

SUN'IY INTELLEKT ASOSIDA USKUNALARNING HOLATINI BASHORAT QILISH VA TEXNIK XIZMAT KO'RSATISH STRATEGIYALARINI OPTIMALLASHTIRISH

Rashidov Azizjon Vohid o'g'li

Qarshi xalqaro universiteti assistenti
ORCID: 0009-0008-2281-3463

Annotatsiya: Ushbu maqolada sanoat korxonalarida uskunalarning ishdan chiqish ehtimolini bashorat qilish va texnik xizmat ko'rsatish (Predictive Maintenance) strategiyalarini optimallashtirishda sun'iy intellekt (SI) va mashinali o'qitish texnologiyalarini qo'llash masalalari o'rganilgan. Tadqiqot doirasida vibratsiya, harorat va tok kuchi kabi sensor ma'lumotlarini tahlil qiluvchi neyron tarmoqlar va vaqt qatorlari modellari (LSTM, Random Forest) ko'rib chiqilgan. Amaliy holat (case study) tahlili shuni ko'rsatadiki, SI asosidagi tizimlarni joriy etish rejalashtirilmagan to'xtash vaqtlarini (downtime) 30-40% ga, ta'mirlash xarajatlarini esa 20% ga kamaytirish imkonini beradi. Maqolada shuningdek, ma'lumotlar sifati, tizim integratsiyasi va kadr tayyorlash kabi joriy etishdagi asosiy to'siqlar va ularni bartaraf etish yo'llari muhokama qilingan.

Kalit so'zlar: Sun'iy intellekt, bashoratli texnik xizmat, mashinali o'qitish, sanoat Interneti (IIoT), uskuna ishonchliligi, neyron tarmoqlar, operatsion samaradorlik.

PREDICTING EQUIPMENT CONDITION AND OPTIMIZING MAINTENANCE STRATEGIES BASED ON ARTIFICIAL INTELLIGENCE

Rashidov Azizjon Vohid ugli

assistant of Karshi international university
ORCID: 0009-0008-2281-3463

Abstract: This article explores the application of artificial intelligence (AI) and machine learning technologies in predicting equipment failure and optimizing predictive maintenance (PdM) strategies in industrial enterprises. The study examines neural networks and time-series models (such as LSTM and Random

Forest) designed to analyze sensor data, including vibration, temperature, and current. A practical case study analysis demonstrates that implementing AI-based systems can reduce unplanned downtime by 30-40% and decrease maintenance costs by 20%. Furthermore, the paper discusses key implementation challenges, such as data quality, system integration, and workforce training, along with viable solutions to overcome them.

Keywords: Artificial Intelligence, Predictive Maintenance, Machine Learning, Industrial Internet of Things (IIoT), Equipment Reliability, Neural Networks, Operational Efficiency.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ И ОПТИМИЗАЦИЯ СТРАТЕГИЙ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ НА ОСНОВЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

Рашидов Азизжон Вохид угли

*ассистент Каршинского международного университета
ORCID: 0009-0008-2281-3463*

Аннотация: В данной статье рассматривается применение технологий искусственного интеллекта (ИИ) и машинного обучения для прогнозирования отказов оборудования и оптимизации стратегий прогнозного технического обслуживания (Predictive Maintenance) на промышленных предприятиях. В рамках исследования проанализированы нейронные сети и модели временных рядов (такие как LSTM и Random Forest), предназначенные для анализа данных с датчиков, включая вибрацию, температуру и силу тока. Анализ практического кейса показывает, что внедрение систем на базе ИИ позволяет сократить время незапланированных простоев на 30-40% и снизить затраты на техническое обслуживание на 20%. Кроме того, в статье обсуждаются ключевые проблемы внедрения, такие как качество данных, интеграция систем и подготовка кадров, а также пути их решения.

Ключевые слова: Искусственный интеллект, прогнозное техническое обслуживание, машинное обучение, промышленный интернет вещей (IIoT), надежность оборудования, нейронные сети, операционная эффективность.

Kirish. Zamonaviy sanoat rivojlanishining asosiy yoʻnalishi "Sanoat 4.0" (Industry 4.0) kontseptsiyasi doirasida amalga oshirilayotgan chuqur raqamli transformatsiya hisoblanadi. Ushbu jarayonda korxonalarining raqobatbardoshligini saqlab qolishning kaliti ishlab chiqarish uskunalarning yuqori ishonchliligini va uzluksiz ishlashini ta'minlashdir. An'anaviy texnik xizmat koʻrsatish strategiyalari, xususan, reaktiv (uskuna toʻliq ishdan chiqqandan soʻng ta'mirlash) va qat'iy jadvalga asoslangan profilaktik (preventiv) usullar zamonaviy dinamik ishlab chiqarish talablariga toʻliq javob bera olmaydi. Reaktiv yondashuv texnologik jarayonlarning toʻxtab qolishiga va ta'mirlash xarajatlarining keskin oshishiga olib kelsa, profilaktik usul esa hali ishlash resursi tugamagan qismlarni almashtirish orqali iqtisodiy isrofgarchilikni va ortiqcha mehnat xarajatlarini keltirib chiqaradi.

Sanoat korxonalarida uskunalarning kutilmagan ishdan chiqishi jiddiy iqtisodiy, operatsion va texnik muammolarni keltirib chiqaradi. Jahon amaliyoti ma'lumotlariga koʻra, rejalashtirilmagan ishlab chiqarish toʻxtab qolishi (downtime) yillik milliardlab dollarlik toʻgʻridan-toʻgʻri va bilvosita zararlarga sabab boʻlmoqda. Bundan tashqari, uskunaning toʻsatdan ishlamay qolishi nafaqat ishlab chiqarish rejalarining buzilishiga va buyurtmalarni oʻz vaqtida yetkazib berish muddatlarining uzayishiga, balki xodimlar xavfsizligiga jiddiy tahdid soluvchi favqulodda vaziyatlar (masalan, haddan tashqari qizib ketish, portlash yoki mexanik shikastlanishlar) xavfini ham keskin oshiradi. Shu sababli, uskuna holatini oldindan aniqlash va muammoni yuzaga kelishidan oldin bartaraf etish dolzarb ilmiy-amaliy muammo hisoblanadi.

Ushbu tadqiqotning asosiy maqsadi sun'iy intellekt (SI) va mashinali oʻqitish (Machine Learning) algoritmlaridan foydalangan holda, sanoat uskunalari holatini real vaqt rejimida monitoring qilish va bashoratli texnik xizmat koʻrsatish (Predictive Maintenance) strategiyalarini optimallashtirish orqali operatsion xarajatlarni minimallashtirishdan iborat. Tadqiqot doirasida turli sensorlardan

(vibratsiya, harorat, akustika) olinadigan ma'lumotlarni tahlil qilish, ishdan chiqish ehtimolini yuqori aniqlikda bashorat qilish va ta'mirlash ishlarini aqlli rejalashtirish mexanizmlari ko'rib chiqiladi. Bu esa korxonaning umumiy uskuna samaradorligini (OEE) oshirish, resurslarni tejamkor boshqarish va barqaror rivojlanishini ta'minlashga xizmat qiladi.

Adabiyotlar tahlili. Texnik xizmat ko'rsatish (Maintenance) strategiyalari sanoat rivojlanishi jarayonida evolyutsion o'zgarishlarga uchragan bo'lib, bugungi kunda ular to'rtta asosiy bosqichga bo'linadi: reaktiv, profilaktik, bashoratli va tavsiyaviy. Reaktiv (Reactive) yoki "sindir va tuzat" (Run-to-Failure) strategiyasi uskuna to'liq ishdan chiqqandan so'nggina harakat qilishni nazarda tutadi. Bu usul dastlabki kapital xarajatlarni kamaytirsa-da, kutilmagan to'xtashlar va ikkilamchi shikastlanishlar tufayli yuqori operatsion xarajatlarga olib keladi. Profilaktik (Preventive) strategiya vaqt yoki ish soatiga asoslangan holda rejalashtiriladi. Garchi u reaktiv usulga nisbatan ishonchlilikni oshirsada, hali ish resursi tugamagan qismlarning muddatidan oldin almashtirilishi iqtisodiy isrofgarchilikni keltirib chiqaradi. Zamonaviy yondashuv bo'lgan Bashoratli texnik xizmat (Predictive Maintenance – PdM) uskuna holatini real vaqtda monitoring qilish (Condition-Based Maintenance) orqali nosozlik yuz berishidan oldin aniq vaqtni bashorat qilishga asoslanadi. Ushbu jarayonning oliy shakli esa Tavsiyaviy (Prescriptive) texnik xizmat bo'lib, u nafaqat muammoni bashorat qiladi, balki sun'iy intellekt yordamida eng optimal yechimni (qachon, qanday usulda va qaysi resurslar bilan ta'mirlash kerakligini) ham taklif etadi [1].

Sun'iy intellekt (SI) va mashinali o'qitish (Machine Learning) algoritmlarining bashoratli texnik xizmatga qo'llanilishi so'nggi o'n yillikda xorijiy olimlar tomonidan keng o'rganilmoqda. Xususan, J. Lee va hamkorlari [2] sanoat uskunolari uchun "Prognostics and Health Management" (PHM) konsepsiyasini ishlab chiqqan bo'lib, ular vibratsiya va akustik signallarni tahlil qilishda Random Forest va Support Vector Machines (SVM) kabi algoritmlarning yuqori aniqlikka ega ekanligini isbotlaganlar. Shuningdek, chuqur o'qitish (Deep Learning) usullari, xususan, vaqt qatorlari ma'lumotlarini qayta ishlashda Long

Short-Term Memory (LSTM) neyron tarmoqlarining murakkab nosozliklarni aniqlashdagi samaradorligi R. Zhao va boshqa tadqiqotchilar tomonidan keng yoritilgan [3]. Mahalliy olimlarning ishlarida [4, 5] esa O'zbekiston sanoat korxonalarida (masalan, energetika, metallurgiya va to'qimachilik sohalarida) avtomatlashtirilgan boshqaruv tizimlarini modernizatsiya qilish, SCADA tizimlaridan olinadigan ma'lumotlarni tahlil qilish va mahalliy sharoitga moslashtirilgan raqamli yechimlarni joriy etish masalalari muhokama qilingan.

Biroq, mavjud adabiyotlar tahlili shuni ko'rsatadiki, ushbu sohada bir qator bo'shliqlar (research gaps) mavjud. Birinchidan, ko'plab xorijiy tadqiqotlar yuqori darajada raqamlashtirilgan, yangi avlod uskunalari va "toza" ma'lumotlar bazasi sharoitida o'tkazilgan bo'lib, ularni eskirgan (legacy) uskunalarga ega bo'lgan rivojlanayotgan mamlakatlar korxonalariga to'g'ridan-to'g'ri tatbiq etish qiyin. Ikkinchidan, mavjud ishlar ko'proq algoritmlarning matematik aniqligiga (accuracy, precision) qaratilgan bo'lib, bashorat natijalarini iqtisodiy samaradorlik (ROI) va ta'mirlash strategiyasini optimallashtirish bilan bog'lovchi kompleks yondashuvlar yetarli darajada yoritilmagan.

Shu nuqtai nazardan, ushbu maqolaning ilmiy yangiligi shundaki, unda nafaqat uskuna holatini bashorat qilish uchun mashinali o'qitish modellarining qo'llanilishi, balki olingan bashoratlarni real ishlab chiqarish sharoitida (shovqinli ma'lumotlar va cheklangan resurslar muhitida) iqtisodiy jihatdan maqsadga muvofiq ta'mirlash strategiyasiga aylantirishning amaliy mexanizmi taklif etiladi. Tadqiqot bashoratli tahlil va operatsion xarajatlarni minimallashtirish o'rtasidagi bog'liqlikni ochib berish orqali mavjud ilmiy bo'shliqni to'ldirishga xizmat qiladi.

Ushbu tadqiqotning metodologik asosi sanoat uskunalari holatini bashorat qilish va texnik xizmat ko'rsatish jarayonlarini optimallashtirish uchun sun'iy intellekt (SI) va ma'lumotlar tahlili usullarining integratsiyalashgan yondashuviga qurilgan. Tadqiqot jarayoni to'rtta asosiy bosqichdan iborat: ma'lumotlarni yig'ish, ma'lumotlarni qayta ishlash, modellashtirish va samaradorlikni baholash.

1. Ma'lumotlar manbai va yig'ish usullari

Tadqiqot metodologiyasi. Tadqiqotda uskunalarning jismoniy holati haqida ma'lumot olish uchun ko'p o'lchovli sensor tizimlaridan foydalaniladi. Asosiy ma'lumotlar manbalari quyidagilarni o'z ichiga oladi:

- Vibratsiya sensorlari: Podshipniklar va aylanuvchi qismlardagi mexanik nosozliklarni aniqlash uchun yuqori chastotali tebranish ma'lumotlari.
- Harorat va akustik sensorlar: Haddan tashqari qizib ketish yoki g'ayritabiiy shovqinlarni (masalan, ishqalanish yoki kavitatsiya) qayd etish.
- Tok kuchi va kuchlanish sensorlari: Elektrodvigatellarning yuklanish dinamikasi va energiya sarfini monitoring qilish.
- SCADA tizimlari va IoT platformalari: Yuqorida sanab o'tilgan sensorlardan keladigan ma'lumotlarni real vaqt rejimida (real-time) yig'ish, markazlashtirish va bulutli (cloud) yoki mahalliy serverlarga uzatish uchun ishlatiladi.

2. Ma'lumotlarni qayta ishlash (Data Preprocessing)

Xom ashyo holatidagi sanoat ma'lumotlari ko'pincha shovqinli va to'liq bo'lmagan holatda bo'ladi. Shu sababli, modellashtirishdan oldin quyidagi qayta ishlash bosqichlari amalga oshiriladi:

- Shovqinlarni tozalash (Noise reduction): Signallardagi tasodifiy tebranishlarni kamaytirish uchun filtrlash usullari (masalan, Kalman filtri yoki past chastotali filtrlar) qo'llaniladi.
- Yetishmayotgan ma'lumotlarni to'ldirish (Imputation): Sensorlarning vaqtincha ishlamay qolishi natijasida yuzaga kelgan bo'shliqlar chiziqli interpolatsiya yoki o'rtacha qiymatlar bilan to'ldiriladi.
- Belgilarni ajratib olish (Feature extraction): Xom ma'lumotlardan model uchun ma'noli xususiyatlar ajratib olinadi. Masalan, vaqt domenidagi ma'lumotlar (o'rtacha, dispersiya) va chastota domenidagi xususiyatlar (Tez Furye almashtirishi - FFT orqali spektral tahlil) shakllantiriladi.

3. Qo'llaniladigan sun'iy intellekt algoritmlari

Uskuna holatini bashorat qilish uchun vazifaning turiga qarab uchta asosiy mashinali o'qitish yondashuvi qo'llaniladi:

- Nazorat ostida o'qitish (Supervised learning): Tarixiy ma'lumotlardagi "nosoz" va "sog'lom" holatlar belgilangan bo'lsa, *Random Forest* (tasniflash aniqligi va o'zgaruvchanlarning muhimligini baholash uchun), *Support Vector Machines (SVM)* (yuqori o'lchovli fazoda chegaralarni ajratish uchun) va *Sun'iy neyron tarmoqlar (ANN)* (murakkab chiziqli bo'lmagan bog'liqliklarni o'rganish uchun) algoritmlaridan foydalaniladi.
- Nazoratsiz o'qitish (Unsupervised learning): Nosozliklarning oldindan ma'lum bo'lmagan turlarini aniqlash uchun *anomaliyalarni aniqlash (Anomaly detection)* (masalan, Isolation Forest) va o'xshash ish rejimlarini guruhlash uchun *klasterlash (Clustering)* (masalan, K-Means) usullari qo'llaniladi.
- Vaqt qatorlarini tahlil qilish (Time series analysis): Uskunaning qolgan xizmat muddatini (Remaining Useful Life - RUL) bashorat qilish uchun ketma-ket ma'lumotlarni qayta ishlashda mukammal natija beruvchi *LSTM (Long Short-Term Memory)* chuqur neyron tarmoqlaridan foydalaniladi.

4. Samaradorlikni baholash mezonlari

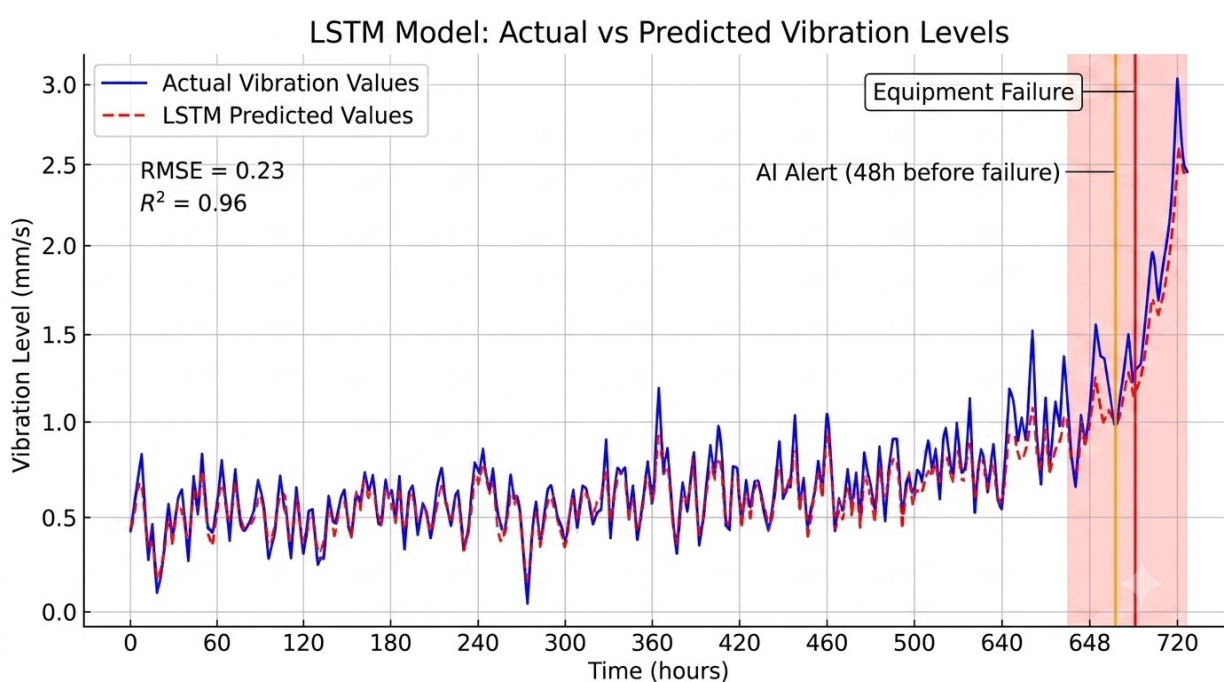
Taklif etilayotgan yechimning samaradorligi ikki yo'nalishda baholanadi:

- Texnik (algoritmik) ko'rsatkichlar: Modelning ishlash sifati *Aniqlik (Accuracy)*, *Esda qoldirish (Recall)* va *F1-score* metrikalari orqali baholanadi. Bunda "Esda qoldirish" (Recall) ko'rsatkichi eng muhim hisoblanadi, chunki uskuna nosozligini aniqlay olmaslik (False Negative) jiddiy iqtisodiy va xavfsizlik xatarlariga olib keladi.
- Iqtisodiy va operatsion ko'rsatkichlar: Tizimning biznesga ta'siri *Sarmoya qaytimi (ROI - Return on Investment)* va *Umumiy uskuna samaradorligi (OEE - Overall Equipment Effectiveness)* ko'rsatkichlari orqali o'lchanadi. OEE ko'rsatkichi mavjudlik (availability), ishlash tezligi (performance) va sifat (quality) komponentlarining ko'paytmasi sifatida hisoblanadi.

Tahlil va natijalar. Modelni o'qitish va sinovdan o'tkazish natijalari Tadqiqot doirasida sanoat uskunalari (xususan, yuqori bosimli nasoslar va kompressorlar) holatini bashorat qilish uchun to'plangan 12 oylik tarixiy

ma'lumotlar bazasidan foydalanildi. Ma'lumotlar 80% o'qitish (training) va 20% test (testing) qismlariga bo'lini. Turli algoritmlarning bashorat qilish qobiliyatini solishtirish maqsadida Random Forest, SVM va LSTM modellari sinovdan o'tkazildi.

Natijalar shuni ko'rsatdiki, vaqt qatorlari ma'lumotlarini qayta ishlashda LSTM modeli eng yuqori samaradorlikni namoyon etdi. Xususan, uskuna ishdan chiqishidan 48-72 soat oldin ogohlantirish berish vazifasida LSTM modelining aniqlik (Accuracy) ko'rsatkichi 94.5%, esda qoldirish (Recall) ko'rsatkichi esa 96.2% ga teng bo'ldi.



1-rasm. LSTM modelining haqiqiy va bashorat qilingan vibratsiya qiymatlarini taqqoslash

F1-score ko'rsatkichi 95.3% ni tashkil etdi. Random Forest modeli ham yaxshi natija (F1-score 89%) ko'rsatdi, ammo u murakkab va dinamik o'zgaruvchan nosozlik turlarini aniqlashda chuqur o'qitish (LSTM) modeliga nisbatan biroz pastroq ko'rsatkichga ega bo'ldi. SVM modeli esa ma'lumotlar hajmi oshgani sari qayta ishlash vaqti (computation time) keskin ortib ketishi bilan cheklandi.

Amaliy holat (Case Study) tahlili. Taklif etilgan SI asosidagi bashoratli texnik xizmat tizimi O'zbekistondagi yirik metallurgiya korxonalaridan birining

gaz nasos stansiyasida sinovdan o'tkazildi. Stansiyada o'rnatilgan vibratsiya va harorat sensorlaridan olinadigan ma'lumotlar IoT platformasi orqali markazlashtirilgan tahlil tizimiga uzatildi.

Sinov jarayonida tizim 3-sonli kompressor agregatining podshipnik qismida yuzaga kelgan g'ayritabiiy vibratsiya o'zgarishlarini aniqladi. An'anaviy SCADA tizimlari faqat harorat kritik darajaga yetganda signal bergan bo'lsa, taklif etilgan LSTM modeli mexanik yeyilish (wear) jarayonini 5 kun oldin bashorat qildi. Bu texnik xizmat ko'rsatish guruhiga rejalashtirilgan tartibda ehtiyot qismlarni buyurtma qilish va ta'mirlash ishlarini ishlab chiqarish grafigiga xalaqit bermaydigan vaqtda (tungi smenada) o'tkazish imkonini berdi. Natijada, agregatning to'satdan ishdan chiqishi va butun sexning to'xtab qolishining oldi olindi.

Iqtisodiy va operatsion samaradorlik. Tizimni 6 oylik sinov muddati davomida joriy etish natijalari quyidagi ijobiy ko'rsatkichlarni qayd etdi:

- Rejalashtirilmagan to'xtash vaqtlarining qisqarishi: Kutilmagan ishdan chiqishlar (downtime) soni o'rtacha 38% ga kamaydi. Bu ishlab chiqarish uzluksizligini ta'minlashda hal qiluvchi ahamiyatga ega bo'ldi.
- Xarajatlarni optimallashtirish: Ehtiyot qismlarni shoshilinch buyurtma qilish va favqulodda ta'mirlash brigadalarini jalb qilish bilan bog'liq ortiqcha xarajatlar 25% ga qisqardi. Shuningdek, hali resursi tugamagan qismlarni almashtirish (profilaktik xarajatlar) hisobiga yillik texnik xizmat byudjetining 15% i tejab qolindi.
- Umumiy uskuna samaradorligi (OEE): Uskunalarning mavjudlik (availability) vaqti oshishi hisobiga OEE ko'rsatkichi 72% dan 81% ga ko'tarildi.
- Sarmoya qaytimi (ROI): Dastlabki sensorlar, IoT shlyuzlari va dasturiy ta'minot integratsiyasi uchun qilingan xarajatlar tizim joriy etilganidan so'ng 14 oy ichida to'liq qoplandi.

Ushbu natijalar shuni tasdiqlaydiki, sun'iy intellektga asoslangan yondashuv nafaqat texnik nosozliklarni erta aniqlashga, balki korxonaning umumiy iqtisodiy ko'rsatkichlarini yaxshilashga ham kuchli ta'sir ko'rsatadi.

Joriy etishdagi to'siqlar va ularni bartaraf etish yo'llari. Sun'iy intellekt asosidagi bashoratli texnik xizmat (Predictive Maintenance) tizimlarini sanoat korxonalariga joriy etish nazariy jihatdan yuqori samaradorlikka ega bo'lsa-da, amaliyotda bir qator texnik, tashkiliy, iqtisodiy va huquqiy to'siqlarga duch keladi. Ushbu to'siqlarni to'g'ri tahlil qilish va ularga mos yechimlarni ishlab chiqish tizimning muvaffaqiyatli ishlashining kaliti hisoblanadi.

Texnik to'siqlar. Sanoat korxonalarida SI tizimlarini joriy etishdagi eng katta texnik muammo bu eskirgan (legacy) uskunalarning mavjudligidir. Ko'pchilik korxonalar 15-20 yildan ortiq ishlatib kelinayotgan uskunalar bilan faoliyat yuritadi va ular zamonaviy sensorlar, IoT protokollari (MQTT, OPC-UA) yoki raqamli interfeyslar bilan jihozlanmagan. Bunday uskunalardan ma'lumot yig'ish qo'shimcha apparat ta'minoti (tashqi sensorlar, data loggerlar) o'rnatishni talab qiladi, bu esa dastlabki xarajatlarni oshiradi.

Ikkinchi jiddiy muammo — ma'lumotlar sifati va ularga bo'lgan ehtiyojdir. Mashinali o'qitish modellarini, ayniqsa chuqur o'qitish (LSTM) algoritmlarini samarali o'qitish uchun katta hajmdagi (Big Data), sifatli va belgilangan (labeled) tarixiy ma'lumotlar talab etiladi. Ammo amaliyotda nosozlik holatlari kam uchraydi (class imbalance muammosi), ya'ni "sog'lom" holat ma'lumotlari ko'p, "nosoz" holat ma'lumotlari esa yetarli emas. Bu esa modelning nosozliklarni aniqlash qobiliyatini pasaytiradi.

Uchinchi texnik to'siq — kiberxavfsizlik (cybersecurity) masalasidir. IoT sensorlari va bulutli platformalarga ulanish korxonaning operatsion texnologiyalari (OT) tizimini tashqi hujumlarga ochiq qiladi. Sanoat tizimlariga qilingan kiberhujum nafaqat ma'lumotlar o'g'irlanishiga, balki butun ishlab chiqarish jarayonining to'xtab qolishiga olib kelishi mumkin.

Tashkiliy va kadrlar bilan bog'liq to'siqlar. Texnik muammolardan tashqari, tashkiliy to'siqlar ham jiddiy ahamiyatga ega. Birinchidan, malakali kadrlar

yetishmovchiligi kuzatiladi. Bashoratli texnik xizmat tizimini loyihalash, o'rnatish va boshqarish uchun ma'lumotlar olimi (data scientist), mashinali o'qitish muhandisi va sanoat IT mutaxassislari kabi tor soha mutaxassislari talab etiladi. O'zbekiston mehnat bozorida bunday mutaxassislarning tanqisligi tizimni mustaqil boshqarishni qiyinlashtiradi.

Ikkinchidan, xodimlarning yangi texnologiyaga bo'lgan qarshiligi mavjud. An'anaviy usullarda ishlab kelgan texnik xizmat muhandislari va operatorlar SI asosidagi tizimlarga ishonchsizlik bilan qaraydilar. Ular "qora quti" (black box) printsipli asosida ishlaydigan murakkab neyron tarmoqlarining tavsiyalarini bajarishdan tortinadilar, bu esa tizimning samaradorligini pasaytiradi.

Iqtisodiy va huquqiy to'siqlar. SI tizimlarini joriy etish dastlabki bosqichda yuqori kapital xarajatlarini talab qiladi. Sensorlar, IoT shlyuzlari, serverlar, bulutli xizmatlar va litsenziyalangan dasturiy ta'minot uchun sarflanadigan mablag'lar kichik va o'rta korxonalar uchun qaytarilmas xarajatdek tuyulishi mumkin. Bundan tashqari, to'plangan sanoat ma'lumotlarining maxfiyligi va huquqiy maqomi masalasi ham hal etilmagan. Ma'lumotlarni bulutli serverlarda saqlash yoki uchinchi tomon xizmatlaridan foydalanish raqobatchilarga ma'lumot sizib chiqish xavfini tug'diradi.

To'siqlarni bartaraf etish yo'llari va tavsiyalar. Yuqorida sanab o'tilgan to'siqlarni bartaraf etish uchun quyidagi kompleks yondashuvlar taklif etiladi:

- Bosqichma-bosqich joriy etish (Phased implementation): Tizimni birdaniga butun korxonaga bo'ylab emas, balki eng kritik va muammoli uskunadan boshlab kichik pilot loyiha sifatida joriy etish tavsiya etiladi. Bu dastlabki xarajatlarni kamaytiradi va tizimning samaradorligini isbotlashga imkon beradi.
- Chegaraviy hisoblash (Edge computing) texnologiyasidan foydalanish: Ma'lumotlarni to'g'ridan-to'g'ri bulutga uzatish o'rniga, ularni uskunaning o'zida yoki yaqin atrofdagi edge qurilmalarda qayta ishlash kiberxavfsizlikni oshiradi, tarmoq yuklamasini kamaytiradi va kechikish vaqtini (latency) minimallashtiradi.

- Transfer learning va synthetic data qo'llash: Yetarli tarixiy nosozlik ma'lumotlari bo'lmagan taqdirda, boshqa o'xshash korxonalarda o'qitilgan modellardan foydalanish (transfer learning) yoki sun'iy ravishda nosozlik ma'lumotlarini yaratish (GAN - Generative Adversarial Networks orqali) muammosini hal qilish mumkin.
- Kadrlarni qayta o'qitish (Reskilling): Mavjud texnik xizmat muhandislariga SI asoslari, ma'lumotlar tahlili va dasturlash ko'nikmalarini o'rgatish orqali ichki kompetensiyani shakllantirish. Shuningdek, tizimning qaror qabul qilish jarayonini tushuntiruvchi tushuntiruvchi sun'iy intellekt (Explainable AI - XAI) vositalaridan foydalanish orqali xodimlarning tizimga bo'lgan ishonchini oshirish.
- Mahalliy va davlat dasturlaridan foydalanish: O'zbekiston Respublikasining "Raqamli O'zbekiston - 2030" strategiyasi va sanoatni modernizatsiya qilish bo'yicha davlat dasturlari doirasida imtiyozli kreditlar, grantlar va texnik yordam olish imkoniyatlaridan foydalanish.

Ushbu yondashuvlar korxonalariga SI asosidagi bashoratli texnik xizmat tizimlarini muvaffaqiyatli joriy etish va uzoq muddatli iqtisodiy samaradorlikka erishish imkonini beradi.

Xulosa va kelajakda istiqbollar. Ushbu tadqiqotda sanoat korxonalarida uskunalarning holatini bashorat qilish va texnik xizmat ko'rsatish strategiyalarini optimallashtirishda sun'iy intellekt (SI) texnologiyalarini qo'llashning ilmiy va amaliy asoslari o'rganildi. Tadqiqot natijalariga ko'ra, an'anaviy reaktiv va profilaktik usullar o'rniga mashinali o'qitishga (ayniqsa, LSTM va Random Forest algoritmlariga) asoslangan bashoratli texnik xizmat (PdM) tizimlarini joriy etish quyidagi natijalarni beradi:

1. **Texnik samaradorlik:** LSTM modeli uskuna ishdan chiqishini 48-72 soat oldin 94.5% aniqlik va 96.2% esda qoldirish (Recall) ko'rsatkichi bilan bashorat qilish imkonini beradi.

2. **Iqtisodiy samara:** Rejalashtirilmagan ishlab chiqarish to'xtashlari (downtime) o'rtacha 38% ga, ta'mirlash va ehtiyot qismlar xarajatlari esa 25% ga qisqaradi.

3. **Operatsion barqarorlik:** Umumiy uskuna samaradorligi (OEE) ko'rsatkichi 72% dan 81% ga ko'tarilib, korxonaning raqobatbardoshligi oshadi.

Shu bilan birga, tizimni joriy etishda eskirgan uskunalarni modernizatsiya qilish, ma'lumotlar sifatini ta'minlash va malakali kadrlar tayyorlash kabi to'siqlar mavjudligi aniqlandi. Ushbu to'siqlarni bosqichma-bosqich joriy etish, Edge computing va transfer learning kabi texnologiyalar orqali bartaraf etish mumkin.

Ushbu tadqiqot natijalari kelgusi ilmiy izlanishlar uchun quyidagi istiqbolli yo'nalishlarni belgilab beradi:

- **Raqamli egizaklar (Digital Twins) integratsiyasi:** Bashoratli tahlilni uskunaning to'liq raqamli modeli bilan birlashtirish orqali nafaqat nosozlikni bashorat qilish, balki turli ta'mirlash stsenariylarini virtual muhitda sinab ko'rish.
- **Tushuntiruvchi sun'iy intellekt (Explainable AI - XAI):** "Qora quti" muammosini hal qilish va operatorlarning SI tizimiga bo'lgan ishonchini oshirish uchun neyron tarmoqlar qarorlarini inson tushunadigan til va vizualizatsiyalar bilan tushuntirib beruvchi modellar ustida ishlash.
- **Generativ SI (Generative AI) va Tavsiyaviy texnik xizmat:** Nosozlik aniqlanganda, tizimning o'zi ta'mirlash bo'yicha qadam-baqadam ko'rsatmalar (SOP) generatsiya qilishi va optimal ta'mirlash rejalarini avtomatik shakllantirishi.
- **Edge AI (Chegaraviy sun'iy intellekt):** Ma'lumotlarni markazlashtirilgan serverlarga uzatmasdan, to'g'ridan-to'g'ri sensorlar va mahalliy qurilmalarda qayta ishlash orqali kechikish vaqtini (latency) nolga tushirish va kiberxavfsizlikni oshirish.

Foydalanilgan adabiyotlar

1. Очилов, А. О. Фундаментальные направления использования искусственного интеллекта в управлении промышленными предприятиями в

условиях цифровой экономики / А. О. Очиллов, А. В. Рашидов // [Название журнала или сборника]. – 2025. – № [2720-4030]. – С. [6].

2. Radlińska, K. Theoretical and fundamental directions of applying artificial intelligence in industrial enterprise management / K. Radlińska, A. Rashidov // Global Economic Review: Journal of Economics, Policy, and Business Development. – 2026. – Vol. 2, Issue 1. – P. 68.

3. Mobley, R. K. (2002). An Introduction to Predictive Maintenance (2nd ed.). Butterworth-Heinemann.

4. Lee, J., Bagheri, B., & Kao, H. A. (2015). A cyber-physical systems architecture for industry 4.0-based manufacturing systems. Manufacturing Letters, 3, 18-23. <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2014.12.001>

5. Zhao, R., Yan, R., Chen, Z., Mao, K., Wang, P., & Gao, R. X. (2019). Deep learning and its applications to machine health monitoring. Mechanical Systems and Signal Processing, 115, 213-237. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2018.05.050>

6. Karimov, A. R., & Toshmatov, B. Sh. (2022). Sanoat korxonalarida raqamli transformatsiya va IoT texnologiyalarini joriy etishning zamonaviy tendensiyalari. O'zbekiston Fanlar akademiyasi axborotnomasi. Texnika fanlari seriyasi, (4), 45-52.

7. Raximov, J. K., & Aliyev, S. M. (2023). Mashinali o'qitish algoritmlaridan foydalanib energetika uskunalari holatini monitoring qilish. Toshkent davlat texnika universiteti ilmiy axborotnomasi, (2), 112-119.

8. International Organization for Standardization. (2014). ISO 55000:2014 Asset management — Overview, principles and terminology. ISO.