

220–500 kV ENERGETIKA TIZIMLARIDA EMI/EMC HIMOYALANGAN SMART KASKALARNI JORIY ETISH ORQALI BAXTSIZ HODISALARNING OLDINI OLIISHNING TEXNOLOGIK VA IQTISODIY SAMARADORLIGI

Xushmurodova Zulxumor O'tkir qizi

O'zbekiston Respublikasi Bank Moliya Akademiyasi

MBA-general mutaxassisligi magistranti

Qashqadaryo magistral elektr tarmoqlari korxonasi muhandisi

zulhumorxushmurodova@gmail.com

+998 97 279 17 88

Annotatsiya. *Ushbu maqolada 220–500 kV kuchlanishli magistral elektr uzatish liniyalari va podstantsiyalarida mehnat xavfsizligini ta'minlash hamda inson omilini kamaytirish maqsadida raqamli monitoring texnologiyalarini joriy etish masalalari tadqiq qilingan. Yuqori kuchlanishli obyektlardagi kuchli elektromagnit maydon (EMF) sharoitida smart kaska tizimlarining texnik va tajriba-sinov modellari ishlab chiqildi. Shuningdek, 50 nafar xodim misolida tizimning dastlabki loyiha qiymati va iqtisodiy samaradorligi tahlil qilinib, O'zbekiston magistral elektr tarmoqlarida bosqichma-bosqich tatbiq etish bo'yicha ilmiy-amaliy tavsiyalar shakllantirildi.*

Kalit so'zlar: *Smart kaska, 220–500 kV, elektromagnit maydon, EMI/EMC, IoT, SCADA, AI videoanalitika, energetika xavfsizligi, sanoat sensorlari*

KIRISH

Zamonaviy energetika tizimining barqaror ishlashi va unga xizmat ko'rsatuvchi xodimlarning xavfsizligi sohaning eng dolzarb vazifalaridan biri hisoblanadi. Xususan, 220–500 kV kuchlanishli magistral elektr uzatish liniyalari va podstantsiyalari yuqori xavfli energetika obyektlari toifasiga kiradi. Ushbu obyektlarda ekspluatatsiya va ta'mirlash ishlarini olib borish jarayonida xodimlar hayotiga tahdid soluvchi quyidagi asosiy xavflar mavjud:

- Elektr toki urishi va yoy razryadlari;
- Balandlikdagi konstruksiyalardan yiqilish;
- Tizimli qisqa tutashuvlar va kutilmagan texnik avariylar.

Energetika tizimlarida jarohatlanish ko'rsatkichlarini kamaytirish, mehnat muhofazasini avtomatlashtirish va inson omili ta'sirini minimallashtirish maqsadida raqamli monitoring texnologiyalarini joriy etish zarurati yuzaga kelmoqda. 2024–2025-yillardagi xalqaro tadqiqotlar natijalariga ko'ra, smart kaskalar (aqlli dubulg'alar) sanoat xavfsizligini mutlaqo yangi bosqichga olib chiquvchi istiqbolli intellektual texnologiya sifatida baholanmoqda.

Biroq, 220–500 kV podstantsiyalarda hosil bo'ladigan kuchli elektromagnit maydonlar oddiy maishiy sensorlarning ishlashiga salbiy ta'sir ko'rsatadi, GPS signallarini bo'g'adi va video uzatish tizimlarida uzilishlar hosil qiladi. Shu sababli, yuqori kuchlanishli obyektlar

uchun maxsus himoyalangan smart kaska tizimlarini modellashtirish ushbu tadqiqotning asosiy yo'nalishi etib belgilandi.

Metodologiya

Tadqiqotda yuqori kuchlanishli elektr tarmoqlari obyektlarida mehnat muhofazasini avtomatlashtirish muammosiga kompleks muhandislik va iqtisodiy-tahliliy yondashildi. Tizimli tahlil doirasida quyidagi ilmiy va amaliy metodlar kombinatsiyasidan foydalanildi:

- *Tizimli va qiyosiy tahlil:* Dunyoning yetakchi energetika korxonalari, xususan, Xitoyning *State Grid Corporation of China (SGCC)* kompaniyasi tomonidan raqamli monitoring xavfsizligi sohasida to'plangan tajribasi, smart kaska arxitekturasining o'ziga xos xususiyatlari hamda ularning ekstremal ish sharoitlariga moslashuvchanlik ko'rsatkichlari qiyosiy tahlil qilindi.

- *Elektromagnit moslashuvchanlik (EMC) modellashtirish:* 220–500 kV kuchlanishli elektr maydonlari (E) va magnit maydonlarining (H) sensorlar hamda yarim o'tkazgichli elektron modullarga ko'rsatadigan xalaqitlari (EMI) va ularni ekranlash (shielding) samaradorligi tahlil qilindi.

- *Matematik-statistik baholash va Risk-tahlil:* Tizimning ishonchliligi, signallar uzatilishidagi kechikish vaqtlari va xavf darajasini pasaytirish ko'rsatkichlari ehtimollar nazorati algoritmlari asosida hisoblandi.

Elektromagnit muhit tahlili va muhandislik himoyasi prinsiplari. 220–500 kV podstantsiyalar atrofida sanoat chastotali ($f = 50 \text{ Hz}$) kuchli elektromagnit maydonlar shakllanadi. Kuchlanishi $U = 220 \text{ kV}$ bo'lgan ochiq tarqatish qurilmalarida (OTQ) elektr maydon kuchlanganligi $E = 5 \text{ kV/m}$ ga, magnit induksiyasi esa $B = 100 \mu\text{Tl}$ gacha yetishi mumkin. Bunday sharoitda maishiy elektronika tarkibidagi parazit sig'implar va induktivliklar hisobiga mikroprotssessor tizimlarida noto'g'ri signallar hosil bo'ladi. Ushbu muammoni bartaraf etish uchun taklif etilayotgan modelda *Faradey katagi* prinsipiga asoslangan faol va passiv himoya usullari kiritildi. Smart kaskaning ichki elektron bloki yuqori magnit singdiruvchanlikka (μ_r) ega bo'lgan permalloy yoki mis-alyuminiy qotishmasidan iborat bo'lgan yupqa ekran qatlami bilan himoyalaniishi ko'zda tutilgan. Ekranlash samaradorligi (SE) quyidagi klassik tenglama orqali baholanadi:

$$SE = A + R + B$$

bu yerda:

A - elektromagnit to'lqinning ekran materialida yutilish koeffitsiyenti;

R - to'lqinning ekran sirtidan qaytish koeffitsiyenti;

B - ekranning ichki sirtlaridan ko'p karra qaytish hisobiga yuzaga keladigan tuzatish koeffitsiyenti.

Smart kaska tizimining texnik-arxitekturaviy modeli. Intellektual himoya vositasining arxitekturasini ko'p sathli sensorlar tarmog'i (WSN) prinsiplari asosida loyihalashtirilgan. Smart kaska quyi tizimlarining funksional vazifalari quyidagicha klassifikatsiya qilindi:

1. *Joylashuvni aniqlash bloki (Industrial GPS/GNSS):* Kuchli EMF sharoitida signallar dispersiyasini kamaytirish maqsadida, differensial tuzatish tizimiga (DGPS) ega bo'lgan, bir

vaqtning o'zida GPS, GLONASS va BeiDou sun'iy yo'ldosh tizimlari bilan ishlovchi ko'p chastotali sanoat modullari tanlandi.

2. *Kinematik holat datchigi (IMU - Inertial Measurement Unit)*: Xodimning fazodagi holatini aniqlash uchun uch o'qli akselerometr va giroskop birlashtirildi. Tizim ishchining to'satdan yiqilishi yoki balandlikdan qulashini aniqlashda erkin tushish tezlanishi ($g = 9.81 \text{ m/s}^2$) va tana og'ish burchagi (θ) dinamikasini quyidagi algoritm bo'yicha tahlil qiladi:

$$\Delta a = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2}$$

Agar $\Delta a \rightarrow 0$ (erkin tushish fazasi) va undan keyingi zarba impulsi kritik qiymatdan oshsa, tizim zudlik bilan avariya holatini qayd etadi.

1. *Ekologik monitoring datchiklari*: Podstansiya kabel tunnellari va yopiq tarqatish qurilmalarida (YTQ) gaz sizib chiqishi (CO , CH_4 , SF_6 - elegaz) hamda ishchi zonadagi harorat parametrlari uzluksiz o'lchanadi.

2. *AI Edge Videoanalytics (Chetli sun'iy intellektli video monitoring)*: Kaskaga o'rnatilgan ixcham keng burchakli (Wide-angle) kamera va past quvvat sarflovchi mikrokontroller (masalan, ARM Cortex-M asosidagi Edge AI protsessorlari) yordamida tasvir dastlabki ishlovdan o'tkaziladi. Bu serverga uzatiladigan kontent hajmini (trafikni) kamaytiradi va faqatgina qoida buzarlilari (himoya ko'zoynagi yo'qligi, ruxsatsiz zonaga kirish) mavjud bo'lganda serverga kadrlar silsilasini yuboradi.

3. *Shovqinga bardoshli aloqa moduli (Private LTE/5G)*: Umumiy tarmoqlardan mustaqil, korxonaning ichki hududiy kam qamrovli xususiy (Private) aloqa stansiyasi orqali ishlaydi. 5G texnologiyasining URLLC (Ultra-Reliable Low-Latency Communications) standarti signallarning kechikish vaqtini $t = 1 \text{ ms}$ gacha qisqartiradi.

4. *Markazlashtirilgan SCADA integratsiyasi*: Smart kaskalardan olingan telemetrik ma'lumotlar MQTT yoki OPC UA protokollari orqali dispetcherlik boshqaruv pultidagi SCADA tizimining alohida "Mehnat muhofazasi monitoringi" (HSE Dashboard) moduliga vizuallashtiriladi.

Tajriba-sinov modelining strukturaviy parametrlari va metodikasi. Tizim amaliy samaradorligini va hayotiyiligini tekshirish maqsadida 220 kV kuchlanishli podstansiyada faoliyat yuritayotgan 50 nafar operativ-ta'mirlash xodimi uchun maxsus sinov ssenariylari ishlab chiqildi. Tajriba 3 bosqichda amalga oshirilishi rejalashtirildi:

```
[1-bosqich: Laboratoriya sinovlari]
└─> EMI/EMC bardoshligini sun'iy gorelka va yuqori kuchlanish
generatorlarida tekshirish.
[2-bosqich: Joyida (In-situ) sinovlar]
└─> 50 nafar xodim tomonidan kaskalarni real OTQ sharoitida 30 kun
davomida ekspluatatsiya qilish.
[3-bosqich: Ma'lumotlarni tahlil qilish]
└─> Sensorlar aniqligi va aloqa sifati metrikalarini matematik
baholash
```

Ekspiriment jarayonida tizimning barqarorligi quyidagi mezoniy tenglamalar va empirik ko'rsatkichlar asosida baholanadi:

• *GPS koordinatalarining og'ishi* (σ_{xy}): EYuK ta'sirida koordinatalar aniqligi radiusi hisoblanadi:

$$\sigma_{xy} = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2} \leq 1,5 \text{ m}$$

• Paketlar yo'qolishi koeffitsiyenti (Packet Loss Rate - *PLR*): Aloqa sifati va shovqinga chidamlilik darajasi:

$$PLR = \left(\frac{N_{yo'q}}{N_{yub}} \right) \cdot 100\% \leq 0,1\%$$

• *SOS signal tezkorligi* (τ_{sos}): Favqulodda vaziyat sodir bo'lgan paytdan boshlab dispatcher pultida ogohlantirish paydo bo'lguncha o'tgan vaqt:

$$\tau_{sos} = \tau_{uzat} + \tau_{jarayon} \leq 1,5 \text{ s.}$$

Ushbu metodologik yondashuv olingan natijalarning ishonchliligini, taklif etilayotgan smart kaska tizimining texnik jihatdan mukammalligini va O'zbekiston energetika tizimining milliy standartlariga mos kelishini ilmiy jihatdan to'liq asoslab beradi.

Results

O'tkazilgan muhandislik dizayni va xalqaro tajriba tahlillari asosida yuqori kuchlanishli energetika obyektlari uchun aqlli dubulg'alarni ishlab chiqishda EMI/EMC (Elektromagnit xalaqitlar / Elektromagnit moslashuvchanlik) himoyasi talab etilishi aniqlandi. Xitoy tajribasiga tayanib, LTE va GPS modullarini maxsus metallashtirilgan ekranlash texnologiyasi bilan qoplash orqali 220 kV gacha bo'lgan maydonlardagi uzilishlarning oldini olish mumkinligi tasdiqlandi.

Loyihaning dastlabki iqtisodiy ko'rsatkichlari. 50 nafar xodimga mo'ljallangan tajriba-sinov modelini to'liq shakllantirish uchun zarur bo'lgan kapital va operatsion xarajatlar tahlil qilinib, quyidagi tarkibiy qismlar bo'yicha dastlabki qiymat aniqlandi:

T/r	Tizim tarkibiy qismlari	Miqdori / Tavsifi
1	Industrial Smart Kaskalar	50 dona (EMI/EMC himoyali)
2	Markaziy monitoring serveri	1 ta (Dasturiy ta'minot bilan)
3	AI videoanalitika tizimi	Litsenziya va algoritmlar
4	Aloqa infratuzilmasi va texnik xizmat	Yillik xizmat ko'rsatuvchi tarmoq
Jami	Dastlabki loyiha qiymati	40 000 – 80 000 AQSh \$

Muhokama va Iqtisodiy samaradorlik

Olingan natijalar shuni ko'rsatadiki, aqlli kaskalarni joriy etish texnik va iqtisodiy jihatdan yuqori samaradorlikka ega. Ayniqsa, inson omili yuqori bo'lgan balandlikdagi ishlar, podstantsiyalarni muntazam ko'zdan kechirish, xavfli zonalarga ruxsatsiz kirish va kutilmagan avariya holatlar monitoringida tizimning tezkorligi yaqqol namoyon bo'ladi.

Iqtisodiy samaradorlik tahlili. *National Safety Council (Milliy Xavfsizlik Kengashi)* xalqaro metodikalariga ko'ra, sanoat korxonalarida yuz beradigan bitta og'ir jarohatlanish yoki baxtsiz

hodisa kompaniyaga ulkan miqdorda to'g'ridan-to'g'ri va bilvosita iqtisodiy zarar keltiradi. Energetika kontekstida bu zarar quyidagilarni o'z ichiga oladi:

- Elektr energiyasi uzatilishining to'xtashi (nedootpusk) tufayli ko'rilgan moliyaviy zarar;
- Qisqa tutashuv oqibatida qimmatbaho podstantsiya uskunalarining (transformatorlar, o'chirgichlar) shikastlanishi;
- Tibbiy sug'urta, kompensatsiya to'lovlari va texnik tiklash xarajatlari.

Xalqaro miqyosda bitta og'ir jarohatlanish korxonaga o'n minglab AQSH dollaridan tortib, yuz minglab dollargacha moliyaviy yo'qotish olib kelishi isbotlangan. Shuning uchun, dastlabki bosqichda 40–80 ming AQSH dollari miqdorida investitsiya kiritish orqali smart kaskalarni joriy etish – nafaqat inson hayotini saqlab qoladi, balki tizim uzluksizligini ta'minlash hisobiga o'zini-o'zi iqtisodiy jihatdan to'liq oqlaydi.

Xulosa

– Smart kaskalar 220–500 kV kuchlanishli yuqori xavfli energetika obyektlarida sanoat xavfsizligini ta'minlash hamda tezkor dispetcherlik nazoratini o'rnatishning eng samarali va zamonaviy raqamli yechimidir.

– Kuchli elektromagnit maydonlarning elektron sensorlarga salbiy ta'sirini EMI/EMC standartlariga mos ekranlangan sanoat modullari va shovqinga bardoshli aloqa texnologiyalari yordamida to'liq bartaraf etish imkoniyati mavjud.

– Tadqiqot doirasida hisoblangan iqtisodiy va texnik model asosida, ushbu intellektual tizimni O'zbekiston magistral elektr tarmoqlari korxonalarida dastlab bosqichma-bosqich tajriba-sinov (pilot loyiha) tariqasida tatbiq etish maqsadga muvofiq deb baholanadi.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR:

1. Merchán-Cruz, E. A., et al. (2025). Smart Safety Helmets with Integrated Vision Systems for Industrial Infrastructure Inspection: A Comprehensive Review of VSLAM-Enabled Technologies. *Sensors*, 25(15), 4834. DOI: 10.3390/s25154834
2. Jiang, C., Wan, H., Cao, H., Yang, M., You, H., Xing, Y., & Cheng, J. (2024). Calculation and Analysis of Manual Efficiency in Power Grid Engineering Based on Smart Safety Helmet Data Collection. DOI: 10.4108/eai.29-3-2024.2347328
3. Raghunath, S. (2025). Developing an IoT-Enabled Smart Helmet for Worker Safety. *Safety*, 11(3), 89. DOI: 10.3390/safety11030089
4. National Safety Council. Work Injury Costs Report, 2024.
5. State Grid Corporation of China. Smart Grid and Industrial Safety Materials, 2024–2025.