

**O‘ZBEKISTON RESPUBLIKASI TEMIR YO‘L HARAKAT TARKIBI
TORTUV ELEKTR DVIGATELLARINI DIAGNOSTIKA QILISHDA
SUN‘IY NEYRON TARMOQLARIDAN FOYDALANISH**

Ilmiy rahbar:

Otabek Xamidov Rustamovich

Texnika fanlari doktori (DSc), Professor

Toshkent davlat transport universiteti

Tel: +998712990480

E-mail: otabek.rustamovich@yandex.ru

G‘anijonov Ilyosbek Hayotjon o‘g‘li

Toshkent davlat transport universiteti, MTVL-4R guruhi magistranti

Tel: +998 90 919 33 99

E-mail: ganijonovilyosbek512@gmail.com ORCID:0009-0003-2195-070X

Mansurova Marjona Otabek qizi

F-Toshkent davlat transport universiteti MAB-11 guruhi magistranti

Tel: +998939875511

E-mail: mansurovamarjona@icloud.com

Annotatsiya. Mazkur maqolada O‘zbekiston temir yo‘l transportida foydalanilayotgan asinxron tortuv elektr dvigatellarining texnik holatini baholash va nosozliklarni erta aniqlashda sun‘iy neyron tarmoqlaridan foydalanish masalalari ko‘rib chiqiladi. Zamonaviy diagnostika usullari, jumladan vibrodiagnostika, tok spektrini tahlil qilish, harorat monitoringi hamda sun‘iy intellekt algoritmlarining qo‘llanilishi tahlil qilinadi. Sun‘iy neyron tarmoqlaridan foydalanish natijasida diagnostika aniqligini oshirish, ekspluatatsion xarajatlarni kamaytirish va lokomotivlarning ishonchligini ta‘minlash imkoniyatlari yoritilgan.

Kalit so‘zlar: asinxron tortuv elektr dvigateli, sun'iy neyron tarmog'i, vibrodiagnostika, diagnostika, lokomotiv, sun'iy intellekt, prediktiv texnik xizmat.

Kirish

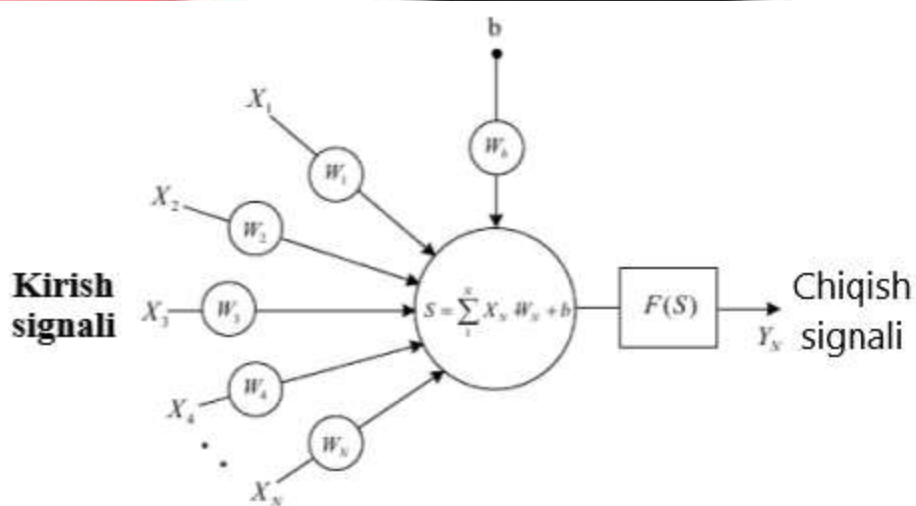
Hozirgi kunda asinxron elektr dvigatellarini boshqarishga mo'ljallangan intellektual boshqaruv tizimlari tobora keng rivojlanib bormoqda. Ushbu tizimlarda moslashuvchanlik (adaptatsiya), o'z-o'zini o'qitish (self-learning) va o'z-o'zini sozlash (self-tuning) kabi murakkab vazifalar samarali hal etiladi [3,5]. Shu sababli bunday boshqaruv tizimlari uchun asinxron elektr dvigatellarining parametrlarini aniqlash (identifikatsiya qilish) eng muhim vazifalardan biri hisoblanadi.

Lokomotivlarning asinxron tortuv elektr dvigatellarini (ATED) diagnostika qilishning asosiy maqsadi ularning joriy texnik holatini aniqlash hamda ishlash resursi (ekspluatatsiya davomiyligi)ga bog'liq holda texnik holatining o'zgarishini prognoz qilishdan iborat. Mazkur vazifalarni hal etishda tuzilishi va qo'llanilish usullariga ko'ra turlicha bo'lgan matematik modellar, jumladan, sun'iy neyron tarmoqlari asosidagi modellar keng qo'llanilishi mumkin [1,2].

Sun'iy neyron tarmoqlari biologik neyron tizimlarining tuzilishi va ishlash tamoyillari asosida yaratiladi. Ular namunalarni tanib olish, obyektlarni identifikatsiya qilish, texnik tizimlarning holatini prognozlash hamda murakkab obyektlarni boshqarishni optimallashtirish kabi keng ko'lamli masalalarni yechish imkoniyatiga ega. Zamonaviy kompyuterlarning hisoblash unumdorligini oshirish ham tobora ko'proq sun'iy neyron tarmoqlari, xususan, neyrokompyuter texnologiyalarining rivojlanishi bilan bog'liq holda qaralmoqda [2,3].

Sun'iy neyronning matematik modelini ko'rib chiqamiz. X_n kirish signallari neyronning kirish qismiga W_n vazn (og'irlik) koeffitsiyentlari orqali uzatiladi. Neyrofiziologiyada qabul qilingan terminologiyaga muvofiq, musbat vazn koeffitsiyentlari qo'zg'atuvchi sinapslarga, manfiy vazn koeffitsiyentlari esa tormozlovchi sinapslarga mos keladi. [1,2].

Kirish signallari tegishli W_n vazn koeffitsiyentlari bo'yicha masshtablangandan so'ng, ular S yig'uvchi elementda jamlanadi. Hosil bo'lgan yig'indi esa $F(S)$ aktivatsiya funksiyasi yordamida qayta ishlanadi. Umumiy holda, ayrim aktivatsiya funksalari uchun neyron modeliga b siljitish (bias) parametrini kiritish maqsadga muvofiq hisoblanadi [1,3].



1-rasmda to‘g‘ridan-to‘g‘ri tarqaluvchi (Feedforward) sun‘iy neyron tarmog‘ining matematik modelining grafik tasviri keltirilgan.

$$S = \sum_{i=1}^N X_i W_i + b$$

bu yerda:

- X_1, X_2, \dots, X_n — kirish signallari;
- W_1, W_2, \dots, W_N — sinaptik vazn (og‘irlik) koeffitsiyentlari;
- b — siljitish (bias) parametri;
- S — vaznlangan yig‘indi;
- $F(S)$ — aktivatsiya funksiyasi;
- Y_N — chiqish signali.

Sun‘iy neyron tarmoqlari tarmoqdagi qatlamlar soniga qarab ikkita asosiy sinfga bo‘linadi:

- **bir qatlamli sun‘iy neyron tarmoqlari (SNT);**
- **ko‘p qatlamli sun‘iy neyron tarmoqlari (SNT).**

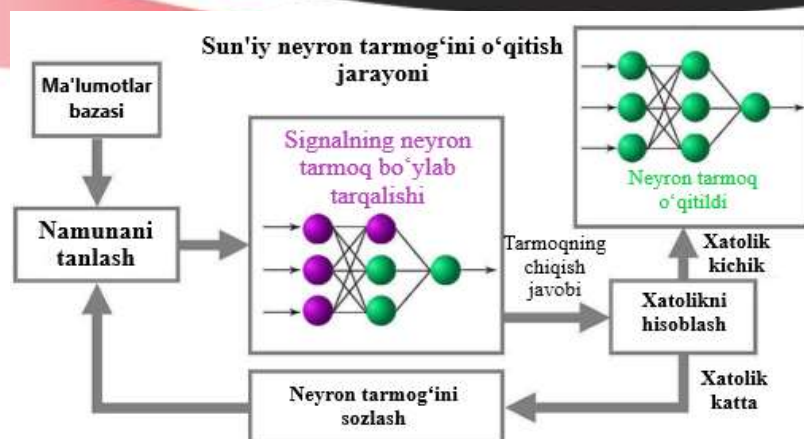
Ko‘p qatlamli sun‘iy neyron tarmoqlari murakkab noxiziqli bog‘liqliklarni aniqlash, obyektlarni tasniflash, prognozlash hamda texnik diagnostika masalalarini

hal etishda yuqori samaradorlikka ega. Shu sababli ular asinxron tortuv elektr dvigatellarining texnik holatini baholash, nosozliklarni erta aniqlash va qoldiq resursini prognoz qilish kabi vazifalarda keng qo'llaniladi. Bir qatlamli neyron tarmoqlari esa asosan sodda chiziqli bog'liqliklarni modellashtirish va oddiy tasniflash masalalarini yechishda qo'llaniladi.

Sun'iy neyron tarmog'ini o'qitish

Neyron tarmog'i — bu o'zaro bog'langan sun'iy neyronlar majmuasi bo'lib, har bir neyron biologik neyronning matematik modelini ifodalaydi. Har bir biologik neyron dendritlar, sinapslar va akson deb ataluvchi asosiy qismlardan tashkil topgan. Dendritlar nerv hujayrasi tanasidan boshqa neyronlarga tomon yo'nalib, sinapslar deb ataluvchi tutashuv nuqtalari orqali ulardan signallarni qabul qiladi. Sinapslar orqali qabul qilingan kirish signallari neyron tanasiga uzatiladi va shu yerda ular yig'iladi. Bunda ayrim signallar neyronni qo'zg'atishga xizmat qilsa, boshqalari uning faollashuvini susaytiradi yoki to'sqinlik qiladi. Neyron tanasidagi umumiy qo'zg'alish ma'lum bir chegaraviy (ostona) qiymatdan oshganda, neyron faollashadi va akson orqali boshqa neyronlarga signal uzatadi. Biologik neyronlarning ishlash mexanizmi bundan ancha murakkab bo'lsa-da, sun'iy neyron tarmoqlarining aksariyati aynan ushbu asosiy tamoyillarni matematik jihatdan modellashtiradi. [1,3].

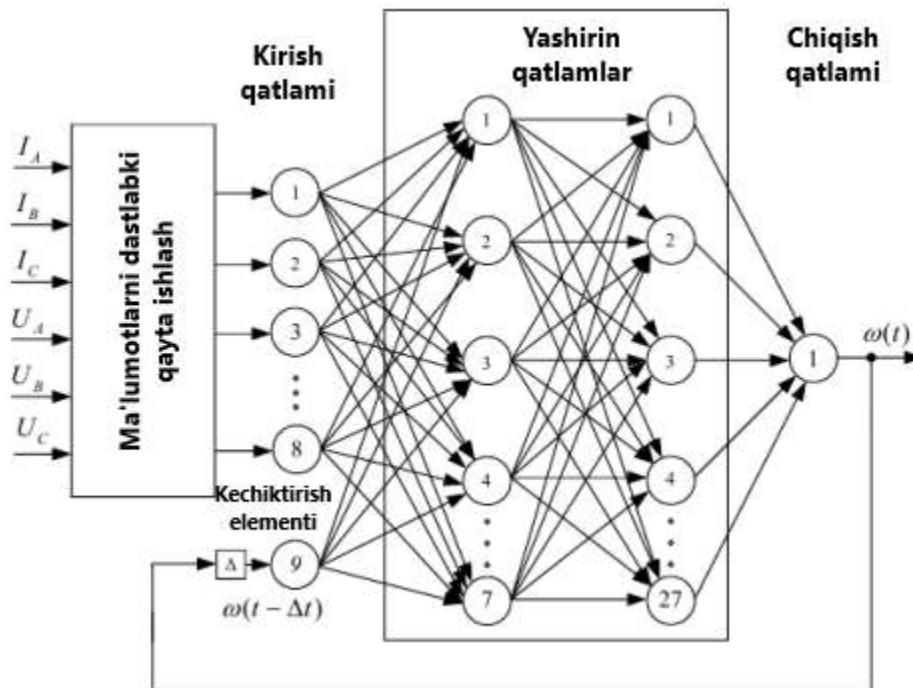
To'g'ridan-to'g'ri tarqaluvchi (Feedforward) sun'iy neyron tarmog'idan muayyan amaliy masalani yechishda foydalanishdan oldin uni o'qitish (trening qilish) zarur. O'qitish jarayonida neyron tarmog'ining kirish qismiga ma'lum parametrlar uzatiladi va chiqish qismida hosil bo'lgan natijalar etalon (kutilayotgan) qiymatlar bilan taqqoslanadi. Agar tarmoq chiqishidagi natijalar talab etilgan qiymatlardan farq qilsa, matematik optimallashtirish algoritmlari yordamida neyronlar orasidagi vazn (og'irlik) koeffitsiyentlari qayta hisoblanadi. Ushbu jarayon tarmoq chiqishi belgilangan aniqlik darajasigacha etalon qiymatlarga mos kelguniga qadar takrorlanadi. Shundan so'ng neyron tarmog'i o'qitilgan deb hisoblanadi. Neyron tarmog'ini o'qitishning umumiy sxemasi 2-rasmda keltirilgan.



2-rasm. Sun'iy neyron tarmog'ini o'qitish jarayonining umumiy sxemasi

Sun'iy neyron tarmoqlari asinxron elektr dvigatellaridagi nosozliklarning sabablari va turlarini yuqori aniqlik bilan aniqlash imkonini beradi. Ular shovqinlar bilan buzilgan (shovqinli) diagnostik ma'lumotlarni samarali qayta ishlash xususiyatiga ega bo'lib, qo'shimcha elektron filtrlar yoki murakkab matematik filtrlash usullaridan foydalanishga bo'lgan ehtiyojni kamaytiradi. Bundan tashqari, sun'iy neyron tarmoqlari ma'lum turdagi elektr dvigateling o'ziga xos xususiyatlariga moslasha oladi va turli ekspluatatsiya sharoitlariga adaptatsiyalanadi. Shu bilan birga, ular texnik tizimlarning holatini oldindan baholash va qoldiq resursini prognoz qilish masalalarida ham keng qo'llaniladi [1,3].

Signalni qayta ishlash algoritmlarini tanlash va asinxron elektr dvigatellarini diagnostika qilish usulini aniqlash bilan bir qatorda, dasturiy-apparat diagnostika majmuasining apparat qismini ham ishlab chiqish zarur. Bunda ushbu majmuani amaliyotga joriy etish uchun arzon va ishonchli komponentlar bazasini tanlash alohida ahamiyat kasb etadi. Tanlangan apparat vositalari diagnostika majmuasining umumiy tannarxini elektr dvigateling o'z qiymatining 10 %idan oshmaydigan darajada saqlash imkonini berishi lozim [4]. Sun'iy neyron tarmog'ini o'qitish jarayonida chiqish qismida elektr dvigateling muayyan nosozlik turiga mos keluvchi maqsadli (etalon) qiymatlar qo'llaniladi. Bunda tajriba elektr dvigateling to'liq iste'mol qilinadigan quvvat signallarining etalon eksperimental qiymatlari ishlatiladi. Ushbu qiymatlar ayni bir xil o'lchash qurilmasi yordamida olinadi. Mazkur o'lchash qurilmasining tuzilish sxemasi 3-rasmda keltirilgan.



3-rasm. Signalni identifikatsiya qilish uchun qo'llaniladigan sun'iy neyron tarmog'ining tuzilishi.

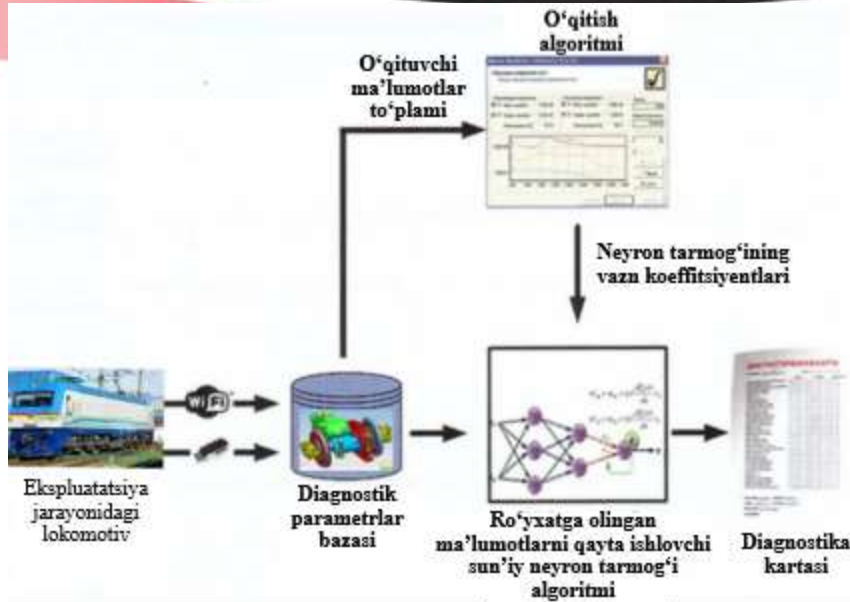
Mazkur dasturiy-apparat diagnostika majmuasi asinxron elektr dvigatellar bilan jihozlangan sanoat qurilmalaridan foydalanishning iqtisodiy samaradorligini sezilarli darajada oshirish imkonini beradi. Shuningdek, diagnostika natijalariga asoslangan prognoz ma'lumotlari asosida elektr dvigatellariga o'z vaqtida texnik xizmat ko'rsatish va ta'mirlash ishlarini amalga oshirish orqali ularning xizmat muddatini uzaytirishga xizmat qiladi [2,3]. Sun'iy neyron tarmoqlari diagnostika jarayonida uchraydigan, masalan, kirish ma'lumotlarining to'liq bo'lmasligi yoki shovqinlar bilan buzilishi kabi muammolarni samarali hal qilish imkoniyatiga ega. Bundan tashqari, ular ma'lumotlarni juda qisqa vaqt ichida qayta ishlab, deyarli real vaqt rejimida natija beradi. Shu bilan birga, sun'iy neyron tarmoqlaridan foydalanish diagnostika uchun o'lchanishi zarur bo'lgan parametrlar sonini sezilarli darajada kamaytiradi. Natijada tizimda o'rnatilishi lozim bo'lgan datchiklar soni ham qisqaradi, bu esa diagnostika majmuasining tuzilishini soddalashtirish, uning

tannarxini kamaytirish va ekspluatatsiya ishonchliligini oshirishga imkon beradi [1–3].

Hozirgi vaqtda sun'iy neyron tarmoqlarini o'qitishda faqat klassik Backpropagation algoritmidan emas, balki Convolutional Neural Network (CNN), Long Short-Term Memory (LSTM), Recurrent Neural Network (RNN) va Transformer arxitekturalaridan ham foydalanilmoqda. Ayniqsa, vaqt bo'yicha o'zgaruvchi vibratsiya va tok signallarini tahlil qilishda LSTM va CNN modellarining aniqligi yuqori ekanligi ilmiy tadqiqotlarda isbotlangan.

Asinxron elektr dvigatelini diagnostika qilish uchun dasturiy-apparat majmuasi

Asinxron elektr dvigatellarini diagnostika qilishning eng samarali usullaridan biri 4-rasmda keltirilgan dasturiy-apparat diagnostika majmuasidan foydalanish hisoblanadi. Ushbu majmua kompyuter hamda zarur elektr parametrlarini o'lchash va olingan ma'lumotlarni kompyuterga uzatishga xizmat qiluvchi raqamli vositachi qurilmadan iborat. O'lchanadigan elektr kattaliklari sifatida faza toki, iste'mol qilinayotgan quvvat, kuchlanish va boshqa ekspluatatsion parametrlar qo'llanilishi mumkin. Kompyuterda ishlovchi dastur ushbu kirish ma'lumotlarini maxsus algoritmlar asosida qayta ishlaydi hamda ishlayotgan asinxron elektr dvigateling eng ehtimoliy nosozlik turini aniqlaydi yoki uning texnik holati me'yorida ekanligi to'g'risida xulosa beradi. Mazkur usul diagnostika samaradorligi nuqtai nazaridan eng maqbul hisoblanadi, chunki u kompyuter xotirasida elektr dvigatellarining ekspluatatsiya jarayonida yuzaga keladigan nosozliklar dinamikasi haqidagi katta hajmdagi ma'lumotlar bazasini saqlash imkonini beradi. Ushbu ma'lumotlar asosida elektr dvigateling texnik holatini uzluksiz monitoring qilish, uning qoldiq resursini baholash hamda kelgusida ishdan chiqish ehtimolini oldindan prognoz qilish mumkin. Natijada texnik xizmat ko'rsatish va ta'mirlash ishlari o'z vaqtida rejalashtiriladi, bu esa elektr dvigatellarining ishonchliligini oshirish va ekspluatatsion xarajatlarni kamaytirishga xizmat qiladi [2,5].

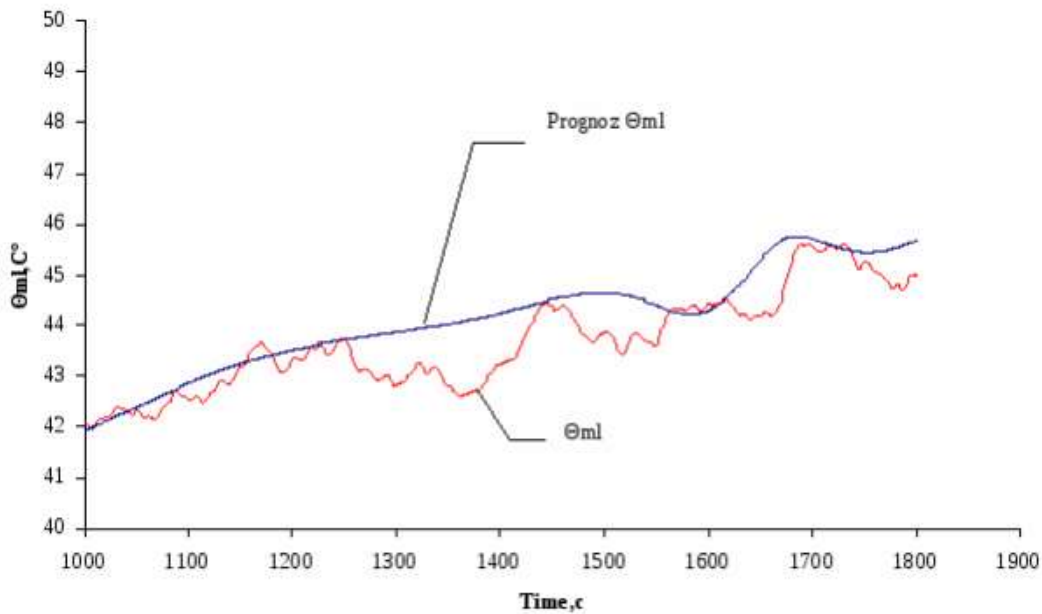


4-rasm. Lokomotivlarning asinxron tortuv elektr dvigatelini diyagnostika qilish uchun dasturiy-apparat majmuasi.

Zamonaviy diyagnostika tizimlari Edge Computing, bulutli hisoblash (Cloud Computing), IoT sensorlari va Digital Twin texnologiyalari bilan integratsiyalashgan holda ishlaydi. Bunday tizimlarda elektr dvigatelidan olinayotgan ma'lumotlar real vaqt rejimida qayta ishlanadi, natijalar esa raqamli model bilan taqqoslanib, nosozliklarning rivojlanish ehtimoli oldindan baholanadi. Ushbu yondashuv texnik xizmat ko'rsatishning samaradorligini oshirib, rejalashtirilmagan to'xtashlar sonini kamaytiradi.

Bundan tashqari, kompyuter ma'lumotlarni qayta ishlash imkoniyatlari bo'yicha mikrokontrollerga nisbatan ancha yuqori hisoblash quvvatiga ega. Bu esa zamonaviy axborot texnologiyalarini, jumladan, sun'iy intellekt texnologiyalarini — sun'iy neyron tarmoqlari, noaniq mantiq (Fuzzy Logic) va ekspert tizimlarini diyagnostika jarayonida qo'llash imkonini beradi. Ma'lumki, ishlayotgan asinxron elektr dvigatelining aylanuvchi rotori hosil qiladigan magnit maydon stator chulg'amining magnit maydoni bilan o'zaro ta'sirlashadi. Ushbu o'zaro ta'sir natijasida elektr dvigatelining iste'mol qilayotgan toki, quvvati hamda stator chulg'amidagi kuchlanish kabi elektr kattaliklarida davriy tebranishlar yuzaga keladi. Mazkur tebranishlarning davri rotorning aylanish chastotasiga to'g'ri proporsional bo'ladi. Shu sababli elektr kattaliklaridan birining signal shaklini ma'lum vaqt oralig'ida tahlil

qilish orqali elektr dvigatelining elektromexanik qismida yuzaga kelgan nosozliklarni aniqlash va ularning turini aniqlash mumkin. Ushbu masalani hal etish uchun turli xil yondashuvlardan foydalanish mumkin [2,3]. Masalan, 5-rasmda ko'rsatilganidek, signalning bir nechta tayanch nuqtalari asosida ma'lum bir nosozlik turiga mos approksimatsiya funksiyasi qurilishi mumkin. Diagnostika jarayonida esa joriy o'lchangan qiymatlar ushbu funksiyaning qiymatlari bilan ma'lum ruxsat etilgan xatolik chegarasida taqqoslanadi. Biroq murakkab noxiziqli signallarni approksimatsiya qilish katta xatoliklarga olib keladi. Bundan tashqari, elektr ta'minoti tarmog'idagi shovqinlar va elektromagnit xalaqitlar ushbu xatoliklarni yanada oshiradi. Hozirgi vaqtda murakkab noxiziqli jarayonlarning matematik modellarini yaratish, signallarni tahlil qilish, tasvir va obrazlarni tanib olish hamda texnik holatni prognozlash masalalarida sun'iy neyron tarmoqlaridan keng foydalanilmoqda. Sun'iy neyron tarmoqlari klassik approksimatsiya usullariga nisbatan yuqori aniqlikni ta'minlaydi, shovqinlar ta'siriga nisbatan barqaror bo'ladi hamda o'z-o'zini o'qitish xususiyati tufayli yangi ekspluatatsiya sharoitlariga tez moslasha oladi. Shu bois ular asinxron tortuv elektr dvigatellarining diagnostika tizimlarida eng istiqbolli intellektual usullardan biri hisoblanadi [3,4].

5-
rasm.

Artificial Neural Networks dasturi yordamida olingan tasodifiy yuklama momenti $M_c(t)$ uchun hisoblangan va prognoz qilingan qiymatlarni taqqoslash

Sun'iy neyron tarmoqlaridan foydalangan holda diagnostika qilish masalasi, avvalo, neyron tarmog'i turini tanlash, uning arxitektura parametrlarini aniqlash hamda o'qitish (trening) jarayonini amalga oshirishdan iborat. Neyron tarmog'i arxitekturasini to'g'ri tanlash diagnostika tizimining aniqligi va ishonchliligini ta'minlaydi. Shuningdek, o'qitish uchun sifatli va yetarli hajmdagi eksperimental ma'lumotlardan foydalanish tarmoqning nosozliklarni to'g'ri aniqlash va kelgusidagi texnik holatni yuqori aniqlik bilan prognoz qilish imkoniyatini oshiradi. Sun'iy neyron tarmoqlari asosida qurilgan diagnostika tizimlari nafaqat mavjud nosozliklarni aniqlaydi, balki elektr dvigatelining qoldiq xizmat muddatini (Remaining Useful Life – RUL) ham prognoz qiladi. Buning uchun vibratsiya, harorat, tok, kuchlanish va aylanish tezligi kabi parametrlar kompleks ravishda tahlil qilinadi. Olingan natijalar asosida texnik xizmat ko'rsatish muddatlari optimallashtiriladi va avariya holatlarning oldi olinadi. Zamonaviy tadqiqotlarda bunday tizimlar klassik diagnostika usullariga nisbatan yuqori aniqlik va ishonchlilikni namoyish etmoqda.

Xulosa

Yuqoridagi tahlillar asosida shuni xulosa qilish mumkinki, lokomotivlarning asinxron tortuv elektr dvigatellari uchun diagnostika qurilmalari va dasturiy-apparat majmualarini yaratishda sun'iy neyron tarmoqlaridan foydalanish maqsadga muvofiq hisoblanadi. Sun'iy neyron tarmoqlari murakkab signallarni tanib olish, nosozliklarni aniqlash va texnik holatni prognozlashning samarali vositasi bo'lib, katta hajmdagi diagnostik ma'lumotlarni yuqori aniqlik bilan qayta ishlash imkoniyatini beradi.

Sun'iy neyron tarmoqlarining o'z-o'zini o'qitish va yangi ekspluatatsiya sharoitlariga moslasha olish xususiyati lokomotivlarning asinxron tortuv elektr dvigatellari uchun adaptiv himoya va intellektual diagnostika tizimlarini yaratishga imkon beradi. Bunday tizimlar nosozliklarni dastlabki bosqichlarda aniqlash, ularning rivojlanishini oldindan prognoz qilish hamda texnik xizmat ko'rsatish va ta'mirlash ishlarini ilmiy asosda rejalashtirishga xizmat qiladi.

Bundan tashqari, sun'iy neyron tarmoqlarini vibrodiagnostika, tok signallarini spektral tahlil qilish, harorat monitoringi, IoT sensorlari, raqamli egizak (Digital Twin) va prediktiv texnik xizmat ko'rsatish (Predictive Maintenance) texnologiyalari bilan integratsiyalash orqali diagnostika tizimlarining aniqligi va ishonchliligini yanada oshirish mumkin. Mazkur yondashuv lokomotivlarning ekspluatatsion ishonchliligini oshirish, avariya holatlar sonini kamaytirish, elektr dvigatellarining xizmat muddatini uzaytirish hamda texnik xizmat ko'rsatish xarajatlarini sezilarli darajada qisqartirish imkonini beradi.

Shunday qilib, sun'iy neyron tarmoqlariga asoslangan intellektual diagnostika tizimlarini O'zbekiston Respublikasi temir yo'l transportida keng joriy etish lokomotivlarning asinxron tortuv elektr dvigatellarini monitoring qilish va diagnostika qilish samaradorligini oshirish bilan birga, temir yo'l transportining xavfsizligi, ishonchliligi va iqtisodiy samaradorligini ta'minlashning muhim omillaridan biri hisoblanadi.

Foydalanilgan adabiyotlar ro‘yxati

- Грищенко А.В., Грачёв В.В., Бабков Ю.В., Клименко Ю.И., Ким С.И., Перфильев К.С., Федотов М.В. **Аппарат искусственных нейронных сетей для диагностики современного локомотива** // *Локомотив.* – 2012. – № 7. – С. 36–40.
- Хамидов О.Р., Касымов О.Т. **Разработка методики комплексного диагностирования асинхронного тягового электродвигателя подвижного состава железнодорожного транспорта** // *Материалы конференций ГНИИ «Нацразвитие»: сборник избранных статей.* – 2017. – С. 32–39.
- Хамидов О.Р., Панченко М.Н. **Математическая модель вибровозмущающих сил локомотивного асинхронного электродвигателя** // *Известия Петербургского университета путей сообщения.* – 2013. – № 4 (37). – С. 60–67.
- Хамидов О.Р., Касымов О.Т. **Оценка технического состояния асинхронных тяговых электродвигателей электровозов серии «UZ-EL» средствами вибродиагностики** // *Материалы конференций ГНИИ «Нацразвитие».* – Сентябрь 2017. – С. 13–19.
- Хамидов О.Р., Грищенко А.В. **Вибродиагностика повреждения подшипников качения локомотивных асинхронных электродвигателей** // *VIII Международная научно-техническая конференция «Подвижной состав XXI века: идеи, требования, проекты».* – Санкт-Петербург: Петербургский государственный университет путей сообщения, 2013. – С. 174–176.
- **Review of Fault Diagnosis Methods for Induction Machines in Railway Traction Applications** // *Energies.* – 2024. – Vol. 17. – No. 11. – Art. 2728.

- **A Comprehensive Review on Artificial Intelligence Driven Predictive Maintenance in Vehicles: Technologies, Challenges and Future Research Directions** // *Discover Applied Sciences*. – 2025. – Vol. 7.
- **Digital Twin Innovations for Induction Motor Monitoring and Predictive Maintenance: A Review (2020–2025)** // *Next Research*. – Elsevier, 2025.
- **Artificial Intelligence Techniques for Predictive Maintenance of Electric Machines: A Review** // *Sensors*. – 2025. – Vol. 25.
- **Condition Monitoring and Fault Diagnosis of Electric Machines Using Deep Learning: A Review** // *IEEE Access*. – 2024. – Vol. 12. – P. 145321–145348.