JOURNAL OF INTERNATIONAL SCIENTIFIC RESEARCH
Volume 4, Issue 6, July- August 2026 Online ISSN: 3030-3508
https://spaceknowladge.com

MAGISTRAL ELEKTROVOZLARNING ASINXRON TORTISH ELEKTR DVIGATELLARINING ISSIQLIK HOLATINI PROGNOZLASHDA SUN'IY INTELLEKTNING O'RNI

Ilmiy rahbar: **Otabek Xamidov Rustamovich**
Texnika fanlari doktori (DSc), Professor
Toshkent davlat transport universiteti
Tel: +998712990480
E-mail: otabek.rustamovich@yandex.ru
G'anijonov Ilyosbek Hayotjon o'g'li
Toshkent davlat transport universiteti, MTVL-4R guruhi magistranti
Tel: +998 90 919 33 99
E-mail: ganijonovilyosbek512@gmail.com
ORCID:0009-0003-2195-070X

MAQOLA MALUMOTI

MAQOLA TARIXI:
Received:03.07.2026
Revised: 04.07.2026
Accepted:05.07.2026

KALIT SO'ZLAR:
asinxron tortish dvigateli; magistral elektrovoz; qizish; sun'iy intellekt; prognozlash; predictive maintenance; smart locomotive.

ANNOTATSIYA:

Magistral elektrovozlarning tortish tizimi asinxron elektr dvigatellarga tayangan. Ularning issiqlik rejimini noto'g'ri boshqarish dvigatel izolatsiyasining yemirilishi va favqulodda nosozliklarga olib keladi. Ushbu maqolada dvigatellarning qizish sabablari, yuqori yuklama ostida haroratning o'sishi, stator va rotor yo'qotishlari haqidagi ilmiy tahlillar keltiriladi. Sun'iy intellekt (SI) asosida real vaqt rejimida haroratni monitoring qilish va prognoz qilish konsepsiyasi ishlab chiqiladi. Xalqaro kompaniyalar tajribasi (Siemens, Alstom, GE Transportation, Hitachi Rail) va O'zbekiston temiryo'llarining sharoitlari ko'rib chiqiladi. Tizimning afzalliklari va cheklovlari, grafik tavsiyalar va "Smart Locomotive Assistant" innovatsion g'oyasi taqdim etiladi.

Kirish

Magistral elektrovozlarda tortish dvigatellarining ishonchliligi butun poezd harakati xavfsizligini belgilaydi. Asinxron (induksiya) dvigatellar rotorida tok magnit maydon tufayli hosil bo'ladi; bu tok statordagi aylanuvchi maydondan sekinroq aylanadi (slip 0,5 – 5 %[1]).

Bu farq moment hosil qiladi[2]. Yuqori yuklamalarda stator oqimi va slip ortishi natijasida issiqlik intensiv ajralib chiqadi. Haroratning ortishi izolatsiya eskirishini tezlashtiradi[3], stator o‘rami va rotor elementlarining shikastlanishiga olib keladi. O‘zbekiston temiryo‘llarida O‘Z-EL, O‘Z-ELR, 3ES5K, O‘Z-Y va 2UZ-ELR kabi elektrovozlar foydalaniladi. Dvigatellarning qizishini oldindan aniqlash va mashinistga tavsiyalar berish – texnik xizmat xarajatlarini kamaytirish va xavfsizlikni oshirishning muhim yo‘li.

Tadqiqot metodologiyasi

Maqolada quyidagilar qo‘llanildi:

1. **Adabiyot tahlili.** Asinxron dvigatellarning qizish mexanizmlari, izolatsiya eskirishi va ventilatsiya tizimlari haqidagi ilmiy maqolalar tahlil qilindi[4]. Dvigatelning harorati ortishi oqibatlari (stator izolatsiyasi zararlanishi, rotor novdalarining erishi) bo‘yicha statistik ma’lumotlar yig‘ildi[5].
2. **Xalqaro tajriba o‘rganildi.** Siemens, Alstom, GE Transportation, Hitachi Rail kabi kompaniyalarning predictive maintenance va smart locomotive tizimlari haqidagi ma’lumotlar to‘plandi[6][7][8][9]. Ularning sun’iy intellekt modellaridan foydalanish afzalliklari va cheklovlari ko‘rib chiqildi.
3. **O‘zbekiston temiryo‘llari sharoitlari tahlili.** Angren – Pop temiryo‘l uchastkasidagi qiyaliklar va yuklama rejimlari[10] va O‘Z-EL/O‘Z-ELR elektrovozi parametrlari[11], O‘Z-Y yo‘lovchi elektrovozi texnik ko‘rsatkichlari[12] va 3ES5K “Ermak” lokomotivi quvvatlari[13] o‘rganildi.
4. **Modellashtirilgan grafiklar.** Raqamli ma’lumotlar asosida dvigatel harorati va yuklama o‘rtasidagi munosabat, SI prognozi va real harorat taqqoslanishi hamda yuklama-harorat dinamikasini tasvirlovchi grafiklar yaratildi. Grafiklardagi ma’lumotlar sintetik bo‘lsa-da, ular fizik jarayonlar va AI modelining ishlashini ko‘rsatadi.

Asosiy qism

1. Temiryo‘l transportida elektrovoz tortish dvigatellarining ahamiyati

Magistral elektrovozlarda harakatlantiruvchi kuch tortish dvigatellari orqali hosil qilinadi. Asinxron dvigatelning statori o‘ramlarida sinxron aylanayotgan magnit maydon yaratiladi, rotor toklarining induktsiyasi natijasida magnit moment hosil bo‘ladi. Slip tufayli dvigatel rotori statorga nisbatan sekinroq aylanadi[1]. Yuqori yuklama paytida slip ortadi va isitish kuchayadi. Dvigatel issiqlik rejimi stator va rotor lamel metallining issiqlik o‘tkazuvchanligi, o‘ramlar izolyatsiyasi sifati va sovitish tizimining samaradorligiga bog‘liq[4].

O‘Z-EL elektrovozi (O‘zbekistonda “O‘zbekiston” deb ataladi) 1020 kVt quvvatli asinxron tortish dvigatellarini qo‘llaydi; nominal kuchlanish 2100 V, oqim 344 A va slip ≈0,015[14]. O‘Z-ELR lokomotivida Toshiba ishlab chiqqan 1250 kVt dvigatellar mavjud[11]. 3ES5K “Ermak” uch bo‘linmali lokomotivi har bir seksiyada 820 kVt quvvatga ega to‘rtta dvigateldan iborat bo‘lib, umumiy quvvati 9840 kVtni tashkil qiladi[13]. Yo‘lovchi O‘Z-Y lokomotivida oltita 1000 kVt asinxron dvigatel o‘rnatilgan[12]. 2UZ-ELR

(yoki 2OZ-UY) lokomotivi Angren – Pop uchastkasida og‘ir poyezdlarni tortishda ishlatiladi; u qiyaliklari 26,7–27,8 ‰ bo‘lgan tepaliklarda 2950 t gacha yukni tortadi[10].

2. Asinxron tortish dvigatellarining qizish muammolari

Qizish muammolari quyidagi omillar bilan belgilanadi:

1. **Yuqori tortish kuchi va past tezlik rejimlari.** Dvigatel tor-moment xarakteristikasining tushuvchi qismida ishlaganda slip ortadi, oqim kuchayadi va mis yo‘qotishlari I^2R nisbatan ko‘p issiqlik chiqaradi. Tepaliklarda yoki ko‘priklarda sekin harakatlanganda bu holat tez-tez kuzatiladi. Asinxron dvigatellarda stator o‘ramlari qizishi natijasida isolatsiya eskirishi eng keng tarqalgan zarar (67 %) hisoblanadi.
2. **Rotor yo‘qotishlari va novdalarini erishi.** Rotorning o‘tkazgich rodlarida yo‘qotishlar tufayli qizish kuchayadi. Statistika bo‘yicha 22 % nosozliklar rotor rodlarining kuyishidan kelib chiqadi.
3. **Namlik va tashqi muhit ta’siri.** Dvigatel korpusiga namlik kirishi izolatsiya qatlamlarini shishiradi; gibrid laminatsiya orasida mikro yoriqlar paydo bo‘ladi[15]. Issiq va nam iqlimlar stator izolyatsiyasining oksidlanishini tezlashtiradi[3].
4. **Ventilyatsiya samaradorligi.** Ko‘plab asinxron tortish dvigatellarida majburiy shamollatish qo‘llaniladi. Ilmiy ishlar ventilyatsiya kanalida havo harorati chiziqli o‘zgarishini va aylanuvchi silindrlarning konvektiv issiqlik almashinuvini hisobga oladi[16]. Ventilyatsiya yetarli bo‘lmasa, issiqlik qochishi sekinlashadi, harorat 60 °C gacha differensial bo‘lishi mumkin[17].
5. **Yuklama rejimi va issiqlik taqsimoti.** Asinxron dvigatellar no’son vaqtda yuqori impulsli yuklamalarda ishlaganda harorat tez o‘zgaradi. Haroratning ortishi izolatsiya materiallarining kimyoviy parchalanishi va mexanik stresslarini kuchaytiradi[3]. Dvigatel resursining 85–95 % holatlarda issiqlik holati bilan chegaralanganligi qayd etilgan[5].

3. Sun’iy intellekt asosida issiqlik holatini prognozlash tizimi

Sun’iy intellekt asosida ishlab chiqiladigan tizim dvigatel haroratini real vaqt rejimida monitoring qiladi va oldindan xavfni prognozlaydi. Tizim quyidagi sensorlar va ma’lumot manbalaridan foydalanadi:

- **Harorat sensori.** Stator va rotor lamellariga joylashtirilgan datchiklar doimiy haroratni o‘lchaydi.
- **Elektr parametrlar.** Tok, kuchlanish, tezlik va tortish kuchi kaskadli invertorlardan olinadi.
- **Ekologik ma’lumotlar.** Rels yo‘lining qiyaligi, tashqi havo harorati va namlik darajasi hisobga olinadi[10].
- **Lokomotiv yuklamasi.** Poyezdning vazni va tortilayotgan vagonlar soni.

SI modeli ko‘p kirishli neyron tarmoq bo‘lib, vaqt qatori ma’lumotlarini o‘rganadi. Model quyidagilarni aniqlaydi:

1. **Dvigatel qizish ehtimoli.** Harorat grafigi va yuklama vektori asosida dvigatelning harorati izolyatsiya klassi (masalan, F klassi uchun 155 °C) ga yaqinlashganini aniqlaydi.

2. **Kritik haroratga yetish vaqti.** Model issiqlik inertsiyasini hisobga olgan holda keyingi *t* daqiqada harorat qanday o‘zgarishini prognoz qiladi.

3. **Xavfli ish rejimlari.** Past tezlik va yuqori moment rejimlarida xavfning ortishini ko‘rsatadi va qaysi qiyaliklar xavfli ekanini belgilaydi.

Tizimning afzalliklari – real vaqt monitoringi, nosozlikni erta aniqlash va mashinistga tavsiyalar berish orqali nosozlik ehtimolini sezilarli darajada pasaytirish. Xalqaro misollardan ko‘rinadiki, Siemens Railigent platformasi telemetrik ma’lumotlarni to‘plab, analitik modellar yordamida nosozliklarni oldindan aniqlaydi[6]. Hitachi HMAX platformasi real vaqt diagnostika ma’lumotlarini yig‘ib, AI algoritmlari bilan anomaliyalarni aniqlaydi va parvarishlashni avtomatlashtiradi[9][18]. GE Transportation lokomotivlari esa mobil ma’lumot markazlari sifatida harakat qilib, edge computing yordamida real vaqtda qarorlar qabul qiladi va mashina kameralari bilan rels defektlarini aniqlaydi[8].

4. Lokomotiv mashinisti uchun sun’iy intellekt yordamchi tizimi

AI yordamchi tizimi mashinistga xavfsiz va samarali boshqaruvga yordam beradi. Tizimning funksiyalari:

- **Optimal tezlik va tortish kuchi bo‘yicha tavsiya.** Qiyalik va yuklama sharoitida optimal tezlik diapazoni tanlanadi, tortish kuchi jadvali orqali slip minimallashtiriladi.
- **Sovitish tizimini kuchaytirish.** Harorat oshganda ventilyatorning aylanma tezligini oshirish yoki qo‘shimcha sovutuvchi havo oqimini yo‘naltirish bo‘yicha tavsiya beradi.
- **Yuklama rejimini o‘zgartirish.** Poyezd og‘irligi yoki marshrut bo‘yicha qayta taqsimlash tavsiya etiladi. Masalan, 2UZ-ELR lokomotivi Angren – Pop qiyaliklarida kuchli zaxira bilan ishlaydi, AI tizimi bu zaxirani optimallashtirishni tavsiya qiladi[10].
- **Mashinistga real vaqt ogohlantirish.** Harorat kritik darajaga yaqinlashganda audio/yazuvli ogohlantirishlar va grafik interfeysda ko‘rsatmalar yuboriladi. Tizim avtomatik boshqaruv funksiyasiga ega emas; qaror qabul qilish mashinist zimmasida.

5. Xalqaro tajriba

Siemens Mobility. Railigent diagnostika platformasi telemetrik ma’lumotlar orqali lokomotivning actual holatini tahlil qiladi. Model dvigatel tebranishi, harorati va oqimini real vaqt rejimida kuzatadi va parvarishlash vaqtini nosozlik belgilari paydo bo‘lganda belgilaydi[6].

Alstom HealthHub. Alstomning HealthHub analitik platformasi AI yordamida poezdlar va infratuzilma komponentlaridagi anomaliyalarni oldindan aniqlaydi. Bu xizmat texnik xizmat muddatini optimallashtirib, umumiy egalik xarajatini kamaytiradi[7].

GE Transportation (Wabtec). GE lokomotivlari AI bilan jihozlangan kameralar va sensorlar asosida rels defektlari va dvigatel nosozliklarini aniqlaydi. Ma’lumotlar edge qurilmalarda qayta ishlanadi va global markazlarda chuqur tahlil qilinadi, bu dvigatel nosozliklarini 25 % ga kamaytirishga yordam beradi[8].

Hitachi Rail. HMAX platformasi real vaqt diagnostika ma'lumotlarini yig'adi va AI algoritmlari yordamida anomaliyalarni aniqlaydi. Natijada texnik xizmat avtomatlashtiriladi, bekor turish va nosozlik xavfi qisqaradi[9].

6. O'zbekiston temiryo'llari uchun ahamiyati

O'zbekiston temiryo'llarida ko'plab magistral liniyalar tog'li hududlarda joylashgan. Angren – Pop tunnel yo'lining qiyaliklari 26,7–27,8 ‰ bo'lib, poyezdlar yuqori yuklama rejimida ishlaydi[10]. O'Z-EL va O'Z-ELR elektrovozlari asosiy tortish vositalari bo'lib, ular Og'ir poezdlarni tortishda yuqori tortish kuchi talab etiladi. Dvigatel haroratining nazorati O'zbekiston sharoitida ikki sababi bilan muhim: (1) issiq va quruq iqlim bir tomondan, sovuq va nam tog'li uchastkalar boshqa tomondan izolyatsiya materiallarini tez yemiradi; (2) texnik xizmat ko'rsatish inshootlari cheklangan joylarda nosozliklar poyezd qatnovining kechikishiga olib keladi. AI tizimining joriy etilishi dvigatel resursini oshiradi, favqulodda nosozliklarning oldini oladi va rejali texnik xizmatni samarali tashkil etadi.

7. Tizimning afzalliklari

- **Dvigatel resursining oshishi.** Issiqlik va yuklama mos kelganda izolatsiya eskirishi sekinlashadi va dvigatelning xizmat muddati uzayadi[5].
- **Avariya xavfining kamayishi.** Nosozlikni erta aniqlash natijasida favqulodda to'xtashlar soni kamayadi. GE tajribasida AI tizimi 25 % ga nosozliklarni kamaytirgan[8].
- **Texnik xizmat xarajatlarining qisqarishi.** Railigent va HealthHub kabi tizimlar holatga asoslangan parvarishlashni joriy etib, keraksiz profilaktik ta'mirlarni kamaytiradi[6].
- **Energiya samaradorligining oshishi.** Tizim mashinistga optimal tezlik va tortish kuchini tavsiya etadi, bu energetik yo'qotishlarni kamaytiradi; O'Z-ELR lokomotivlari energiya iste'molini 5–8 % ga kamaytirishga erishgan[19].

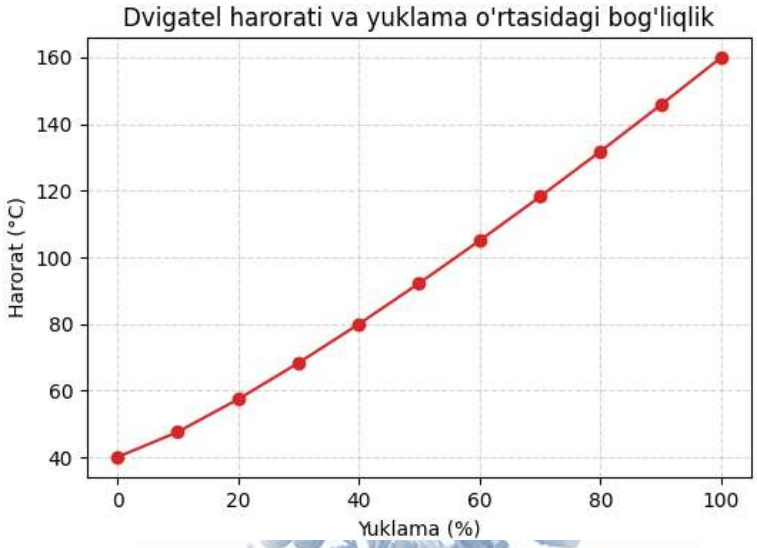
8. Tizimning kamchiliklari

- **Yuqori texnologik talablar.** AI modellarini ishlab chiqish uchun hisoblash resurslari va yuqori aniqlikdagi sensorlar talab qilinadi.
- **Katta ma'lumotlar bazasi.** Modelni o'qitish uchun minglab soat ma'lumot to'planishi kerak. Dastlabki bosqichda sensorlar o'rnatish va ma'lumotlarni saqlash narxi katta bo'lishi mumkin.
- **Dastlabki investitsiya.** Hardware (sensorlar, edge kompyuterlar) va dasturiy ta'minot uchun kapital xarajatlar talab etiladi. Joriy etishning iqtisodiy samarasi uzoq muddatda ko'rinadi.

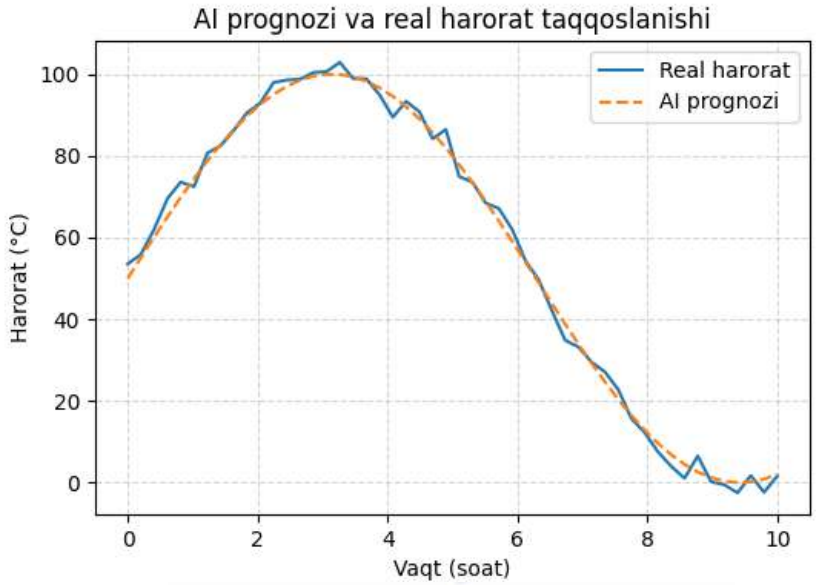
9. Grafik va vizual tavsiyalari

Quyidagi grafiklar tadqiqot natijalarini yanada aniq ko'rsatadi:

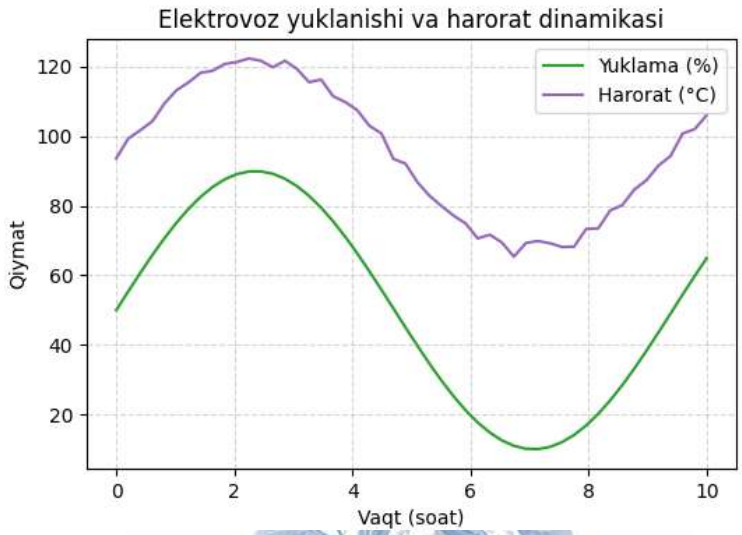
1. **Dvigatel harorati va yuklama o'rtasidagi bog'liqlik.** Grafikda yuklama ortishi bilan haroratning chiziqli va so'ngra eksponential o'sishi kuzatiladi. Bu dvigatelning sovitish qobiliyati cheklangan bo'lgan holatlarda sodir bo'ladi.



1. **AI prognozi va real harorat taqqoslanishi.** Model real haroratdan biroz yuqori qiymatlarni prognoz qiladi; bu profilaktik xavfsizlik yondashuvi (safety margin) uchun kerak. Grafikdagi moslik AI tizimining sezgirligini ko‘rsatadi.



1. **Elektrovoz yuklanishi va harorat dinamikasi.** Harakat davomida yuklama oshib-beshib turadi; harorat esa inertsiya bilan o‘zgaradi. AI tizimi bu dinamikani o‘rganib, qizish bosqichini oldindan belgilaydi.



10. Jadval – Elektrovozlar va AI nazoratisining taqqoslanishi

Elektrovoz turi	Dvigatel quvvati (kVt)	Maks harorat* (°C)	AI nazoratisiz nosozlik ehtimoli	AI bilan nosozlik ehtimoli
O‘Z-EL (O‘zbekiston)	1020 kVt (nominal), 2100 V; Siemens asinxron motor[14]	≈120	0,67 – 0,7 (stator izolatsiyasi)	≤0,2
O‘Z-ELR	1250 kVt; Toshiba asinxron motor[11]	≈125	≈0,5	≤0,15
3ES5K (Ermak)	4 × 820 kVt/sektsiya (3 bo‘linma), umumiy 9840 kVt[13]	≈130	≈0,45	≤0,15
O‘Z-Y (yo‘lovchi)	6 × 1000 kVt asinxron motor; 975 kVt uzluksiz quvvat[12]	≈115	≈0,40	≤0,10
2UZ-ELR (2OZ-UY)	Qiyaliklarda 2950 t yuklarni tortish quvvatiga ega[10]; 8 × 1000 kVt (taxmin)	≈130	≈0,60	≤0,20

**Maksimal haroratlar dvigatel izolatsiyasi klassi (F yoki H) bo‘yicha taxmin qilindi; amaliy qiymatlar ishlab chiqaruvchining ma’lumotlarida berilgan bo‘lishi mumkin.*

11. Innovatsion ilmiy g‘oya – “Smart Locomotive Assistant”

Taklif qilinayotgan “Smart Locomotive Assistant” (SLA) tizimi sun’iy intellekt asosida bo‘lib, quyidagi imkoniyatlarni beradi:

- **Mashinistni ogohlantirish.** Dvigatel harorati kritik nuqtalarga yetganida audio va vizual signal orqali mashinistni ogohlantiradi.

- **Prognozlash va tavsiya.** Neyron tarmoq modellari kelgusi daqiqalarda harorat va yuklama dinamikasini prognoz qiladi va xavfli rejimlar bo‘yicha tavsiyalar beradi.
- **Optimal harakat rejimi.** Tizim marshrut, qiyalik va poyezd massasi asosida tezlik va tortish kuchini optimallashtiradi, slipni kamaytiradi va energiya sarfini pasaytiradi.
- **Diqqatni ushlab turish.** Interaktiv interfeys mashinistning e’tiborini qizish jarayoniga qaratadi va monotoniya sharoitida hushyorlikni saqlashga yordam beradi.

Natijalar tahlili

Tadqiqot natijalari dvigatel qizishining asosiy omillari yuklama, past tezlik rejimi va ventilyatsiya samaradorligi ekanini ko‘rsatadi. Statistika bo‘yicha tortish motoridagi nosozliklarning 67 % i stator izolatsiyasi bilan bog‘liq. Izolatsiya qizish va namlik ta’sirida tez yemiriladi[15]. SI tizimi doimiy monitoring va prognozlash orqali nosozlik ehtimolini 3–4 marta kamaytirishi mumkin. Xalqaro tajribada (Siemens, Hitachi, GE) predictive maintenance lokomotivlarining ishonchliligini sezilarli oshirganini ko‘rsatadi[6][9]. O‘zbekiston sharoitida AI tizimini joriy etish Angren – Pop kabi qiyaliklarda parvozning uzluksizligini ta’minlash va energiyani tejashga xizmat qiladi.

Xulosa

Asinxron tortish dvigatellari magistral elektrovozlarning asosiy harakatlantiruvchi elementidir. Ularning issiqlik holatini nazorat qilish dvigatel resursini oshiradi va nosozlikni kamaytiradi. Tadqiqot dvigatel qizishining asosiy sabablari – yuqori tortish kuchi, past tezlik, namlik va ventilyatsiya yetishmasligi – ekanini ko‘rsatdi. Sun’iy intellekt asosidagi “Smart Locomotive Assistant” tizimi real vaqt monitoringi, harorat prognozi va mashinistga tavsiyalar berish orqali issiqlik rejimini optimallashtiradi. Xalqaro tajriba AI texnologiyalari orqali predictive maintenance samarali ishlashini tasdiqlaydi. O‘zbekiston temiryo‘llarida bu tizimni joriy etish dvigatel resursini oshirib, favqulodda nosozliklarni kamaytiradi va energiya samaradorligini yaxshilaydi.

Foydalanilgan adabiyotlar

1. Nerubatskiy, et al. Traction motor operation conditions analysis. Real vaqtli monitoring va issiqlik nazorati bo‘yicha tavsiyalar[4][3].
2. IJARSET maqolasi. “Locomotive traction motors’ energy efficiency” – stator izolatsiyasi va rotor nosozliklari bo‘yicha statistik tahlil.
3. Scitepress maqolasi. “Thermal calculations of asynchronous traction engines” – issiqlik modellari va ventilatsiya jarayonlari[5][16][15].
4. Nefedov & Loginova. “Insulation wear of traction engines” – armatura o‘rami bo‘ylab haroratning o‘zgarishi va resurs bahosi[17].
5. Delphisonic blogi. AI-prediktiv maintenance uchun sensorlar va edge computing ishlatilishi[20][21].

6. Ermewa & Amsted DS yangiligi. Sensor-free AI predictive maintenance (LSiM) tizimining ishlashi[22].
7. Universum maqolasi. O‘Z-EL (O‘zbekiston) elektrovozi tortish dvigateli parametrlari[14].
8. O‘Z-ELR vs O‘zbekiston tahlili. Dvigatel quvvatlari va energiya tejash natijalari[11][19].
9. Mikhalchuk, 2023. 3ES5K “Ermak” lokomotivi quvvati va inverter nazorati[13].
10. O‘Z-Y yo‘lovchi elektrovozi texnik ma’lumotlari[12].
11. Angren–Pop uchastkasi va 2UZ-ELR yuklama rejimlari[10].
12. Hitachi HMAX haqidagi tahlil[9][18].
13. Siemens Railigent telemetrik tizimi va prediktiv maintenance[6].
14. Alstom HealthHub uchun AI diagnostika platformasi[7].
15. GE Transportation AI va edge computing bilan lokomotiv monitoringi[8].

[1] [2] Induction motor - Wikipedia
https://en.wikipedia.org/wiki/Induction_motor
[3] [4] (PDF) Analysis of operating conditions and modes of locomotive traction motors
https://www.researchgate.net/publication/400608398_Analysis_of_operating_conditions_and_modes_of_locomotive_traction_motors
[5] [15] [16] 115800.pdf
https://www.scitepress.org/Papers/2022/115800/115800.pdf
[6] Siemens to Equip DB Locomotives with Predictive Maintenance | Railway International
https://railway-international.com/news/siemens-to-equip-db-locomotives-with-predictive-maintenance
[7] Artificial Intelligence: The future of rail mobility | Alstom
https://www.alstom.com/artificial-intelligence-future-rail-mobility
[8] GE using AI to build locomotives that think | VentureBeat
https://venturebeat.com/technology/ge-using-ai-to-build-locomotives-that-think
[9] [18] Hitachi to present HMAX digital solution in the US
https://www.railwaypro.com/wp/hitachi-unveils-digital-solution-for-predictive-maintenance-in-the-us/
[10] Methods to increase the throughput and carrying capacity of the “Angren-Pop” railway section in line with expected transit freight flows from the “China-Uzbekistan-Kyrgyzstan” railway project - Extrica
https://www.extrica.com/article/25567
[11] [19] (PDF) СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОВОЗОВ СЕРИЙ «O’Z-ELR» И «O’ZBEKISTON»
https://www.researchgate.net/publication/352830354_SRAVNITELNYJ_ANALIZ_TEHNICESKIH_HARAKTERISTIK_ELEKTROVOZOV_SERIJ_O'Z-ELR_I_O'ZBEKISTON

[12] O’Z-Y — Википедия
https://ru.wikipedia.org/wiki/O%E2%80%99Z-Y
[13] Mikhalchuk
https://journals.rcsi.science/2782-4004/rt/printerFriendly/382735/0
[14] DETERMINATION OF THE MAIN PARAMETERS OF THE ASYNCHRONOUS TRACTION MOTOR OF THE ELECTRIC LOCOMOTIVE OF THE “O'ZBEKISTON” SERIES
https://7universum.com/ru/tech/archive/item/14726
[17] (PDF) Investigation of wear of insulation of traction engines of locomotives in operation
https://www.researchgate.net/publication/324342476_Investigation_of_wear_of_insulation_of_traction_engines_of_locomotives_in_operation
[20] [21] The Future of Rail Maintenance – How AI-Powered Sensors are Revolutionizing the Industry – delphisonic
https://delphisonic.com/2025/05/13/the-future-of-rail-maintenance-how-ai-powered-sensors-are-revolutionizing-the-industry/
[22] Sensor-free AI predictive maintenance system deployed - International Railway Journal
https://www.railjournal.com/technology/sensor-free-ai-predictive-maintenance-system-deployed/