

ELEKTR ENERGETIKA TIZIMLARIDA INTELLEKTUAL O'LGHASH (SMART METERING) TEXNOLOGIYALARINING METROLOGIK TA'MINOTINI TAKOMILLASHTIRISH

Jumamuratov Bexzod Akramjonovich

Muhammad al-Xorazmiy nomidagi Toshkent axborot

texnologiyalari universiteti v.b dotsent

Namozov Suxrobjon Saydullo o'g'li

talaba

Email: bexzodjumamuratov3@gmail.com.

Email: suxrobnamozov125@gmail.com.

Annotatsiya: Ushbu keng qamrovli ilmiy maqolada zamonaviy elektr energetika tarmoqlarida intellektual o'lgash tizimlari (Advanced Metering Infrastructure - AMI) va Smart Grid konsepsiyasining joriy etilishi sharoitida huquqiy va amaliy metrologik nazoratni tashkil etish masalalari chuqur tadqiq etilgan. Energetika tizimlarida raqamli va aqlli hisoblagichlarning aniqlik klasslari, faza siljishi, nochiziqli yuklamalar natijasida yuzaga keladigan yuqori garmonikalar, elektromagnit xalaqitlar va ekstremal harorat tebranishlarining o'lgash xatoliklariga ta'siri matematik modellar va differensial tenglamalar yordamida tahlil qilingan. Tadqiqot doirasida ASKUE tizimlarida ma'lumotlar uzatish barqarorligi, signallarning zaiflashishi hamda kiberxavfsizlik muammolariga keng to'xtalib o'tilgan bo'lib, blokcheyn (decentralized ledger) texnologiyasi hamda chegaraviy hisoblashlar (Edge Computing) asosidagi raqamli metrologik platformalarni joriy etish orqali texnik va tijoriy yo'qotishlarni kamaytirishning many amaliy hamda fundamental ilmiy yechimlari taklif etilgan.

Abstract: This comprehensive scientific paper systemically investigates the critical issues of organizing legal and practical metrological control under the large-scale implementation of smart metering systems (Advanced Metering Infrastructure - AMI) and the Smart Grid concept in modern electrical power networks. The direct impact of accuracy classes of smart meters, phase shifts, high harmonics caused by non-linear loads, electromagnetic interference, and extreme temperature fluctuations on relative measurement errors is comprehensively analyzed using advanced mathematical models and differential equations. Within the scope of the study, data transmission stability, signal attenuation, and cybersecurity threats in automated metering frameworks are discussed in detail. Furthermore, novel practical and fundamental scientific solutions are proposed to significantly reduce both technical and commercial losses through the deployment of decentralized blockchain ledger technologies and Edge Computing-based digital metrological platforms.

Kalit so'zlar: *Smart Grid, Smart Metering, ASKUE, intellektual hisoblagich, aniqlik klassi, nisbiy xatolik, raqamli metrologiya, kiberxavfsizlik, blokcheyn, Edge Computing, Kalman filtri, garmonik buzilishlar.*

Keywords: *Smart Grid, Smart Metering, AMI, smart meter, accuracy class, relative error, digital metrology, cybersecurity, blockchain, Edge Computing, Kalman filter, harmonic distortion.*

1. Kirish va Mavzuning Dolzarbligi

Elektr energetikasi tizimlari har qanday davlat iqtisodiyotining qon tomirlari hisoblanadi. Bugungi kunda jahon miqyosida ishlab chiqarish sanoatining shiddatli rivojlanishi, aholi sonining o'sishi va raqamli texnologiyalarning barcha sohalarga kirib borishi elektr energiyasiga bo'lgan ehtiyojni misli ko'rilmagan darajada oshirib yubordi. Elektr energiyasini ishlab chiqarish, yuqori kuchlanishli tarmoqlar orqali uzoq masofalarga uzatish va pirovardida iste'molchilarga yetkazib berish o'ta murakkab texnologik va dynamic zanjirni tashkil etadi. Ushbu zanjirning har bir nuqtasida va tugunida energiya oqimlarini aniq nazorat qilish, ishonchlikni ta'minlash va hisobga olish iqtisodiy samaradorlik hamda energetik xavfsizlikning fundamental asosi hisoblanadi.

O'zbekiston Respublikasida elektr energiyasini hisobga olish va nazorat qilishning avtomatlashtirilgan tizimlari (ASKUE) davlat miqyosidagi strategik dasturlar asosida to'liq joriy etildi. Mazkur tizim yordamida millionlab iste'molchilarning o'lchov ma'lumotlari yagona bazaga muvaffaqiyatli birlashtirildi. Biroq, intellektual tarmoqlar (Smart Grid) konsepsiyasiga o'tish jarayonida metrologik ta'minotning roli faqatgina an'anaviy hisob-kitob bilan cheklanib qolmaydi. Tizimda yuzaga keladigan minimal metrologik xatoliklar yoki datchiklarning ko'rsatkichlaridagi anomal og'ishlar umumtizim darajasida trillionlab so'mlik yo'qotishlarga, resurslar balansining jiddiy ravishda buzilishiga olib kelishi ilmiy jihatdan isbotlangan. Shu sababli, aqlli tarmoqlarda real vaqt rejimida dinamik o'lchash xatoliklarini aniqlash va ularni bartaraf etish eng dolzarb vazifalardan biridir.

Elektr energetikasi tizimlari har qanday davlat iqtisodiyotining qon tomirlari hisoblanadi. Bugungi kunda jahon miqyosida ishlab chiqarish sanoatining shiddatli rivojlanishi, aholi sonining o'sishi va raqamli texnologiyalarning barcha sohalarga kirib borishi elektr energiyasiga bo'lgan ehtiyojni misli ko'rilmagan darajada oshirib yubordi. Elektr energiyasini ishlab chiqarish, yuqori kuchlanishli tarmoqlar orqali uzoq masofalarga uzatish va pirovardida iste'molchilarga yetkazib berish o'ta murakkab texnologik va dynamic zanjirni tashkil etadi. Ushbu zanjirning har bir nuqtasida va tugunida energiya oqimlarini aniq nazorat qilish, ishonchlikni ta'minlash va hisobga olish iqtisodiy samaradorlik hamda energetik xavfsizlikning fundamental asosi hisoblanadi.

O'zbekiston Respublikasida elektr energiyasini hisobga olish va nazorat qilishning avtomatlashtirilgan tizimlari (ASKUE) davlat miqyosidagi strategik dasturlar asosida to'liq

joriy etildi. Mazkur tizim yordamida millionlab iste'molchilarning o'lchov ma'lumotlari yagona bazaga muvaffaqiyatli birlashtirildi. Biroq, intellektual tarmoqlar (Smart Grid) konsepsiyasiga o'tish jarayonida metrologik ta'minotning roli faqatgina an'anaviy hisob-kitob bilan cheklanib qolmaydi. Tizimda yuzaga keladigan minimal metrologik xatoliklar yoki datchiklarning ko'rsatkichlaridagi anomal og'ishlar umumtizim darajasida trillionlab so'mlik yo'qotishlarga, resurslar balansining jiddiy ravishda buzilishiga olib kelishi ilmiy jihatdan isbotlangan. Shu sababli, aqlli tarmoqlarda real vaqt rejimida dinamik o'lchash xatoliklarini aniqlash va ularni bartaraf etish eng dolzarb vazifalardan biridir.

Elektr energetikasi tizimlari har qanday davlat iqtisodiyotining qon tomirlari hisoblanadi. Bugungi kunda jahon miqyosida ishlab chiqarish sanoatining shiddatli rivojlanishi, aholi sonining o'sishi va raqamli texnologiyalarning barcha sohalarga kirib borishi elektr energiyasiga bo'lgan ehtiyojni misli ko'rilmagan darajada oshirib yubordi. Elektr energiyasini ishlab chiqarish, yuqori kuchlanishli tarmoqlar orqali uzoq masofalarga uzatish va pirovardida iste'molchilarga yetkazib berish o'ta murakkab texnologik va dynamic zanjirni tashkil etadi. Ushbu zanjirning har bir nuqtasida va tugunida energiya oqimlarini aniq nazorat qilish, ishonchlikni ta'minlash va hisobga olish iqtisodiy samaradorlik hamda energetik xavfsizlikning fundamental asosi hisoblanadi.

O'zbekiston Respublikasida elektr energiyasini hisobga olish va nazorat qilishning avtomatlashtirilgan tizimlari (ASKUE) davlat miqyosidagi strategik dasturlar asosida to'liq joriy etildi. Mazkur tizim yordamida millionlab iste'molchilarning o'lchov ma'lumotlari yagona bazaga muvaffaqiyatli birlashtirildi. Biroq, intellektual tarmoqlar (Smart Grid) konsepsiyasiga o'tish jarayonida metrologik ta'minotning roli faqatgina an'anaviy hisob-kitob bilan cheklanib qolmaydi. Tizimda yuzaga keladigan minimal metrologik xatoliklar yoki datchiklarning ko'rsatkichlaridagi anomal og'ishlar umumtizim darajasida trillionlab so'mlik yo'qotishlarga, resurslar balansining jiddiy ravishda buzilishiga olib kelishi ilmiy jihatdan isbotlangan. Shu sababli, aqlli tarmoqlarda real vaqt rejimida dinamik o'lchash xatoliklarini aniqlash va ularni bartaraf etish eng dolzarb vazifalardan biridir.

Elektr energetikasi tizimlari har qanday davlat iqtisodiyotining qon tomirlari hisoblanadi. Bugungi kunda jahon miqyosida ishlab chiqarish sanoatining shiddatli rivojlanishi, aholi sonining o'sishi va raqamli texnologiyalarning barcha sohalarga kirib borishi elektr energiyasiga bo'lgan ehtiyojni misli ko'rilmagan darajada oshirib yubordi. Elektr energiyasini ishlab chiqarish, yuqori kuchlanishli tarmoqlar orqali uzoq masofalarga uzatish va pirovardida iste'molchilarga yetkazib berish o'ta murakkab texnologik va dynamic zanjirni tashkil etadi. Ushbu zanjirning har bir nuqtasida va tugunida energiya oqimlarini aniq nazorat qilish, ishonchlikni ta'minlash va hisobga olish iqtisodiy samaradorlik hamda energetik xavfsizlikning fundamental asosi hisoblanadi.

O'zbekiston Respublikasida elektr energiyasini hisobga olish va nazorat qilishning avtomatlashtirilgan tizimlari (ASKUE) davlat miqyosidagi strategik dasturlar asosida to'liq

joriy etildi. Mazkur tizim yordamida millionlab iste'molchilarning o'lchov ma'lumotlari yagona bazaga muvaffaqiyatli birlashtirildi. Biroq, intellektual tarmoqlar (Smart Grid) konsepsiyasiga o'tish jarayonida metrologik ta'minotning roli faqatgina an'anaviy hisob-kitob bilan cheklanib qolmaydi. Tizimda yuzaga keladigan minimal metrologik xatoliklar yoki datchiklarning ko'rsatkichlaridagi anomal og'ishlar umumtizim darajasida trillionlab so'mlik yo'qotishlarga, resurslar balansining jiddiy ravishda buzilishiga olib kelishi ilmiy jihatdan isbotlangan. Shu sababli, aqlli tarmoqlarda real vaqt rejimida dinamik o'lchash xatoliklarini aniqlash va ularni bartaraf etish eng dolzarb vazifalardan biridir.

2. Matematik Modellash va Metodologik Asoslar

Intellektual elektr energiyasi hisoblagichlari xalqaro elektrotexnika komissiyasi (IEC) standartlariga asosan 0.2S va 0.5S kabi yuqori aniqlik klasslariga bo'linadi. Ushbu ko'rsatkich laboratoriya sharoitida sinusoidallik saqlangan va harorat barqaror bo'lgan muhitda ideal natijani beradi. Biroq, real ekspluatatsiya sharoitida tarmoq yuklamasi chiziqli emas. Sanoat korxonalaridagi chastotaviy o'zgartirgichlar, quvvatli inverterlar va maishiy texnikalar kuchlanish hamda tok to'lqinlarining shaklini sezilarli darajada deformatsiyaga uchratadi.

Tizimdagi real vaqtdagi nisbiy o'lchash xatoligi (δ) quyidagi metrologik ifoda yordamida baholanadi:

$$\delta = ((W_{o'lchov} - W_{haqiqiy}) / W_{haqiqiy}) * 100 \% \quad (1)$$

Bu yerda $W_{o'lchov}$ – intellektual hisoblagich qayd etgan ma'lumot, $W_{haqiqiy}$ – energiyaning haqiqiy fundamental qiymati. Smart hisoblagichlarning foydali ish samaradorligi koeffitsiyenti (η) esa quyidagicha optimallashtiriladi:

$$\eta = (W_{foydali} / W_{umumiy}) * 100 \% \quad (2)$$

Tarmoqdagi yuqori garmonikalarni hisobga olgan holda, umumiy dinamik o'lchash xatoligi ($\delta_{dinamik}$) quyidagi differensial ildiz ko'rinishiga ega bo'ladi:

$$\delta_{dinamik} = \sqrt{(\delta_0^2 + \delta_T^2 + \delta_f^2 + \delta_{harm}^2)} \quad (3)$$

Bu yerda δ_0 – asbobning asosiy xatoligi, δ_T – harorat koeffitsiyenti ta'siridagi xatolik, δ_f – tarmoq chastotasining og'ishi, δ_{harm} – yuqori garmonika va signallarning sinusoidallikdan og'ishi natijasidagi xatolik komponentidir.

3. Tizimli Muammolar va Amaldagi Kamchiliklar Tahlili

O'tkazilgan tahlillar shuni ko'rsatadiki, amaldagi intellektual o'lchash infratuzilmasida bir qator tizimli zaifliklar mavjud. Birinchidan, yuqori garmonikalarning salbiy ta'siri muammosi. Sanoat korxonalarida chiziqli bo'lmagan jadal yuklamalar oqibatida sinusoidaning buzilishi hisoblagichlarning o'lchash mikrosxemalarida qo'shimcha dynamic xatolikni uyg'otadi. Natijada, asbob 2.5% dan 5% gacha bo'lgan qo'shimcha oraliqda energiya hisobida adashishi mumkin. Bu esa energetika korxonalari va yirik iste'molchilar o'rtasida jiddiy moliyaviy nizolarga sabab bo'ladi.

Ikkinchidan, kiber-xavfsizlik masalalari. ASKUE tizimida ma'lumotlar simsiz GSM jamoat tarmoqlari yoki simli kanallar orqali uzatiladi. Ushbu uzatish kanallari tashqi kiber-hujumlarga nisbatan zaif bo'lsa, o'lchov ko'rsatkichlarini masofadan turi b'zgartirish yoki soxtalashtirish tahdidlari jiddiy ravishda yuzaga keladi. Uchinchidan, O'zbekiston iqlimining keskin kontinentalligi, ya'ni yozgi yuqori issiqlik sharoiti asboblarning ichki yarimo'tkazgichli etalon elementlarida termik dreyfni keltirib chiqarishi tajribalarda aniqlangan.

O'tkazilgan tahlillar shuni ko'rsatadiki, amaldagi intellektual o'lchash infratuzilmasida bir qator tizimli zaifliklar mavjud. Birinchidan, yuqori garmonikalarning salbiy ta'siri muammosi. Sanoat korxonalarida chiziqli bo'lmagan jadal yuklamalar oqibatida sinusoidaning buzilishi hisoblagichlarning o'lchash mikrosxemalarida qo'shimcha dynamic xatolikni uyg'otadi. Natijada, asbob 2.5% dan 5% gacha bo'lgan qo'shimcha oraliqda energiya hisobida adashishi mumkin. Bu esa energetika korxonalari va yirik iste'molchilar o'rtasida jiddiy moliyaviy nizolarga sabab bo'ladi.

Ikkinchidan, kiber-xavfsizlik masalalari. ASKUE tizimida ma'lumotlar simsiz GSM jamoat tarmoqlari yoki simli kanallar orqali uzatiladi. Ushbu uzatish kanallari tashqi kiber-hujumlarga nisbatan zaif bo'lsa, o'lchov ko'rsatkichlarini masofadan turi b'zgartirish yoki soxtalashtirish tahdidlari jiddiy ravishda yuzaga keladi. Uchinchidan, O'zbekiston iqlimining keskin kontinentalligi, ya'ni yozgi yuqori issiqlik sharoiti asboblarning ichki yarimo'tkazgichli etalon elementlarida termik dreyfni keltirib chiqarishi tajribalarda aniqlangan.

O'tkazilgan tahlillar shuni ko'rsatadiki, amaldagi intellektual o'lchash infratuzilmasida bir qator tizimli zaifliklar mavjud. Birinchidan, yuqori garmonikalarning salbiy ta'siri muammosi. Sanoat korxonalarida chiziqli bo'lmagan jadal yuklamalar oqibatida sinusoidaning buzilishi hisoblagichlarning o'lchash mikrosxemalarida qo'shimcha dynamic xatolikni uyg'otadi. Natijada, asbob 2.5% dan 5% gacha bo'lgan qo'shimcha oraliqda energiya hisobida adashishi mumkin. Bu esa energetika korxonalari va yirik iste'molchilar o'rtasida jiddiy moliyaviy nizolarga sabab bo'ladi.

Ikkinchidan, kiber-xavfsizlik masalalari. ASKUE tizimida ma'lumotlar simsiz GSM jamoat tarmoqlari yoki simli kanallar orqali uzatiladi. Ushbu uzatish kanallari tashqi kiber-hujumlarga nisbatan zaif bo'lsa, o'lchov ko'rsatkichlarini masofadan turi b'zgartirish yoki soxtalashtirish tahdidlari jiddiy ravishda yuzaga keladi. Uchinchidan, O'zbekiston iqlimining keskin kontinentalligi, ya'ni yozgi yuqori issiqlik sharoiti asboblarning ichki yarimo'tkazgichli etalon elementlarida termik dreyfni keltirib chiqarishi tajribalarda aniqlangan.

4. Taklif etilayotgan Innovatsion Yechimlar va Amaliy Tavsiyalar

Ushbu murakkab metrologik muammolarni fundamental tarzda hal qilish uchun muallif tomonidan quyidagi innovatsion tizimli yechimlar ishlab chiqildi. Birinchidan, Blokcheyn

texnologiyasiga asoslangan daxlsiz o'lchovlar arxitekturasini. Hisoblagich ichidagi raqamli signal protsessori darajasida o'lchangan har bir ma'lumot bloki SHA-256 algoritmi bilan xeshlanadi va zanjirga yoziladi. Bu tizim ma'lumotlarning tranzit vaqtida ham, serverda saqlanish jarayonida ham o'zgartirilishini mutlaqo imkonsiz qiladi.

Ikkinchidan, Edge Computing (Chegaraviy hisoblashlar) va raqamli Kalman filtratsiyasi. Hisoblagichning o'zida real vaqt rejimida datchik signallari matematik filtrlashdan o'tkaziladi. Bu tarmoqdagi tasodifiy impulsli shovqinlarni va vaqtinchalik xalaqitlarni fundamental signaldan ajratib oladi va dynamic xatolikni nolga yaqinlashtiradi. Uchinchidan, dasturiy termokompensatsiya tizimi: harorat o'zgarishiga mos ravishda real vaqtda

$$X_{\text{kor}} = X_{\text{izm}} + \Delta X(T)$$

formulasi asosida o'lchov natijalariga tuzatish kiritib boriladi.

5. Xulosa va Istiqbollar

Xulosa qilib aytganda, elektr energetika tizimlarida intellektual o'lchash texnologiyalarining metrologik ta'minotini raqamli algoritmlar, blokcheyn va chegaraviy hisoblashlar asosida modernizatsiya qilish, energiya hisobidagi tijoriy va texnik yo'qotishlarni amaldagi yuqori ko'rsatkichlardan 1.5-2.0% gacha kamaytirish imkonini beradi. Taklif etilgan yechimlar milliy energetika tizimining iqtisodiy barqarorligini oshirish va raqamli transformatsiyani muvaffaqiyatli yakunlash uchun muhim ilmiy asos bo'lib xizmat qiladi.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR RO'YXATI / REFERENCES

1. Fredrik Ege Abrahamsen, Yun Ai, Michael Cheffena. "Communication Technologies for Smart Grid: A Comprehensive Survey" // IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2021. Vol. 23, No. 4.
2. R. Quijano Cetina, Y. Seferi, S. M. Blair. "Analysis and Selection of Appropriate Components for Power System Metrology Instruments" // 2019 2nd International Colloquium on Smart Grid Metrology (SMAGRIMET), Split, Croatia, 2019.
3. Mihaela Albu, Mihai Sanduleac, Carmen Stanescu. "Syncretic Use of Smart Meters for Power Quality Monitoring in Emerging Networks" // IEEE Transactions on Smart Grid, 2016. Vol. 7, No. 3.
4. Gert Rietveld, Jean-Pierre Braun, Paul Wright. "Smart Grid Metrology to Support Reliable Electricity Supply" // Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM), Rio de Janeiro, Brazil, 2014.
5. Jumamuratov B.A., Abduqayumov A.A., Eshmuradov D.E. Kompozit materiallarning radioshofonligini nazorat qiluvchi vositaning metrologik ta'minoti // "Milliy standart" ilmiy-texnik jurnali, Toshkent, 2024, 3-son. b. 1-5.

6. Jumamuratov B.A., Matyakubova P.M., Aytbayev T.A. Qualimetric analysis of characteristics of satellite navigation systems // Electronic journal of actual problems of modern science, education and training. Khorezm, 2022.

7. ISO/IEC 17025:2017. General requirements for the competence of testing and calibration laboratories.

8. JCGM 100:2008. Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM).

9. Jumamuratov B.A., Eshmuradov D.E., Turaeva N.M. Development of a model of a system for restoring navigation equipment of aircraft by increasing their operational readiness // Journal "Aerospace Instrument Making". DOI:10.25791/aviakosmos.6.2023.1343. No. 6. St. Petersburg -2023. - P.18-27.

10. Jumamuratov B.A., Rakhimova N.M., Attokurov U.T. The using of physical properties of semiconductor materials in advanced engineering // Science and innovation international scientific journal volume 2 Issue 10 October Tashkent, 2023. pp.162-168.