

**TOSHKENT DAVLAT TRANSPORT UNIVERSITETI  
HUZURIDAGI ILMIY DARAJALAR BERUVCHI  
DSc.15/31.08.2022.T.73.07 RAQAMLI ILMIY KENGASH**

---

**TOSHKENT DAVLAT TRANSPORT UNIVERSITETI**

**VOHIDOV MIRABROR XUSAN O'G'LI**

**LOKOMOTIVLARNING O'ZGARUVCHAN TOK TORTUV ELEKTR  
DVIGATELLARINI SUN'IY NEYRON TARMOQLARINI QO'LLASH  
ORQALI TEXNIK HOLATINI BAHOLASH**

**05.08.06 – Temir yo'llarning harakatlanuvchi tarkibi, poyezdlarni tortish  
va elektrlashtirish**

**TEXNIKA FANLARI BO'YICHA FALSAFA DOKTORI (PhD)  
DISSERTATSIYASI AVTOREFERATI**

**Тошкент – 2025**

**Texnika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD)  
dissertatsiyasi avtoreferati mundarijasi**

**Оглавление автореферата диссертации  
доктора философии (PhD) техническим наукам**

**Content of the dissertation abstract of doctor of philosophy  
(PhD) on technical sciences**

**Vohidov Mirabror Xusan o'g'li**

Lokomotivlarning o'zgaruvchan tok tortuv elektr dvigatellarini sun'iy neyron tarmoqlarini qo'llash orqali texnik holatini baholash.....3

**Вохидов Мираброр Хусан угли**

Оценка технического состояния тяговых электродвигателей переменного тока локомотивов с применением искусственных нейронных сетей.....21

**Vokhidov Mirabror Xusan ogli**

Assessment of the technical condition of alternating current traction electric motors of locomotives using artificial neural networks.....41

**E'lon qilingan ishlar ro'uxati**

**Список опубликованных работ**

List of published works.....44

**TOSHKENT DAVLAT TRANSPORT UNIVERSITETI  
HUZURIDAGI ILMIY DARAJALAR BERUVCHI  
DSc.15/31.08.2022.T.73.07 RAQAMLI ILMIY KENGASH**

---

**TOSHKENT DAVLAT TRANSPORT UNIVERSITETI**

**VOHIDOV MIRABROR XUSAN O'G'LI**

**LOKOMOTIVLARNING O'ZGARUVCHAN TOK TORTUV ELEKTR  
DVIGATELLARINI SUN'IY NEYRON TARMOQLARINI QO'LLASH  
ORQALI TEXNIK HOLATINI BAHOLASH**

**05.08.06 – Temir yo'llarning harakatlanuvchi tarkibi, poyezdlarni tortish  
va elektrlashtirish**

**TEXNIKA FANLARI BO'YICHA FALSAFA DOKTORI (PhD)  
DISSERTATSIYASI AVTOREFERATI**

**Тошкент – 2025**

**Texnika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasining mavzusi O'zbekiston Respublikasi Oliy ta'lim, fan va innovatsiyalar vazirligi huzuridagi Oliy attestatsiya komissiyasida B2025.2.PhD/T5738 raqam bilan ro'yxatga olingan.**

Dissertatsiya Toshkent davlat transport universitetida bajarilgan.

Dissertatsiya avtoreferati uch tilda (o'zbek, rus, ingliz (rezyume)) Ilmiy Kengash veb-sahifasida ([www.tstu.uz](http://www.tstu.uz)) va "Ziyonet" Axborot ta'lim portalida ([www.ziyonet.uz](http://www.ziyonet.uz)) joylashtirilgan.

**Ilmiy rahbar:**

**Xamidov Otabek Rustamovich**  
texnika fanlari doktori, professor

**Rasmiy oponentlar:**

**Pirmatov Nurali Berdiyorovich**  
texnika fanlari doktori, professor

**Kurilkin Dmitriy Nikolayevich**  
texnika fanlari nomzodi, dotsent

**Yetakchi tashkilot:**

**Andijon davlat texnika instituti**

Dissertatsiya himoyasi Toshkent davlat transport universiteti huzuridagi DSc.15/31.08.2022.T.73.07 raqamli Ilmiy Kengashning 2025-yil \_\_\_\_\_ soat \_\_\_\_ dagi majlisida bo'lib o'tadi. Manzil: 100167, Toshkent sh., Temiryo'lchilar ko'chasi, 1-uy. Tel.: (99871) 299-00-01; faks: (99871) 293-57-54; e-mail: [tashiit\\_rektorat@mail.ru](mailto:tashiit_rektorat@mail.ru).

Dissertatsiya bilan Toshkent davlat transport universitetining Axborot-resurs markazida tanishish mumkin (\_\_\_\_-raqam bilan ro'yxatga olingan). Manzil: 100167, Toshkent sh., Temiryo'lchilar ko'chasi, 1-uy. Tel.: (99871) 299-05-66.

Dissertatsiya avtoreferati 2025-yil \_\_\_\_\_ kuni tarqatildi.  
(2025-yil \_\_\_\_\_dagi \_\_\_\_ raqamli reyestr bayonnomasi).

**R.V. Raximov**

Ilmiy darajalar beruvchi  
Ilmiy kengash raisi, t.f.d., professor

**Ya.O. Ruzmetov**

Ilmiy darajalar beruvchi  
Ilmiy kengash ilmiy kotibi, t.f.d., professor

**R.M. Mirsaatov**

Ilmiy darajalar beruvchi  
Ilmiy kengash qoshidagi ilmiy  
seminar raisi, t.f.d., professor

## **KIRISH (falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi annotatsiyasi)**

**Dissertatsiya mavzusining dolzarbligi va zarurati.** Jahonda mashinasozlik, qishloq xo‘jaligi hamda temir yo‘l transportida qo‘llaniladigan asinxron tortuv elektr dvigatellarining ishonchligi va samaradorligini oshirish maqsadida zamonaviy diagnostika usullarini joriy etish orqali texnologik va ishlab chiqarish jarayonlarini jadallashtirish masalalariga alohida e‘tibor qaratilmoqda. Hozirgi kunda rivojlangan mamlakatlarda olib borilgan tadqiqotlar natijalariga ko‘ra, lokomotivlar umumiy nosozliklarining 20–25% asinxron tortuv elektr dvigatellariga to‘g‘ri kelishi aniqlangan. Bu borada, jumladan lokomotivlardan foydalanishda ta‘mirlash xarajatlarini optimallashtirish, harakat xavfsizligini ta‘minlash hamda elektr dvigatellarining ishonchligi va ekspluatatsion samaradorligini oshirish dolzarb vazifa sifatida belgilangan. Mazkur muammolarni hal etishda, asinxron tortuv elektr dvigatellarining texnik-iqtisodiy ko‘rsatkichlarini yaxshilash, ularning texnik holatini baholash bo‘yicha diagnostika usullarini takomillashtirish muhim ahamiyat kasb etadi.

Jahonda temir yo‘l transportidan samarali foydalanish maqsadida nazariy hisob-kitoblar, tajriba-sinov tadqiqotlarining zamonaviy usullarini ishlab chiqish va ularni takomillashtirish bo‘yicha turli ilmiy texnikaviy yechimlarni ishlab chiqishga yo‘naltirilgan ilmiy-tadqiqot ishlari olib borilmoqda. Ushbu yo‘nalishda, jumladan, lokomotivlarning asinxron tortuv elektr dvigatellari ish samaradorligini oshirishda sun‘iy intellektga asoslangan intellektual texnologiyalarni qo‘llash orqali foydali ish koeffitsiyentini oshirish, elektrodinamik va elektromexanik tavsiflarini yaxshilash hamda matematik modellashtirish asosida texnik holatini aniqlash bo‘yicha tadqiqotlar ustivor hisoblanmoqda. Shu bilan birga, tortuv elektr dvigatellarining magnit maydon ko‘rsatkichlarining nuqsonlarga bog‘liqligini o‘rganish, foydalanish samaradorligini oshirish hamda ularning elektrodinamik va elektromexanik tavsiflarini sun‘iy idrokni joriy etgan holda texnik holatini baholash usullari dolzarb vazifalardan biri hisoblanmoqda.

Respublikamizda turli transport sohalarini rivojlantirish, jumladan, temir yo‘l transporti infratuzilmasini takomillashtirish, mavjud lokomotiv parkidan samarali foydalanish, mavjud temir yo‘l uchastkalarini elektrlashtirish va takomillashtirish ishlari bo‘yicha ko‘lamli chora-tadbirlar amalga oshirilib, muayyan natijalarga erishilmoqda. 2022-2026 yillarga mo‘ljallangan Yangi O‘zbekistonning taraqqiyot strategiyasida, jumladan “Barcha transport turlarini uzviy bog‘lagan holda yagona transport tizimini rivojlantirish”<sup>1</sup> bo‘yicha muhim vazifalar belgilab berilgan. Ushbu vazifalarni amalga oshirish jarayonida zamonaviy elektrovozlar asinxron tortuv elektr dvigatellarida yuzaga kelishi mumkin bo‘lgan nosozliklarni oldindan aniqlashga xizmat qiladigan hamda ularning diagnostika metodlarini takomillashtirishga qaratilgan yangi usul va texnologiyalarni ishlab chiqish muhim hisoblanadi.

O‘zbekiston Respublikasi Prezidentining 2024 yil 10 yanvardagi “Elektrotexnika sanoatining ishlab chiqarish va eksport salohiyatini yanada

---

<sup>1</sup> O‘zbekiston Respublikasi Prezidentining 2022 yil 28 yanvardagi “2022-2026 yillarga mo‘ljallangan Yangi O‘zbekistonning taraqqiyot strategiyasi to‘g‘risida” gi PF-60-sonli farmoni

o'shishga doir qo'shimcha chora-tadbirlar to'g'risida"gi PQ-15-sonli, 2024 yil 24-dekabrda "2025 – 2027 yillarda O'zbekiston Respublikasining ijtimoiy va ishlab chiqarish infratuzilmasini rivojlantirish chora-tadbirlari to'g'risida"gi PQ-454-sonli, 2025 yil 22 yanvardagi "Elektrotexnika sanoatini rivojlantirishni yangi bosqichga olib chiqishga doir qo'shimcha chora-tadbirlar to'g'risida"gi PQ-20-sonli, 2022 yil 24 yanvardagi "Respublikada ishlab chiqarishni rivojlantirish va sanoat kooperatsiyasini kengaytirishning samarali tizimini yaratish chora-tadbirlari to'g'risida"gi PQ-99-sonli va 2023 yil 10 oktyabrda "O'zbekiston Respublikasi temir yo'l transporti sohasini tubdan isloh qilish chora-tadbirlari to'g'risida"gi PQ-329-sonli va 2025 yil 27 yanvardagi "O'zbekiston Respublikasining transport-logistika tizimini yanada rivojlantirish chora-tadbirlari to'g'risida"gi PQ-28-sonli Qarorlari hamda mazkur faoliyatga tegishli boshqa me'yoriy-huquqiy hujjatlarda belgilangan vazifalarni amalga oshirishga ushbu dissertatsiya ishi muayyan darajada xizmat qiladi.

**Tadqiqotning respublika fan va texnologiyalarini rivojlantirishning ustuvor yo'nalishlariga muvofiqligi.** Mazkur tadqiqot respublika fan va texnologiyalari rivojlanishining II. "Energetika, energiya va resurs tejamlilik" ustuvor yo'nalishiga mos keladi.

**Muammoning o'rganilganlik darajasi.** Temir yo'l transporti o'zgaruvchan o'zgaruvchan tok elektr uzatmali lokomotivlarining asinxron tortuv elektr dvigatellarining yangi konstruksiyalarini ishlab chiqish va mavjudlarini takomillashtirish bilan bog'liq dolzarb vazifalarni hal etishga qaratilgan ilmiy tadqiqotlar ilmiy markazlar, dunyoning yetakchi davlatlari oliy o'quv yurtlari va ilmiy tadqiqot institutlarida olib borilmoqda, shu jumladan Technical University of Ilmenau va Siemens, Siemens va Halke (Germaniya), Sony va Tokyo Technology Institute, Toshiba (Yaponiya), Islom Karimov nomidagi Toshkent davlat texnika universiteti va Toshkent davlat transport universiteti (O'zbekiston)da olib borilmoqda.

Jahonda harakatlanuvchi tarkib asinxron dvigatellarining ekspluatatsion ishonchliligini oshirish, konstruksiyalarini takomillashtirishga qaratilgan muhim nazariy va amaliy tadqiqotlar taniqli xorijiy olimlar tomonidan amalga oshirilgan, jumladan: A.S. Girnik, O.L. Rapoport, I.P. Kopilov, P.S. Dzen, G.Ya. Shkilko, Y.B. Danilyevich, E.G. Kasharskiy, A.I. Zaysev, D.I. Bannov, A.B. Vinogradov, A.V. Brajnikov, V.I. Pantelev, N.N. Dovjenko, G.Ya. Shkilko, E.M. Novoselov, V.A. Savelyev, I. Tan, K. Zhang, X. Jiang, Y. Wu, S. Chakroune va boshqa yetuk olimlar shug'ullanishgan.

Respublikamizda harakatlanuvchi tarkib elektr dvigatellarining mustahkamliligi, chidamliligi, ishonchliligi hamda foydalanish samaradorligini oshirishga A.D. Glushenko, B.I. Vilkevich., V.I. Yushko., S.F. Amirov, G.A. Xromova, Y.O. Ro'zmetov, R.V. Raximov, D.O. Radjibayev, O.T. Boltayev, U.T. Berdiyev, Sh.S. Fayzibayev, N.B. Pirmatov, O.R. Xamidov., O'.I. Safarov, Jamilov Sh.F., Ergashev O.E, Sh.I. Mamayev kabi olimlar va boshqa olimlar o'z hissalarini qo'shishgan. Shu bilan birga izlanishlar tahlili shuni ko'rsatadiki, o'zgaruvchan tok tortuv elektr dvigatellarining texnik holati baholashni takomillashtirish orqali ularning ishonchliligini oshirish, ta'mirlararo ishlash muddatini uzaytirish, diagnostika jarayonlariga yangi texnologiyalar xususan sun'iy neyron tarmoqlarni joriy qilish bo'yicha ilmiy tadqiqotlar yetarli darajada olib

borilmagan.

**Dissertatsiya tadqiqotining dissertatsiya bajarilgan oliy ta'lim muassasasining ilmiy-tadqiqot ishlari rejalari bilan bog'liqligi.** Dissertatsiya tadqiqotlari Toshkent davlat transport universitetining ilmiy-tadqiqot ishlari rejasiga kiritilgan 2023-yilning 23-yanvardagi "Transport sohasini rivojlantirishning dolzarb masalalari bo'yicha fundamental, amaliy va innovatsion izlanish va tadqiqotlar olib borish, ularning natijalarini joriy etish bo'yicha faoliyat tahlili" 5-sonli va "O'zbekiston temir yo'llari" AJning 2024-yil 8-iyundagi 175-sonli "Yangi ta'mir turlarini o'zlashtirish va modernizatsiyalash to'g'risida"gi buyrug'i talabi doirasida bajarilgan.

**Tadqiqotning maqsadi** - lokomotivlar o'zgaruvchan tok tortuv elektr dvigatellarini sun'iy neyron tarmoqlar orqali texnik holatini baholashdan iborat.

**Tadqiqotning vazifalari:**

o'zgaruvchan tok tortuv elektr dvigatellarning texnik holatini baholash bo'yicha mavjud usullarni, xususan neyron tarmoqlar asosida yaratilgan yondashuvlarni o'rganish va tahlil qilish;

asinxron tortuv elektr dvigateli asosiy nosozliklarining magnit parametrlariga bog'liqligi hamda ularning diagnostika belgilari imitatsion modelini ishlab chiqish;

mahalliy sharoitda o'zgaruvchan tok tortuv elektr dvigatellarning stator va rotor oraligidagi havo bo'shlig'i magnit induksiyasini real vaqtda aniqlash imkonini beruvchi diagnostika qurilmasini ishlab chiqish;

dvigatelning texnik holatini baholash uchun optimal neyron tarmoq modelini yaratish va uni o'qitish algoritmini ishlab chiqish;

dvigatel magnit parametrlari bo'yicha tajriba natijalarini yig'ish, ularni qayta ishlash va neyron tarmoqda o'qitish;

ishlab chiqilgan neyron tarmoq asosidagi diagnostika tizimining aniqligi, tezkorligi va amaliy qo'llash imkoniyatlarini baholash;

natijalar asosida lokomotivlar o'zgaruvchan tok tortuv elektr dvigatellarining texnik holatini monitoring qilish va diagnostika qilish bo'yicha metodika ishlab chiqish.

**Tadqiqotning obyekti** sifatida lokomotivlarning asinxron tortuv elektr dvigatellari olingan.

**Tadqiqotning predmetini** lokomotivlarning asinxron tortuv elektr dvigatellarining texnik holati tashkil qiladi.

**Tadqiqotning usullari.** Tadqiqot jarayonida asinxron tortuv elektr dvigatellarining nosozliklarini statistik tahlil qilish, nazariy hisob-kitoblar, matematik va kompyuterli modellashtirish usullari, elektromagnit induksiya qonunlari, eksperimental tadqiqotlar kabi usullaridan foydalanilgan.

**Tadqiqotning ilmiy yangiligi** quyidagilardan iborat:

lokomotiv asinxron tortuv elektr dvigatellarining ishlash jarayonida stator va rotor oralig'idagi havo bo'shlig'i magnit induksiyasidagi o'zgarishlarni baholash imkonini beruvchi imitatsion modeli ishlab chiqilgan;

ilk bor zamonaviy avtomatik boshqarish tizimlari ma'lumotlari asosida lokomotivlarning asinxron tortuv elektr dvigatellari texnik holatini baholash imkonini beruvchi intellektual diagnostika usuli ishlab chiqilgan;

mahalliy sharoitda lokomotiv asinxron tortuv elektr dvigatellarining stator va rotor oralig'idagi havo bo'shlig'i magnit induksiyasini real vaqtda aniqlash imkonini beruvchi diagnostika qurilmasi ishlab chiqilgan;

asinxron tortuv elektr dvigatellarining havo oralig'idagi magnit maydonning o'zgarish qonuniyatlarini inobatga olgan holda texnik holatini baholash imkonini beruvchi algoritm va uslubiyot ishlab chiqilgan.

**Tadqiqotning amaliy natijalari** quyidagilardan iborat:

tortuv elektr dvigatellarining texnik holatini baholash uchun magnit parametrlar asosida diagnostika qilish metodikasi ishlab chiqilgan va uning amaliy samaradorligi tajriba natijalari bilan tasdiqlangan.

sun'iy neyron tarmoqlar asosida ishlab chiqilgan diagnostika modeli real o'lchov ma'lumotlari asosida sinovdan o'tkazilib, dvigatelning sog'lom va nosoz holatlarini yuqori aniqlik bilan farqlash imkoniyatini yaratilgan.

laboratoriya sharoitida yig'ilgan magnit induksiya signallari ma'lumotlar bazasi kelgusida ilmiy tadqiqotlar, diagnostika tizimlarini takomillashtirish hamda o'quv jarayonida foydalanish uchun amaliy manba sifatida shakllantirilgan.

portativ teslametr yordamida magnit induksiya signallari yig'ilib, ma'lumotlar bazasi shakllantirildi va neyron tarmoqda o'qitish uchun qo'llanildi.

diagnostika tizimi yuqori aniqlik va tezkor ishlash ko'rsatkichlarini namoyish etdi hamda real sharoitlarda samarali qo'llash mumkinligi tasdiqlangan.

amaliy samaradorligi tajriba-sinovlarda tasdiqlanib monitoring va erta diagnostika bo'yicha metodika ishlab chiqilgan.

**Tadqiqot natijalarining ishonchliligi.** Ushbu tadqiqot natijalarining ishonchliligi nazariy modellar, matematik hisob-kitoblar va amaliy tajribalar o'zaro solishtirilishi bilan ta'minlandi. Asinxron tortuv elektr dvigatellarida magnit parametrlar asosida nosozliklarni aniqlash eksperimental ma'lumotlar bilan taqqoslanib, yuqori moslikka erishildi. Neyron tarmoqlar yordamida modellashtirish natijalarining qayta takrorlanishi va turli sharoitlarda olingan ma'lumotlarning yaqinligi barqarorlikni ko'rsatdi. Aniqlik darajasi, xatolik ko'rsatkichlari va konfuzion matritsalar bilan tekshiruv natijalari ham nazariy va amaliy natijalar mosligi bilan izohlanadi.

**Tadqiqot natijalarining ilmiy va amaliy ahamiyati.** Tadqiqot natijalarining ilmiy ahamiyati asinxron tortuv elektr dvigatellarining magnit parametrlariga asoslangan texnik holatini baholashning yangi yondashuvi ishlab chiqilganligi elektrodinamika nazariyasi va amaliyoti rivojiga qo'shgan hissasi bilan izohlanadi.

Tadqiqot natijalarining amaliy ahamiyati lokomotiv asinxron tortuv elektr dvigatellarining stator va rotor oralig'idagi havo bo'shlig'i magnit induksiyasini real vaqtda aniqlash imkonini beruvchi diagnostika qurilmasi ishlab chiqilganligi bilan izohlanadi.

**Tadqiqot natijalarining joriy qilinishi.** Lokomotivlarning o'zgaruvchan tok elektr dvigatellarini sun'iy neyron tarmoqlarini qo'llash orqali texnik hoatini baholash bo'yicha olib borilgan ilmiy tadqiqot natijalar asosida:

asinxron tortuv elektr dvigatellari texnik holatini baholash imkonini beruvchi intellektual diagnostika usuli "O'zbekiston" lokomotiv deposiga joriy etildi (O'zbekiston Respublikasi Transport vazirligining 2025-yil 16-oktyabrdagi 4/E1484-sonli ma'lumotnomasi). Natijada asinxron tortuv elektr dvigatellarining nosozliklarini oldindan baholash imkonini bergan.

asinxron tortuv elektr dvigatellarining stator va rotor oralig'idagi havo bo'shlig'i magnit induksiyasini real vaqtda aniqlash imkonini beruvchi diagnostika qurilmasi "O'zbekiston temir yo'llari" AJ lokomotiv depolariga joriy etildi (O'zbekiston Respublikasi Transport vazirligining 2025-yil 16-oktyabrdagi 4/E1484-sonli ma'lumotnomasi). Natijada kutilayotgan yillik iqtisodiy samaradorlik 856 321 000 (sakkiz yuz ellik olti million uch yuz yigirma bir ming) so'mni tashkil etgan.

**Tadqiqot natijalarining aprobatsiyasi.** Dissertatsiya tadqiqot natijalari 3 ta ilmiy anjumanlarda, shu jumladan 1 ta Scopus xalqaro ma'lumotlar bazasida indekslangan ilmiy anjumanda, 2 ta respublika ilmiy-amaliy anjumanlarida bayon etilgan va muhokama qilingan.

**Tadqiqot natijalarining e'lon qilinganligi.** Dissertatsiya mavzusi bo'yicha 14 ta ilmiy ish, shu jumladan 2 ta xalqaro va 6 ta O'zbekiston Respublikasi Oliy attestatsiya komissiyasi tomonidan doktorlik dissertatsiyaning asosiy ilmiy natijalarini chop etish uchun tavsiya etilgan nashrlar, 6 ta EHM uchun dasturiy mahsulotlar ro'yxatga olingan.

**Dissertatsiyaning tuzilishi va hajmi.** Dissertatsiya kirish, to'rtta bob, xulosa, foydalanilgan adabiyotlar ro'yxatidan iborat. Dissertatsiya hajmi 115 betni tashkil etadi.

## DISSERTATSIYANING ASOSIY MAZMUNI

**Kirish** qismida dissertatsiya mavzusining dolzarbligi va zaruriyati asoslangan, qo'yiladigan masalaning holati batafsil yoritilgan, tadqiqotning maqsadi va vazifalari shakllantirilgan, tadqiqot obyektini va predmetini tavsiflangan, tadqiqotning respublika fan va texnologiyasini rivojlantirishning ustuvor yo'nalishlariga muvofiqligi ko'rsatilgan, tadqiqotning ilmiy yangiligi va amaliy natijalari bayon qilingan, ishonchliligi asoslangan, ilmiy tadqiqotlar natijalarini ishlab chiqarishga joriy etish to'g'risida ma'lumot berilgan va shuningdek, nashr etilgan ishlar va dissertatsiya tuzilishi to'g'risidagi ma'lumotlar ko'rsatilgan.

Dissertatsiya ishining "**Lokomotivlar o'zgaruvchan tok tortuv elektr dvigatellari tahlili va tadqiqot vazifasining qo'yilishi**" nomli birinchi bobida

“O‘zbekiston temir yo‘llari” AJ lokomotiv parkida foydalanilayotgan lokomotivlarning asinxron elektr dvigatellari hamda uning nosozliklari sabablarining tahlili keltirib o‘tilgan.

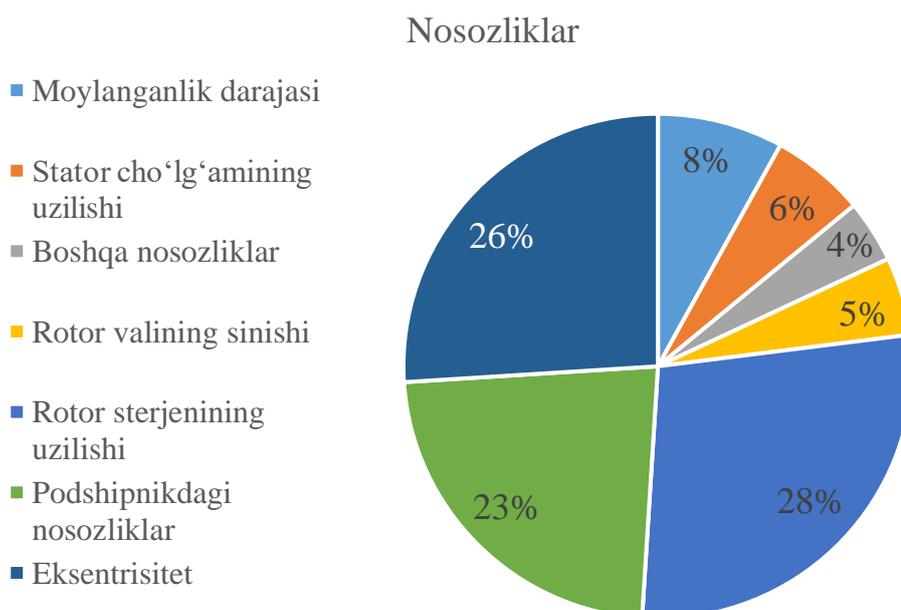
O‘zgaruvchan tokda ishlaydigan tortuv asinxron elektr dvigatellari elektrovozlarda juda keng qo‘llaniladi, chunki ular samarali va ishonchli hisoblanadi. Ularning elektrovozlarda bajaradigan asosiy vazifasi lokomotivning tortuvida asosiy harakatga keltiruvchi agregat xisoblanadi.

Amaliyotda keng qo‘llanilayotgan turli nazorat va monitoring metodlarini o‘rganish, ularning imkoniyatlarini tahlil qilish, afzallik va kamchiliklarini aniqlash, shuningdek, qaysi usul qaysi sharoitda samarali qo‘llanishini baholash dolzarb masaladir. Bu jarayonda vibratsion tahlil, elektr signallari asosida diagnostika, magnit parametrlar, issiqlik va akustik usullarning qiyosiy tahlili muhim ahamiyat kasb etadi.

“O‘zbekiston temir yo‘llari” AJ ga qarashli bo‘lgan lokomotivlarda mavjud bo‘lgan asinxron tortuv elektr dvigatellarda turli nosozliklar kuzatiladi. Ushbu nosozliklar quyidagicha talqin qilinadi va uchta asosiy nosozliklar tahlil qilingan (1-rasm).

Tahlillar shuni ko‘rsatadiki, asinxron tortuv elektr dvigatellarida uchraydigan asosiy nosozliklar quyidagilar:

eksentrisitet (26%), rotor sterjenlarining uzilishi (28%) va mexanik nosozliklar (23%). Eksentrisitet rotor va stator markazlarining mos kelmasligi natijasida havo oralig‘ida magnit induksiyasining notekis taqsimlanishiga va qo‘shimcha radial kuchlarning paydo bo‘lishiga olib keladi. Rotor sterjenlarining uzilishi esa asosan yuqori harorat ta‘sirida sodir bo‘lib, natijada elektr hamda mexanik muammolarni kuchaytiradi. Mexanik nosozliklar esa, odatda, podshipniklarning eskirishi yoki noto‘g‘ri ekspluatatsiya tufayli yuzaga kelib, dvigatel samaradorligini sezilarli pasaytiradi.



**1 – rasm. O‘zgaruvchan tok tortuv asinxron dvigatellardagi nosozliklar (%)**

Dissertatsiya ishining “**Elektr dvigatellarning texnik diagnostika usullarini takomillashtirishda neyron tarmoqlar texnologiyalari va matematik modellar**” nomli ikkinchi bobida lokomotivlarning o‘zgaruvchan tokda ishlaydigan asinxron tortuv elektr dvigatellarining texnik holatini baholash, elektr dvigatellarda samarali diagnostika qilish uchun nuqsonlarga sezgir parametrlarni tanlash, elektr, magnit, mexanik va issiqlik kattaliklari ichida ayniqsa magnit induksiya eng informatsion bo‘lib, rotor va statoridagi kichik o‘zgarishlarni ham aks ettiradi. Ikkinchi bobda ushbu parametrlar matematik modellar asosida tahlil qilinib, sun‘iy neyron tarmoqlar yordamida avtomatlashtirilgan diagnostika tizimi tadqiq etilgan.

Elektr dvigatellarning diagnostikasida magnitodinamik usul havo oralig‘idagi magnit maydon induksiyasining o‘zgarishlarini tahlil qilish orqali uch asosiy nosozlikni aniqlashi mumkin. Ushbu usulning har bir nosozlikka nisbatan harakterlovchi xususiyatlarini ko‘rib chiqamiz:

**Podshipnikdagi nosozliklar.** Magnit maydonga ta’siri: Podshipnikning nosozligi, yetarli darajada moylanmagani natijasida rotor va stator orasidagi mexanik beqarorlik yuzaga keladi. Bu havo oralig‘ida magnit induksiya notekis taqsimlanishiga olib keladi. Magnit induksiyada past chastotali garmonikalar paydo bo‘ladi. Bu rotorning ozgina chayqalishini ko‘rsatadi. Magnit maydonning past chastotali o‘zgarishlarini diagnostika qilish orqali aniqlanadi.

**Eksentrisitet.** Eksentrisitet rotor o‘qi va stator o‘qi orasidagi geometrik nomutanosiblik natijasida yuzaga keladi. Ular aralash, dinamik va statika eksentrisitetga bo‘linadi. Bu havo oralig‘ining qalinligi notekis bo‘lishiga olib keladi. Magnit induksiyada muayyan yuqori garmonikalar paydo bo‘ladi va ularning chastotasi rotorning aylanish chastotasi bilan bog‘liq bo‘ladi. Magnit maydonning asimmetrik taqsimlanishi va yuqori chastotali garmonikalar mavjudligi orqali aniqlanadi.

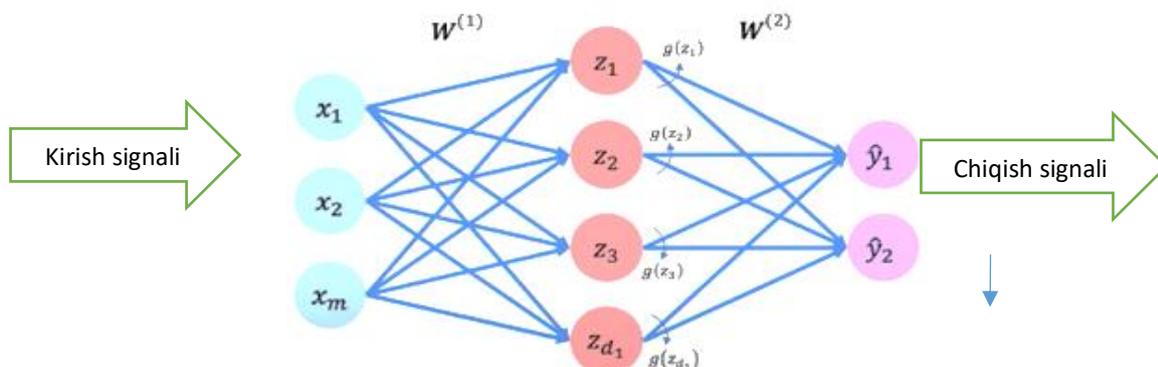
**Rotordagi yoriqlar.** Rotor yoriqlari magnit maydonning yo‘nalishini va o‘tish yo‘llarini buzadi, bu esa magnit induksiya kuchlanishining notekis o‘zgarishiga olib keladi. Induksiyada modulyatsiyalangan yuqori chastotali signal va dinamik garmonikalar paydo bo‘ladi. Magnit maydon induksiyasining yuqori chastotali garmonikalari va signalning o‘zgarish intensivligi orqali diagnostika qilinadi.



**2 – rasm. ATED texnik holatini baholash ketma-ketligi**

Sun'iy neyron tarmoqlari (SNT) - bu neyron tarmoqlar nazariyasi va amaliyoti sohasi bo'lib, unda signallarni qayta ishlash texnika tizimining neyronlarida sodir bo'ladigan hodisalarni tadqiq qiluvchi formulalar va algoritmlar bo'yicha amalga oshiriladi (2-rasm).

Neyron tarmoqlar ichida eng ko'p ishlatiladigan modellardan biri MLP (Multi-Layer Perceptron) (3-rasm) bo'lib, u oddiy arxitekturaga ega va kirish ma'lumotlarini to'liq bog'langan qatlamlar orqali qayta ishlaydi. MLP asosan jadval ko'rinishidagi ma'lumotlar, regressiya va klassifikatsiya vazifalarida samarali hisoblanadi.



**3-rasm. Ko'p qatlamli perseptron sun'iy neyron tarmoq modeli:**  $x_1, x_2, \dots, x_n$  kirish signallari,  $z_1, z_2, \dots, z_{d1}$  birinchi yashirin qatlam funksiyasi,  $y_1$  va  $y_2$  . chiqish signallari (soz yoki nosoz)

Asosi – oddiy to'liq bog'langan qatlamlar (fully-connected layers) matematik modeli: Kirish:  $x \in \mathbb{R}^n$

Birinchi yashirin qatlam:

$$z^{(1)} = f(W^{(1)}x + b^{(1)}),$$

Ikkinchi yashirin qatlam:

$$z^{(2)} = f(W^{(2)}z^{(1)} + b^{(2)}),$$

Chiqish:

$$y = g(W^{(3)}z^{(2)} + b^{(3)}),$$

bu yerda  $W^{(i)}$  – og'irliklar matritsasi (weight),  $b^{(i)}$  – siljish (bias),  $f(\cdot)$  – aktivatsiya funksiyasi (masalan, ReLU),  $g(\cdot)$  – chiqish funksiyasi (masalan, softmax).

Murakkabroq ma'lumot turlarini, xususan fazoviy struktura va tasvirlarni tahlil qilishda esa CNN (Convolutional Neural Network) keng qo'llanadi. CNN konvolyutsion qatlamlar orqali xususiyatlarni ajratib oladi va u rasm, signal yoki magnit maydon o'lchovlari kabi ma'lumotlarni yuqori aniqlik bilan qayta ishlash imkonini beradi.

Asosi – konvolyutsiya (filterlash) operatsiyasi matematik modeli 1D signal uchun:

$$h_i^{(k)} = f\left(\sum_{j=1}^m w_j^{(k)} \cdot x_{i+j-1} + b^{(k)}\right),$$

2D rasm uchun (kanallik konvolyutsiya):

$$h_{ij}^{(k)} = f\left(\sum_{m=1}^M \sum_{p=1}^P \sum_{q=1}^Q w_{p,q,m}^{(k)} \cdot x_{i+p,j+q,m} + b^{(k)}\right);$$

bu yerda:  $w_{p,q,m}^{(k)}$  – konvolyutsion filtrning og‘irliklari;  $b^{(k)}$  – bias;  $f(\cdot)$  – aktivatsiya funksiyasi (ReLU, sigmoid va h.k.).

Pooling qatlam esa:

$$h_{i,j} = \max_{(p,l) \in R} x_{i+p,j+q} \text{ ya'ni filtr ichidagi maksimal qiymat olinadi.}$$

Ketma-ketlikka ega bo‘lgan vaqtli jarayonlarni modellashtirish uchun esa RNN (Recurrent Neural Network) asosiy vositalardan biridir. RNN avvalgi vaqt bosqichidagi yashirin holatni keyingisiga uzatish orqali vaqtli bog‘liqliklarni hisobga oladi. Shu sababli, u elektr dvigatellarning vaqt bo‘yicha o‘zgaruvchi signallarini, masalan, tebranish, tok yoki magnit induksiya spektrlarini tahlil qilishda qo‘llanishi mumkin. RNN (Recurrent Neural Network) – matematik modeli Har bir vaqt  $t$  da: Yashirin holat yangilanishi:

$$h_{(t)} = f(W_h h_{t-1} + W_x x_t + b_h),$$

Chiqish:

$$y_{(t)} = g(W_y h_t + b_y);$$

bu yerda  $x_t$  – vaqt  $t$  dagi kirish,  $h_t$  – yashirin holat (memory),  $W_x, W_h, W_y$  – og‘irliklar,  $f(\cdot)$  – aktivatsiya (tanh yoki ReLU),  $g(\cdot)$  – chiqish funksiyasi (softmax, sigmoid).

RNNning qolganlaridan farqi shuku har bir vaqt qadamida avvalgi holat  $h_{t-1}$  xotira sifatida qayta ishlatiladi. Bu uni vaqtli ketma-ketlik (masalan, dvigatel vibratsiya signali yoki tok spektri)ni model qilishga mos qiladi.

Shunday qilib, MLP, CNN va RNN modellarining o‘ziga xos afzalliklari mavjud bo‘lib, ular birgalikda qo‘llanganda elektr dvigatellarining turli nosozliklarini erta aniqlash va texnik holatini baholash imkoniyatini kengaytiradi.

Tadqiqot natijalari shuni ko‘rsatadiki, 1TB 2KF2624–3EA00 tipidagi Siemens tortuv elektr dvigatelinig nosozliklari tufayli yuzaga keladigan magnit induksiya o‘zgarishlari dvigatelnig texnik holatini baholashda muhim ko‘rsatkich bo‘lib xizmat qiladi. Ayniqsa, eksentrisitet, podshipnik yoki rotor sterjenlarida nosozliklar paydo bo‘lganda, magnit maydonning notekis taqsimlanishi kuzatiladi va bu neyron tarmoq modeli yordamida aniq diagnostika qilish imkonini beradi.

Shu sababli, magnit induksiya parametrlari asosida olib borilgan tahlillar mazkur motorning samaradorligini baholash, nosozliklarning oldini olish va ishlash davrini uzaytirishda ilmiy va amaliy ahamiyatga ega natijalarni taqdim etadi.

Mazkur ilmiy natijalar neyron tarmoqlar asosida magnit induksiya parametrlari orqali texnik holatni baholash usullarini ishlab chiqishda ham muhim ahamiyat kasb etadi. Chunki rotor panjarasi materiali tufayli yuzaga keladigan magnit jarayonlar farqlari neyron model yordamida aniqlanib, motorning texnik diagnostikasini yuqori aniqlik bilan amalga oshirish imkonini beradi.

Dissertatsiya ishining **“Asinxron dvigatellarning nosozliklardagi magnit jarayonlari va ularni neyron tarmoqlar orqali modellashtirish usuli”** nomli uchinchi bobida asinxron dvigatellarda uchraydigan nosozliklar ta’sirida magnit

jarayonlarning o'zgarishi tahlil qilinadi. Eksentrisitet, rotor panjarasidagi yoriqlar va podshipnik nosozliklari havo oralig'idagi magnit maydonning notekis taqsimlanishiga hamda elektromagnit moment pulsatsiyalariga sabab bo'ladi. Shu bois magnit parametrlar diagnostika uchun asosiy mezon sifatida tanlanadi. Ularning spektral xususiyatlari neyron tarmoqlar yordamida qayta ishlanib, dvigatelning texnik holatini erta va avtomatlashtirilgan tarzda baholash imkoniyati yaratiladi.

Elektr mashinasining havo bo'shlig'ida induksiyani taqsimlashning ko'rib chiqilgan xususiyatlarini hisobga olgan holda, qutb bo'linishining hisoblangan maydoni

$$S_{\delta} = a_{\delta} \tau l_{\delta}$$

U holda oraliqdagi induksiya

$$B_{\delta} = \frac{\Phi}{S_{\delta}} = \frac{\Phi}{a_{\delta} \tau l_{\delta}}$$

Havo oralig'ining o'ziga xos magnit o'tkazuvchanligi usuliga ko'ra, mashinaning magnit davri to'yinmaganligini va magnit o'takzichlarning magnit kuchlanishini havo oralig'ining magnit kuchlanishiga nisbatan e'tiborsiz qoldirish mumkin ( $\mu_{\text{CT}} = \infty$ ), havo oralig'idagi maydon shu yerdagi magnit kuchlanganlik va oraliqning solishtirma magnit o'tkazuvchanligi ko'paytmasi bilan aniqlanadi [5]:

$$\sum B_{\delta} = \sum F_{\delta} \sum \lambda_{\delta} = \left( \sum F_{\delta_s} + \sum F_{\delta_r} \right) \sum \lambda_{\delta} = \sum F_{\delta_s} \sum \lambda_{\delta} + \sum F_{\delta_r} \sum \lambda_{\delta}$$

Rotorning eksentrisiteti mavjud bo'lgandagi havo oralig'i statik va dinamik eksentrisitet mavjud bo'lganda rotor yuzasi o'qining siljishi tadqiq etilgan.  $\bar{\varepsilon}$  va  $\varepsilon'$  vektorlar rotor o'qining nisbiy birliklardagi vektorlariga mos keladi,  $\bar{\varepsilon}_{\Sigma}$  . vektori esa rotorning oniy to'liq eksentrisitetidir.

Oniy eksentrisitet yig'indisi va rotor siljishining yo'nalishi

$$\bar{\varepsilon}_{\Sigma} = \sqrt{(\varepsilon \cos \varphi_{\varepsilon} + \varepsilon' \cos \varphi_{\varepsilon}')^2 + (\varepsilon \sin \varphi_{\varepsilon} + \varepsilon' \sin \varphi_{\varepsilon}')^2},$$

$$\varphi_{\varepsilon \Sigma} = \text{arctg} \frac{\varepsilon \sin \varphi_{\varepsilon} + \varepsilon' \sin \varphi_{\varepsilon}'}{\varepsilon \cos \varphi_{\varepsilon} + \varepsilon' \cos \varphi_{\varepsilon}'};$$

Tadqiqot jarayonida asinxron tortuv elektr dvigatellarida uchraydigan asosiy nosozliklar – eksentrisitet, rotor panjarasidagi yoriqlar, hamda podshipnikdagi nosozliklar – ularning barchasi havo oralig'idagi magnit induksiya taqsimotiga sezilarli ta'sir ko'rsatishi aniqlangan. Har bir nosozlik alohida ko'rib chiqilganda magnit induksiya B, havo oralig'i  $\delta$ , rotor toki  $I_2$  va elektromagnit moment M o'zgarishlari turlicha ifodalanadi. Shu bilan birga, umumlashtirilgan holda quyidagi bog'lanish formulasi taklif etilishi mumkin:

$$B(\theta, t) = \frac{\mu_0 A(\theta, t) C(\theta)}{\delta_0 + \varepsilon_e(\theta, t)} + B_{nl}(\theta, t).$$

bu yerda  $B(\theta, t)$  — magnit induksiya lokal qiymati; funksion, birlik: tesla (T).

$\theta$ — aylana bo'yicha burchak koordinata (rad yoki °); pozitsiyaviy argument.  $A(\theta, t)$  — chiziqli tok yuklamasi, A/m; odatda stator fazalari va tok amplitudalaridan olinadi.

$\delta_0$  — o‘rtacha havo oralig‘i (mean air-gap), birlik: metr (m).  $\varepsilon_e(\theta, t)$  — eksentrisitetdan kelib chiqadigan havo oralig‘i modulyatsiyasi

$$B(\theta, t) = f_{SNN} \left( \delta(\theta, t) A(\theta, t), i_2(\theta, t), M(t), FFT_f, \dots; w \right),$$

bu yerda  $f_{SNN}$  — SNN (sun‘iy neyron tarmog‘i) ning funkcionalligi; kirish  $\rightarrow$  chiqishni xarakterlaydi (arkitekturaga bog‘liq: MLP/CNN/ReLU va boshqalar).

$x(\theta, t)$  — kirish xususiyatlarining vektori: misol uchun FFT- Signalni vaqt sohasidan chastota sohasiga o‘tkazadi.

$$[\delta, A, \Re(i_2), \Im(i_2), M, FFT_{amp}, T, S, \dots],$$

Yo‘qotish funksiyasi va giperparamterlar

$$L(w) = aL_{reg} bL_{reg} + gR(w);$$

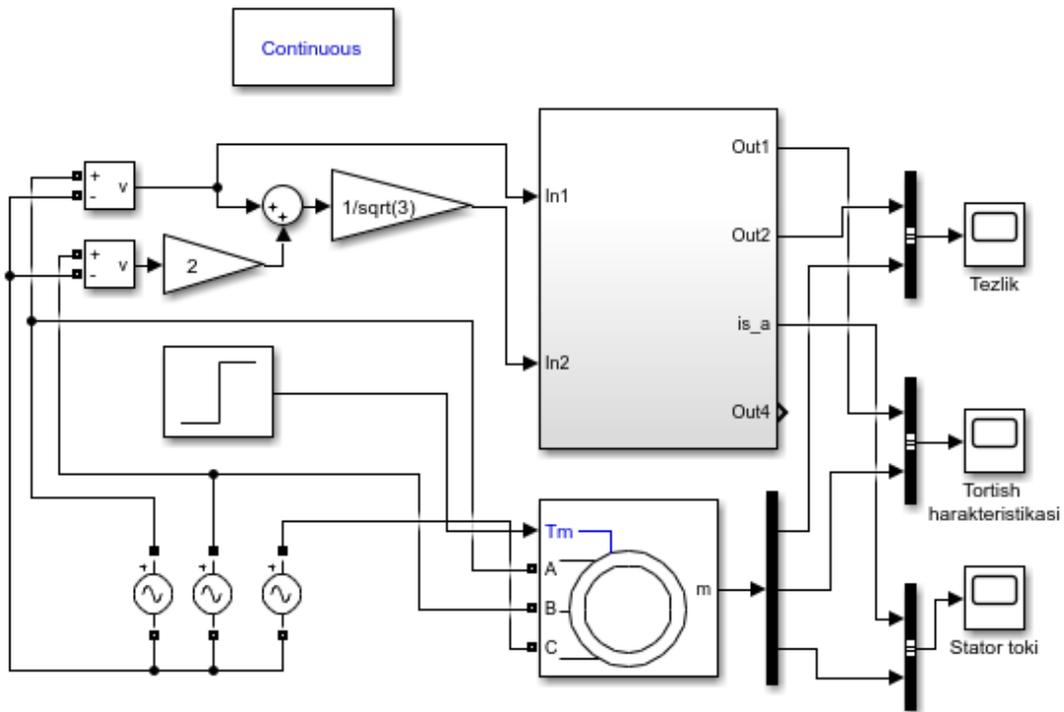
Berilgan ifoda neyron tarmoqni o‘qitishda qo‘llaniladigan umumiy yo‘qotish funksiyasining (loss function) tarkibini bildiradi. Yo‘qotish funksiyasi bir nechta mustaqil komponentlardan tashkil topib, har biri modelning ma‘lum xususiyatini nazorat qiladi.

bu yerda  $L(w)$ —modelning umumiy yo‘qotish funksiyasi, ya‘ni og‘irliklar  $w$  uchun baholangan yo‘qotish qiymati;  $\alpha, \beta, \gamma$  tegishli komponentlarning ulushini belgilovchi ijobiy og‘irlik koeffitsiyentlari;  $L_{reg}$ —regularizatsiya yo‘qotishi bo‘lib, u modelning haddan tashqari moslashib ketishini (overfitting) oldini olishga xizmat qiladi;  $R(w)$ —og‘irliklarga nisbatan qo‘shimcha jazolovchi funksiya (penalty function) bo‘lib, modelning murakkabligi yoki parametrlarining qiymatini cheklash uchun qo‘llanadi.

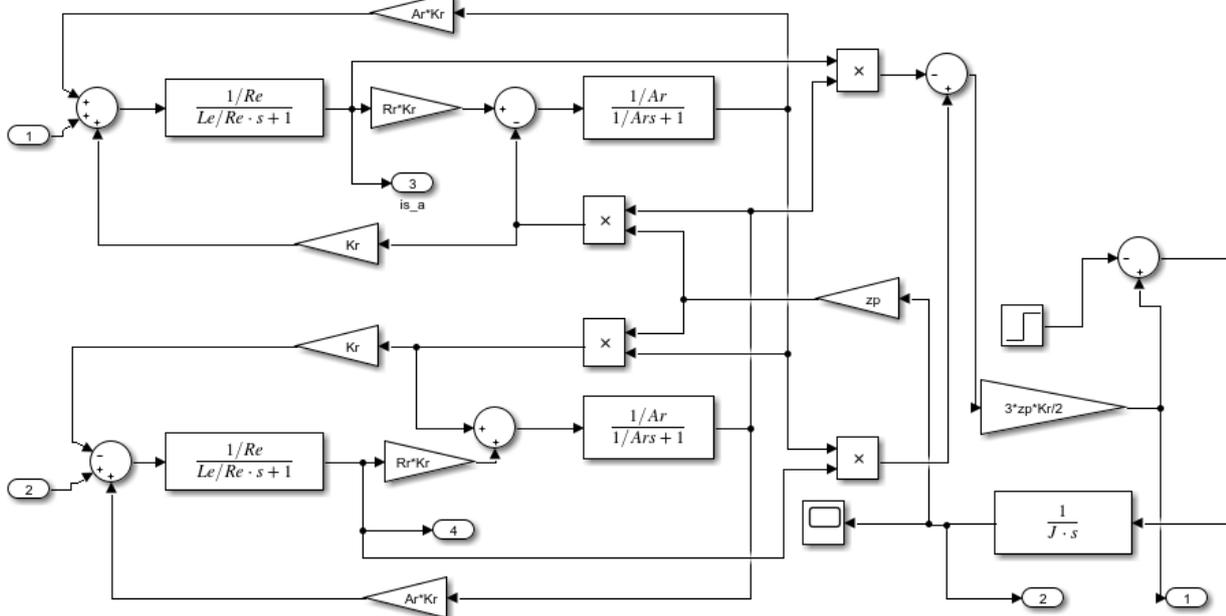
Quyidagi Continuous powergui – doimiy quvvat manbai, 50 Hz chastota asos qilib olingan bo‘lib, stator va rotor qarshiliklari ( $R_s, R_r$ ) hamda ularning induktivliklari ( $L_s, L_r$ ) kiritilgan.  $L_m$ —magnitlanish induktivligi,  $p$ —juft qutblar soni,  $J$  esa inersiya momentini bildiradi. Umumiy stator va rotor induktivligi ( $L_s, L_r$ ) shu qiymatlar asosida hisoblangan. Shuningdek, magnit bog‘lanish koeffitsienti ( $K_r$ ), ekvivalent qarshilik ( $R_e$ ) va ekvivalent induktivlik ( $L_e$ ) aniqlangan. Modelda kuchlanishning amplitudasi ( $U_{amp}$ ) va rotor vaqt konstantasiga oid ko‘rsatkich ( $A_r$ ) ham hisoblab chiqilgan (4-rasm).

Asinxron dvigatelning magnit jarayonlarini tahlil qilishda MATLAB/Simulink dasturi asosida kompyuter modeli tuzildi (4 – rasm). Modelda dvigatelning elektr va magnit tenglamalari hisobga olingan holda, normal (soz) holatda ishlash jayoni imitatsiya qilindi (5-rasm). Bu orqali dvigatelning magnit induksiya o‘zgarishi, moment va tok grafigi hamda boshqa elektromagnit ko‘rsatkichlar kuzatildi (6-rasm).

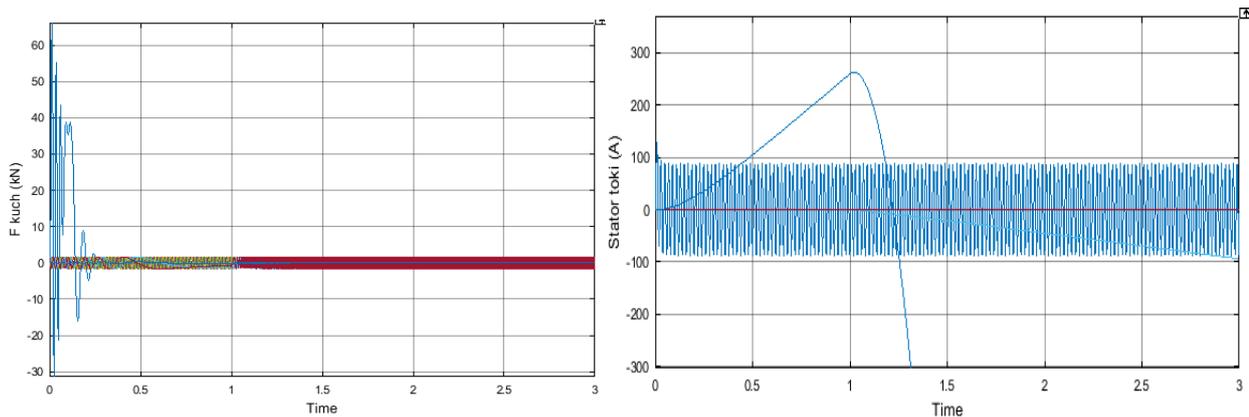
a)



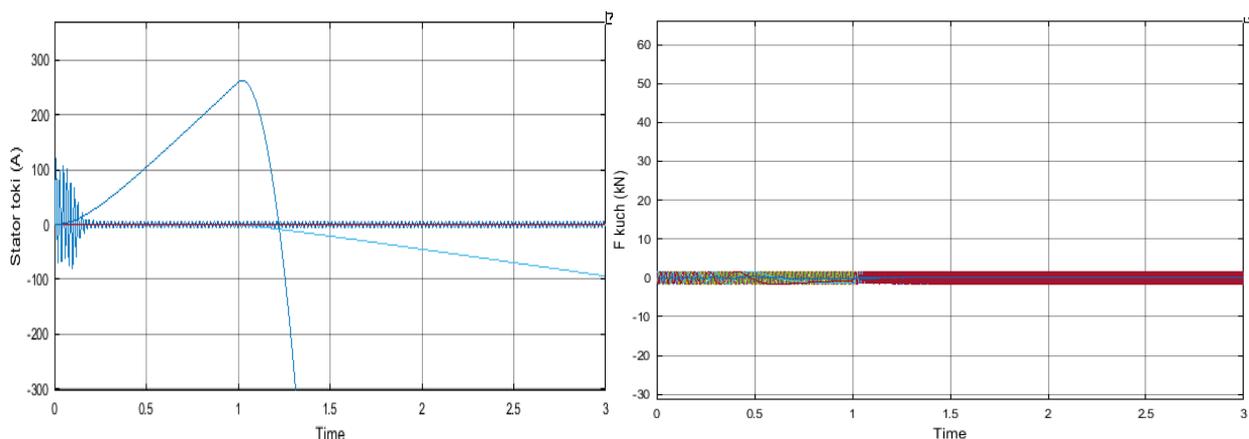
b)



4 – rasm. Matlab simulink dasturida ta'minotida tortuv asinxron elektr dvigatellardagi nosozliklarini aniqlash tizimining immitatsion modeli  
 a) asosiy blok b) Klark o'zgartgichi



**5 – rasm. Tortish karakteristikalarini dvigatel soz holatdagi ko'rsatkichlari**



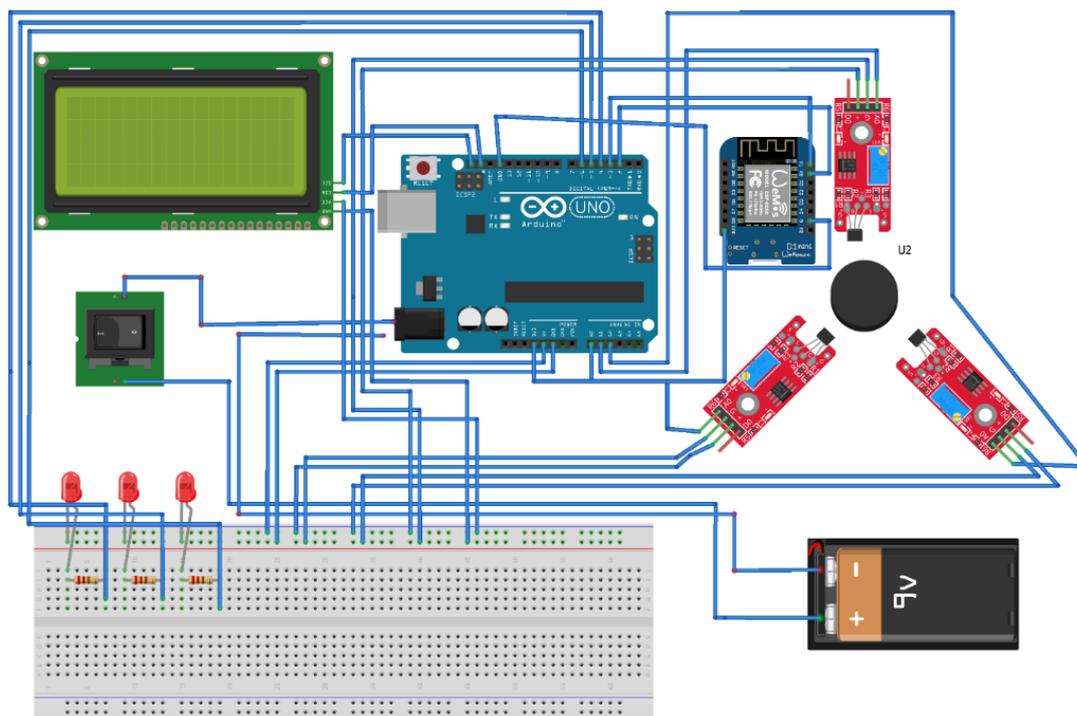
**6 – rasm. Dvigatel nosoz holatdagi tortish xarakteristikasining o'zgarishi**

Yuqoridagi parametrlar MATLAB/Simulink muhitida asinxron dvigatelning soz holatdagi imitatsion modelini qurish uchun asos bo'lib xizmat qiladi. Ushbu imitatsion model yordamida asinxron tortuv elektr dvigateldagi rotor soz va nosozlik holatdagi tortish karakteristikalarining o'zgarishi taqqoslash ko'rsatilgan.

Dissertatsiya ishining **“Asinxron dvigatellarni magnitodinamik usulda nosozliklarni diagnostika qilish va neyron tarmoqlarni qo'llash”** nomli to'rtinchi bobida asinxron tortuv elektr dvigatelning asosiy uch nosozligi bo'yicha texnik holatini baholash metodikasi ishlab chiqilgan va asoslangan mezonlar taqdim etilgan.

Amalga oshirilgan ishlar natijasida asinxron tortuv dvigatellarining havo oralig'ida magnit induksiyaning o'lchash uchun Arduino mikrokontrolleri, Hall datchigi, LCD indikator va WiFi moduli asosida portativ teslametr prototipi ishlab chiqilgan (7-rasm). Qurilma laboratoriya va amaliy sinovlarda tekshirilib, magnit induksiya o'zgarishlarini real vaqt rejimida ko'rsatish imkoniyati yaratildi. Teslametr yordamida rotor yoriqlari, eksentrisitet va boshqa nosozliklarni magnit parametrlar bo'yicha aniqlash metodikasi ishlab chiqilgan. Tadqiqot doirasida olingan ma'lumotlarni yig'ish va uzatishni avtomatlashtirish maqsadida teslametrga Wi-Fi modul o'rnatilib, o'lchov qiymatlari real vaqtda TCP/IP tarmog'i orqali markaziy serverning ko'rsatilgan IP-manziliga uzatildi. Har bir o'lchov paketida vaqt belgisi, sensordan olingan xom qiymatlar va mos keluvchi identifikator JSON formatida shakllantirilib, HTTP POST so'rovi yoki UDP paketlari orqali serverga jo'natildi. Ushbu yechim sinov jarayonlarida ma'lumotlarni markaziy omborlashtirish va

keyingi tahlil (analog tahlil, neyron tarmoqni baholash) uchun qulay infratuzilma ta'minladi.



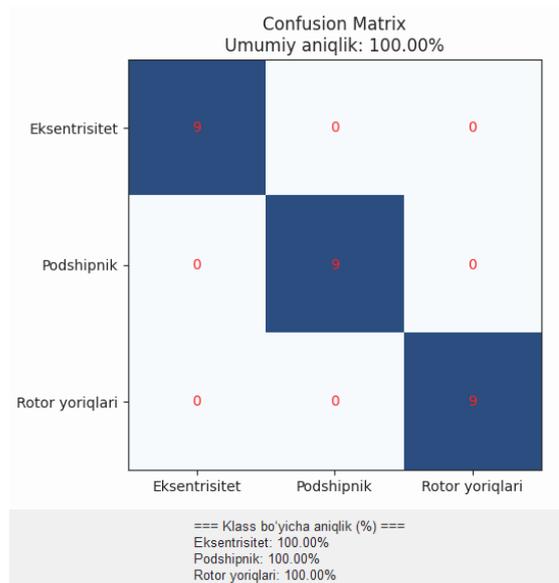
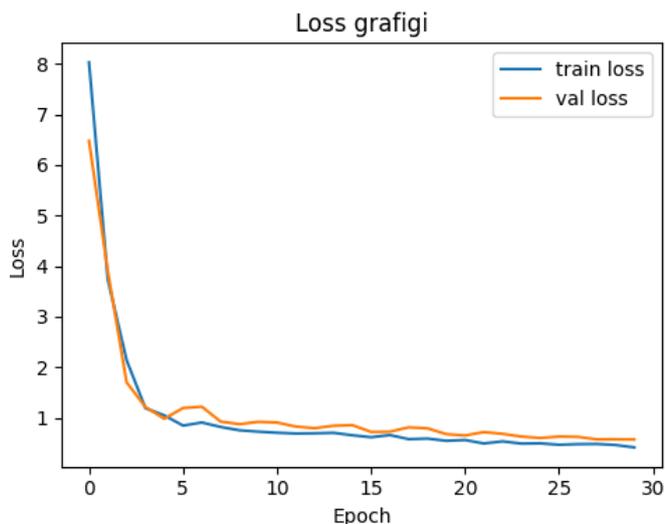
**7 – rasm. Teslametrning ichki tuzilishi (sxemasi)**

Tadqiqot doirasida yaratilgan teslametr qurilmasi (7-rasm) o'zining imkoniyatlari bilan mavjud xorijiy analoglardan sezilarli darajada ustunlik qiladi. Avvalo, qurilma havo oralig'idagi magnit induksiyani real vaqt rejimida aniqlik bilan o'lchash imkoniyatini beradi. Bu esa tortuv elektr dvigatellarida yuzaga keladigan elektromagnit jarayonlarni bevosita kuzatish va ularni aniq baholash imkonini yaratadi.

Teslametr qurilmasining navbatdagi muhim xususiyati – u yig'ilgan magnit signallarni spektral tahlil qilish imkoniyatidir. Bunday tahlil yordamida rotor panjarasidagi yoriqlar, eksentrisitet yoki podshipnik nosozliklari kabi murakkab holatlarning elektromagnit belgilarini erta aniqlash mumkin bo'ladi. Bu esa dvigatel nosozliklarini dastlabki bosqichdayoq aniqlash va samarali profilaktika choralarini ko'rishga zamin yaratadi.

Qurilma imkoniyatlari faqatgina o'lchash bilan cheklanmaydi. U sun'iy neyron tarmoqlar bilan integratsiya qilingan holda ishlashi mumkin. Bu yondashuv yig'ilgan ma'lumotlarni qayta ishlashni avtomatlashtiradi, diagnostika aniqligini oshiradi hamda kelgusidagi nosozliklarni ishonchli bashorat qilish imkoniyatini beradi. Natijada texnik xizmat ko'rsatish jarayoni zamonaviy intellektual tizim darajasiga ko'tariladi (8-rasm).

Amaliy nuqtayi nazardan, teslametr qurilmasining portativligi, arzonligi va qulayligi alohida ahamiyat kasb etadi. Qurilma ixcham bo'lgani bois uni nafaqat laboratoriya sharoitida, balki lokomotiv deposida ham bevosita qo'llash mumkin. Xorijiy analoglarga nisbatan ishlab chiqarish va ekspluatatsiya xarajatlari ancha past bo'lishiga qaramay, olingan natijalar yuqori darajada aniqligi bilan ajralib turadi.



**8-rasm. Neyron tarmoq orqali o‘qitish natijasi**

Shuningdek, teslametr qurilmasi ko‘p qirrali qo‘llanish imkoniyatiga ega. U nafaqat tortuv elektr dvigatellarida, balki sanoatning boshqa tarmoqlarida ishlatiladigan asinxron motorlarda ham samarali foydalanilishi mumkin. Bundan tashqari, qurilma mavjud avtomatlashtirilgan monitoring tizimlariga ulanish imkoniyatiga ega bo‘lib, transport vositalarining texnik holatini uzoqdan nazorat qilish va onlayn diagnostika tizimini shakllantirishga zamin yaratadi.

Qurilma “O‘zbekiston” lokomotiv deposida tajribadan o‘tkazilib, asinxron tortuv elektr dvigatellarini diagnostika qilishda qo‘llash mumkinligi tasdiqlandi (8-rasm). Portativ teslametr signallari asosida spektral tahlil metodikasi ishlab chiqilib, sun’iy neyron tarmoqlar yordamida nosozliklarni bashoratlash imkoniyati ko‘rsatildi.

Ilmiy-texnikaviy jihatdan qurilma xorijiy teslametrlarga muqobil arzon variant sifatida ishlab chiqildi, real vaqt rejimida diagnostika qilish imkonini berdi hamda texnik xizmat ko‘rsatishda xarajatlarni kamaytirishga xizmat qiladi.

## XULOSA

1. Ushbu tadqiqot ishida asinxron tortuv elektr dvigatellarining texnik holatini magnit parametrlar asosida baholashning nazariy va amaliy asoslari ishlab chiqildi. Ayniqsa, havo oralig'idagi magnit maydon taqsimoti, rotor panjarasidagi yoriqlar, eksentrisitet va podshipnik nosozliklari magnitodinamik tahlil yordamida aniqlanib, ularning diagnostik belgilarini aniqlash imkoniyati ko'rsatib berildi.

2. Tadqiqot doirasida yaratilgan portativ teslametr qurilmasi laboratoriya va ishlab chiqarish sharoitida xususan "O'zbekiston" lokomotiv deposida muvaffaqiyatli sinovdan o'tkazildi. Qurilma magnit induksiya signalini real vaqt rejimida qayd etish, spektral tahlil qilish va sun'iy neyron tarmoqlar orqali nosozliklarni ishonchli bashoratlash imkonini berdi.

3. Olingan ilmiy natijalar magnit maydon parametrlariga asoslangan diagnostika yondashuvining samaradorligini isbotladi. Ayniqsa, sun'iy neyron tarmoqlarni qo'llash texnik holatni baholashda yuqori aniqlik beradi, diagnostika jarayonini avtomatlashtiradi va amaliyotga tezkor joriy etish imkonini yaratadi.

4. Amaliy nuqtayi nazardan ishlab chiqilgan teslametr qurilmasi xorijiy analoglarga nisbatan arzon, ixcham va samarali bo'lib, temir yo'l transportida qo'llanishi texnik xizmat ko'rsatish jarayonlarini takomillashtiradi. Natijada nosozliklarni erta aniqlash, rejalashtirilmagan ta'mirlarni kamaytirish va ekspluatatsiya xarajatlarini sezilarli darajada qisqartirish imkonini beradi.

5. Tadqiqotda ishlab chiqilgan usul va qurilma lokomotiv parkining ishonchliligi va xavfsizligini oshirishga xizmat qiladi. Dvigatelning magnit jarayonlariga asoslangan diagnostika vositalari transportda avariya holatlarining oldini olish, lokomotiv brigadalarining mehnatini yengillashtirish va samaradorligini oshirishga zamin yaratadi.

6. Ilmiy va amaliy jihatdan olingan natijalar nafaqat temir yo'l transporti, balki boshqa sanoat tarmoqlarida qo'llaniladigan asinxron elektr dvigatellar uchun ham universalligi bilan ajralib turadi. Bu esa magistral va shahar elektr transportida, shuningdek, energetika va ishlab chiqarish sohalarida zamonaviy diagnostika tizimlarini yaratishga keng imkoniyat beradi.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ ПО ПРИСУЖДЕНИЮ НАУЧНЫХ СТЕПЕНЕЙ  
DSc.15/31.08.2022.Т.73.07 ПРИ ТАШКЕНТСКОМ  
ГОСУДАРСТВЕННОМ ТРАНСПОРТНОМ УНИВЕРСИТЕТЕ**

---

**ТАШКЕНТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТРАНСПОРТНЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ**

**ВОХИДОВ МИРАБРОР ХУСАН УГЛИ**

**ОЦЕНКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ТЯГОВЫХ  
ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА ЛОКОМОТИВОВ С  
ПРИМЕНЕНИЕМ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ**

**05.08.05 – Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация**

**АВТОРЕФЕРАТ ДИССЕРТАЦИИ ДОКТОРА ФИЛОСОФИИ (PhD)  
ПО ТЕХНИЧЕСКИМ НАУКАМ**

**Ташкент – 2025**

**Тема диссертации доктора философии по техническим наукам (PhD) зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Министерстве высшего образования, науки и инноваций Республики Узбекистан за № В2025.2.PhD/Т5738.**

Диссертация выполнена в Ташкентском государственном транспортном университете.

Автореферат диссертации на трех языках (узбекский, русский, английский (резюме)) размещен на веб-сайте Научного Совета ([www.tstu.uz](http://www.tstu.uz)) и Информационно-образовательном портале «Ziyonet» ([www.ziyonet.uz](http://www.ziyonet.uz)).

**Научный руководитель:**

**Хамидов Отабек Рустамович**  
доктор технических наук, профессор

**Официальные оппоненты:**

**Пирматов Нурали Бердиёрович**  
доктор технических наук, профессор

**Курилкин Дмитрий Николаевич**  
кандидат технических наук, доцент

**Ведущая организация:**

**Андижанский государственный  
технический институт**

Защита диссертации состоится \_\_\_\_\_ 2025 г. \_\_\_\_ часов на заседании Научного совета DSc.15/31.08.2022.Т.73.07 при Ташкентском государственном транспортном университете. Адрес: 100167, Ташкент, Темирйулчилар, 1. Тел.: (99871) 299-00-01; факс: (99871) 293-57-54, e-mail: [tashiit\\_rektorat@mail.ru](mailto:tashiit_rektorat@mail.ru).

С диссертацией можно ознакомиться в Ташкентском государственном транспортном университете (регистрационный номер – \_\_\_\_). Адрес: 100167, Ташкент, ул. Темирйулчилар, 1. Тел.: (99871) 299-05-66.

Автореферат диссертации разослан \_\_\_\_\_ 2025 года.  
(протокол реестра № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_ 2025 года).

**Р.В. Рахимов**

Председатель Научного совета  
по присуждению учёных степеней,  
д.т.н., профессор

**Я.О. Рузметов**

Ученый секретарь Научного совета  
по присуждению учёных степеней,  
д.т.н., профессор

**Р.М. Мирсаатов**

Председатель Научного семинара  
при Научном совете по присуждению  
учёных степеней, д.т.н., профессор

## **ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора философии (PhD))**

**Актуальность и необходимость темы диссертации.** В мире особое внимание уделяется вопросам ускорения технологических и производственных процессов за счет внедрения современных методов диагностики с целью повышения надежности и эффективности асинхронных тяговых электродвигателей, применяемых в машиностроении, сельском хозяйстве и железнодорожном транспорте. По результатам исследований, проведенных в развитых странах, установлено, что 20-25% общих неисправностей локомотивов приходится на асинхронные тяговые электродвигатели. В связи с этим, в частности, оптимизация затрат на ремонт при эксплуатации локомотивов, обеспечение безопасности движения и повышение надежности и эксплуатационной эффективности электродвигателей определены как актуальные задачи. В решении этих задач важное значение имеет улучшение технико-экономических показателей асинхронных тяговых электродвигателей, совершенствование методов диагностики для оценки их технического состояния. Актуальность и востребованность темы диссертации.

В мире проводятся научно-исследовательские работы, направленные на разработку различных научно-технических решений по теоретическим расчетам, разработке и совершенствованию современных методов экспериментальных исследований с целью эффективного использования железнодорожного транспорта. В этом направлении приоритетными считаются исследования по повышению коэффициента полезного действия, улучшению электродинамических и электромеханических характеристик, а также определению технического состояния на основе математического моделирования путем применения интеллектуальных технологий, основанных на искусственном интеллекте, для повышения эффективности работы асинхронных тяговых электродвигателей локомотивов. Вместе с тем, одной из актуальных задач является изучение зависимости показателей магнитного поля тяговых электродвигателей от дефектов, повышение эффективности их эксплуатации, а также разработка методов оценки их технического состояния с внедрением искусственного интеллекта для анализа электродинамических и электромеханических характеристик.

В нашей республике реализуются масштабные меры по развитию различных транспортных отраслей, в том числе по совершенствованию инфраструктуры железнодорожного транспорта, эффективному использованию существующего локомотивного парка, электрификации и совершенствованию существующих железнодорожных участков, и достигаются определенные результаты. В Стратегии развития Нового Узбекистана на 2022-2026 годы определены важные задачи, в том числе "Развитие единой транспортной системы с неразрывной связью всех видов транспорта." В процессе реализации этих задач важно разработать новые методы и технологии, которые служат для прогнозирования возможных

неисправностей в асинхронных тяговых электродвигателях современных электропоездов и направлены на совершенствование методов их диагностики.

Данное диссертационное исследование в определенной степени служит выполнению задач, предусмотренных в Постановлениях Президента Республики Узбекистан № ПП-15 от 10 января 2024 года "О дополнительных мерах по дальнейшему повышению производственного и экспортного потенциала электротехнической промышленности," № ПП-454 от 24 декабря 2024 года "О мерах по развитию социальной и производственной инфраструктуры Республики Узбекистан в 2025-2027 годах," № ПП-20 от 22 января 2025 года "О дополнительных мерах по поднятию развития электротехнической промышленности на новый уровень," № ПП-99 от 24 января 2022 года "О мерах по созданию эффективной системы развития производства и расширения промышленной кооперации в республике," № ПП-329 от 10 октября 2023 года "О мерах по коренному реформированию сферы железнодорожного транспорта Республики Узбекистан" и № ПП-28 от 27 января 2025 года "О мерах по дальнейшему развитию транспортно-логистической системы Республики Узбекистан," а также в других нормативно-правовых документах, принятых в данной сфере.

**Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий республики.** Данное исследование выполнено в соответствии с приоритетным направлением развития науки и технологий республики II. Это соответствует приоритетному направлению "Энергетика, энерго-и ресурсосбережение."

**Степень изученности проблемы.** Научные исследования, направленные на решение актуальных задач, связанных с разработкой новых конструкций асинхронных тяговых электродвигателей локомотивов железнодорожного транспорта переменного - постоянного тока и усовершенствованием существующих, проводятся в научных центрах, высших учебных заведениях и научно-исследовательских институтах ведущих стран мира, в том числе в Technical University of Ilmenau и Siemens, Siemens и Halke (Германия), Sony и Tokyo Technology Institute, Toshiba (Япония), Ташкентском государственном техническом университете имени Ислама Каримова и Ташкентском государственном транспортном университете (Узбекистан).

В мире важные теоретические и практические исследования, направленные на повышение эксплуатационной надежности, совершенствование конструкций асинхронных двигателей подвижного состава, были проведены известными зарубежными учеными, в том числе: А.С. Гирник, О.Л. Рапопорт, И.П. Копылов, П.С. Дзен, Г.Я. Шкилько, Е.Б. Данильевич, Е.Г. Кашарский, А.И. Зайцев, Д.И. Баннов, А.Б. Виноградов, А.В. Бражников, В.И. Пантелеев, Н.Н. Довженко, Г.Я. Шкилько, Е.М. Новоселова, В.А. Савельева, И. Тан, К. Zhang, X. Jiang, Y. Wu, S. Chakroune и других ведущих ученых.

В нашей республике большой вклад в повышение прочности, долговечности, надежности и эффективности эксплуатации

электродвигателей подвижного состава внесли такие ученые, как А.Д. Глущенко, Б.И. Вилькевич, В.И. Юшко, С.Ф. Амиров, Г.А. Хромова, Ю.О. Рузметов, Р.В. Рахимов, Д.О. Раджибаев, О.Т. Болтаев, У.Т. Бердиев, Ш.С. Файзибаев, Н.Б. Пирматов, О.Р. Хамидов, У.И. Сафаров, Жамилов Ш.Ф., Эргашев О.Э, Ш.И. Мамаев и другие. Вместе с тем, анализ исследований показывает, что недостаточно проведены научные исследования по повышению надежности тяговых электродвигателей переменного тока за счет совершенствования оценки их технического состояния, продления срока межремонтной работы, внедрения новых технологий в процессы диагностики, в частности, искусственных нейронных сетей.

**Связь диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ высшего образовательного учреждения, где выполнена диссертация.** Диссертационное исследование выполнено в соответствии с планом научно-исследовательских работ Ташкентского государственного транспортного университета в соответствии с приказом № 5 от 23 января 2023 года "Проведение фундаментальных, прикладных и инновационных исследований и изысканий по актуальным вопросам развития транспортной отрасли, анализ деятельности по внедрению их результатов" и приказом АО «Узбекистон темир йуллари» № 175 от 8 июня 2024 года «Об освоении и модернизации новых видов ремонта.»

**Цель исследования** - оценка технического состояния тяговых электродвигателей локомотивов переменного тока с применением искусственных нейронных сетей.

**Задачи исследования:**

изучение и анализ существующих методов оценки технического состояния тяговых электродвигателей переменного тока, в частности подходов, созданных на основе нейронных сетей;

разработка имитационной модели зависимости основных неисправностей асинхронного тягового электродвигателя от магнитных параметров и их диагностических признаков;

разработка в местных условиях диагностического устройства, позволяющего в режиме реального времени определять магнитную индукцию воздушного зазора между статором и ротором тяговых электродвигателей переменного тока;

создание оптимальной нейросетевой модели для оценки технического состояния двигателя и разработка алгоритма ее обучения;

сбор, обработка и обучение в нейронной сети результатов экспериментов по магнитным параметрам двигателя;

оценка точности, оперативности и возможности практического применения разработанной системы диагностики на базе нейронной сети;

разработка методики мониторинга и диагностики технического состояния тяговых электродвигателей локомотивов переменного тока на основе полученных результатов.

**Объектом исследования** являются асинхронные тяговые

электродвигатели локомотивов.

**Предметом исследования** является техническое состояние асинхронных тяговых электродвигателей локомотивов.

**Методы исследования.** В процессе исследования использовались такие методы, как статистический анализ неисправностей асинхронных тяговых электродвигателей, теоретические расчеты, методы математического и компьютерного моделирования, законы электромагнитной индукции, экспериментальные исследования.

**Научная новизна исследования заключается в следующем:**

разработана имитационная модель, позволяющая оценить изменения магнитной индукции воздушного пространства между статором и ротором в процессе работы асинхронных тяговых электродвигателей локомотивов;

впервые разработан метод интеллектуальной диагностики, позволяющий оценить техническое состояние асинхронных тяговых электродвигателей локомотивов на основе данных современных систем автоматического управления;;

разработано диагностическое устройство, позволяющее в местных условиях в режиме реального времени определять магнитную индукцию воздушного пространства между статором и ротором асинхронных тяговых электродвигателей локомотивов;

разработаны методика и алгоритм, позволяющие оценить техническое состояние асинхронных тяговых электродвигателей с учетом закономерностей изменения магнитного поля в воздушном зазоре.

**Практические результаты исследования** состоят из:

разработана методика диагностики на основе магнитных параметров для оценки технического состояния тяговых электродвигателей, практическая эффективность которой подтверждена результатами экспериментов.

Диагностическая модель, разработанная на основе искусственных нейронных сетей, была протестирована на основе реальных измерительных данных, что позволило с высокой точностью различать здоровые и неисправные состояния двигателя.

база данных сигналов магнитной индукции, собранная в лабораторных условиях, сформирована в качестве практического источника для дальнейших научных исследований, совершенствования диагностических систем и использования в учебном процессе.

с помощью портативного тесламетра были собраны сигналы магнитной индукции, сформирована база данных и использована для обучения в нейронной сети.

система диагностики продемонстрировала высокую точность и быстродействие, а также подтверждена эффективность применения в реальных условиях.

практическая эффективность подтверждена экспериментами и разработана методика мониторинга и ранней диагностики.

**Достоверность результатов исследования.** Достоверность результатов

данного исследования обеспечивается сопоставлением теоретических моделей, математических расчетов и практических экспериментов. Определение неисправностей на основе магнитных параметров в асинхронных тяговых электродвигателях было сопоставлено с экспериментальными данными и достигнуто высокое соответствие. Повторение результатов моделирования с использованием нейронных сетей и близость полученных данных в различных условиях показали устойчивость. Степень точности, показатели погрешности и результаты проверки с помощью конфузионных матриц также объясняются соответствием теоретических и практических результатов.

#### **Научная и практическая значимость результатов исследования.**

Научная значимость результатов исследования объясняется разработкой нового подхода к оценке технического состояния асинхронных тяговых электродвигателей на основе их магнитных параметров и вкладом в развитие теории и практики электродинамики.

Практическая значимость результатов исследования объясняется разработкой диагностического устройства, позволяющего в режиме реального времени определять магнитную индукцию воздушного пространства между статором и ротором асинхронных тяговых электродвигателей локомотивов.

**Внедрение результатов исследования.** На основе результатов научных исследований по оценке технического состояния локомотивов с использованием искусственных нейронных сетей:

метод интеллектуальной диагностики, позволяющий оценить техническое состояние асинхронных тяговых электродвигателей, внедрен в локомотивное депо "Узбекистан" (справка Министерства транспорта Республики Узбекистан No 4/E1484 от 16 октября 2025 г.). В результате стало возможным заранее оценить неисправности асинхронных тяговых электродвигателей.

диагностическое устройство, позволяющее в режиме реального времени определять магнитную индукцию воздушного зазора между статором и ротором асинхронных тяговых электродвигателей, внедрено в локомотивных депо АО "Узбекистон темир йуллари" (справка Министерства транспорта Республики Узбекистан No 4/E1484 от 16 октября 2025 г.). В результате ожидаемая годовая экономическая эффективность составила 856 321 000 (восемьсот пятьдесят шесть миллионов триста двадцать одна тысяча) сумов.

**Апробация результатов исследования.** Результаты диссертационного исследования были представлены и обсуждены на 3 научных конференциях, в том числе на 1 научной конференции, индексируемой в международной базе данных Scopus, 2 республиканских научно-практических конференциях.

**Публикация результатов исследования.** По теме диссертации зарегистрировано 14 научных работ, в том числе 2 международных и 6 изданий, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики

Узбекистан для публикации основных научных результатов докторских диссертаций, 6 программных продуктов для ЭВМ.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Объем диссертации составляет 115 страниц.

## СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

**Во введении** обоснована актуальность и востребованность темы диссертации, подробно освещено состояние поставленной задачи, сформулированы цель и задачи исследования, охарактеризованы объект и предмет исследования, показано соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий республики, изложены научная новизна и практические результаты исследования, обоснована достоверность, приведены сведения о внедрении результатов научных исследований в производство, а также сведения об опубликованных работах и структуре диссертации.

В первой главе диссертации **"Анализ тяговых электродвигателей переменного тока локомотивов и постановка задачи исследования"** приведен анализ асинхронных электродвигателей локомотивов, эксплуатируемых в локомотивном парке АО "Узбекистон темир йуллари," а также причины их неисправностей.

Тяговые асинхронные электродвигатели переменного тока широко применяются в электровозах, поскольку они считаются эффективными и надежными. Основной функцией, которую они выполняют в электровозах, является главный приводный агрегат в тяге локомотива.

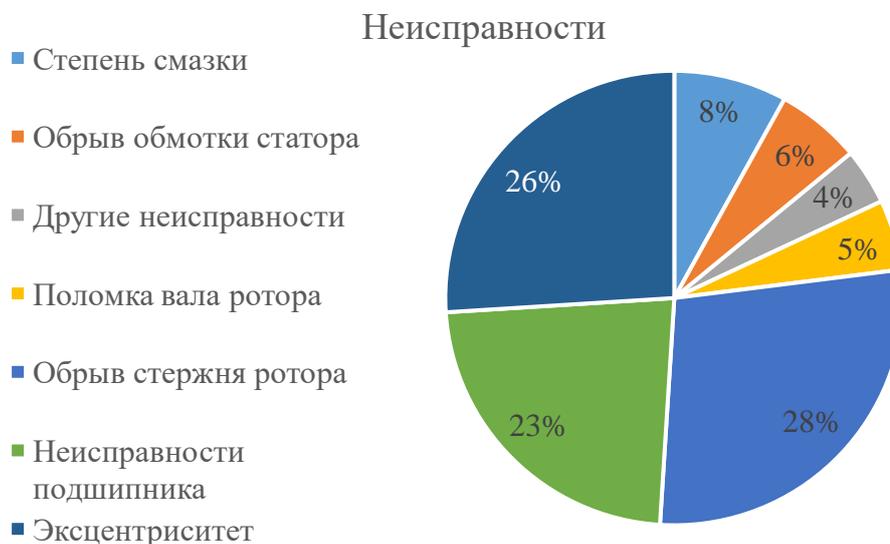
Актуальным вопросом является изучение различных методов контроля и мониторинга, широко используемых на практике, анализ их возможностей, выявление преимуществ и недостатков, а также оценка того, какой метод эффективно применяется в каких условиях. В этом процессе важную роль играют вибрационный анализ, диагностика на основе электрических сигналов, сравнительный анализ магнитных параметров, тепловых и акустических методов.

В асинхронных тяговых электродвигателях, имеющих на локомотивах, принадлежащих АО "Узбекистон темир йуллари," наблюдаются различные неисправности. Эти неисправности интерпретируются следующим образом, и анализируются три основных неисправности (рисунок-1):

Анализ показывает, что основными неисправностями, возникающими в асинхронных тяговых электродвигателях, являются:

эксцентриситет (26%), обрыв стержней ротора (28%) и механические неисправности (23%). В результате несовпадения центров ротора и статора эксцентриситет приводит к неравномерному распределению магнитной индукции в воздушном зазоре и появлению дополнительных радиальных сил. Разрыв стержней ротора происходит в основном под воздействием высокой температуры, что приводит к усилению электрических и механических

проблем. Механические неисправности, как правило, возникают из-за износа подшипников или неправильной эксплуатации, что значительно снижает эффективность двигателя.



**Рисунок 1. Неисправности в тяговых асинхронных двигателях переменного тока (%)**

Во второй главе диссертации под названием **"Технологии нейронных сетей и математические модели при совершенствовании методов технической диагностики электродвигателей"** представлена оценка технического состояния асинхронных тяговых электродвигателей локомотивов, работающих на переменном токе, выбор параметров, чувствительных к дефектам, для эффективной диагностики электродвигателей, среди электрических, магнитных, механических и тепловых величин наиболее информативной является магнитная индукция, которая также отражает небольшие изменения в роторе и статоре. Во второй главе эти параметры проанализированы на основе математических моделей и исследована автоматизированная диагностическая система с использованием искусственных нейронных сетей.

В диагностике электродвигателей магнитодинамический метод может выявить три основных неисправности путем анализа изменений индукции магнитного поля в воздушном зазоре. Рассмотрим характеристики этого метода для каждой неисправности:

#### **Неисправности подшипника**

Влияние на магнитное поле: Неисправность подшипника и недостаточная смазка приводят к механической нестабильности между ротором и статором. Это приводит к неравномерному распределению магнитной индукции в воздушном зазоре. В магнитной индукции возникают низкочастотные гармоники. Это указывает на небольшое покачивание ротора.

Определяется путем диагностики низкочастотных изменений магнитного поля.

### Эксцентриситет

Эксцентриситет возникает в результате геометрического несоответствия между осью ротора и осью статора. Они делятся на смешанные, динамические и статические эксцентриситеты. Это приводит к неравномерной толщине воздушного зазора. При магнитной индукции возникают определенные высшие гармоники, частота которых связана с частотой вращения ротора. Определяется асимметричным распределением магнитного поля и наличием высокочастотных гармоник.

### Трещины в роторе

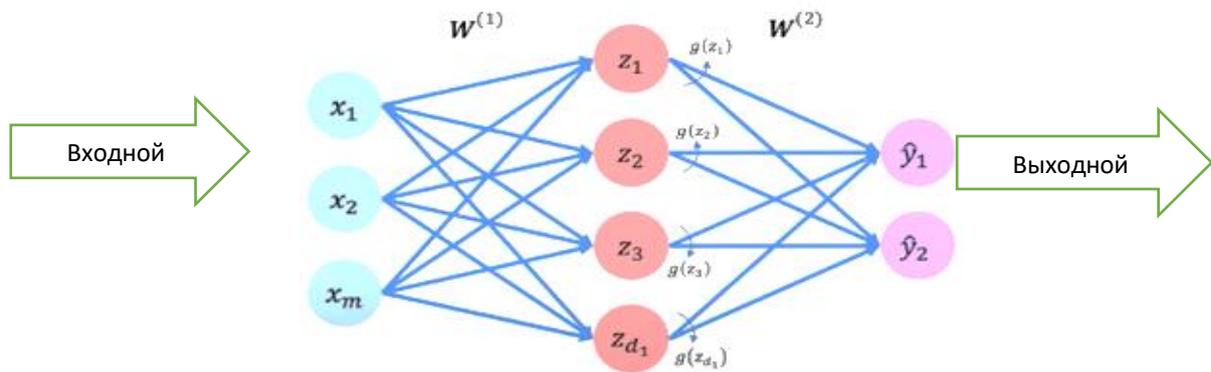
Трещины ротора искажают направление и пути прохождения магнитного поля, что приводит к неравномерному изменению напряжения магнитной индукции. В индукции появляются модулированный высокочастотный сигнал и динамические гармоники. Диагностируется по высокочастотным гармоникам индукции магнитного поля и интенсивности изменения сигнала.

Искусственные нейронные сети (ИНС) - это область теории и практики нейронных сетей, в которой обработка сигналов осуществляется по формулам и алгоритмам, исследующим явления, происходящие в нейронах технической системы (рисунок-2).

Одной из наиболее часто используемых моделей среди нейронных сетей является **MLP (Multi-Layer Perceptron)** (Рисунок 3), которая имеет простую архитектуру и обрабатывает входные данные через полностью связанные слои. MLP в основном эффективен в задачах табличных данных, регрессии и классификации.



Рисунок 2. Последовательность оценки технического состояния АТЭД



**Рисунок 3. Модель многослойной персептронной нейронной сети:**

$x_1, x_2 \dots x_n$  входные сигналы,  $z_1, z_2 \dots z_n$  первый скрытый слой,  $y_1$  и  $y_2$  выходные сигналы

$x \in \mathbb{R}^n$ . **Основа** - математическая модель простых полностью связанных слоев: Вход:

Первый скрытый слой:

$$h^{(1)} = f(W^{(1)}x + b^{(1)})$$

Второй скрытый слой:

$$h^{(2)} = f(W^{(2)}h^{(1)} + b^{(2)})$$

Выход:

$$y = g(W^{(3)}h^{(2)} + b^{(3)})$$

Здесь:

$W^{(i)}$  - матрица весов (weight),  $b^{(i)}$  - сдвиг (bias),  $f(\cdot)$  - функция активации (например, ReLU),  $g(\cdot)$  - функция выхода (например, softmax).

**CNN (Convolutional Neural Network)** широко используется для анализа более сложных типов данных, в частности пространственных структур и изображений. CNN выделяет свойства через свёрточные слои и позволяет обрабатывать такие данные, как изображения, сигналы или измерения магнитного поля, с высокой точностью.

**Основа** - математическая модель операции свертки (фильтрации).

Для 1D сигнала:

$$h_i^{(k)} = f\left(\sum_{j=1}^m w_j^{(k)} \cdot x_{i+j-1} + b^{(k)}\right)$$

Для 2D-изображения (канальная свертка):

$$h_{ij}^{(k)} = f\left(\sum_{m=1}^M \sum_{p=1}^P \sum_{q=1}^Q w_{p,q,m}^{(k)} \cdot x_{i+p,j+q,m} + b^{(k)}\right)$$

Здесь:

- веса свёрточного фильтра,

$b^{(k)}$  - bias,

$f(\cdot)$  - функция активации (ReLU, сигмоида и т.д.).

А полинг-слой:

то есть максимальное значение внутри фильтра.

Для моделирования временных процессов с последовательностью **RNN (Recurrent Neural Network)** один из основных инструментов. RNN учитывает временные зависимости, передавая скрытое состояние на предыдущем этапе времени следующему. Поэтому он может быть использован для анализа сигналов электродвигателей, изменяющихся во времени, например, спектров вибрации, тока или магнитной индукции. RNN (Recurrent Neural Network) - математическая модель

Каждый момент времени  $t$ :  
Обновление скрытого статуса:

$$h_{(t)} = f(W_h h_{t-1} + W_x x_t + b_h)$$

Выход:

$$y_{(t)} = g(W_y h_t + b_y)$$

Здесь:  $x_t$  - вход в момент времени  $t$ ,  $h_t$  - скрытое состояние (memory),  $W_x$ ,  $W_h$ ,  $W_y$  - веса,  $f(\cdot)$  - активация (tanh или ReLU),  $g(\cdot)$  - функция выхода (softmax, sigmoid).

Отличие RNN от остальных заключается в том, что предыдущее состояние  $h_{t-1}$  повторяется в качестве памяти на каждом шаге времени. Это делает его подходящим для моделирования временной последовательности (например, сигнала вибрации двигателя или спектра тока).

Таким образом, модели MLP, CNN и RNN имеют свои преимущества, которые при совместном использовании расширяют возможности раннего выявления различных неисправностей и оценки технического состояния электродвигателей.

Результаты исследования показывают, что изменения магнитной индукции, вызванные неисправностями тягового электродвигателя Siemens типа 1ТВ 2KF2624-3EA00, служат важным показателем при оценке технического состояния двигателя. Особенно при появлении неисправностей в эксцентриситете, подшипниках или стержнях ротора наблюдается неравномерное распределение магнитного поля, что позволяет проводить точную диагностику с помощью нейросетевой модели.

Поэтому анализ, основанный на параметрах магнитной индукции, дает результаты, имеющие научное и практическое значение для оценки эффективности данного двигателя, предотвращения неисправностей и продления срока службы.

Эти научные результаты также важны при разработке методов оценки технического состояния с помощью параметров магнитной индукции на основе нейронных сетей. Потому что различия магнитных процессов, вызванных материалом решетки ротора, определяются с помощью нейронной модели, что позволяет проводить техническую диагностику двигателя с высокой точностью.

В третьей главе диссертации под названием "**Магнитные процессы асинхронных двигателей при неисправностях и метод их моделирования**"

**через нейронные сети"** анализируется изменение магнитных процессов под воздействием неисправностей, возникающих в асинхронных двигателях. Эксцентриситет, трещины в решетке ротора и неисправности подшипников вызывают неравномерное распределение магнитного поля в воздушном зазоре и пульсации электромагнитного момента. Поэтому магнитные параметры выбираются в качестве основного критерия диагностики. Их спектральные характеристики обрабатываются нейронными сетями, что позволяет проводить раннюю и автоматизированную оценку технического состояния двигателя.

Расчетная площадь расщепления полюсов с учетом рассмотренных особенностей распределения индукции в воздушном пространстве электрической машины

$$S_{\delta} = a_{\delta} \tau l_{\delta}$$

Тогда индукция в промежутке

$$B_{\delta} =$$

гласно методу специфической магнитной проводимости воздушного зазора, можно пренебречь ненасыщенностью магнитного периода машины и магнитным напряжением магнитопроводов относительно магнитного напряжения воздушного зазора ( $\mu_{st} = \infty$ ), поле в воздушном зазоре определяется произведением магнитного напряжения здесь и удельной магнитной проводимости зазора:

$$\sum B_{\delta} = \sum F_{\delta} \sum \lambda_{\delta} = \left( \sum F_{\delta s} + \sum F_{\delta r} \right) \sum \lambda_{\delta} = \sum F_{\delta s} \sum \lambda_{\delta} + \sum F_{\delta r} \sum \lambda_{\delta} .$$

Воздушный зазор при наличии эксцентриситета ротора

$\bar{\varepsilon}$  va  $\bar{\varepsilon}_{\Sigma}$ . На рис. 6 представлена схема смещения оси поверхности ротора при наличии статического и динамического эксцентриситета. векторы соответствуют векторам оси ротора в относительных единицах, а вектор - мгновенный полный эксцентриситет ротора.

Сумма мгновенного эксцентриситета и направление смещения ротора

$$\bar{\varepsilon}_{\Sigma} = \sqrt{\left( \varepsilon \cos \varphi_{\varepsilon} + \varepsilon' \cos \varphi_{\varepsilon}' \right)^2 + \left( \varepsilon \sin \varphi_{\varepsilon} + \varepsilon' \sin \varphi_{\varepsilon}' \right)^2} ,$$

$$\varphi_{\varepsilon \Sigma} = \operatorname{arctg} \frac{\varepsilon \sin \varphi_{\varepsilon} + \varepsilon' \sin \varphi_{\varepsilon}'}{\varepsilon \cos \varphi_{\varepsilon} + \varepsilon' \cos \varphi_{\varepsilon}'}$$

В процессе исследования было установлено, что основные неисправности, встречающиеся в асинхронных тяговых электродвигателях - эксцентриситет, трещины в решетке ротора, и неисправности в подшипниках - все они оказывают существенное влияние на распределение магнитной индукции в воздушном зазоре. При рассмотрении каждой неисправности в отдельности изменения магнитной индукции  $B$ , воздушного зазора  $\delta$ , тока ротора  $I_2$  и электромагнитного момента  $M$  выражаются по-разному. В то же время, в обобщенном виде может быть предложена следующая формула связи:

$$B(\theta, t) = \frac{\mu_0 A(\theta, t) C(\theta)}{\delta_0 + \varepsilon_e(\theta, t)} + B_{nl}(\theta, t)$$

$B(\theta, t)$  - локальное значение магнитной индукции; функция, единица: тесла (Т).

$\theta$  - угловая координата по окружности (рад или °); позиционный аргумент.

$A(\theta, t)$  - линейная нагрузка тока, А/м; обычно берется из фаз статора и амплитуд тока.

$\delta_0$  - среднее воздушное расстояние (mean air-gap), ед.: метр (м).

$\varepsilon_e(\theta, t)$  - модуляция воздушного зазора, обусловленная эксцентриситетом  
 $f_{CNN}$  - функциональность СНН (искусственной нейронной сети); характеризует вход → выход (в зависимости от архитектуры: MLP/CNN/ReLU и др.).

$x(\theta, t)$  - вектор входных свойств: например, FFT-Переводит сигнал из временной области в частотную область.

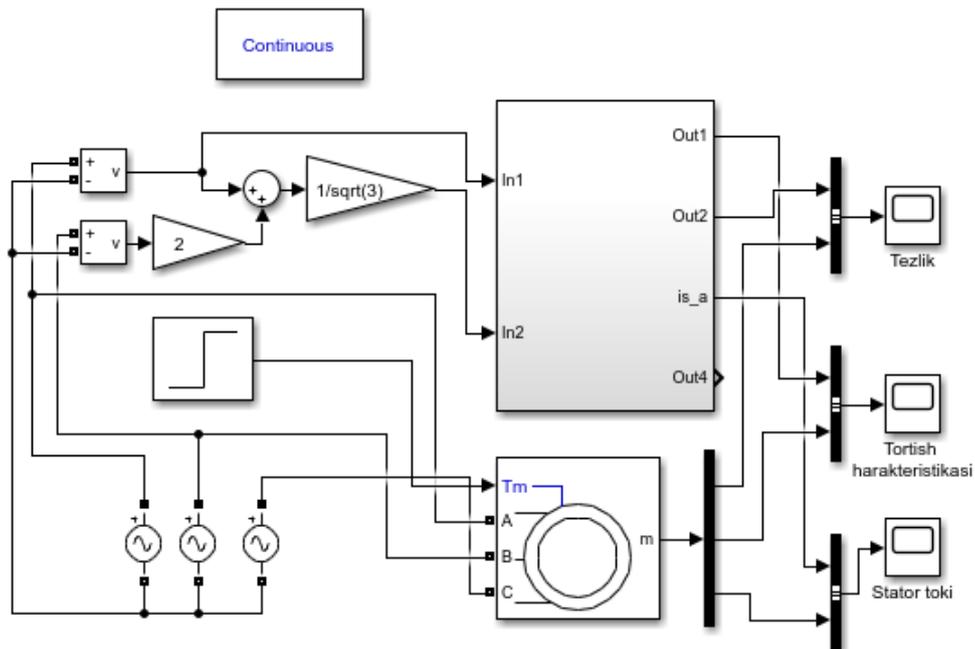
$$[\delta, A, R(i_2), I(i_2), M, FFT_{amp}, T, s, \dots]$$

Функция удаления и гиперпараметры

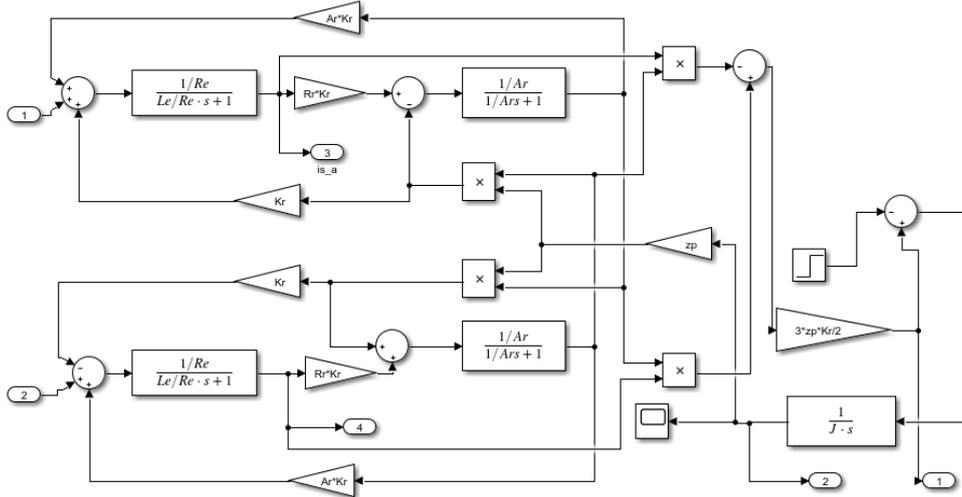
$$L(w) = \alpha L_{reg} + \beta L_{reg} + \gamma R(w)$$

При анализе магнитных процессов асинхронного двигателя была создана компьютерная модель на основе программы MATLAB/Simulink (рисунок-4). В модели имитируется процесс работы двигателя в нормальном (исправном) состоянии с учетом электрических и магнитных уравнений. С помощью этого наблюдали изменение магнитной индукции двигателя, график момента и тока, а также другие электромагнитные показатели.

а)



b)

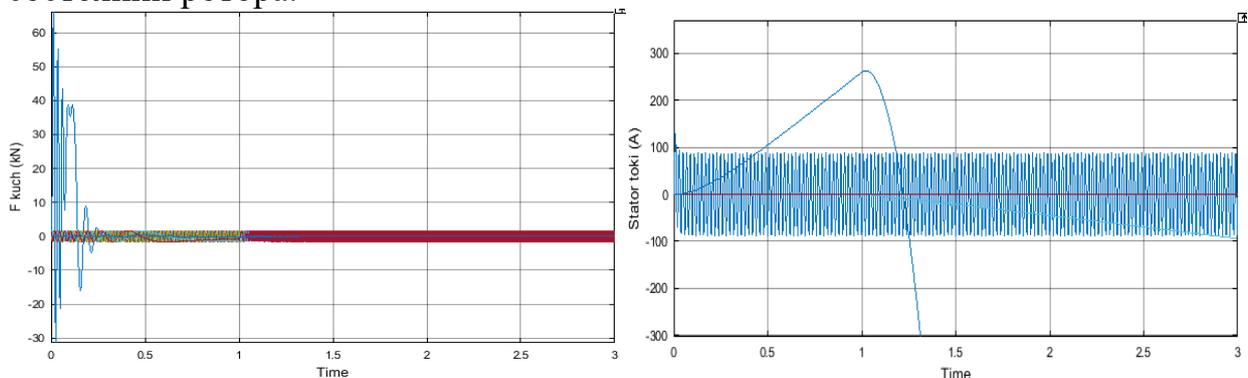


**Рисунок-4. Имитационная модель системы обнаружения неисправностей тяговых асинхронных электродвигателей в программном обеспечении Matlab simulink**

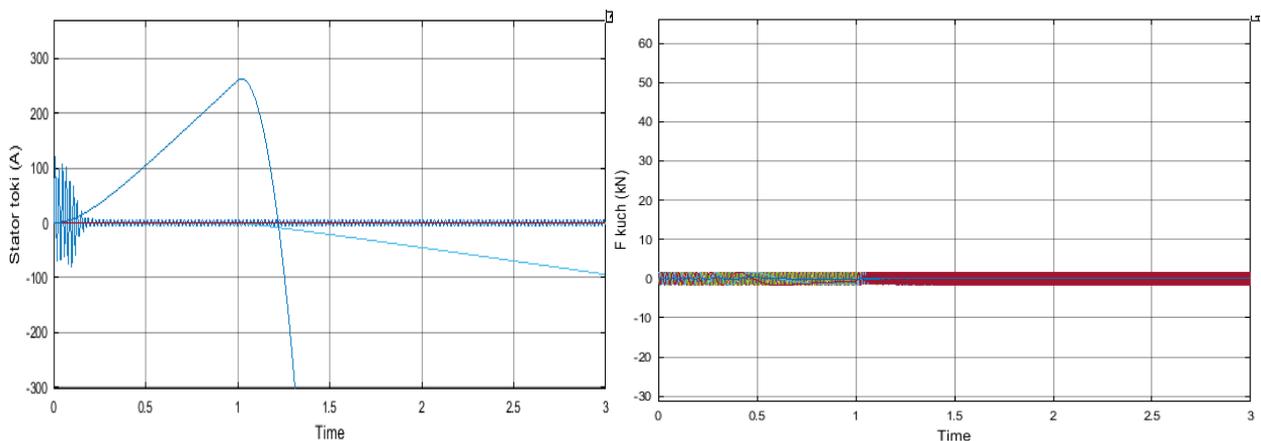
**а) основной блок б) преобразователь Кларка**

Рисунок 4 Continuous powergui - постоянный источник питания, основанный на частоте 50 Гц, включающий сопротивления статора и ротора ( $R_s, R_r$ ) и их индуктивность ( $L_s, L_r$ ).  $L_m$  - индуктивность намагничивания,  $p$  - число пар полюсов, а  $J$  - момент инерции. Общая индуктивность статора и ротора ( $L_s, L_r$ ) рассчитана на основе этих значений. Также были определены коэффициент магнитной связи ( $K_r$ ), эквивалентное сопротивление ( $R_e$ ) и эквивалентная индуктивность ( $L_e$ ). В модели также рассчитаны амплитуда напряжения ( $U_{amp}$ ) и показатель, относящийся к константе времени ротора ( $A_r$ ).

Вышеуказанные параметры служат основой для построения имитационной модели асинхронного двигателя в исправном состоянии в среде MATLAB/Simulink. С помощью этой имитационной модели показано сравнение изменений тяговых характеристик в асинхронном тяговом электродвигателе в исправном (рисунок-5) и неисправном (рисунок-6) состоянии ротора.



**Рисунок 5. Тяговых характеристик при исправном состоянии двигателя**



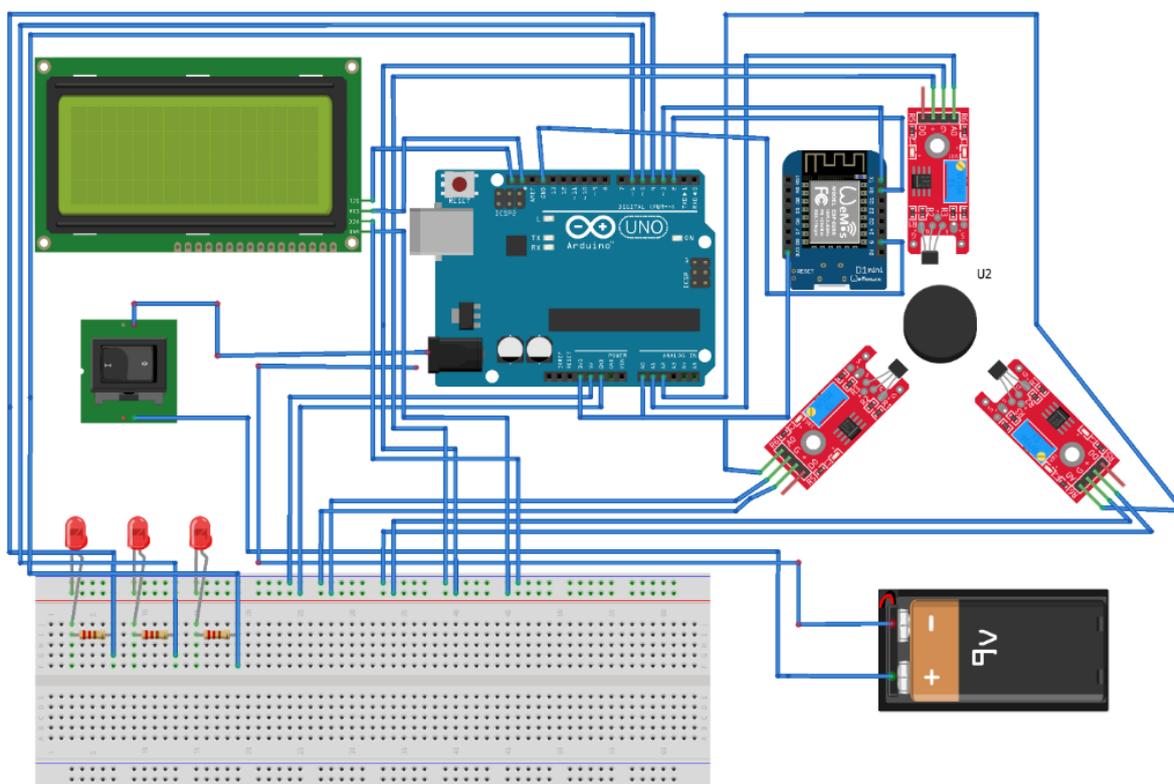
**Рисунок 6. Изменение тяговой характеристики при неисправном двигателе**

В четвертой главе диссертации **"Диагностика неисправностей магнитодинамическим методом асинхронных двигателей и применение нейронных сетей"** разработана методика оценки технического состояния асинхронного тягового электродвигателя по трем основным неисправностям и представлены обоснованные критерии.

В результате проведенных работ разработан прототип портативного тесламетра на основе микроконтроллера Arduino, датчика Hall, LCD индикатора и модуля WiFi для измерения магнитной индукции в воздушном зазоре асинхронных тяговых двигателей (рисунок-7). Устройство было проверено в лабораторных и практических испытаниях, что позволило отображать изменения магнитной индукции в режиме реального времени. Разработана методика определения трещин ротора, эксцентриситета и других неисправностей по магнитным параметрам с помощью тесламетра. Для автоматизации сбора и передачи данных, полученных в рамках исследования, на тесламетр был установлен Wi-Fi модуль, а значения измерений передавались в режиме реального времени по сети TCP/IP на указанный IP-адрес центрального сервера.

В каждом измерительном пакете временная метка, исходные значения, полученные с датчика, и соответствующий идентификатор формировались в формате JSON и отправлялись на сервер через HTTP POST-запрос или UDP-пакеты. Это решение обеспечило удобную инфраструктуру для централизованного хранения данных и последующего анализа (аналоговый анализ, оценка нейронной сети) в процессе тестирования.

Тесламетр, созданный в рамках исследования, по своим возможностям значительно превосходит существующие зарубежные аналоги. Прежде всего, устройство позволяет точно измерять магнитную индукцию в воздушном зазоре в режиме реального времени. Это позволяет непосредственно наблюдать и точно оценивать электромагнитные процессы, происходящие в тяговых электродвигателях.



**Рисунок 7. Внутренняя структура тесламетра (схема)**

Следующей важной особенностью тесламетра является возможность спектрального анализа собранных магнитных сигналов. С помощью такого анализа можно рано обнаружить электромагнитные признаки сложных состояний, таких как трещины в решетке ротора, эксцентриситет или неисправности подшипника. Это создает основу для выявления неисправностей двигателя на начальном этапе и принятия эффективных профилактических мер.

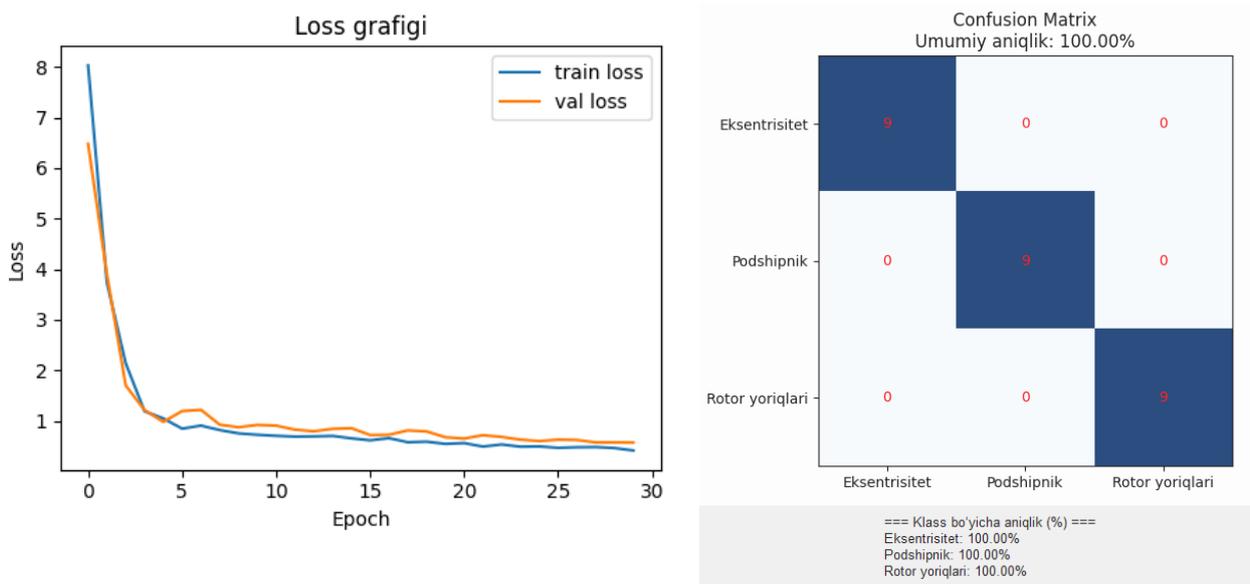
Возможности устройства не ограничиваются измерениями. Она может работать в интеграции с искусственными нейронными сетями. Этот подход автоматизирует обработку собранных данных, повышает точность диагностики и позволяет достоверно прогнозировать будущие сбои. В результате процесс технического обслуживания поднимется до уровня современной интеллектуальной системы (рисунок-8).

С практической точки зрения, портативность, дешевизна и удобство тесламетра имеют особое значение. Поскольку устройство компактное, его можно использовать не только в лабораторных условиях, но и непосредственно в локомотивном депо. Несмотря на значительно более низкие производственные и эксплуатационные затраты по сравнению с зарубежными аналогами, полученные результаты отличаются высокой степенью точности.

Тесламетр также имеет многогранное применение. Он может эффективно использоваться не только в тяговых электродвигателях, но и в асинхронных двигателях, используемых в других отраслях промышленности. Кроме того, устройство имеет возможность подключения к существующим

автоматизированным системам мониторинга, что создает основу для дистанционного мониторинга технического состояния транспортных средств и формирования системы онлайн-диагностики.

Устройство было протестировано на локомотивном депо "Узбекистан" и подтверждено, что его можно использовать для диагностики асинхронных тяговых электродвигателей. Разработана методика спектрального анализа на основе сигналов портативного тесламетра и показана возможность прогнозирования неисправностей с помощью искусственных нейронных сетей.



**Рисунок 8. Результат обучения через нейронную сеть**

С научно-технической точки зрения устройство разработано как недорогой альтернативный зарубежным тесламетрам, позволяет диагностировать в режиме реального времени и служит для снижения затрат на техническое обслуживание.

## ВЫВОД

1. В данной исследовательской работе разработаны теоретические и практические основы оценки технического состояния асинхронных тяговых электродвигателей на основе магнитных параметров. В частности, распределение магнитного поля в воздушном зазоре, трещины в решетке ротора, эксцентриситет и неисправности подшипников были выявлены с помощью магнитодинамического анализа и показана возможность определения их диагностических признаков.

2. Созданный в рамках исследования портативный тесламетр успешно апробирован в лабораторных и производственных условиях, в частности, на локомотивном депо "Узбекистан." Устройство позволило регистрировать сигнал магнитной индукции в режиме реального времени, проводить спектральный анализ и надежно прогнозировать неисправности через искусственные нейронные сети.

3. Полученные научные результаты доказали эффективность диагностического подхода, основанного на параметрах магнитного поля. В частности, использование искусственных нейронных сетей обеспечивает высокую точность при оценке технического состояния, автоматизирует процесс диагностики и позволяет быстро внедрять его в практику.

4. С практической точки зрения разработанное устройство тесламетра дешевле, компактнее и эффективнее зарубежных аналогов, а его применение на железнодорожном транспорте улучшает процессы технического обслуживания. В результате это позволяет выявлять неисправности на ранней стадии, сокращать незапланированные ремонты и значительно снижать эксплуатационные расходы.

5. Разработанные в исследовании метод и устройство служат повышению надежности и безопасности локомотивного парка. Диагностические средства, основанные на магнитных процессах двигателя, создают основу для предотвращения аварий на транспорте, облегчения труда локомотивных бригад и повышения их эффективности.

6. Полученные научные и практические результаты отличаются универсальностью не только для железнодорожного транспорта, но и для асинхронных электродвигателей, применяемых в других отраслях промышленности. Это создаст широкие возможности для создания современных диагностических систем на магистральном и городском электротранспорте, а также в энергетической и производственной сферах.

**TASHKENT STATE TRANSPORT UNIVERSITY  
SCIENTIFIC COUNCIL FOR AWARDED  
SCIENTIFIC DEGREES DSc.15/31.08.2022.T.73.07**

---

**TASHKENT STATE TRANSPORT UNIVERSITY**

**VOKHIDOV MIRABROR XUSAN UGLI**

**ASSESSMENT OF THE TECHNICAL CONDITION OF ALTERNATING  
CURRENT TRACTION ELECTRIC MOTORS OF LOCOMOTIVES  
USING ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS**

**05.08.05 – Railway rolling stock, train traction and electrification**

**DISSERTATION ABSTRACT OF THE DOCTOR OF PHILOSOPHY (PhD)  
ON TECHNICAL SCIENCES**

**Tashkent – 2025**

**The theme of the dissertation of doctor of philosophy (PhD) on technical sciences was registered at the Supreme Attestation Commission at the Ministry of Higher Education, Science and Innovation of the Republic of Uzbekistan under № B2025.2.PhD/T5738.**

The dissertation was completed at the Tashkent state transport university.

The abstract of the dissertation is posted in three languages (Uzbek, Russian, English (resume)) on the website of the Scientific Council ([www.tstu.uz](http://www.tstu.uz)) and on the web site of «Ziyonet» Information and education portal ([www.ziyonet.uz](http://www.ziyonet.uz)).

**Scientific supervisor:**

**Khamidov Otabek Rustamovich**  
doctor of technical sciences, professor

**Official opponents:**

**Pirmatov Nurali Berdiyevich**  
Doctor of technical sciences, professor

**Kurilkin Dmitriy Nikolayevich**  
candidate of technical sciences, associate  
professor

**Leading organization:**

**Andijan state technical institute**

The defense will be take place \_\_\_\_\_ 2025 at \_\_\_\_\_ at the meeting of Scientific Council at the Scientific Council DSc.15/31.08.2022.T.73.07 Tashkent state transport university. Address: 1, Temiryolchilar str., Tashkent 100167, Uzbekistan. Phone: (+998 71) 299-00-01, fax: (99871) 293-57-57, e-mail: tashiit\_rektorat@mail.ru.

The doctoral (PhD) dissertation can be reviewed at the Information–Resource Center of the Tashkent state transport university (Registration number \_\_\_\_). Address: 1, Temiryolchilar str., Tashkent 100167, Uzbekistan. Phone: (+998 71) 299-05-66).

Abstract of dissertation was distributed on \_\_\_\_\_, 2025 year.  
(mailing record \_\_\_\_ on \_\_\_\_\_, 2025 year).

**R.V. Rahimov**  
Chairman of Scientific council  
on awarding scientific degrees,  
doctor of technical sciences, professor

**Ya.O. Ruzmetov**  
Scientific secretary of the Scientific council  
on awarding scientific degrees,  
doctor of technical sciences, professor

**R.M. Mirsaatov**  
Chairman of the Scientific seminar  
under scientific council on  
awarding scientific degrees,  
doctor of technical sciences, professor

## **INTRODUCTION (abstract for the dissertation of doctor of philosophy (PhD))**

**The purpose of the research** is improvement of methods for assessing the technical condition of locomotive traction electric motors of alternating current through artificial neural networks.

**The objectives of the research:**

study and analysis of existing methods for assessing the technical condition of traction electric motors of alternating current, in particular, approaches created on the basis of neural networks;

development of a simulation model of the dependence of the main malfunctions of an asynchronous traction electric motor on magnetic parameters and their diagnostic features;

development, under local conditions, of a diagnostic device that allows real-time determination of the magnetic induction of the air gap between the stator and rotor of traction motors of alternating current;

creation of an optimal neural network model for assessing the technical condition of the engine and development of an algorithm for its training;

collection of experimental results on the magnetic parameters of the engine, their processing and training in the neural network;

assessment of the accuracy, speed, and practical applicability of the developed neural network-based diagnostic system;

based on the results, develop a methodology for monitoring and diagnosing the technical condition of locomotive traction electric motors of alternating current.

**The object of the research**-alternating current torque electric (asynchronous) motors of locomotives.

**The scientific novelty of the research work** of the research consists of the following:

a simulation model has been developed that allows assessing changes in the magnetic induction of the air gap between the stator and rotor during the operation of locomotive asynchronous traction electric motors;

for the first time, an intelligent diagnostic method has been developed that allows assessing the technical condition of asynchronous traction electric locomotive engines based on data from modern automatic control systems;

a diagnostic device has been developed that allows real-time determination of the magnetic induction of the air gap between the stator and rotor of locomotive asynchronous traction electric motors in local conditions;

a program, methodology and algorithm have been developed that allow assessing the technical condition of asynchronous traction electric motors taking into account the laws of change of the magnetic field in the air gap.

**Implementation of the research results.** Based on the results of scientific

research on assessing the technical condition of locomotive AC electric motors using artificial neural networks:

A method of intelligent diagnostics, allowing to assess the technical condition of asynchronous traction electric motors, was introduced at the locomotive depot "Uzbekistan" (certificate of the Ministry of Transport of the Republic of Uzbekistan No. 4/E1484 dated October 16, 2025). As a result, it was possible to predict malfunctions of asynchronous traction electric motors.

A diagnostic device that allows determining the magnetic induction of the air gap between the stator and rotor of asynchronous traction electric motors in real time has been implemented in the locomotive depots of JSC "Uzbekistan Railways" (certificate of the Ministry of Transport of the Republic of Uzbekistan No. 4/E1484 dated October 16, 2025). As a result, the expected annual economic efficiency amounted to 856,321,000 (eight hundred fifty-six million three hundred twenty-one thousand) soums.

#### **Structure and scope of the thesis.**

The dissertation consists of an introduction, 4 chapters, a conclusion, lists of published works and used literature, as well as an appendix. The volume of the thesis is 115 pages.

**E'LON QILINGAN ISHLAR RO'YXATI**  
**СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ**  
**LIST OF PUBLISHED WORKS**

**I bo'lim (I часть; I part)**

1. Vohidov M.X. Diagnosis of malfunction of electric motors of locomotives using artificial neural networks (ANN) and topological types of ANN / M.X. Vohidov, O.R. Xamidov // The scientific journal of vehicles and roads. – 2023. Iss. 4. (05.00.00; O'zbekiston Respublikasi Vazirlar Mahkamasi huzuridagi Oliy attestatsiya komissiyasining 2020 yil 30 noyabrdagi 288/14-son qarori).

2. Vohidov M.X. O'zbekiston temir yo'llarida foydalanishda bo'lgan zamonaviy elektrovotlar tortuv asinxron dvigatellarining havo oralig'idagi maydon garmonikasiga ta'sir qiluvchi omillar / O.R. Xamidov, M.X. Vohidov, Sh.F. Jamilov, O.E. Ergashev // "Mashinasozlik" ilmiy-texnika jurnali. – 2025. №1. – B. 318-325. (05.00.00; OAK Rayosatining 2021-yil 30-dekabrda 310/14.2-sonli qarori).

3. Vohidov M.X. O'zgaruvchan tok tortuv elektr dvigatellarida eksentrisitet, rotor sterjening uzilishi va podshipniklar moylanganlik darajasi pastligi (ERM) bo'lganda havo oralig'ining magnit maydoni / O.R. Xamidov, M.X. Vohidov, Sh.F. Jamilov, Sh.I. Kudratov // "Irrigatsiya va Melioratsiya" ilmiy-texnik jurnali. – 2025. №1(39). B. 73-78. (05.00.00; OAK Rayosatining 2015 yil 22 dekabrda №219/5 sonli qarori).

4. Vohidov M. Development of a program for determining eccentricity by analyzing the magnetic field in the air gap of an asynchronous motor / M. Vohidov // Scientific and Technical Journal of NamIET. – 2024. – Vol. 9. No 4. – P. 262-269. (05.00.00; №33).

5. Vokhidov M. The magnetic field in the air gap in the presence of rotor eccentricity in alternating current traction motors / M. Vokhidov, O. Khamidov, U. Safarov, Sh. Jamilov, O. Ergashev // Acta of Turin Polytechnic University in Tashkent. – 2025. – Vol. 15. – No. 1. – С. 51-55. (05.00.00; №25)

6. Вохидов М.Х. Анализ проблем в условиях эксплуатации асинхронных машин / О.Р. Хамидов, О.Т. Касимов, О.Э. Эргашев, М.Э. Абдувахобов, М.Х. Вохидов // Railway transport: topical issues and innovations. – 2024. – №2. – С.71-76. (05.00.00; OAK Rayosatining 2020 yil 30 noyabrdagi №288/14 sonli qarori).

7. Вохидов М.Х. Оценка технического состояние подшипниковых узлов тяговых электродвигателей современного тягового подвижного состава / О.Р. Хамидов, О.Т. Касимов, О.Э. Эргашев, М.Э. Абдувахобов, М.Х. Вохидов // Railway transport: topical issues and innovations. – 2024. №2. – P. 54-60. (05.00.00; OAK Rayosatining 2020 yil 30 noyabrdagi №288/14 sonli qarori).

8. Вахидов М.Х. Магнитодинамический метод диагностирования тяговых асинхронных электродвигателей / О.Р. Хамидов М.Х. Вахидов // Материалы третьей международной научно-технической конференции «Железнодорожный подвижной состав: проблемы, решения, перспективы» - Т.: ТГТУ, 2024.

– С. 451 – 456. (05.00.00; ОАК Раёсатининг 2023 йил 1 апрелдаги 336/3 – сон қарори).

9. Vokhidov M.X. Mathematical modelling of heat exchange process of locomotive traction electric motors / Sh.F. Jamilov, A.M. Yusufov, O.R. Khamidov, O.T. Kasimov, M.X. Vokhidov // AIP Conference Proceedings. – AIP Publishing LLC, 2025. – Vol. 3256. – No. 1. – P. 060011. (CiteScore: 0.6, Scopus).

10. Vohidov M.X. O‘zgarmas tok uzatmali teplovozlarning tortuv elektr dvigatellarini magnit maydonini susaytirish tizimini takomillashtirish. / Vohidov M.X., Safarov U.I., Nabiyeu Sh.M. / “O‘zbekistonda ilm-fan va ta‘lim masalalari: muammo va yechimlar” mavzusidagi 3-son konferensiya materiallari. – Toshkent 2020. – С123 – 125

## **II bo‘lim (II часть; II part)**

11. Вахидов М.Х. Применение магнитодинамический метод диагностики в асинхронных двигателях с короткозамкнутым ротором для раннего обнаружения подшипниковых дефектов / Хамидов О.Р., Вахидов М.Х. // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2024 – С 63-66. 4(121).

12. Vohidov M.X. “Magnit maydoni induksiyasi qiymatlari orqali, magnit oqimi garmonikalarini tahlil qilish va natijalarni qiyoslash dasturi” / Vohidov M.X., Jamilov Sh.F., Abdurasulov Sh.H., Yusufov A.M., Xamidov O.R., Samatov Sh.A., Turdimurodov B.Ch., Raxmiddinov I.O. // O‘zbekiston Respublikasi Adliya vazirligi huzuridagi Intelektual mulk agentligi. EHM uchun yaratilgan dasturning rasmiy ro‘yxatdan o‘tkazilganligi to‘g‘risida guvohnoma. DGU 33278; 2024.

13. Vohidov M.X. “Elektr dvigatellarda hosil bo‘luvchi magnit oqimning 3D modelini qurish dasturi” / Xamidov O.R., Vohidov M.X., Kasimov O.T., Qosimov X.R., Erkinov B.X., Ergashev O.E., Safarov O‘.I., Abdullayev U.I. // O‘zbekiston Respublikasi Adliya vazirligi huzuridagi Intelektual mulk agentligi. EHM uchun yaratilgan dasturning rasmiy ro‘yxatdan o‘tkazilganligi to‘g‘risida guvohnoma. DGU 34649; 06.03.2024.

14. Vohidov M.X. “Elektr dvigatellarning soz va nosoz sharoitlarda tok kuchini taqqoslash dasturi” / Xamidov O.R., Abduvaxobov M.E., Kasimov O.T., Samatov Sh.A., Keldibekov Z.O., Erkinov B.H. // O‘zbekiston Respublikasi Adliya vazirligi huzuridagi Intelektual mulk agentligi. EHM uchun yaratilgan dasturning rasmiy ro‘yxatdan o‘tkazilganligi to‘g‘risida guvohnoma. DGU 40977; 07.02.2024 yil

15. Vohidov M.X. “Lokomotivlarning o‘zgaruvchan tok tortuv elektr dvigatellarini sun‘iy neyron tarmoqlarni qo‘llash orqali texnik holatini baholovchi dastur” / Vohidov M.X., Xamidov O.R., Ablyalimov O.S., Akbarova Sh.Sh. // // O‘zbekiston Respublikasi Adliya vazirligi huzuridagi Intelektual mulk agentligi. EHM uchun yaratilgan dasturning rasmiy ro‘yxatdan o‘tkazilganligi to‘g‘risida guvohnoma. DGU 54798; 24.09.2024 yil

16. Vohidov M.X. “G‘ildiraklarni kolodkali tormozlash paytida lokomotiv g‘ildirak juftining yuklanishini kvazistatik hisoblash uchun dasturiy ta‘minot ” / Kasimov O.T., Erkinov B.X., Keldibekov Z.O., Ergashev O.E., Kulmanov B.T., Zayniddinov N.S. // O‘zbekiston Respublikasi Adliya vazirligi huzuridagi

Intelektual mulk agentligi. EHM uchun yaratilgan dasturning rasmiy ro'yxatdan o'tkazilganligi to'g'risida guvohnoma. DGU 34892; 2024.

17. Vohidov M.X. "Asinxron elektr yuritma funksional bloklarini adaptiv boshqarish usuli" / Sagatova M.A., Yakubov M., Amirov S.F., // O'zbekiston Respublikasi Adliya vazirligi huzuridagi Intelektual mulk agentligi. EHM uchun yaratilgan dasturning rasmiy ro'yxatdan o'tkazilganligi to'g'risida guvohnoma. DGU 51249; 2025.

Avtoreferat “TDTrU axborotnomasi” ilmiy-amaliy jurnali tahririyatida tahrirdan o‘tkazildi va matnlarni mosligi tekshirildi ( 2025-yil).

---

Qog‘oz bichmi 60x84/16. Rizograf bosma usuli Times New Roman garniturasida.  
Shartli bosma tabog‘i: 2,8 b.t. Adadi: 40 nusxa. Buyurtma № 43-3/2024  
Nashrga ruxsat etildi: 19.02.2025-y.

Toshkent davlat transport universiteti bosmaxonasida chop etildi.  
Manzil: 100167, Toshkent shahar, Temiryo‘lchilar ko‘chasi, 1-uy.