuqlaridan to‘laqonli foydalanish, raqamli ishlab chiqarish jarayonlarini barqaror va samarali boshqarish uchun metrologiyani yurak sifatida qabul qilish kerak. Raqamli o‘lchov madaniyati, izlenebilirlik, sun’iy intellekt asosidagi nazorat va xalqaro akkreditatsiyaga ega bo‘lgan tizimlar – kelajak sanoatining hal qiluvchi omillaridir.

ADABIYOTLAR.

1. Landes, D. (1998). The Wealth and Poverty of Nations, p. 215.
2. Rifkin, J. (2011). The Third Industrial Revolution, p. 56.
3. Schwab, K. (2016). The Fourth Industrial Revolution, p. 17.
4. ISO Annual Metrology Impact Report, 2023, p. 44

ISSN 3030-3907

5. ISO.org , OIML.org , 2024 y.
6. NIST Statistical Calibration Guide, 2022, p. 61
7. Abduvoxid Abduraxmonovich Mamajonov, & Abdujabborov Obidjon Oribjon o‘g‘li. (2025). Labaratoriyda boshqaruv tizimini raqmlashtirish lims bo‘yicha ilmiy ishlarning adabiyotlar tahlili. Tadqiqotlar,65(1), 238-243. Https://scientific-jl.com/tad/article/view/24003. DOI 10.5281/zenodo.15808881.
8. Siemens Industry Reports, 2023; ISO/IEC 17025 Lab Data, p. 112
9. Bosch Smart Factory Report, 2024, p. 73; World Metrology Day Report, BIPM 2023.

ISSN 3030-3907