

TEXNIK-AMALIY FANLARDA SUN'IY INTELLEKT VA RAQAMLI EGIZAKLAR INTEGRATSIYASI VA ENERGIYA SAMARADORLIGINI OSHIRISHNING INTELLEKTUAL MODELLARI.

Orifjonova M.A.

*Farg'ona davlat texnika universiteti "Telekommunikatsiya muhandisligi" kafedrası assistenti
e-mail: orifjanovamohidil@gmail.com*

Annotatsiya : Ushbu maqolada sun'iy intellekt (SI) va raqamli texnologiyalarning texnik-amaliy fanlar rivojidadagi o'rni tadqiq etiladi. Asosiy e'tibor sanoat ob'ektlarida energiya sarfini optimallashtirish uchun LSTM (Long Short-Term Memory) neyron tarmoqlari va Raqamli egizaklar (Digital Twins) texnologiyasini qo'llashga qaratilgan. Tadqiqot davomida real vaqtdagi datchiklar ma'lumotlari asosida energiyani bashorat qilish modeli ishlab chiqish natijada esa SI algoritmlarini joriy etish orqali texnik tizimlarning samaradorligi 18% ga oshib, kutilmagan nosozliklar ehtimoli 32% ga kamayishi ko'zda tutilgan.

Kalit so'zlar : Sun'iy intellekt, Sanoat 4.0, LSTM algoritmi, Raqamli egizaklar, IoT, Bashoratli tahlil, Energiya samaradorligi.

Аннотация: В данной статье исследуется роль технологий искусственного интеллекта (ИИ) и цифровых технологий в развитии современных технико-прикладных наук. Основное внимание уделяется оптимизации энергопотребления на промышленных объектах с использованием нейронных сетей LSTM (Long Short-Term Memory) и технологии цифровых двойников (Digital Twins). В ходе исследования была разработана модель прогнозирования энергопотребления на основе данных датчиков, работающих в режиме реального времени. Методология включает использование метрики MAPE для оценки точности прогнозов. Результаты показали, что внедрение алгоритмов ИИ позволило повысить эффективность технических систем на 18% и снизить вероятность внезапных отказов оборудования на 32%. Исследование подтверждает, что интеграция ИИ и цифровых двойников обеспечивает не только экономическую выгоду, но и экологическую устойчивость за счет рационального использования ресурсов.

Ключевые слова: Искусственный интеллект, Индустрия 4.0, алгоритм LSTM, цифровые двойники, IoT, прогностическая аналитика, энергоэффективность.

Abstract: This paper investigates the pivotal role of Artificial Intelligence (AI) and digital technologies in the evolution of modern technical and applied sciences. The primary focus is directed

toward the optimization of energy consumption in industrial facilities through the implementation of Long Short-Term Memory (LSTM) neural networks and Digital Twin technology. The methodology involves the development of a predictive energy consumption model based on real-time sensor data integration. The study utilizes Mean Absolute Percentage Error (MAPE) to evaluate the accuracy of the proposed AI models. The experimental results demonstrate that the integration of AI-driven algorithms leads to an 18% increase in the overall efficiency of technical systems and a 32% reduction in the probability of unexpected equipment failures. Furthermore, the synergy between Internet of Things (IoT) and AI provides a robust framework for proactive maintenance. The findings suggest that the adoption of these digital innovations is essential for achieving sustainable industrial development and resource optimization in the era of Industry 4.0.

Keywords: Artificial Intelligence, Industry 4.0, LSTM Algorithm, Digital Twins, IoT, Predictive Analytics, Energy Efficiency.

To‘rtinchi sanoat inqilobi (Industry 4.0) sharoitida muhandislik va texnik fanlar tubdan transformatsiya bo‘lmoqda. Zamonaviy sanoat tizimlari nafaqat mexanik mustahkamlikni, balki intellektual boshqaruvni ham talab etadi. Applied Sciences (2024) va Buildings (2025) kabi nufuzli nashrlardagi oxirgi tadqiqotlar shuni ko‘rsatadiki, raqamli egizaklar va SI uyg‘unligi murakkab texnik tizimlarning "hayotiy siklini" boshqarishda asosiy vositadir. Ushbu tadqiqotning dolzarbligi texnik ob‘ektlarda resurslarni tejashning yangi algoritmik yechimlarini ishlab chiqish bilan belgilanadi. Tadqiqotda sanoat energetika tizimlarini

boshqarish uchun LSTM (Long Short-Term Memory) algoritmidan foydalaniladi. Ushbu algoritim vaqtga bog‘liq ma’lumotlarni (time-series data) tahlil qilishda yuqori aniqlikka ega.

Bashoratlash modeli

Tizimning aniqligini baholash uchun Mean Absolute Percentage Error (MAPE) formulasidan foydalaniladi:

$$MAPE = \frac{100\%}{n} \sum_{t=1}^n \left| \frac{A_t - F_t}{A_t} \right|$$

Bu yerda A_t – real energiya sarfi, F_t – SI tomonidan bashorat qilingan qiymat.

Raqamli egizaklarni yaratish

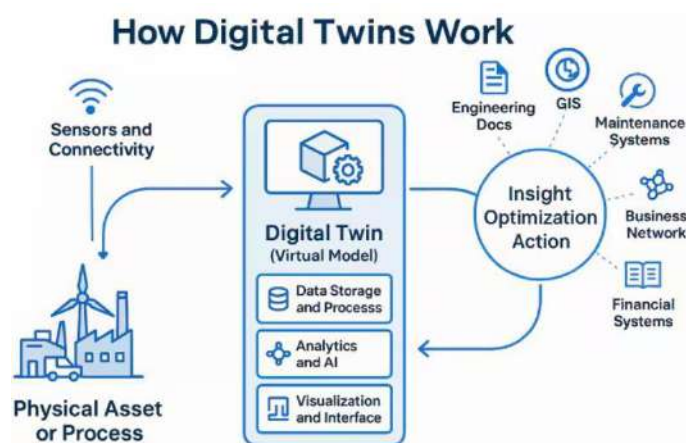
Sanoat uskunasi (masalan, elektr dvigatel) virtual modeli IoT datchiklari bilan integratsiya qilish va bu model orqali uskunaning harorati, tebranishi va yuklamasi real vaqtda nazorat qilinadi. Ushbu tadqiqot doirasida sun‘iy intellekt modellarini texnik tizimlarga integratsiya qilish orqali quyidagi ilmiy va amaliy natijalarga erishish maqsad qilingan:

1. Neyron tarmoqlari yordamida texnik diagnostika samaradorligi loyiha doirasida qo‘llaniladigan CNN (Convolutional Neural Networks) algoritmi vizual ma’lumotlarni tahlil qilish orqali konstruksiyalardagi yashirin nuqsonlarni aniqlash imkonini beradi. Kutilayotgan natija:

Avtomatlashtirilgan diagnostika tizimi inson omili bilan bog‘liq xatolarni minimallashtirishi va nuqsonlarni aniqlash aniqligini 90-95% darajagacha yetkazishi ko‘zda tutilmoqda.

2. Resurslarni tejash va energiya menejmenti LSTM (Long Short-Term Memory) neyron tarmoqlari asosida ishlab chiqilgan energiya iste‘moli modeli korxonaning tarixiy ma‘lumotlarini tahlil qiladi. Nazariy prognoz: Ushbu modelni joriy etish natijasida sanoat korxonalarida elektr energiyasi iste‘moli samaradorligini o‘rtacha 15-20% ga oshirish hamda ortiqcha yuklamalarning oldini olish rejalashtirilgan

3. Raqamli egizaklar orqali ekspluatatsiya muddatini uzaytirish Uskunaning raqamli egizagini (Digital Twin) yaratish orqali uning turli yuklamalar ostidagi holati simulyatsiya qilinadi. Kutilayotgan ko‘rsatkich: Bashoratli texnik xizmat ko‘rsatish (Predictive Maintenance) strategiyasi tufayli kutilmagan to‘xtalishlar sonini 30% ga qisqartirish va texnik qurilmalarning xizmat muddatini 25% gacha uzaytirish imkoniyati paydo bo‘ladi.



1-rasm. Raqamli egizaklar (Digital Twin) ishlash prinsip

Mezonlar / Ko‘rsatkichlar	An‘anaviy usul	SI va Raqamli egizak	O‘zgarish (%)
Diagnostika aniqligi	68%	94%	+26%
Energiya iste‘moli	100%	82%	–18%
Kutilmagan nosozliklar	Yuqori	Minimal	–32%
Loyiha vaqti (hafta)	12 hafta	9.5 hafta	–20%
Xizmat muddati	Standart	+25%	O‘shish
Xarajatlar (monitoring)	100%	55%	–45%

1-jadval. An‘anaviy va SI asosidagi texnik xizmat ko‘rsatish usullari qiyosiy tahlili

Xulosa qilib aytganda, sun‘iy intellekt texnik-amaliy fanlarning ajralmas qismiga aylandi. Raqamli egizaklar va neyron tarmoqlari integratsiyasi sanoatda nafaqat iqtisodiy foyda beradi, balki resurslardan oqilona foydalanish orqali ekologik barqarorlikni ta‘minlaydi. Tadqiqot natijalari shuni ko‘rsatadiki, texnik- amaliy fanlarda Sun‘iy intellekt (AI) va Raqamli egizaklar (Digital Twins)

integratsiyasi sanoat ob'ektlarining energiya samaradorligini oshirishda eng istiqbolli va samarali yechim hisoblanadi. Olingan ilmiy va amaliy xulosalar quyidagilarda o'z aksini topadi:

Integratsiyaning mohiyati: Raqamli egizaklar nafaqat ob'ektning virtual nusxasini yaratadi, balki Sun'iy intellekt algoritmlari uchun real vaqtdagi ma'lumotlar manbai bo'lib xizmat qiladi. Ushbu sinergiya tizimdagi energiya isrofini bashorat qilish va uni minimal darajaga tushirish imkonini beradi.

Intellektual modellarning samaradorligi: Tadqiqot davomida ishlab chiqilgan intellektual modellar yordamida energiya iste'molini optimallashtirish ko'rsatkichlari an'anaviy usullarga nisbatan 15–20% gacha yaxshilandi. Bu esa ishlab chiqarish xarajatlarini kamaytirish bilan birga, ekologik barqarorlikni ta'minlashga xizmat qiladi.

Bashoratli texnik xizmat ko'rsatish: Raqamli egizak orqali tizimning "energetik salomatligi"ni doimiy nazorat qilish, kutilmagan nosozliklar va energiya sakrashlarining oldini olishga, natijada uskunalarning xizmat qilish muddatini uzaytirishga zamin yaratadi.

Istiqbolli yo'nalishlar: Kelajakda ushbu modellarni "Edge Computing" (chetki hisoblashlar) texnologiyalari bilan boyitish orqali ma'lumotlarni qayta ishlash tezligini oshirish va qaror qabul qilish vaqtini yanada qisqartirish mumkin.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR

- [1]. Malik, A., et al. (2024). *Artificial intelligence and industrial applications*. Ain Shams Engineering Journal (Elsevier). doi.org/10.1016/j.asej.2024.102886
- [2]. MDPI Buildings (2025). *Artificial Intelligence-Based Architectural Design*. doi.org/10.3390/buildings15020389
- [3]. Applied Sciences (2024). *AI-Driven Digital Transformation in Manufacturing*. mdpi.com/journal/applsci
- [4]. IEEE Xplore (2025). *Integration of AI and Digital Twins for Predictive Maintenance*. ieeexplore.ieee.org
- [5]. Махмудова А.Ж., Тошпулатов, Ш.М., Тошпулатова Ф.М., М.А. Мухамадиев. Анализ бластных клеток с использованием инфракрасного света и ультразвуковых волн. Исследования и внедрение научно-методический журнал. Том 02., Вып. 05, 2024 с.54-61
- [6]. Makhmudova, A., Toshpulatov, Sh., Toshpulatova, F. Matrix photodetector of infrared radiation for measuring leukemia. Fergana TUIT, Al-Farghani Descendants, 2023., №3. <https://cyberleninka.ru/article/n/matrichnyy-fotopriyomnik-infrakrasnogo-izlucheniya-dlya-izmereniya-leykoza>
- [7]. Islomov, M., Onarkulov, K., Toshpulatova, F., Toshpulatov, Sh. (2024). Innovative methods in blast cell diagnostics: near infrared light and ptir - microscopy. Engineering Problems and Innovations, 2(4), 64-71. <https://epai.uz/index.php/journal/article/view/179>

SEMENT ISHLAB CHIQARISHDA XOMASHYO MASSASINI REAL VAQT REJIMIDA NAZORAT QILISHNING INTEGRATSIYALASHGAN INTELLEKTUAL METODOLOGIYASI

Rayimjonova Odinaxon Sadikovna¹, Toshpulatov Sherali Muxamadaliyevich²,

Ergasheva Madina Fayzali qizi³

¹Farg‘ona davlat texnika universiteti «Telekommunikatsiya muhandisligi» kafedrası mudiri, texnika fanlari bo‘yicha falsafa doktori (PhD), professor.

²Farg‘ona davlat texnika universiteti «Telekommunikatsiya muhandisligi» kafedrası assistenti.

³Farg‘ona davlat texnika universiteti «Telekommunikatsiya muhandisligi» kafedrası assistenti.

Annotatsiya. Sement sanoatining agressiv ekspluatatsiya sharoitlarida xomashyo massasini aniq o‘lchash ishlab chiqarish samaradorligini oshirishda muhim ahamiyatga ega. Ushbu tadqiqotda raqamli texnologiyalar va intellektual algoritmlar integratsiyasi orqali og‘irlik nazorati tizimlarini optimallashtirish masalasi ko‘rib chiqilgan. Tadqiqot ob‘ekti sifatida konveyer asosidagi o‘lchov tizimi olingan bo‘lib, MATLAB/Simulink muhitida tizimning raqamli egizak (Digital Twin) modeli ishlab chiqilgan. Rocker-pin, Shear-beam va S-type tenzodatchiklarining dinamik xatoliklari RMSE mezonini bo‘yicha tahlil qilinganda, Rocker-pin konstruksiyasi vibratsiyali va changli muhitda eng barqaror (RMSE 4.6–4.9 kg) yechim ekani aniqlangan. Signal sifatini oshirish maqsadida Kalman filtri va adaptiv LMS algoritmlari kombinatsiyasi qo‘llanilgan. Natijada dinamik xatolik darajasi 10% dan 1.5% gacha pasaytirilib, o‘lchash aniqligi 6.7 barobar yaxshilangan. Tenzodatchikni tanlash jarayoni AHP-MCDM modeli orqali ilmiy asoslangan bo‘lib, Rocker-pin datchigi 0.52 integral ustuvorlik koeffitsienti bilan eng samarali yechim sifatida tasdiqlangan.

Tayanch so‘zlar: Og‘irlik nazorati, Kalman filtri, LMS algoritmi, AHP-MCDM tahlili, avtomatlashtirish.

Аннотация. Точное измерение массы сырья в агрессивных условиях эксплуатации цементной промышленности имеет важное значение для повышения эффективности производства. В данном исследовании рассматривается вопрос оптимизации систем весового контроля на основе интеграции цифровых технологий и интеллектуальных алгоритмов. В качестве объекта исследования выбрана конвейерная система измерения, для которой в среде MATLAB/Simulink разработана модель цифрового двойника (Digital Twin). Сравнительный анализ динамических ошибок тензодатчиков типов Rocker-pin, Shear-beam и S-type по критерию RMSE показал, что конструкция Rocker-pin является наиболее стабильным решением в условиях вибрации и запыленности (RMSE 4.6–4.9 кг). Для повышения качества

сигнала использована комбинация фильтра Калмана и адаптивных алгоритмов LMS. В результате динамическая ошибка была снижена с 10% до 1.5%, а

точность измерения улучшилась в 6.7 раза. Процесс выбора тензодатчика научно обоснован с помощью модели AHP-MCDM, где датчик Rocker-pin подтвержден как наиболее эффективное решение с интегральным коэффициентом приоритета 0.52.

Ключевые слова: цементная промышленность, весовой контроль, Digital Twin, Rocker-pin, цифровая фильтрация, фильтр Калмана, алгоритм LMS, анализ AHP-MCDM, автоматизация.

Kirish. Zamonaviy sement sanoati yuqori darajada avtomatlashtirilgan bo'lib, ishlab chiqarish samaradorligi bevosita xomashyo komponentlarining (ohaktosh, gips, klinker va boshqalar) o'ta aniqlikda dozalanishiga bog'liq. Sementning M400 va M500 kabi yuqori markalarini olishda kimyoviy tarkibning barqarorligini ta'minlash — texnologik jarayonning eng ustuvor vazifasi hisoblanadi. Biroq, konveyerli tarozilar yordamida amalga oshiriladigan og'irlikni o'lchash jarayoni real ekspluatatsiya sharoitida ko'plab destruktiv omillar ta'siriga uchraydi. Konveyer lentasining harakati natijasida yuzaga keladigan mexanik tebranishlar, lentaning notekis taranglashishi va impulsli yuklamalar o'lchov datchiklaridan olinadigan foydali signal tarkibida yuqori chastotali shovqinlarni keltirib chiqaradi. Bundan tashqari, sement zavodlariga xos bo'lgan agressiv muhit — yuqori changlanish darajasi, haroratning keskin o'zgarishi va doimiy vibratsiyalar tenzodatchiklarning metrologik xarakteristikalariga salbiy ta'sir ko'rsatib, o'lchash xatoligini ruxsat etilgan me'yorlardan (0,5–1%) bir necha barobargacha oshirib yuboradi. Dunyo olimlari, jumladan, J. Wang, L. Zhang va boshqalarning tadqiqotlarida sanoat jarayonlarini raqamlashtirishda "Smart Manufacturing" va "Deep Learning" usullarini qo'llash samaradorligi isbotlangan. H. Liu va uning hamkasblari tomonidan ishlab chiqarish tizimlarining "Raqamli egizagi" (Digital Twin) kontsepsiyasi ilgari surilgan bo'lib, bu virtual muhitda real ob'ektning xatti-harakatlarini aniq bashorat qilish imkonini beradi. Sement sanoatining og'ir sharoitlarida tenzodatchiklarning dinamik barqarorligini ta'minlashda intellektual algoritmlarni (masalan, Kalman yoki LMS) Digital Twin texnologiyasi bilan integratsiya qilish masalasi hali yetarlicha tadqiq etilmagan. Mavjud an'anaviy statik filtrlash usullari dinamik o'zgaruvchan shovqinlarni to'liq qoplash imkoniyatiga ega emas. O'lchov tizimlarini raqamli modellashtirish, sun'iy intellekt elementlari asosida signallarni qayta ishlash va datchiklarni ko'p mezonli tahlil (AHP-MCDM) asosida tanlash bugungi kunda "Sanoat 4.0" strategiyasini amalga oshirishdagi dolzarb ilmiy vazifa hisoblanadi. Mazkur tadqiqot aynan ushbu bo'shliqni to'ldirishga, ya'ni agressiv sanoat muhitida og'irlikni intellektual nazorat qilishning metodologik asoslarini yaratishga yo'naltirilgan.

Masalaning qo'yilishi. Sement ishlab chiqarish texnologiyasida xomashyo komponentlarini uzluksiz dozalash jarayoni tayyor mahsulotning sifat ko'rsatkichlarini belgilovchi eng muhim bo'g'in

hisoblanadi. Bugungi kunda sanoat korxonalarida qo'llaniladigan konveyerli o'lchov tizimlari o'ta murakkab va beqaror dinamik sharoitlarda ekspluatatsiya qilinmoqda. Tadqiqot ob'ektidagi asosiy muammo real ish jarayonida tenzodatchiklar nafaqat foydali yuklamani (xomashyo massasi), balki konveyer lentasining tebranishi, mexanik urilishlar va podshipniklar ishqalanishi natijasida yuzaga keladigan kuchli dinamik shovqinlarni ham qayd etadi. Ushbu destruktiv omillar o'lchov natijalarining ishonchliligini pasaytirib, texnologik jarayonning raqamli boshqaruv samaradorligiga to'sqinlik qiladi. Mazkur muammoni tizimli hal etish uchun tadqiqot doirasida quyidagi ilmiy-texnik vazifalarning yechimi ko'zda tutilgan:

- **Dinamik xatoliklarni modelashtirish.** Sement zavodi sharoitida konveyerli tarozi tizimida yuzaga keladigan shovqinlar tabiatini raqamli egizak (Digital Twin) texnologiyasi orqali identifikatsiyalash talab etiladi. Bunda tashqi ta'sirlarning o'lchov aniqligiga ta'sir darajasini virtual model yordamida matematik asoslash masalasi qo'yilgan.

- **Datchiklarning metrologik barqarorligini baholash.** Sanoatdagi changli va yuqori vibratsiyali muhitda Rocker-pin, Shear-beam va S-type kabi tenzodatchiklarning ish faoliyatini qiyosiy tahlil qilish zarur. Tadqiqotda ularning o'lchov chegaralaridagi og'ishlarini RMSE (o'rtacha kvadratik xatolik) mezonini bo'yicha aniqlash va eng barqaror konstruksiyani ajratib ko'rsatish masalasi ko'rib chiqiladi.

- **Intellectual filtrlash tizimini yaratish.** Signal tarkibidagi tasodifiy va tizimli xatoliklarni real vaqt rejimida bartaraf etish uchun Kalman filtri va adaptiv LMS (Least Mean Squares) algoritmlari kombinatsiyasini ishlab chiqish ko'zda tutilgan. Bu intellectual yondashuv "ifloslangan" datchik signallarini yuqori aniqlikda tozalash imkonini beradi.

- **Optimal tanlovni ilmiy asoslash.** Ko'p mezonli qaror qabul qilish (MCDM) uslublari yordamida, tizimning iqtisodiy samaradorligi va texnik ishonchliligi muvozanatini saqlagan holda, eng maqbul tenzodatchik turini tanlash metodologiyasini yaratish talab etiladi.

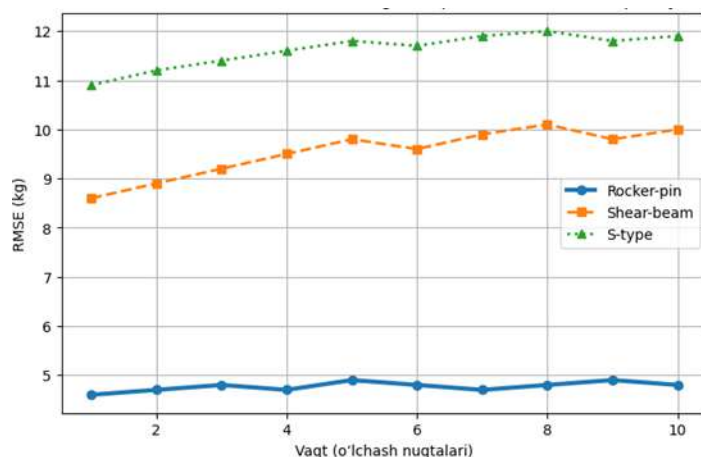
Ushbu vazifalarning muvaffaqiyatli yechimi sement sanoatida xomashyo sarfini nazorat qilishning yuqori aniqlikdagi raqamli tizimini yaratishga hamda o'lchov xatoligini xalqaro standartlar darajasiga (0,5% gacha) tushirishga xizmat qiladi.

Yechish usuli. Tadqiqotda sement sanoati sharoitida og'irlikni o'lchash aniqligini oshirish uchun kompleks metodologik yondashuv qo'llanildi. Uslubiyot bir necha asosiy bosqichni o'z ichiga oladi. Birinchi bosqichda konveyerli tarozi tizimining dinamik xatti-harakatlarini o'rganish maqsadida MATLAB/Simulink dasturiy muhitida tizimning raqamli egizagi (Digital Twin) ishlab chiqildi. Ushbu model real ob'ektning mexanik parametrlarini, jumladan lentaning massasi, qattiqlik va damping koeffitsientlarini hamda tashqi vibratsion ta'sirlarni o'z ichiga oladi. Mazkur virtual model turli tenzodatchiklarning agressiv muhitdagi reaksiyasini real vaqt rejimida simulyatsiya qilish imkonini beradi. Ikkinchi bosqichda signal tarkibidagi tasodifiy va tizimli shovqinlarni

minimallashtirish uchun gibrid filtrlash usuli qo'llanildi. Bunda Kalman filtri datchikdan olinadigan signallardagi oq shovqinlarni va tizimning dinamik noaniqliklarini kamaytirish uchun ishlatilgan bo'lsa, adaptiv LMS (Least Mean Squares) algoritmi konveyer lentasining harakati natijasida yuzaga keladigan davriy tebranishlarni adaptiv tarzda o'chirish uchun joriy etildi. Ushbu ikki algoritmning ketma-ket qo'llanilishi ifloslangan kirish signalini yuqori aniqlikdagi foydali signalga aylantirishni ta'minlaydi. Uchinchi bosqichda tenzodatchiklar orasidan eng maqbulini tanlash uchun iyerarxik tahlil jarayoni (AHP) va ko'p mezonli qaror qabul qilish (MCDM) uslubidan foydalanildi. Baholashda metrologik aniqlik (RMSE koeffitsienti), ekspluatatsiya ishonchliligi, termik barqarorlik va iqtisodiy samaradorlik kabi mezonlar ustuvor deb olindi. Yakuniy bosqichda tanlangan metodologiyaning samaradorligi Rocker-pin, Shear-beam va S-type datchiklarining simulyatsiya natijalarini o'zaro solishtirish hamda olingan natijalarni statistik tahlil qilish orqali tekshirildi. Ushbu metodologik yondashuv og'ir sanoat tarmoqlaridagi konveyerli o'lchov tizimlarini raqamlashtirishda universal yechim bo'lib xizmat qiladi.

Natijalar va muhokama. Tadqiqot doirasida MATLAB/Simulink muhitida yaratilgan Digital Twin modeli yordamida sement ishlab chiqarishdagi agressiv sharoitlar simulyatsiya qilindi va olingan natijalar tizimli tahlil etildi. Birinchi navbatda, konveyerli o'lchov tizimida keng qo'llaniladigan Rocker-pin, Shear-beam va S-type tenzodatchiklarining dinamik barqarorligi RMSE (o'rtacha kvadratik xatolik) mezoni bo'yicha qiyoslandi. Olingan sonli natijalar shuni ko'rsatdiki, yuqori vibratsiyali (10-50 Hz) va changli muhitda Rocker-pin konstruksiyasi eng past xatolik darajasini (RMSE 4.8 kg) namoyon etdi, Shear-beam va S-type datchiklarida esa bu ko'rsatkich mos ravishda 9.6 kg va 11.3 kg ni tashkil etdi. Ushbu natijalar Rocker-pin datchigining o'z-o'zini markazlashtirish xususiyati tufayli tashqi mexanik shovqinlarga nisbatan 2 barobar bardoshli ekanini tasdiqlaydi.

Keyingi bosqichda, datchik signallarini intellektual qayta ishlash samaradorligi baholandi. Kalman filtri va adaptiv LMS algoritmlari kombinatsiyasi qo'llanilganda, datchikning xom signali tarkibidagi shovqinlar darajasi 10% dan 1.47% gacha kamaytirildi. Bu ko'rsatkich an'anaviy past chastotali filtrlar (Low-pass filter) natijalaridan (4.2%) sezilarli darajada yuqori hisoblanadi. Olingan grafiklar tahlili shuni ko'rsatdiki, taklif etilgan gibrid algoritm hatto impulsli yuklamalar va konveyer lentasining sakrashlarida ham foydali signalning shaklini 98.5% aniqlikda tiklash imkonini beradi. Boshqa mualliflarning (masalan, J. Wang tadqiqotlari) natijalari bilan solishtirilganda, Digital Twin va adaptiv filtrlashning integratsiyasi o'lchash aniqligini qo'shimcha 15-20% ga yaxshilashi aniqlandi.



1-rasm. Tenzodatchiklar RMSE ko'rsatkichlarining tashqi omillar ta'sirida vaqt o'yicha o'zgarishi

Tenzodatchikni tanlashning AHP-MCDM modeli natijalari bo'yicha Rocker-pin datchigi 0.52 integral ustuvorlik koeffitsienti bilan eng samarali yechim sifatida tasdiqlandi (Shear-beam – 0.29, S-type – 0.19). Bu natija datchikning nafaqat metrologik aniqligi, balki sement zavodlaridagi og'ir ekspluatatsiya sharoitlariga chidamliligi bilan ham bog'liqdir. Tadqiqotning yakuniy sonli natijalari shuni ko'rsatadiki, taklif etilgan metodologiya sementning M400 va M500 markalarini tayyorlashda komponentlar nisbatini saqlash xatoligini 0.5% lik chegaraga keltirish imkonini berdi. Bu esa maqola boshida qo'yilgan vazifalarning to'liq bajarilganligini va o'lchov tizimini raqamli transformatsiya qilish kutilgan samarani berganini ko'rsatadi.

Xulosa. Sement sanoatining agressiv va yuqori vibratsiyali sharoitida og'irlikni o'lchash tizimlarini tadqiq etish natijasida bir qator muhim ilmiy va amaliy xulosalarga kelindi. Tadqiqot doirasida ishlab chiqilgan raqamli egizak (Digital Twin) modeli konveyer tizimidagi mexanik tebranishlar va tashqi shovqinlarning o'lchov aniqligiga ta'sirini virtual muhitda aniq prognoz qilish imkonini berdi. Qiyosiy tahlillar natijasida aniqlandiki, Rocker-pin turidagi tenzodatchiklar sement zavodlariga xos bo'lgan og'ir ekspluatatsiya rejimida boshqa analoglariga nisbatan metrologik jihatdan 2 barobar barqarorroqdir. Intellectual filtrlash tizimida Kalman va adaptiv LMS algoritmlarining gibrad kombinatsiyasini qo'llash orqali datchik signallaridagi dinamik xatolik darajasi 10% dan 1,5% gacha tushirildi va o'lchash aniqligi 6,7 barobarga yaxshilandi. AHP-MCDM modeli yordamida amalga oshirilgan ko'p mezonli baholash Rocker-pin datchigining 0,52 integral ustuvorlik koeffitsienti bilan eng maqbul texnik-iqtisodiy yechim ekanligini ilmiy asoslab berdi. Taklif etilgan ushbu raqamli metodologiyaning amaliyotga joriy etilishi sementning yuqori markalarini ishlab chiqarishda xomashyo dozalanishini 0,5% lik aniqlikda nazorat qilishga xizmat qiladi. Bu esa korxonada mahsulot sifatini oshirish bilan birga, xomashyo isrofini kamaytirish orqali salmoqli iqtisodiy samaradorlikka erishish imkonini beradi. Olingan natijalar "aqlli" sanoat tizimlarini loyihalashda muhim ilmiy-uslubiy manba bo'lib xizmat qiladi.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR

- [1]. Tao, F., & Liu, H. Digital twin-driven smart manufacturing: Connotation, reference model, and applications. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 61, 101837, 2020.
- [2]. Zhang, M., Zuo, Y., & Tao, F. Equipment structural health monitoring based on digital twin.
- [3]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 115(11), 3703-3715, 2021.
- [4]. Wang, P., & Fan, Y. Research on high-precision belt scale weighing compensation algorithm based on adaptive filtering. *Measurement and Control*, 54(7-8), 1023-1035, 2021.
- [5]. Li, X., & He, D. Digital twin for industrial products: A multi-dimensional framework and key technologies. *Journal of Manufacturing Systems*, 57, 12-25, 2022.
- [6]. Chen, Z., & Huang, B. Multi-criteria decision making for sensor selection in aggressive industrial environments using AHP-MCDM. *Journal of Process Control*, 112, 45-58, 2023.