“ KUCH TRANSFORMATORLARINING SALT ISHLASH REJIMIDA ENERGIYA ISROFLARINI INTELLEKTUAL PROGNOZLASH USULLARI ”

Axmadov Jonibek Otabek o‘g‘li. *Navoiy innovatsiyalar universiteti o‘qituvchisi.*
Ergashev Yoqubjon Hamro o‘g‘li. *Navoiy innovatsiyalar universiteti o‘qituvchisi.*
Halimov Zohidjon Shavkat o‘g‘li. *Navoiy innovatsiyalar universiteti o‘qituvchisi.*

Annotatsiya. Bugungi elektr ta’minoti tizimlarida kuch transformatorlarining salt ishlash rejimi doimiy energiya isrofi manbalaridan biri bo‘lib qolmoqda. Bu isroflar bir qarashda uncha katta bo‘lmagandek tuyuladi, ammo uzoq muddatli ekspluatatsiya jarayonida sezilarli miqdordagi elektr energiyasi yo‘qotilishiga olib keladi. Maqolada salt ishlash rejimidagi isroflarni faqat an’anaviy hisoblash formulalari orqali emas, balki intellektual usullar yordamida oldindan prognozlash masalasi ko‘rib chiqiladi. Shu maqsadda neyron tarmoqlar, mashinaviy o‘qitish algoritmlari, noaniq mantiq va gibrid modellardan foydalanish imkoniyatlari tahlil qilinadi. Transformatorning texnik parametrlari, kuchlanish, tok, chastota, harorat va yuklama rejimi kabi ko‘rsatkichlar asosida prognozlash modeli shakllantiriladi. Olingan natijalar RMSE, MAE, MAPE va R^2 mezonlari bo‘yicha baholanib, an’anaviy usullar bilan qiyoslanadi. Tadqiqot natijalari intellektual prognozlash orqali salt ishlash isroflarini vaqtida aniqlash, monitoring tizimini moslashtirish va energiya samaradorligini oshirish mumkinligini ko‘rsatadi. Maqola energetika, elektr tarmoqlari diagnostikasi va smart grid yo‘nalishidagi mutaxassislar uchun foydalidir.

Kalit so‘zlar.*kuch transformatori; salt ishlash rejimi; energiya isroflari; intellektual prognozlash; neyron tarmoq; mashinaviy o‘qitish; noaniq mantiq; avtomatlashtirilgan monitoring; energiya samaradorligi; smart grid.*

Elektr ta’minoti tizimining ishonchli ishlashi ko‘p jihatdan kuch transformatorlarining texnik holatiga bog‘liq. Ular elektr stansiyalari, podstansiyalar va iste’molchilarni o‘zaro bog‘lovchi asosiy qurilma sifatida uzluksiz rejimda ishlaydi. Transformatorning xizmat muddati davomida nafaqat yuklama ostidagi, balki salt ishlash rejimidagi isroflari ham doimiy ravishda kuzatib borilishi kerak. Salt ishlash rejimida foydali quvvat ishlab chiqarilmasa-da, magnit o‘tkazgichning qayta magnitlanishi, uyurma toklar hamda konstruktiv elementlardagi qo‘shimcha yo‘qotishlar saqlanib qoladi. Bunday isroflar bir lahzalik kesimda katta bo‘lmagandek tuyuladi, ammo transformatorning uzoq yillar davomida uzluksiz ishlashini hisobga olganda, ularning yig‘indisi sezilarli energiya yo‘qotilishiga va iqtisodiy xarajatlarga olib keladi.

Bugungi kunda energiya resurslaridan oqilona foydalanish, elektr tarmoqlarida yo‘qotishlarni kamaytirish va “yashil” energetikaga o‘tish masalalari dolzarb ahamiyat kasb etmoqda. Bu borada kuch transformatorlarining salt ishlash rejimidagi isroflarini aniq baholash va oldindan prognozlash alohida o‘rin tutadi. An’anaviy hisoblash usullari asosan pasport ma’lumotlari va nominal kattaliklarga tayanadi. Biroq real ekspluatatsiya sharoitida kuchlanishning og‘ishi, chastotaning o‘zgarishi, atrof-muhit harorati, transformatorning qizishi, izolyatsiya holati, yuklama grafigi va qurilmaning qarishi kabi ko‘plab omillar isroflar miqdoriga ta’sir qiladi. Shu sababli faqat me’yoriy formulalar orqali aniq natijaga erishish har doim ham mumkin bo‘lmaydi.

So‘nggi yillarda bunday murakkab va ko‘p omilli jarayonlarni tahlil qilishda intellektual usullarga qiziqish ortib bormoqda. Neyron tarmoqlar, mashinaviy o‘qitish algoritmlari, noaniq mantiq, qo‘llab-quvvatlovchi vektorlar usuli va gibrid modellar transformatorlarning salt ishlash rejimidagi energiya isroflarini prognozlashda yangi imkoniyatlar ochadi. Bu usullar katta hajmdagi eksperimental va ekspluatatsion ma’lumotlar asosida yashirin qonuniyatlarni aniqlash, isrof

dinamikasini kuzatish va ruxsat etilgan xatolik darajasida oldindan baho berish imkonini beradi. Ayniqsa, real vaqt rejimida ishlaydigan monitoring tizimlari bilan integratsiya qilinganda, intellektual prognozlash vositalari energiya samaradorligini oshirishning amaliy mexanizmiga aylanishi mumkin.

Mazkur maqolaning maqsadi kuch transformatorlarining salt ishlash rejimida yuzaga keladigan energiya isroflarini intellektual usullar yordamida prognozlash imkoniyatlarini o‘rganish, mavjud yondashuvlarni qiyosiy tahlil qilish va samarali model shakllantirish yo‘llarini belgilashdan iborat. Shu maqsadga erishish uchun salt ishlash rejimidagi isroflarning fizik mohiyati, ularga ta’sir qiluvchi asosiy omillar, an’anaviy va intellektual prognozlash usullarining afzallik va cheklovlari ko‘rib chiqiladi. Shuningdek, prognozlash natijalarini baholashda RMSE, MAE, MAPE va R^2 kabi mezonlardan foydalanish, modelning aniqligini oshirishda ma’lumotlarni tayyorlash va tanlash bosqichlarining ahamiyati tahlil qilinadi.

Tadqiqot ob’ekti sifatida kuch transformatorlarining salt ishlash rejimi, predmeti sifatida esa bu rejimdagi energiya isroflarini intellektual prognozlash usullari belgilangan. Ishning amaliy ahamiyati shundaki, taklif etilayotgan yondashuvlar transformatorlarni diagnostika qilish, monitoring qilish va energiya tejash bo‘yicha qarorlar qabul qilishda qo‘llanilishi mumkin. Bu esa o‘z navbatida elektr tarmoqlarining umumiy samaradorligini oshirishga, isroflarni kamaytirishga va ekspluatatsiya xarajatlarini optimallashtirishga xizmat qiladi.

Shu o‘rinda ta’kidlash joizki, intellektual prognozlash usullari faqat matematik model qurish bilan cheklanmaydi. Ular transformatorning real ish sharoitini aks ettiruvchi ma’lumotlar sifati, datchiklar aniqligi, o‘lchov davriyligi va modelni doimiy yangilab borish kabi omillar bilan chamberchas bog‘liq. Shuning uchun maqolada nazariy tahlil bilan birga amaliy qo‘llash shartlari, cheklovlari va istiqbolli yo‘nalishlariga ham alohida e’tibor qaratiladi.

Salt ishlash rejimida energiya isroflarining mohiyati. Kuch transformatorining salt ishlash rejimi deganda uning ikkilamchi chulg‘ami ochiq, ya’ni yuklamaga ulanmagan holati tushuniladi. Bu rejimda transformator foydali quvvat uzatmaydi, lekin birlamchi chulg‘amdan o‘tayotgan tok magnit o‘tkazgichda magnit oqimini hosil qilish uchun sarflanadi. Shu sababli salt ishlash rejimidagi isroflar transformatorning doimiy yo‘qotishlariga yaqin bo‘lib, ular asosan magnit o‘tkazgichdagi histerezis va uyurma toklar hisobiga yuzaga keladi.

Histerezis isroflari magnitlanish yo‘nalishining davriy o‘zgarishi natijasida magnit materialning qayta magnitlanishiga sarflanadi. Uyurma toklar esa o‘zgaruvchan magnit oqimi ta’sirida magnit o‘tkazgichda induksiyalanadigan yopiq toklardan kelib chiqadi. Bu ikki asosiy isrofdan tashqari, konstruktiv elementlardagi qo‘shimcha yo‘qotishlar, izolyatsiyadagi dielektrik isroflar va o‘tish joylaridagi qizishlar ham ma’lum darajada ta’sir qiladi.Amaliyotda salt ishlash isroflari ko‘pincha nominal kuchlanish va chastota uchun pasport ma’lumotlari asosida baholanadi. Biroq real ekspluatatsiya sharoitida kuchlanishning og‘ishi, chastotaning o‘zgarishi, atrof-muhit harorati, transformatorning qizish darajasi, magnit o‘tkazgichning qarishi va izolyatsiya holati kabi omillar bu isroflarni sezilarli darajada o‘zgartirishi mumkin. Shu sababli salt ishlash rejimidagi isroflarni faqat me’yoriy formulalar orqali aniq baholash har doim ham ishonchli natija bermaydi.

An’anaviy usullarning cheklovlari. An’anaviy yondashuvlarda salt ishlash isroflari asosan empirik yoki yarim empirik formulalar yordamida hisoblanadi. Bu usullar transformatorning tuzilishi, magnit materialning xususiyatlari va nominal parametrlari haqida yetarli ma’lumot bo‘lganda ma’lum darajada qoniqarli natija beradi. Lekin ularning asosiy kamchiligi shundaki, real vaqtda o‘zgarib turuvchi ko‘plab omillar hisobga olinmaydi.Masalan, transformatorning ish rejimi kun davomida bir xil bo‘lmaydi. Yuklama grafigi, tarmoqdagi kuchlanish darajasi, chastota, harorat va boshqa tashqi ta’sirlar doimiy ravishda o‘zgarib turadi. Bundan tashqari, transformatorning qarishi bilan magnit o‘tkazgich xususiyatlari ham asta-

sekin o‘zgaradi. Natijada an’anaviy hisoblash usullari bilan olingan qiymatlar haqiqiy isroflardan farq qilishi mumkin. Ayniqsa, energiya samaradorligini oshirish va monitoring tizimini real vaqt rejimida yuritish talab qilinganda, bunday usullarning imkoniyatlari cheklangan bo‘ladi.

Intellektual prognozlash usullarining o‘rni. Salt ishlash rejimidagi isroflarni prognozlash masalasi ko‘p omilli, nochiziqli va vaqt bo‘yicha o‘zgaruvchan jarayon hisoblanadi. Shu sababli bu yerda intellektual usullar alohida ahamiyat kasb etadi. Ular katta hajmdagi eksperimental va ekspluatatsion ma’lumotlar asosida yashirin qonuniyatlarni aniqlash, isrof dinamikasini kuzatish va kelgusi qiymatlarni ma’lum xatolik chegarasida oldindan baholash imkonini beradi.

Intellektual prognozlash usullarini shartli ravishda bir necha guruhga ajratish mumkin:

- **Sun’iy neyron tarmoqlar** – ko‘p qatlamli perseptronlar, radial bazisli tarmoqlar, takrorlanuvchi neyron tarmoqlar (LSTM, GRU) va boshqalar. Ular murakkab bog‘lanishlarni o‘rganishda kuchli vosita hisoblanadi.
- **Mashinaviy o‘qitish algoritmlari** – qo‘llab-quvvatlovchi vektorlar regressiyasi (SVR), tasodifiy o‘rmon (Random Forest), gradient boosting, regressiya daraxtlari va boshqalar.
- **Noaniq mantiq (Fuzzy Logic)** – ma’lumotlar noaniq yoki to‘liq bo‘lmagan hollarda ekspert bilimlarini modellashtirishga yordam beradi.
- **Gibrid modellar** – neyro-noaniq tizimlar, to‘lqinli o‘zgartirishlar bilan neyron tarmoqlar kombinatsiyasi, genetik algoritmlar bilan optimallashtirilgan modellar.

Bu usullarning har biri o‘zining afzallik va cheklovlariga ega. Masalan, neyron tarmoqlar yuqori aniqlik ko‘rsatishi mumkin, lekin ularni o‘qitish uchun yetarli hajmdagi sifatli ma’lumot talab qilinadi. Qaror daraxtlari va Random Forest modellari talqin qilish osonroq, ammo ba’zi murakkab vaqtli ketma-ketliklarda neyron tarmoqlarga qaraganda pastroq natija berishi mumkin. Noaniq mantiq esa

ekspert bilimlari mavjud bo‘lganda yaxshi ishlaydi, lekin avtomatik o‘rganish qobiliyati cheklangan.

Ma’lumotlarni yig‘ish va tayyorlash. Intellektual modelning muvaffaqiyati ko‘p jihatdan ma’lumotlar sifatiga bog‘liq. Salt ishlash rejimidagi isroflarni prognozlash uchun quyidagi ko‘rsatkichlar kirish parametrlari sifatida ishlatilishi mumkin:

- birlamchi kuchlanish va tok;
- chastota;
- transformatorning ish harorati;
- atrof-muhit harorati;
- yuklama rejimi (oldingi davrlardagi);
- izolyatsiya qarshiligi;
- transformatorning xizmat muddati;
- magnit o‘tkazgich turi va pasport parametrlari;
- oldingi o‘lchovlardagi isrof qiymatlari.

Ma’lumotlar SCADA tizimlari, smart hisoblagichlar, diagnostika qurilmalari va transformator pasportlaridan olinishi mumkin. Yig‘ilgan ma’lumotlar odatda tozalash, yetishmayotgan qiymatlarni to‘ldirish, chetga chiqqan qiymatlarni aniqlash, normalizatsiya qilish va xususiyatlarni shakllantirish bosqichlaridan o‘tkaziladi. So‘ngra ma’lumotlar o‘qitish, tekshirish va sinov to‘plamlariga bo‘linadi. Bu bosqichda ma’lumotlarning yetarli hajmda va turli ish rejimlarini qamrab olgan bo‘lishi muhim ahamiyatga ega.

Modelni qurish va o‘qitish. Prognozlash modelini qurishda avvalo masalaning turi aniqlanadi. Agar transformatorning joriy holatiga qarab isrof qiymati baholanayotgan bo‘lsa, bu regressiya masalasi hisoblanadi. Agar kelgusi vaqt oralig‘idagi isrof dinamikasi prognozlanayotgan bo‘lsa, vaqtli qatorlar masalasi sifatida qaraladi. Bunday holatda LSTM, GRU yoki boshqa takrorlanuvchi neyron tarmoqlardan foydalanish maqsadga muvofiq bo‘ladi.

Modelni o‘qitishda maqsad funksiyasi sifatida odatda o‘rtacha kvadratik xatolik (MSE) yoki uning variantlaridan foydalaniladi. O‘qitish jarayonida model parametrlari optimallashtirilib, tekshirish to‘plamidagi xatolik kuzatib boriladi. Overfitting holatini oldini olish uchun regulizatsiya, dropout, erta to‘xtatish kabi usullar qo‘llaniladi. Giperparametrlar esa grid search, random search yoki Bayesian optimallashtirish yordamida tanlanadi.

Modelning talqin qilinishi ham muhim. Ba’zi hollarda eng yuqori aniqlikni bergan model emas, balki qaror qabul qilish uchun tushunarli bo‘lgan model afzal ko‘riladi. Shu sababli xususiyatlarning ahamiyatini baholash, SHAP yoki o‘xshash usullar yordamida model qarorlarini tahlil qilish foydali bo‘ladi.

Natijalarni baholash mezonlari. Intellektual modelning samaradorligini baholash uchun bir nechta mezonlardan foydalanish tavsiya etiladi. Ularning eng keng tarqalganlari:

- **MAE** – o‘rtacha absolyut xatolik;
- **MAPE** – o‘rtacha absolyut foiz xatolik;
- **RMSE** – o‘rtacha kvadratik xatolikning ildizi;
- $\mathbf{R^2}$ – determinatsiya koeffitsiyenti.

Bu mezonlar modelning qanchalik aniq prognoz berayotganini baholashga yordam beradi. Shuningdek, olingan natijalarni an’anaviy hisoblash usullari bilan qiyoslash maqsadga muvofiq. Bunda modelning qaysi ish rejimlarida yaxshi, qaysi sharoitlarda esa xatolik kattaroq bo‘lishi alohida tahlil qilinishi kerak.

Avtomatlashtirilgan monitoring bilan integratsiya. Intellektual prognozlashning amaliy ahamiyati u avtomatlashtirilgan monitoring tizimi bilan integratsiya qilinganda yaqqol namoyon bo‘ladi. Bunday tizim real vaqtda transformatorning asosiy parametrlarini o‘lchaydi, prognoz modeliga uzatadi va olingan natijalar asosida qaror qabul qilishga yordam beradi. Masalan, isroflar me’yordan yuqori bo‘lishi prognoz qilinsa, tizim xizmat ko‘rsatishni rejalashtirish, yuklamani qayta taqsimlash yoki transformatorni almashtirish bo‘yicha signal berishi mumkin.

Bunday yondashuv SCADA, IIoT va smart grid platformalarida qo‘llanilishi mumkin. Edge computing yordamida ma’lumotlarni transformatorning o‘zida qayta ishlash tezlikni oshiradi va tarmoqqa yuboriladigan ma’lumot hajmini kamaytiradi. Natijada energiya samaradorligini oshirish, ekspluatatsiya xarajatlarini kamaytirish va uskunalarning ishdan chiqish xavfini oldini olish imkoniyati yaratiladi.

Cheklovlar va istiqbolli yo‘nalishlar. Intellektual prognozlash usullari katta imkoniyatlarga ega bo‘lsa-da, ularning amaliy qo‘llanishida bir qator cheklovlar mavjud. Bularga ma’lumotlarning yetarli emasligi, datchiklar xatoligi, modelning vaqt o‘tishi bilan eskirishi, kiberxavfsizlik masalalari va yuqori hisoblash resurslariga bo‘lgan talab kiradi. Shuning uchun modelni doimiy yangilab borish, ma’lumotlar sifatini nazorat qilish va natijalarni ekspert xulosasi bilan tekshirish zarur.Kelgusida bu yo‘nalishda raqamli egizak (digital twin) texnologiyalari, federated learning, tushuntiriladigan sun’iy intellekt (Explainable AI) va energiya tizimlarining boshqa elementlari bilan integratsiyalashgan modellarni ishlab chiqish istiqbolli hisoblanadi. Bu esa kuch transformatorlarining salt ishlash rejimidagi isroflarini yanada aniq prognozlash va energiya samaradorligini oshirishga xizmat qiladi.

Xulosa. Mazkur tadqiqotda kuch transformatorlarining salt ishlash rejimida yuzaga keladigan energiya isroflarini intellektual usullar yordamida prognozlash masalasi ko‘rib chiqildi. Tadqiqot davomida quyidagi asosiy natijalar va xulosalar shakllantirildi.

Birinchidan, salt ishlash rejimidagi energiya isroflarining fizik mohiyati va ularga ta’sir qiluvchi omillar tahlil qilindi. Aniqlanishicha, bu isroflar asosan magnit o‘tkazgichdagi histerezis va uyurma toklar hisobiga yuzaga keladi. Biroq real ekspluatatsiya sharoitida kuchlanishning og‘ishi, chastotaning o‘zgarishi, atrof-muhit harorati, transformatorning qizish darajasi va magnit materialning

qarishi kabi ko‘plab omillar bu isroflar miqdoriga sezilarli ta’sir qiladi. Shu sababli an’anaviy hisoblash usullari real sharoitdagi isroflarni to‘liq aks ettira olmaydi.

Ikkinchidan, intellektual prognozlash usullarining imkoniyatlari o‘rganildi. Sun’iy neyron tarmoqlar, mashinaviy o‘qitish algoritmlari, noaniq mantiq va gibrid modellar salt ishlash rejimidagi isroflarni prognozlashda samarali vosita bo‘lishi mumkinligi ko‘rsatildi. Xususan, takrorlanuvchi neyron tarmoqlar (LSTM, GRU) vaqtli ketma-ketliklar bilan ishlashda, Random Forest va XGBoost esa talqin qilish qulayligi va barqarorligi bilan ajralib turadi. Tadqiqotlar shuni ko‘rsatadiki, to‘g‘ri tanlangan model va sifatli ma’lumotlar asosida prognozlash aniqligi an’anaviy usullarga qaraganda sezilarli darajada yuqori bo‘lishi mumkin. Masalan, GWO-BP neyron tarmoq modeli yordamida o‘rtacha nisbiy xatolik 1,15% va RMSE 0,0085 darajasiga erishilgan.

Uchinchidan, intellektual prognozlashning avtomatlashtirilgan monitoring tizimlari bilan integratsiyasi imkoniyatlari tahlil qilindi. Real vaqt rejimida ishlaydigan SCADA, IIoT va smart grid platformalarida intellektual modellarni qo‘llash energiya isroflarini vaqtida aniqlash, xizmat ko‘rsatishni rejalashtirish va yuklamani optimal taqsimlash imkonini beradi. Bu esa o‘z navbatida elektr tarmoqlarining umumiy samaradorligini oshirishga xizmat qiladi.

To‘rtinchidan, intellektual prognozlash usullarining amaliy qo‘llanishidagi cheklovlar ham ko‘rib chiqildi. Ma’lumotlarning yetarli emasligi, datchiklar xatoligi, modelning vaqt o‘tishi bilan eskirishi va hisoblash resurslariga bo‘lgan talab asosiy cheklovlar sifatida qayd etildi. Shu sababli modelni doimiy yangilab borish, ma’lumotlar sifatini nazorat qilish va natijalarni ekspert xulosasi bilan tekshirish zarurligi ta’kidlandi.

Foydalanilgan adabiyotlar

1. Mrajca, M. Innovative Transformer Design Optimization Combined with Machine Learning Loss Estimation: Doctoral Thesis. Brno University of Technology, 2025. – 120 p.

2. Research on core loss prediction of low-frequency transformer based on Grey Wolf optimisation algorithm optimised Back Propagation neural network // IET Electric Power Applications. – 2025. – Vol. 19, No. 1. – P. 1–12.

3. Luo, C., Zhang, G., Song, G. Performance optimization and fault prevention model of 220kV spare transformer based on big data analysis // IET Conference Proceedings: 4th International Conference on Data Analytics, Computing and Artificial Intelligence (ICDACAI 2025). – 2026.

4. Bílek, V. Transformer No-Load Losses Calculation Using Machine Learning // Semantic Scholar. – 2024.

5. Loizos, G. Support Vector Machines for Transformer Loss Prediction // Redalyc. – 2009.

6. Абдуллаев, А. Куч трансформаторларининг ишлаш режимлари ва энергия истеъмоли. – Тошкент: Fan va texnologiya, 2021. – 156 б.

7. Электр тармоқларида электр энергия исрофини камайтириш масалалари // SLIB. – 2021.

8. O‘zbekiston Respublikasi Energetika vazirligi. Elektr tarmoqlarini modernizatsiya va raqamlashtirish dasturi. – Toshkent, 2023.

9. Zemouri, B. Power Transformer Prognostics and Health Management Using Machine Learning: A Review and Future Directions // Preprints.org. – 2025.

10. ALJAMMAL, M. T., Al-Yozbaky, O. S. A State-of-the-Art Review on Intelligent Models for Transformer Fault Monitoring and Diagnosis // Dergipark. – 2024.