



Past kuchlanishli taqsimlovchi elektr tarmoqlarini matematik modellashtirish

Maxsud K. Bobojanov¹, Turatbek T. Omorov², Eldor G. Usmanov^{1,a)},
Raxmatillo Ch. Karimov^{1,b)}

¹ DSc., professor, Islom Karimov nomidagi Toshkent davlat texnika universiteti, Toshkent, 100095, O'zbekiston; mbobojanov@yahoo.com; <https://orcid.org/0000-0001-9655-2683>

² DSc., professor, Qirg'iz Respublikasi Milliy fanlari akademiyasi, Bishkek, 720071, Qirg'iziston; omorovtt@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5902-0220>

^{1,a)} PhD., professor, Islom Karimov nomidagi Toshkent davlat texnika universiteti, Toshkent, 100095, O'zbekiston; eusmonov@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-3681-3770>

^{1,b)} PhD., dotsent, Islom Karimov nomidagi Toshkent davlat texnika universiteti, Toshkent, 100095, O'zbekiston; raxmatillo82@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0129-5643>

Dolzarbliigi: bugungi kunda 0,4 kV kuchlanishli uch fazali taqsimlovchi elektr tarmoqlar energiya ta'minoti tizimining asosiy bo'g'ini hisoblanadi. Tarmoqlarda yuklama nosimmetriyasi, fazalar nomutanosibligi va real vaqtda nazoratning yetarli darajada yo'lga qo'yilmaganligi energiya sifati hamda ishonchligini pasaytiradi. Shuningdek, ENHATni joriy etish sharoitida taqsimlovchi elektr tarmoq holatini matematik modellashtirish orqali tezkor monitoring va tahlilini ta'minlash dolzarb vazifa sanaladi. Bu nafaqat elektr energiyasi isroflarini aniqlash, balki magistral liniya parametrlarini baholash, yuklamalarning dinamik o'zgarishini real vaqt rejimida kuzatish imkonini ham yaratadi. Shu boisdan, nosimmetrik uch fazali tarmoqlarning aniq matematik modellarini ishlab chiqish va ular asosida tahlil usullarini takomillashtirish amaliyotda muhim ahamiyat kasb etadi.

Maqsad: 0,4 kV kuchlanishli nosimmetrik uch fazali taqsimlovchi elektr tarmoqlarning matematik modelini ishlab chiqish, unda o'lchanmaydigan tok va kuchlanishlarni real vaqt rejimida aniqlash usullarini takomillashtirish hamda ENHAT tizimida qo'llash uchun samarali algoritmlarni ishlab chiqishdan iborat.

Usullari: tadqiqotda elektr zanjirlar nazariyasi, signallarni raqamli qayta ishlash, identifikatsiya va optimallashtirish usullariga asoslangan matematik modellashtirish uslubiyati qo'llanildi. Nosimmetrik rejimdagi tok va kuchlanish kattaliklari simmetrik tarkiblarga ajratildi, o'lchanmagan parametrlar korrelyatsion va adaptiv hisoblash usullari yordamida baholandi. Shu bilan birga, ma'lumotlarni yig'ish va tahlil qilishda ENHAT tarkibidagi telekommunikatsion modullar hamda ma'lumotlar konsentratori imkoniyatlaridan foydalanildi.

Natijalar: maqola tadqiqoti natijasida 0,4 kV kuchlanishli nosimmetrik uch fazali tarmoqning matematik modeli yaratildi va uning asosida o'lchanmaydigan elektr o'zgaruvchilarini aniqlashning aniqligi oshirildi. Taklif etilgan uslubiyat orqali tarmoqning elektr energiyasi sifati ko'rsatkichlarini baholash, magistral liniya qarshiliklarining joriy qiymatlarini aniqlash va energiya isroflarini monitoring qilish imkoni yaratildi. Olingan natijalar ENHAT tizimida tatbiq etilishi mumkin bo'lib, ular orqali taqsimlovchi elektr tarmoqning ish samaradorligini va nazorat darajasini sezilarli oshirish imkoni tug'ildi.

Kalit so'zlar: taqsimlovchi elektr tarmoq; magistral liniya; elektr hisoblagich; ma'lumotlar konsentratori; ma'lumotlar bazasi; yuklama dinamikasi identifikatori; telekommunikatsiya moduli; elektr energiyasi sifati; transformator podstansiyasi; elektr energiyasini nazorat qilish va hisobga olishning avtomatlashtirilgan tizimini (ENHAT).

For citation: M.K. Bobojanov, T.T. Omorov, E.G. Usmanov, R.Ch. Karimov. Mathematical modeling of low-voltage distribution electrical networks. Scientific and technical journal of Problems of Energy and Sources Saving, 2025, no. 4, pp. 52-63.

<https://doi.org/10.5281/zenodo.18459819>

Received: 03.04.2025

Revised: 17.04.2025

Accepted: 09.07.2025

Published: 27.12.2025

Copyright: © Maxsud K. Bobojanov, Turatbek T. Omorov, Eldor G. Usmanov, Raxmatillo Ch. Karimov, 2025. Submitted to Problems of Energy and Sources Saving for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Математическое моделирование низковольтных распределительных электрических сетей

Maxsud K. Bobojanov¹, Turatbek T. Omorov², Eldor G. Usmanov^{1,a)},
Raxmatillo Ch. Karimov^{1,b)}

¹ DSc., профессор, Ташкентский государственный технический университет имени Ислама Каримова, Ташкент, 100095, Узбекистан; mbobojanov@yahoo.com; <https://orcid.org/0000-0001-9655-2683>

² DSc., профессор, Национальная академия наук Кыргызской Республики, Бишкек, 720071, Киргизия; omorovtt@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5902-0220>

^{1,a)} PhD., профессор, Ташкентский государственный технический университет имени Ислама Каримова, Ташкент, 100095, Узбекистан; eusmonov@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-3681-3770>

^{1,b)} PhD., доцент, Ташкентский государственный технический университет имени Ислама Каримова, Ташкент, 100095, Узбекистан; raxmatillo82@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0129-5643>

Актуальность: в настоящее время трёхфазные распределительные электрические сети напряжением 0,4 кВ являются основным звеном системы электроснабжения. Несимметрия нагрузок в сетях, несбалансированность фаз и недостаточная организация контроля в режиме реального времени снижают качество электроэнергии и надёжность системы. Кроме того, в условиях внедрения АСКУЭ актуальной задачей является обеспечение оперативного мониторинга и анализа состояния распределительной электрической сети посредством её математического моделирования. Это позволяет не только выявлять потери электрической энергии, но и оценивать параметры магистральной линии, а также отслеживать динамические изменения нагрузок в режиме реального времени. Поэтому разработка точных математических моделей несимметричных трёхфазных сетей и совершенствование методов их анализа имеют важное практическое значение.



Цель: разработка математической модели несимметричных трёхфазных распределительных электрических сетей напряжением 0,4 кВ, совершенствование методов определения неизмеряемых токов и напряжений в режиме реального времени, а также создание эффективных алгоритмов для их применения в системе АСКУЭ.

Методы: в исследовании была применена методология математического моделирования, основанная на теории электрических цепей, цифровой обработке сигналов, методах идентификации и оптимизации. Величины тока и напряжения в несимметричном режиме были разложены на симметричные составляющие, а неизмеренные параметры оценены с использованием корреляционных и адаптивных методов расчёта. В процессе сбора и анализа данных использовались телекоммуникационные модули АСКУЭ и соответствующие функции концентраторов данных.

Результаты: в результате исследования статьи была создана математическая модель несимметричной трёхфазной сети с напряжением 0,4 кВ, на основе которой повысилась точность определения неизмеряемых электрических величин. Предложенным методом создана возможность оценивать показатели качества электроэнергии в сети, определять текущие значения сопротивлений магистральных линий и контролировать потери энергии. Полученные результаты могут быть внедрены в систему АСКУЭ, что позволит значительно повысить эффективность работы распределительной электрической сети и уровень её контроля.

Ключевые слова: распределительная электрическая сеть; магистральная линия; электрический счётчик; концентратор данных; база данных; идентификатор динамики нагрузки; телекоммуникационный модуль; качество электроэнергии; трансформаторная подстанция; автоматизированная система контроля и учёта электроэнергии (АСКУЭ).

Mathematical modeling of low-voltage distribution electrical networks

Maxsud K. Bobojanov¹, Turatbek T. Omorov², Eldor G. Usmanov^{1,a)},
Raxmatillo Ch. Karimov^{1,b)}

¹ DSc, professor, Tashkent State Technical University named after Islam Karimov, Tashkent, 100095, Uzbekistan; mbobojanov@yahoo.com; <https://orcid.org/0000-0001-9655-2683>

² DSc., professor, National Academy of Sciences of the Kyrgyz Republic, Bishkek, 720071, Kyrgyzstan; omorovtt@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5902-0220>

^{1,a)} PhD., professor, Tashkent State Technical University named after Islam Karimov, Tashkent, 100095, Uzbekistan; eusmonov@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-3681-3770>

^{1,b)} PhD., associate Professor, Tashkent State Technical University named after Islam Karimov, Tashkent, 100095, Uzbekistan; raxmatillo82@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0129-5643>

Relevance: the current three-phase 0.4 kV distribution electrical networks are the main link in the power supply system. Load asymmetry in networks, phase imbalance, and insufficient real-time monitoring reduce the quality and reliability of electricity. Moreover, in the context of implementing an automated system for commercial electricity metering (ASCAE), an urgent task is to ensure the operational monitoring and analysis of the distribution electrical network through its mathematical modeling. This not only allows for the detection of electrical energy losses but also for the assessment of the main line parameters and the monitoring of dynamic load changes in real time. Therefore, the development of accurate mathematical models of unbalanced three-phase networks and the improvement of methods for their analysis are of significant practical importance.

Aim: development of a mathematical model of unbalanced three-phase 0.4 kV distribution electrical networks, improvement of methods for determining unmeasured currents and voltages in real-time, as well as the creation of efficient algorithms for their application in an ASCAE system.

Methods: the study employed a methodology of mathematical modeling based on electrical circuit theory, digital signal processing, and methods of identification and optimization. The current and voltage values in the unbalanced mode were decomposed into symmetrical components, and the unmeasured parameters were estimated using correlation and adaptive calculation methods. During the data collection and analysis process, ASCAE telecommunication modules and the corresponding functions of data concentrators were used.

Results: as a result of the study, a mathematical model of an unbalanced three-phase 0.4 kV network was developed, which improved the accuracy of determining unmeasured electrical quantities. The proposed method enables the assessment of power quality indicators in the network, the determination of the current values of the main line resistances, and the monitoring of energy losses. The obtained results can be implemented in the ASCAE system, which will significantly improve the efficiency of the distribution electrical network and the level of its control.

Key words: distribution electrical network; main (trunk) line; electric meter; data concentrator; database; load dynamics identifier; telecommunication module; power quality; transformer substation; Automated System for Control and Accounting of Electricity (ASCAE).

1. Kirish (Introduction)

0,4 kV kuchlanishli taqsimlovchi elektr tarmoqlar past kuchlanishli iste'molchilarga mahsulot sifatida elektr energiyasini yetkazib berishning yakuniy bo'g'ini hisoblanadi. Bizga ma'lumki, bugungi kunda taqsimlovchi elektr tarmoqlarning sifati va ishlash samaradorligini oshirishi asosan

zamonaviy texnologiyalarni, jumladan ENHATni joriy etish orqali ta'minlanmoqda [1-2, 9-11].

Ushbu tizimning asosiy tuzilmaviy va funksional elementlari - ma'lumotlar konsentratori hamda tarmoq abonentlarida o'rnatilgan zamonaviy raqamli elektr hisoblagichlar majmuasidan iboratdir. ENHATning kichik tizimlari o'rtasida texnologik va xizmat ma'lumotlarini almashish uchun ma'lumotlar konsentratori va elektr hisoblagichning tarkibida zamonaviy ma'lumot uzatish texnologiyalari (GSM, Zigbee, PLC va boshqalar) asosida yaratilgan telekommunikatsiya modullari mavjud.

Ma'lumotlar konsentratorining asosiy vazifalari quyidagilardan iborat:

- elektr hisoblagichlar guruhidan ma'lumotlarni tezkor yig'ish;
- olingan ma'lumotlarni saqlash;
- tegishli funksional vazifalarni hal etish uchun axborotni raqamli qayta ishlash;
- boshqaruvning yuqori darajasi bilan ma'lumot almashinuvini ta'minlash.

Ta'kidlash lozimki, hozirgi vaqtda avtomatlashtirilgan ENHAT doirasida asosan elektr energiyasini tijoriy hisobga olishga doir vazifalar hal etilmoqda. Shu bilan birga, avtomatlashtirilgan tizimlarning samaradorligini oshirish maqsadida, ular tarkibiga quyidagi muhim funksional vazifalarni kiritish eng dolzarb masala hisoblanadi, ya'ni operativ monitoring o'tkazish, ish holatlarini tahlil qilish va taqsimlovchi elektr tarmoqning ish rejimi optimallashtirish [3, 10-12].

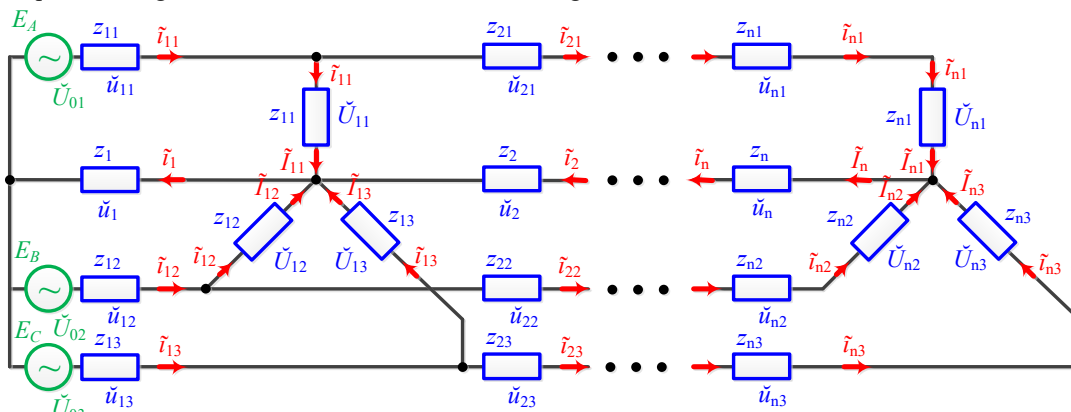
Keltirilgan vazifalarni hal etishning asosini 0,4 kV kuchlanishli uch fazali tarmoqdagi o'lchanmaydigan va nazorat qilinmaydigan o'zgaruvchilarni (tok va kuchlanishlar) real vaqt rejimida aniqlash imkonini beradigan matematik modellar va usullar tashkil etadi. Bu esa, tarmoqning haqiqiy elektr energiyasi isrofi kabi sifat ko'rsatkichlarini aniqlash hamda o'lchash ma'lumotlaridan foydalangan holda, magistral liniya parametrlari (qarshiliklari)ning real qiymatlarini baholash imkonini beradi. Bizga ma'lum bo'lgan model va usullardan, jumladan, simmetrik tarkibiy qismlar usulidan foydalanilishi maqsadimiz yo'lida ma'lum qiyinchiliklarni keltirib chiqaradi, bunday qiyinchiliklarga quyidagi omillarni kiritish mumkin [4-5, 10-11, 13-14]:

- 0,4 kV kuchlanishli uch fazali tarmoqlarda tok va kuchlanishlar nosimmetriyasi;
- magistral liniyaning abonentlar orasidagi qismlari (uchastka)ning joriy (haqiqiy) qarshilik qiymatlarida noaniqlik mavjud bo'lib, ular tashqi omillar (harorat, namlik)ga bog'liq holda tasodifiy tarzda o'zgarib turadi;
- elektr hisoblagichlar faqat iste'molchilar yuklamasidagi tok va kuchlanishlarning amaliy qiymatlarini o'lchaydi, bu esa taqsimlovchi elektr tarmoqlarning ish jarayonlarining matematik tavsifini tuzishda mavjud fizik qonunlardan to'g'ridan-to'g'ri foydalanish imkonini bermaydi.

Yuqorida ko'rsatilgan omillar, taqsimlovchi elektr tarmoq fizik jarayonlarini ifodalovchi samarali modellarni yaratishni cheklaydi. Bu esa, taqsimlovchi elektr tarmoqning holatini modellash va monitoring qilish vazifalarini to'liq hajmda bajarish imkonini bermaydi. Ushbu maqolada 0,4 kV kuchlanishli nosimmetrik uch fazali taqsimlovchi elektr tarmoq modelini qurish va uning o'lchashning imkoni bo'lmagan elektr o'zgaruvchilarini real vaqt rejimida aniqlash uslubiyati taklif etilgan. Olingan natijalar ENHAT tarkibida qo'llashga yo'naltirilgan bo'lib, ular taqsimlovchi elektr tarmoqlarning ish holatini tezkor monitoring qilish hamda tarmoqdagi elektr energiyasi isroflarini baholash uchun xizmat qiladi [6-11].

2. Asosiy qism (Main part)

Tadqiqot predmeti sifatida 0,4 kV kuchlanishli uch fazali taqsimlovchi elektr tarmoqni ko'rib chiqamiz, uning hisoblash sxemasi 1-rasmda ko'rsatilgan.



1-rasm. 0,4 kV kuchlanishli taqsimlovchi elektr tarmoqning hisoblash sxemasi

Fig.2. Calculation scheme of a 0.4 kV distribution electrical network

Tadqiqot uchun, rasmda keltirilgan tarmoqni nosimmetrik rejimda ishlaydi deb qabul qilamiz.



Sxemani soddalashtirish maqsadida A, B, C fazalar mos ravishda k -indeksli o'zgaruvchi orqali raqamlangan ($k = \overline{1,3}$) va qolgan belgilar quyidagicha ma'noga ega, ya'ni: E_A, E_B, E_C - oniy fazaviy EYuK; Z_{vk} - k -fazasiga ulangan v -chi yuklama (elektr qabul qiluvchi) ($v = \overline{1,n}$); $I_{vk}, \tilde{U}_{vk} - Z_{vk}$ yuklamadagi oniy tok va kuchlanish qiymatlari; \check{I}_{vk}, z_{vk} - k -fazaning v -chi abonentlararo uchastkasi bo'ylab oniy tok va qarshilik qiymatlari; $\check{U}_{vk}, \check{U}_v$ - mos ravishda k -chi fazaning v -chi abonentlararo uchastkasi va neytral simdagi oniy kuchlanishlar; \check{J}_v, z_v - neytral simning v -chi uchastkasi bo'ylab oniy tok va qarshilik qiymatlari; $\check{U}_{0k}, \check{I}_{1k} = \check{I}_{0k}$ - mos ravishda tegishli fazalar kirishidagi oniy kuchlanish va tok qiymatlari.

Shundan so'ng, quyidagi shartlar bajariladi deb hisoblaymiz:

- 1) 0,4 kV kuchlanishli taqsimlovchi elektr tarmoq normal rejimda ishlamoqda;
- 2) tarmoqning faza va neytral simlari bir xil kesim yuzasiga ega, ya'ni ularning qarshiliklari $z_{vk} = z_v$ ($k = \overline{1,3}, v = \overline{1,n}$) bo'lib, ular oldindan ma'lum emas;
- 3) tizimda taqsimlovchi elektr tarmoqdagi tok va kuchlanishlarning yuqori garmonik tashkil etuvchilarini so'ndirish uchun texnik vositalardan foydalaniladi;
- 4) Eh_{vk} - elektr hisoblagichdan ma'lumotlar konsentratoriga aloqa kanallari orqali $t \in [t_\xi, t_{\xi+1}]$ diskret vaqt oraliqlarida $\Delta t_\xi = t_{\xi+1} - t_\xi$ ($\xi = 1, 2, \dots$) diskretlash qadami bilan quyidagi ma'lumotlar uzatiladi:

- Z_{vk} yuklamasidagi I_{vk} - tok va U_{vk} - kuchlanishlarning ta'sir etuvchi (haqiqiy) qiymatlari;
- mos \tilde{U}_{vk} - kuchlanish va \check{I}_{vk} - toklar orasidagi φ_{vk} - fazaviy siljishlar bo'yicha aniqlanadigan $\cos\varphi_{vk}$ - quvvat koeffitsiyenti.

Bizga m'lumki, Z_{vk} - yuklamasidagi $\check{I}_{vk}(t)$ - sinusoidal tok va $\tilde{U}_{vk}(t)$ - kuchlanishlar davriyligi T bo'lgan quyidagi munosabatlar orqali aniqlanadi:

$$\check{I}_{vk}(t) = I_{vk}^{max} \sin(\omega t + \alpha_{vk}); \quad (1)$$

$$\tilde{U}_{vk}(t) = U_{vk}^{max} \sin(\omega t + \psi_{vk}); \quad (2)$$

$$k = \overline{1,3}, v = \overline{1,n};$$

bu yerda $I_{vk}^{max}, U_{vk}^{max}, \alpha_{vk}, \psi_{vk}, \omega$ - mos ravishda tok va kuchlanishlarning amplitudasi, fazasi va davriy chastotasi (bundan, $I_{vk}^{max} = \sqrt{2}I_{vk}, U_{vk}^{max} = \sqrt{2}U_{vk}, \omega = 2\pi T^{-1}$).

(1) va (2)-ifodalar asosida ularning kompleks shaklidagi ko'rinishlarini ekvivalent tarzida hisoblaymiz:

$$\check{I}_{vk} = I_{vk}^B + jI_{vk}^M = I_{vk} e^{j\alpha_{vk}}; \quad (3)$$

$$\check{U}_{vk} = U_{vk}^B + jU_{vk}^M = U_{vk} e^{j\psi_{vk}}; \quad (4)$$

$$k = \overline{1,3}, v = \overline{1,n};$$

bu yerda, B va M belgilari mos ravishda kompleks o'zgaruvchilarning haqiqiy va mavhum qismlarini ifodalaydi hamda bundan, $j = \sqrt{-1}$ - mavhum son hisoblanadi.

Quyidagi kompleks vektorlar sistemasini kiritamiz:

$$\begin{aligned} \check{I}_k &= [\check{I}_{0k}, \check{I}_{1k}, \dots, \check{I}_{nk}]; \\ \check{i}_k &= [\check{i}_{1k}, \check{i}_{2k}, \dots, \check{i}_{n-1,k}]; \\ \check{U}_k &= [\check{U}_{0k}, \check{U}_{1k}, \dots, \check{U}_{nk}]; \\ \check{u}_k &= [\check{u}_{1k}, \check{u}_{2k}, \dots, \check{u}_{n-1,k}]; \\ \check{u} &= [\check{u}_1, \check{u}_2, \dots, \check{u}_{n-1}]; \\ \check{J} &= [\check{J}_1, \check{J}_2, \dots, \check{J}_{n-1}]; \\ k &= \overline{1,3}. \end{aligned} \quad (5)$$

Ko'rib chiqilayotgan taqsimlovchi elektr tarmoqning to'liq joriy holati t - ixtiyoriy vaqt momentida yuqorida ko'rsatilgan vektorlar orqali aniqlaymiz hamda ushbu vektorlarni qalin harflar bilan belgilaymiz. Shuningdek, bundan keyin ularning komponentlarini *tarmoq holatining o'zgaruvchilari* deb ataymiz. Bundan tasavvur qilamizki, $t \in [t_1, t_2]$ - vaqt momentida Eh_{vk} - elektr hisoblagichlar so'rovi orqali ma'lumotlar bazasiga o'lchov natijalarini, ya'ni \check{I}_k, \check{U}_k - vektor komponentalarining modullari va tegishli $\cos\varphi_{vk}$ ($k = \overline{1,3}, v = \overline{1,n}$) - quvvat koeffitsiyentlari uzatiladi. Shu bilan birga, ushbu ma'lumotlar asosida ko'rib chiqilayotgan uch fazali tarmoqning modelini qurish va uning ish holatidagi o'lchashi qiyin hamda nazorat qilib bo'lmaydigan o'zgaruvchilarni aniqlash, ya'ni $\check{i}_k, \check{J}, \check{u}_k$ va \check{u} - vektorlarining komponentlarini baholash talab etiladi [15-19].

3. Adabiyot tahlili (Literature analysis)

[1] adabiyot tahliliga ko'ra, maqolada 1 kV kuchlanishgacha bo'lgan elektr tarmoqlarida nazorat qilinmaydigan elektr energiyasi iste'molini tezkor aniqlash usullari tadqiq qilinib, uning asosiy yo'nalishlariga quyidagilar kiradi, ya'ni tarmoqdagi tok va kuchlanish holatlarini tezkor monitoring qilish; fider va transformator punktlarida energiya balansini aniq hisoblash; fazalar bo'yicha toklar nosimmetriyasi asosida noqonuniy ulanishlarni topish; hisoblagich ma'lumotlari va real vaqtdagi



o'lashlarni solishtirish orqali iste'moldagi nomutanosiblikni aniqlash. Bu ish amaldagi elektr tarmoqlarida isroflarni qisqartirish va nazoratsiz iste'molni aniqlash uchun qo'llaniladigan muhandislik usullariga qaratilgan bo'lib, qaralayotgan maqola uchun bevosita algoritmlar bermasa ham, real 0,4 kV kuchlanishli tarmoqlarning fizik va ekspluatatsion xususiyatlarini modellashtirish uchun muhim nazariy va amaliy asoslarni taqdim etadi.

Shuningdek, [2] adabiyotda mualliflar tomonidan "0,4 kV kuchlanishli taqsimlovchi tarmoqlar holati" identifikatsiyasi masalalari ko'rib chiqilgan, ya'ni tarmoqning nominal, ishdan chiqqan va boshqa turli holatlari tasniflanadi. Ushbu identifikatsiya natijasida texnik va iqtisodiy isroflarni kamaytirish, aniqlikni yaxshilash maqsad qilinadi. Bundan tashqari, [3] materialda 0,4 kV nesimmetrik tarmoqlarda isroflarni kamaytirishga yo'naltirilgan muhim va amaliy yondashuvlar taklif qilingan. Mualliflar tomonidan keltirilgan modellashtirish va nazorat algoritmi tadqiq qilinayotgan ushbu maqola uchun yaxshi baza hisoblanib, uning ba'zi jihatlari kengaytirish hamda chuqurlashtirish imkoniyatlari mavjud. Biroq, joriy etishda texnik, iqtisodiy va amaliy muammo-larga e'tibor berish zarur.

[4] adabiyotda Kosouxov va mualliflar jamoasi 0,38 kV kuchlanishli kommunal-maishiy iste'molchilar bilan ishlaydigan tarqatish tarmoqlaridagi toklar nosimmetriyasi, kuchlanishning buzilishi, quvvat isroflari va elektr energiyasi sifati yomonlashuvi muammolarini o'rganadi. Tadqiqotda quyidagi omillar asosiy sabab sifatida ko'rsatiladi, ya'ni bir fazali maishiy yuklamalarning notekis taqsimlanishi; nol simdagi tokning oshishi; kuchlanishning 2- va 3-garmonikalar bilan buzilishi; ko'p qavatli uy-joy massivlarida yuklamaning vaqt bo'yicha keskin o'zgaruvchanligi. Mualliflar amaliy o'lchovlar asosida tarmoqdagi nosimmetriya natijasida aktiv quvvat isroflari 10-15% gacha ortishi mumkinligini ko'rsatadi.

[5] adabiyot bo'yicha mualliflar tomonidan quyidagi hisoblash qadamlari taklif qilinadi: tarmoqlarning fazalar bo'yicha parametrlarini ajratish, bunda 0,4 kV tarmoqlarda A, B, C fazalar bo'yicha alohida olinishi lozim; transformatorning simmetrik komponentlar bo'yicha ekvivalent modeli, bu aynan teskari va nol ketma-ketlik qarshiliklari modellashtirishda muhim; tarmoqqa ulangan bir fazali iste'molchilarni mustaqil yuklama sifatida elementarni modellashtirish, bu 0,4 kV kuchlanishli tarmoqlar uchun eng muhim metodik tamoyildir; iteratsion hisoblash, bunda nosimmetrik rejimlarda toklar va kuchlanishlar o'zaro bog'liq bo'lib, tizim noxiziqlik xarakterga ega — shuning uchun iteratsion yondashuv talab etiladi.

[6] adabiyotda Kochergin va hammualliflar qishloq hududlarida keng tarqalgan 10/0,4 kV kuchlanishli taqsimlovchi elektr tarmoqlarining energetik xolatini modellashtirish hamda tarmoq-dagi yuklamalarning nosimmetriyasi, kuchlanish pasayishi va fazalar bo'yicha disbalanslarni aniq hisoblash uchun matematik yondashuv ishlab chiqishni maqsad qilgan. Garchi maqolada umumiy tarmoq modellashtirishi asosiy mavzu bo'lsada, uning natijalari 0,4 kV nosimmetrik tarmoqlarni modellashtirishga bevosita tatbiq qilinadi.

[7] material bo'yicha, Arutyunyan tadqiqotida asosiy e'tibor quyidagi masalaga qaratilgan, ya'ni: uch fazali to'rt simli tarqatuvchi tarmoqlarda nosimmetriya va neytral simdan tok oqishi natijasida yuzaga keladigan qo'shimcha quvvat isroflarni aniq hisoblash. Bu turdagi isroflar standart simmetrik rejimlardagi isroflarga qo'shilmaydi, lekin amalda juda muhim ahamiyatga ega, chunki maishiy va kichik sanoat iste'molchilari juda ko'p hollarda nosimmetrik yuklama tushadi.

[8] adabiyot asosida, Xlebnikov va Podgorniy 0,38 kV (amalda 0,4 kV) past kuchlanishli taqsimlovchi tarmoqlarda elektr energiyasi isroflarini hisoblashning aniqlashtirilgan usulini taklif qiladilar. Bundan maqsad — tok va kuchlanishlarning real o'lchovlari hamda tarmoqning sxematik (kabel uzunliklari, sim markalari, faza yuklamasi va h.k.) ma'lumotlariga tayanadigan va isbotlangan hisoblash algoritmini yaratish. Bu usul nosimmetrik yuklama holatlarida aniq isroflar hisobini berishga qodirdir.

[9] adabiyot tahliliga ko'ra, Omorov va Takirbashevning maqolasi 0,4 kV kuchlanishli tarmoqlarda texnik isroflarni aniqlash va monitoring qilish uchun juda muhim hamda amaliy yondashuvni taqdim etadi. Ularning matematik modeli, identifikatsiya algoritmi va ENHAT bilan integratsiya imkoniyatlari, ko'rilayotgan maqola uchun katta nazariy va amaliy ahamiyatga ega.

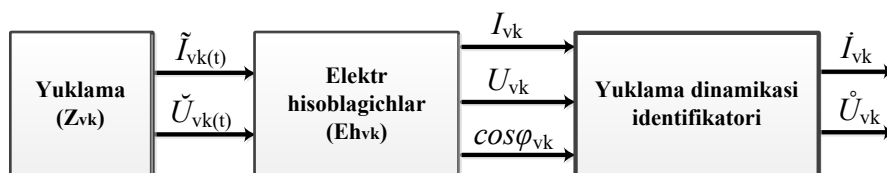
Qaralayotgan ushbu maqolada 0,4 kV kuchlanishli uch fazali taqsimlovchi tarmoqni elektr o'lchov kattaliklarini nosimmetriya sharoitida hamda ENHAT joriy etilgan holda ko'rib chiqilgan. Bunda, ENHATning asosiy vazifasi — elektr energiyasining tijorat hisobini avtomatik yuritishdan iboratdir. Shu bilan birga, tizim samaradorligini oshirish maqsadida uning tarkibiga kiruvchi 0,4 kV kuchlanishli taqsimlovchi elektr tarmoqning holatini tezkor monitoring va tahlil (diagnostika) qilish hamda uning ish rejimida optimallashtirish kabi funksional vazifalarni kiritish eng dolzarb hisoblanadi. Ko'rsatilgan vazifalarni hal etishning asosini matematik modellar va usullar tashkil etadi. Ular real vaqt rejimida uch fazali tarmoqning o'lchanmaydigan va nazorat qilinmaydigan o'zgaruvchilari (tok va kuchlanishlar)ni aniqlashni ta'minlaydi. Bu esa tarmoqning elektr energiyasi sifat ko'rsatkichlarini, jumladan, amaldagi elektr energiyasi isroflarini baholash hamda o'lchov ma'lumotlaridan foydalangan holda magistral liniya parametrlari (qarshiliklari)ning joriy qiymatlarini

aniqlash imkonini beradi. Ushbu maqsad yo'lida ma'lum model va usullardan foydalanish ba'zi qiyinchiliklarni keltirib chiqaradi. Bu esa, taqsimlovchi elektr tarmoq ish rejimida kuchlanish nosimmetriyasi hamda tarmoqda kechayotgan jarayonlarni matematik tavsiflash uchun dastlabki ma'lumotlarning to'liq emasligi va noaniqligi bilan bog'liqdir. Ushbu masalalarni echish maqsadida, nosimmetrik uch fazali tarmoq modelini qurish va undagi o'lchash imkoni bo'lmagan elektr o'zgaruvchilarini real vaqt rejimida aniqlash uslubiyati taklif etilgan. Olingan natijalar ENHAT tarkibida qo'llanilishiga yo'naltirilgan bo'lib, ular orqali taqsimlovchi elektr tarmoqning elektr holatini tezkor monitoring va tahlil qilish hamda tarmoqdagi elektr energiyasi isroflarini baholash imkoni yaratiladi [16-23].

4. Usullar va materiallar (Methods and materials)

Tadqiqot yo'lida shuni ta'kidlash lozimki, elektr hisoblagichdan olingan o'lchov ma'lumotlari maqola maqsadi uchun qo'yilgan masalani yechish uchun yetarli emas. Ushbu masalani yechish maqsadida shunday usulni topish zarurki, u mavjud boshlang'ich ma'lumotlarni (3) va (4)-ifodalarda bayon etilganidek, Z_{vk} - yuklamalaridagi kompleks tok va kuchlanishlarga aylantirish imkonini bersin. Bu esa, tarmoq holatining izlanayotgan o'zgaruvchilarini aniqlash uchun Kirxgof qonunlarini to'g'ri qo'llash imkonini beradi.

Maqola tadqiqidan asosiy maqsad quyidagilardan iborat, ya'ni avvalo $\cos\varphi_{vk}$ - quvvat koeffitsiyenti haqidagi ma'lumotlar asosida \tilde{I}_{vk} - tok hamda \tilde{U}_{vk} - kuchlanishlarning α_{vk} va ψ_{vk} - fazaviy o'zgarishlari aniqlanadi. So'ngra, ushbu ma'lumotlar uch fazali tarmoqning Z_{vk} - yuklamalar holatini tavsiflovchi \tilde{I}_{vk} va \tilde{U}_{vk} kompleks o'zgaruvchilarning haqiqiy hamda mavhum qismlarini topish uchun qo'llaniladi. Ko'rilayotgan hisoblashlarni amalga oshirish uchun maxsus o'zgartirgich – konsentrator tarkibidagi hisoblash (dasturiy) modulidan foydalanishni taklif qilamiz. Uni *yuklama dinamikasi identifikatori* deb atashadi. Yuklama dinamikasi identifikatori elektr qabul qilgichlardagi mustahkamlashgan jarayonlarni tiklash uchun mo'ljallangan bo'lib, yuklama dinamikasi identifikatoridan foydalangan holda ma'lumotlarni transformatsiya qilish sxemasi 2-rasmda ko'rsatilgan.



2-rasm. Ma'lumotlarni transformatsiyalash sxemasi
Fig.2. Data Transformation Scheme

Bundan tashqari, yuklama dinamikasi identifikatorining chiqish o'zgaruvchilari uch fazali tarmoq holatlari bo'yicha ko'rilayotgan o'zgaruvchilarni baholash uchun qo'llaniladi. Natijada, ko'rib chiqilayotgan vazifani hal qilish quyidagi asosiy bosqichlarni o'z ichiga oladi:

1. Eh_{vk} – elektr hisoblagich yordamida o'lchash ma'lumotlarini to'plash va ularni ma'lumotlar bazasi bazasiga yozish.
2. Yuklama dinamikasi identifikatorini tahlil qilish.
3. Uch fazali tarmoq magistral liniyaning abonentlari orasidagi uchashtalar holatini aniqlaydigan tok va kuchlanishlarini baholash.

Maqola bo'yicha qo'yilgan vazifalarni ko'rib chiqib, avvalo yuklama dinamikasi identifikatorini tahlil qilamiz. Qo'yilgan vazifa shartlariga ko'ra, tarmoq abonentlariga o'rnatilgan Eh_{vk} - elektr hisoblagichlar faqat \tilde{I}_{vk} - tok va \tilde{U}_{vk} - kuchlanishlarning amaliy qiymatlarini o'lchaydi hamda ularning α_{vk} - fazaviy burchaklari va ψ_{vk} - noma'lum kattaliklari hisoblanadi. Bunda, ular nosimmetrik uch fazali tarmoq uchun quyidagi ifodalar orqali aniqlanadi [16-17]:

$$\begin{aligned}
 \alpha_{v1} &= \tilde{\alpha}_{v1}; \\
 \alpha_{v2} &= \tilde{\alpha}_{v2} - 2\pi/3; \\
 \alpha_{v3} &= \tilde{\alpha}_{v3} - 4\pi/3; \\
 \psi_{v1} &= \tilde{\psi}_{v1}; \\
 \psi_{v2} &= \tilde{\psi}_{v2} - 2\pi/3; \\
 \psi_{v3} &= \tilde{\psi}_{v3} - 4\pi/3;
 \end{aligned} \tag{6}$$

bu yerda $\tilde{I}_{vk} = \frac{I_{vk}}{I_{vk}}$; $\tilde{U}_{vk} = \frac{U_{vk}}{U_{vk}}$; $k = \overline{1,3}$; $v = \overline{1,n}$.

(6)-ifodalarga kiruvchi $\tilde{\alpha}_{vk}$ va $\tilde{\psi}_{vk}$ noma'lum kattaliklarni topamiz. Buning uchun quyidagi yangi kompleks o'zgaruvchilarni kiritamiz:

$$\tilde{\psi}_{vk} = \varphi_{vk} + \tilde{\alpha}_{vk}; \quad k = \overline{1,3}; \quad v = \overline{1,n}.$$

bu yerda I_{vk} , U_{vk} – belgilangan o'zgarmaslar (konstantalar) bo'lib, ular bazaviy (nominal) tok va

kuchlanish qiymatlarini aniqlovchi berilgan o'zgarmlar hisoblanadi. Bundan, ularning qiymatlari quyidagi shartlarga muvofiq bo'lishi kerak:

$$\begin{aligned} U_{vk} &= Z_{vk} I_{vk}; \\ k &= \overline{1,3}; \quad v = \overline{1,n}. \end{aligned} \quad (7)$$

bu yerda $z_{vk} = U_{vk}/I_{vk}$.

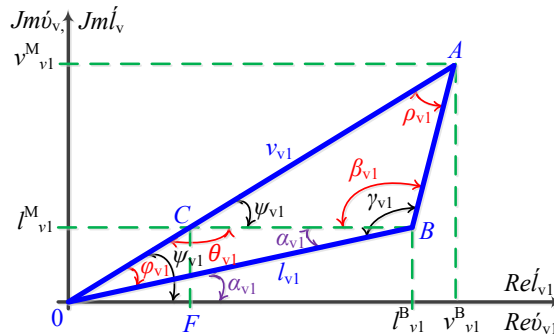
Shunda, nisbiy kompleks o'zgaruvchilar quyidagi shaklda bo'ladi:

$$\begin{aligned} \dot{i}_{vk} &= l_{vk}^B + j l_{vk}^M = l_{vk} e^{j\alpha_{vk}}; \\ \dot{v}_{vk} &= v_{vk}^B + j v_{vk}^M = v_{vk} e^{j\psi_{vk}}, \quad k = \overline{1,3}, \quad v = \overline{1,n}. \end{aligned}$$

Bundan, ularning modullari quyidagicha aniqlanadi:

$$l_{vk} = \frac{i_{vk}}{i_{vk}}, \quad v_{vk} = \frac{\dot{v}_{vk}}{v_{vk}}.$$

Yuqorida keltirilganlar asosida, avvalo A ($k = 1$) fazasiga ulangan Z_{v1} yuklamalardagi \dot{U}_{v1} oniy kuchlanishlarning $\psi_{v1} = \check{\psi}_{v1}$ faza siljish burchaklarni aniqlash masalasini ko'rib chiqamiz. Bunda, i_{v1} va \dot{v}_{v1} kompleks o'zgaruvchilarning geometrik tasviri 3-rasmda ko'rsatilgan (bu yerda $AO = u_{v1}$ va $BO = l_{v1}$ lar ham mavjud).



3-rasm. i_{v1} va \dot{v}_{v1} kompleks o'zgaruvchilarning geometrik tasviri

Fig.3. Geometric representation of the complex variables i_{v1} and \dot{v}_{v1}

Tasvir ma'lumotlari asosida, AB segmenti va ρ_{v1} burchagini kosinuslar teoremasi bo'yicha hisoblab chiqamiz [19-20]:

$$\begin{aligned} AB &= \sqrt{v_{v1}^2 + l_{v1}^2 - 2v_{v1}l_{v1}\cos\varphi_{v1}}; \\ \rho_{v1} &= \arccos\left(\frac{v_{v1}^2 + AB^2 - l_{v1}^2}{2v_{v1}AB}\right). \end{aligned} \quad (8)$$

Shuningdek, mos burchaklar uchun quyidagi ifodalarni to'g'ri keladi:

$$\begin{aligned} \gamma_{v1} &= \pi - (\rho_{v1} + \varphi_{v1}); \\ \beta_{v1} &= \gamma_{v1} - \alpha_{v1}; \\ \theta_{v1} &= \pi - \psi_{v1}. \end{aligned} \quad (9)$$

Ko'rilayotgan fazalar oralig'idagi ψ_{v1} burchaklarni aniqlash maqsadida, quyidagi munosabatni ko'rib chiqamiz:

$$AO = OC + CA; \quad (10)$$

bu yerda, AO kesimi ma'lum kattalik bo'lib, uning moduli \dot{v}_{vk} ga teng, ya'ni $AO = v_{v1}$.

Bundan, OC va CA kesmalarini aniqlaydigan ifodalarni topish zarur. CA ni topish uchun CAB uchburchak bo'yicha sinuslar teoremasidan foydalanamiz [18-19]:

$$\begin{aligned} \frac{CA}{\sin\beta_{v1}} &= \frac{AB}{\sin\psi_{v1}}. \end{aligned}$$

Shundan kelib chiqib, (9) va $\alpha_{v1} = \psi_{v1} - \varphi_{v1}$ ni hisobga olgan holda, quyidagiga ega bo'lamiz:

$$CA = \frac{AB\sin\beta_{v1}}{\sin\psi_{v1}} = \frac{AB\sin(\gamma_{v1} - \alpha_{v1})}{\sin\psi_{v1}} = \frac{AB\sin(\psi_{v1} + \rho_{v1})}{\sin\psi_{v1}}. \quad (11)$$

OC kesmani aniqlash uchun OCF uchburchakni ko'rib chiqamiz. 3-rasmda keltirilgan tasvir bo'yicha: $CF = l_{v1}^M = l_{v1}\sin\alpha_{v1}$. U holda OC kesmani quyidagi ifoda yordamida hisoblaymiz:

$$OC = \frac{CF}{\sin\psi_{v1}} = \frac{l_{v1}\sin(\psi_{v1} - \varphi_{v1})}{\sin\psi_{v1}}. \quad (12)$$

Natijasida, (11) va (12)-ifodalarni inobatga olgan holda, (10)-ifodadan quyidagiga ega bo'lamiz.

$$v_{v1} = \frac{l_{v1}\sin(\psi_{v1} - \varphi_{v1})}{\sin\psi_{v1}} + \frac{AB\sin(\psi_{v1} + \rho_{v1})}{\sin\psi_{v1}}. \quad (13)$$

Bizga trigonometriyadan ma'lumki,

$$\begin{aligned} \sin(\psi_{v1} - \varphi_{v1}) &= \sin\psi_{v1}\cos\varphi_{v1} - \cos\psi_{v1}\sin\varphi_{v1}; \\ \sin(\psi_{v1} + \rho_{v1}) &= \sin\psi_{v1}\cos\rho_{v1} + \cos\psi_{v1}\sin\rho_{v1}; \end{aligned} \quad (14)$$

Bundan, (14)-ifodani (13)ga qo'yish orqali, quyidagi tenglikni olamiz:

$$v_{v1}\sin\psi_{v1} = l_{v1}(\sin\psi_{v1}\cos\varphi_{v1} - \cos\psi_{v1}\sin\varphi_{v1}) + AB(\sin\psi_{v1}\cos\rho_{v1}\cos\psi_{v1}\sin\rho_{v1}). \quad (15)$$

Soddalashtirishlardan so'ng, (15)-tenglik asosida quyidagi munosabatlarni yozish mumkin.

$$q_{v1}\sin\psi_{v1} = f_{v1}\cos\psi_{v1}, \quad v = \overline{1,n}. \quad (16)$$



bu yerda, q_{v1}, f_{v1} – keltirilgan ifoda orqali aniqlanadigan ma'lum koeffitsientlar:

$$\begin{aligned} q_{v1} &= ABC \cos \rho_{v1} - u_{v1} + l_{v1} \cos \varphi_{v1}, \\ f_{v1} &= l_{v1} \sin \varphi_{v1} - AB \sin \rho_{v1}. \end{aligned}$$

(16)-ifodaning chap tomonini $\cos \psi_{v1} \neq 0$ ga bo'lish orqali, noma'lum faza siljishlarini ψ_{v1} ga nisbatan quyidagi tenglamalarini olamiz:

$$tg(\psi_{v1}) = \lambda_{v1}, \quad v = \overline{1, n}. \quad (17)$$

bu erda, $\lambda_{v1} = -f_{v1}/q_{v1}$.

Natijada, (17)-ifoda echimlari asosida ko'rilayotgan ψ_{v1} faza siljishlari quyidagi asosiy $arctg(\lambda_{v1})$ ifoda orqali aniqlanadi:

$$\psi_{v1} = arctg(\lambda_{v1}), \quad v = \overline{1, n}. \quad (18)$$

Bunda, α_{v1} faza siljishi quyidagi ifoda bilan topiladi:

$$\alpha_{v1} = \psi_{v1} - \varphi_{v1}, \quad v = \overline{1, n}.$$

Natijada, Z_{v1} ($v = \overline{1, n}$) yuklamadagi kompleks \dot{I}_{v1} tok va \dot{U}_{v1} kuchlanishlarning ko'rilayotgan I_{v1}^B, U_{v1}^B haqiqiy va I_{v1}^M, U_{v1}^M mavhum qismlari quyidagi ifodalar orqali aniqlanadi:

$$\begin{aligned} I_{v1}^B &= I_{v1}^* l_{v1}^B = I_{v1}^* l_{v1} \cos \alpha_{v1}, \\ I_{v1}^M &= I_{v1}^* l_{v1}^M = I_{v1}^* l_{v1} \sin \alpha_{v1}, \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} U_{v1}^B &= U_{v1}^* v_{v1}^B = U_{v1}^* v_{v1} \cos \psi_{v1}, \\ U_{v1}^M &= U_{v1}^* v_{v1}^M = U_{v1}^* v_{v1} \sin \psi_{v1}, \quad v = \overline{1, n}. \end{aligned} \quad (20)$$

Keltirilgan metodika asosida, V va S fazalariga ulangan Z_{vk} ($k = 2, 3, v = \overline{1, n}$) yuklamalardagi kompleks \dot{I}_{vk} tok va \dot{U}_{vk} kuchlanishlarning parametrlari (fazaviy siljishlar, haqiqiy va mavhum qismlar) aniqlanishi mumkin.

Shu bilan birga, yuklama dinamikasi identifikatori parametrlari va tuzilishi (18)-(20) ifodalar asosida aniqlanadi. Yuklama dinamikasi identifikatorini amalga oshirish ma'lumotlar konsentratori tarkibida dasturiy yo'l bilan bajariladi va u mikroprotsektor tizimi asosida texnik jihatdan amalga oshiriladi.

5. Natijalar (Results)

Maqola doirasida qo'yilgan vazifa bo'yicha, 0,4 kV kuchlanishli uch fazali tarmoq magistral liniyaning holat o'zgaruvchilarini baholaymiz. Buning uchun yuklama dinamikasi identifikatoridan foydalanib, Kirxgof qonunlari asosida tarmoqning har qanday uzeli hisobga olgan holda magistral liniya holatining o'lchanmaydigan (nazorat qilinmaydigan) o'zgaruvchilarini aniqlash imkonini beradi. Buni abonent I_{vk} toki va U_{vk} kuchlanishlarining ($k = \overline{1, 3}, v = \overline{1, n}$) amaldagi qiymatlari asosida amalga oshirib bo'lmaydi. Ushbu maqsad yo'lida, taqsimlovchi elektr tarmoqning $[t_1, t_m]$ vaqt davridagi faoliyatini ko'rib chiqamiz. Bu yerda, t_1 va t_m – kuzatuvning boshlanish va tugash momentlari. Elektr hisoblagich orqali zarur ma'lumotlarni olish, ularni telekommunikatsiya moduli yordamida aloqa kanali bilan uzatish hamda ma'lumotlar konsentratorida qayta ishlash jarayoni $[t_\xi, t_{\xi+1}]$ ($\xi = \overline{1, m-1}$) vaqt intervallari davomida siklik tarzda amalga oshiriladi. Shuningdek, har bir $[t_\xi, t_{\xi+1}]$ modellashtirish siklida ko'rilayotgan $i_k = [i_{1k}, i_{2k}, \dots, i_{n-1,k}]$ vektorlar va $j = [j_1, j_2, \dots, j_{n-1}]$ komponentlar (3) va (19)-ifodalarini hisobga olgan holda, quyidagi ifodalar orqali aniqlanadi:

$$\begin{aligned} i_{vk} &= \sum_{\lambda=v}^n \dot{I}_{\lambda k} = \sum_{\lambda=v}^n (I_{\lambda k}^B + j I_{\lambda k}^M) = i_{vk}^B + j i_{vk}^M; \\ k &= \overline{1, 3}, \quad v = \overline{1, n}; \end{aligned} \quad (21)$$

$$j_v = i_{v1} + i_{v2} + i_{v3}, \quad v = \overline{1, n}. \quad (22)$$

Bundan:

$$i_{vk}^B = \sum_{\lambda=v}^n I_{\lambda k}^B, \quad i_{vk}^M = \sum_{\lambda=v}^n I_{\lambda k}^M. \quad (23)$$

bu yerda λ – tarmoqning elektr konturi raqami.

Yuqorida olingan natijalar, magistral liniya abonentlar orasidagi uchashtkalaridan oquvchi $\dot{I}_{vk}(t)$ va $\dot{J}_v(t)$ toklarni aniqlash imkonini beradi:

$$\begin{aligned} \dot{I}_{vk}(t) &= i_{vk}^{\max} \sin(\omega t + \eta_{vk}), \quad k = \overline{1, 3}, \quad v = \overline{1, n}; \\ \dot{J}_v(t) &= j_v^{\max} \sin(\omega t + \theta_v), \quad v = \overline{1, n}. \end{aligned}$$

Bundan, tegishli holat o'zgaruvchilarining i_{vk}^{\max} , j_v^{\max} amplitudalari hamda η_{vk} , θ_v fazalari yordamida aniqlangan i_{vk}^B haqiqiy va i_{vk}^M mavhum qismlariga asoslanib topiladi (23-ifodada ko'rsatilgan).

Shuningdek, magistral liniyaning abonentlar orasidagi uchashtkalar holatlarini tavsiflovchi \dot{u}_k va \dot{u} kuchlanish vektorlari komponentlarini identifikatsiyalash vazifasini ko'rib chiqamiz. Bunda, tarmoqning v -konturidagi \dot{u}_{vk} va \dot{u}_v kuchlanishlari Kirxgofning ikkinchi qonuniga mos keladi hamda quyidagicha yechiladi [20-23]:

$$\begin{aligned} \dot{u}_{vk} + \dot{u}_v + \dot{U}_{vk} - \dot{U}_{v-1,k} &= 0; \\ k &= \overline{1, 3}, \quad v = \overline{1, n}. \end{aligned} \quad (24)$$



(22)-ifoda va $i_{vk} = \dot{u}_{vk}/z_{vk}$ ni hisobga olgan holda, neytral sim uchastkasidagi \dot{u}_v kuchlanishni quyidagicha yozish mumkin:

$$\dot{u}_v = J_v z_v = (i_{v1} + i_{v2} + i_{v3}) z_v = \left(\frac{\dot{u}_{v1}}{z_{v1}} + \frac{\dot{u}_{v2}}{z_{v2}} + \frac{\dot{u}_{v3}}{z_{v3}} \right) z_v.$$

Bundan, ko'rilayotgan tarmoqda fazalar va neytral o'tkazgichlarning kesim yuzalari bir xil bo'lganida, tegishli qarshiliklarning ($z_{v1} = z_{v2} = z_{v3} = z_v$) ga tengligini anglatadi hamda \dot{u}_v kuchlanishi uchun quyidagi ifoda orqali topiladi:

$$\dot{u}_v = \dot{u}_{v1} + \dot{u}_{v2} + \dot{u}_{v3} = u_v^B + j u_v^M, \quad v = \overline{1, n}. \quad (25)$$

Shuningdek, (25)-ifoda asosida (24)-ifodani aniqlanayotgan \dot{u}_{vk} kuchlanishi bo'yicha chiziqli algebraik tenglamalar tizimi ko'rinishida ifodalash mumkin:

$$\begin{aligned} 2\dot{u}_{v1} + \dot{u}_{v2} + \dot{u}_{v3} &= \dot{b}_{v1}; \\ \dot{u}_{v1} + 2\dot{u}_{v2} + \dot{u}_{v3} &= \dot{b}_{v2}; \\ \dot{u}_{v1} + \dot{u}_{v2} + 2\dot{u}_{v3} &= \dot{b}_{v3}, \quad k = \overline{1, 3}, \quad v = \overline{1, n}. \end{aligned} \quad (26)$$

bu yerda $\dot{b}_{vk} - \dot{U}_{vk}$ kompleks kuchlanishning oldin aniqlangan tashkil etuvchilari asosida hisoblanadigan ma'lum kompleks koeffitsiyenti bo'lib, quyidagicha aniqlanadi:

$$\begin{aligned} \dot{b}_{v1} &= \dot{U}_{v-1,1} - \dot{U}_{v1} = b_{v1}^B + j b_{v1}^M; \\ \dot{b}_{v2} &= \dot{U}_{v-1,2} - \dot{U}_{v2} = b_{v2}^B + j b_{v2}^M; \\ \dot{b}_{v3} &= \dot{U}_{v-1,3} - \dot{U}_{v3} = b_{v3}^B + j b_{v3}^M. \end{aligned}$$

Bundan, ushbu koeffitsiyentlarning haqiqiy va mavhum qismlari quyidagi ifodalar orqali aniqlanadi:

$$\begin{aligned} b_{v1}^B &= U_{v-1,1}^B - U_{v1}^B, \quad b_{v1}^M = U_{v-1,1}^M - U_{v1}^M; \\ b_{v2}^B &= U_{v-1,2}^B - U_{v2}^B, \quad b_{v2}^M = U_{v-1,2}^M - U_{v2}^M; \\ b_{v3}^B &= U_{v-1,3}^B - U_{v3}^B, \quad b_{v3}^M = U_{v-1,3}^M - U_{v3}^M. \end{aligned}$$

Bundan ko'rinib turibdiki, (26)-tenlamalar tizimi determinantlari nolga teng emas ($\Delta=4$). Demak, ularning yagona yechimlari mavjud bo'lib, ularni aniq ko'rinishda yozish mumkin:

$$\begin{aligned} \dot{u}_{v1} &= (3\dot{b}_{v1} - \dot{b}_{v2} - \dot{b}_{v3})/4; \\ \dot{u}_{v2} &= (-\dot{b}_{v1} + 3\dot{b}_{v2} - \dot{b}_{v3})/4; \\ \dot{u}_{v3} &= (-\dot{b}_{v1} - \dot{b}_{v2} + 3\dot{b}_{v3})/4, \quad v = \overline{1, n}. \end{aligned} \quad (27)$$

Neytral simning tegishli qismlaridagi \dot{u}_v kompleks kuchlanishlar, aniqlangan \dot{u}_{v1} , \dot{u}_{v2} , \dot{u}_{v3} kuchlanishlarni (25)-ifodaning o'ng tomoniga qo'yish orqali aniqlanadi. Bu holda, ularning haqiqiy va mavhum qismlari quyidagi ifodalar orqali hisoblanadi:

$$\begin{aligned} u_v^B &= u_{v1}^B + u_{v2}^B + u_{v3}^B; \\ u_v^M &= u_{v1}^M + u_{v2}^M + u_{v3}^M; \end{aligned} \quad (28)$$

Tarmoqning joriy holatini identifikatsiya qilish natijasidan, uch fazali elektr tarmog'idagi texnik isroflarni hamda magistral liniya uchastkasi qarshiliklarining mavjud qiymatlarini baholash uchun foydalanish mumkin. Agar taqsimlovchi elektr tarmoq normal (oddiy) rejimda ishlasa, ξ -chi kuzatuv siklida tarmoqdagi umumiy texnik quvvat isroflari $\dot{P}(\xi)$ miqdoriga teng bo'ladi:

$$\dot{P}(\xi) = \dot{P}_0(\xi) + \dot{P}_1(\xi); \quad (29)$$

bu yerda, $\dot{P}_0(\xi)$ – neytral simdagi quvvat isrofi; $\dot{P}_1(\xi)$ – liniyaning fazalari simlaridagi umumiy quvvat isroflari.

$$\text{Bunda} \quad \dot{P}_0(\xi) = \sum_{v=1}^{n-1} \dot{p}_v(\xi) = \sum_{v=1}^{n-1} \dot{u}_v^*(\xi) J_v(\xi); \quad (30)$$

bu yerda, $\dot{p}_v(\xi)$ – neytral simning v -chi uchastkasidagi quvvat isrofi; $\dot{u}_v^*(\xi)$ – (25) va (28)-ifodalar orqali aniqlanadigan \dot{u}_v kompleks kuchlanishning juft qiymati; $J_v(\xi)$ – neytral simning v -chi uchastkasidan oqadigan va (22)-ifoda orqali topiladigan kompleks tok.

Liniya fazalari simlaridagi quvvat isrofi quyidagi ifoda orqali aniqlanadi:

$$\dot{P}_1(\xi) = \sum_{k=1}^3 \sum_{v=1}^{n-1} \dot{p}_{vk}(\xi) = \sum_{k=1}^3 \sum_{v=1}^{n-1} \dot{u}_{vk}^*(\xi) i_{vk}(\xi); \quad (31)$$

bu yerda, $\dot{p}_{vk}(\xi)$ – k -fazadagi v -chi konturning texnik quvvat isrofi; \dot{u}_{vk} – (27)-ifoda orqali aniqlangan \dot{u}_{vk} kompleks kuchlanishning biriktirilgan qiymati; $i_{vk}(\xi)$ – (21) va (23)-ifodalar orqali topiladigan abonentlar orasidagi uchastka tokining kompleks qiymati.

Shuningdek, taqsimlovchi elektr tarmoq abonentlari orasidagi uchastkadagi $z_{vk} = z_v$ kompleks qarshiliklarning amaldagi qiymatlarini Om qonuni asosida aniqlaymiz:

$$z_{vk} = \dot{u}_{vk}/i_{vk}, \quad k = \overline{1, 3}, \quad v = \overline{1, n}. \quad (32)$$

(32)-ifodada berilgan qarshilik baholari taqsimlovchi elektr tarmoqning asosiy liniyasidagi tegishli uchastka simlarining eskirish darajasi va ulanish nuqtalarida elektr energiyasi sifatini aniqlash imkonini beradi.

6. Tahlil va takliflar (Analysis and Recommendations)

Maqola doirasida tadqiqot natijasiga ko'ra, taqsimlovchi elektr tarmoqni modellashning umumlashtirilgan algoritmi quyidagi asosiy bosqichlarni o'z ichiga oladi:



1. 0,4 kV kuchlanishli uch fazali taqsimlovchi elektr tarmoq tuzilishini belgilash (masalan, 1-rasm kabi).
2. Taqsimlovchi elektr tarmoq abonentlari hamda transformator podstansiyasi chiqishida o'rnatilgan Eh_{vk} - elektr hisoblagichdan I_{vk} tok va \tilde{U}_{vk} ($k = \overline{1,3}, v = \overline{0,n}$) kuchlanishlarning haqiqiy qiymatlari va tegishli $\cos\varphi_{vk}$ quvvat koeffitsienti bo'yicha ma'lumotlarni olish.
3. (17)-(20) ifodalar asosida yuklama dinamikasi identifikatorini tahlil qilish.
4. Yuklama dinamikasi identifikatoridan foydalangan holda, (17)-(20) ifodalar asosida Z_{vk} ($k = \overline{1,3}, v = \overline{1,n}$) yuklamalardagi kompleks I_{vk} tok va \tilde{U}_{vk} ($k = \overline{1,3}, v = \overline{1,n}$) kuchlanishlarning haqiqiy va mavhum qismlarini baholash.
5. Uch fazali taqsimlovchi elektr tarmoqning magistral liniya abonentlariaro bo'limlardan oquvchi i_k va j_v ($k = \overline{1,3}, v = \overline{1,n}$) kompleks vektor toklarining i_{vk} va j_v komponentlarini (21)-(23) ifodalar asosida baholash.
6. Uch fazali taqsimlovchi elektr tarmoqning magistral liniya abonentlari orasidagi uchastkasi \dot{u}_k va \dot{u}_v ($k = \overline{1,3}, v = \overline{1,n}$) kompleks kuchlanishlarining \dot{u}_{vk} va \dot{u}_v komponentlarini (25)-(28) ifodalardan foydalanib baholash.
7. Tarmoqdagi $\dot{P}(\xi)$ texnik quvvat isrofini (29)-(31) ifodalar orqali baholash.

7. Xulosa (Conclusion)

0,4 kV kuchlanishli nosimmetrik taqsimlovchi elektr tarmoqlarning matematik modellashtirish tadqiqidan, maqola doirasida quyidagilar xulosa qilindi:

0,4 kV kuchlanishli uch fazali taqsimlovchi elektr tarmoq holatini modellashtirish va monitoring qilish masalasi, ENHAT tarkibida ko'rib chiqildi.

Magistral liniyadagi abonentlar orasidagi uchastkalarining elektr energiyasi sifatini belgilovchi, o'lganishi va nazorat qilinishi mumkin bo'lmagan tok va kuchlanishlarni real vaqt rejimida aniqlash usuli taklif qilindi.

Maqola tadqiqi uchun ko'rilayotgan taqsimlovchi elektr tarmoq nosimmetrik rejimda ishlaydi deb qabul qilindi va abonentlari orasidagi uchastka qarshiliklarining joriy qiymatlari noma'lum kattaliklar asosida hisoblandi.

Maqola tadqiqi uchun ko'rilayotgan usulning asosiy maqsadi – tarmoq abonentlarining elektr qabul qilgichlaridagi mustahkamlashgan jarayonlarni tasvirlovchi o'zgaruvchilarni tiklash konsepsiyasiga asoslandi. Ushbu jarayonda, ma'lumotlar elektr hisoblagichlardan aloqa kanallari orqali olindi. Tadqiqotni amalga oshirish jarayoni maxsus transformator – hisoblash moduli asosida bajariladi hamda uni yuklama dinamikasi identifikatori deb ataldi. Shuningdek, taklif qilingan usul 0,4 kV kuchlanishli taqsimlovchi elektr tarmoqlarni modellashtirish jarayonini soddalashtirish imkonini berdi hamda tok va kuchlanishlardagi nosimmetriya holatida uch fazali tarmoqlarni hisoblashning ma'lum usullaridagi kamchiliklarni bartaraf etishga imkon beradi.

Maqola tadqiqi asosida olingan natijalar, ENHAT tarkibidagi taqsimlovchi elektr tarmoq holatini modellashtirish va monitoring qilish tizimi uchun algoritmik hamda maxsus dasturiy ta'minot yaratishga qaratilgan bo'lib, mavjud taqsimlovchi elektr tarmoqlarning ish rejimi bo'yicha tahlil va optimizatsiya vazifalarini hal qilishda ham qo'llash mumkinligi asoslandi.

ADABIYOT

1. А.А.Сапронов, С.Л.Кужеков, В.Г.Тынянский. Оперативное выявление неконтролируемого потребления электроэнергии в электрических сетях напряжением до 1 кВ. //Иzv. вузов. Электромеханика. 2004, №1. – С.55-58.
2. Т.Т.Оморов, Б.К.Такырбашев. Идентификация состояния распределительной электрической сети в системах автоматизации учета и управления энергопотреблением. //Мехатроника, автоматизация, управление. 2016, №10. – С.651-656. DOI: 10.17587/mau.17.651-656.
3. Т.Т.Оморов, Б.К.Такырбашев. К проблеме оптимизации несимметричных режимов работы распределительных сетей. //Приборы и системы: управление, контроль, диагностика. – 2016, №6. – С.11-15.
4. Ф.Д.Косоухов, Н.В.Васильев, А.О.Филиппов. Снижение потерь от несимметрии токов и повышение качества электрической энергии в сетях 0,38 кВ с коммунальнобытовыми нагрузками. //Электротехника. 2014, №6. – С.8-12. DOI: 10.3103/S106837121406008X.
5. О.Н.Войтов, В.А.Мантров, Л.В.Семенова. Анализ несимметричных режимов электроэнергетических систем и управление ими. //Электричество. 1999, №10. – С.2-18.
6. С.В.Кочергин, А.В.Кобелев, Н.А.Хребтов, П.А.Киташин, К.И.Терехов. Моделирование сельских распределительных электрических сетей 10/0,4 кВ. //Fractalsimulation. 2013, №1. -С. 5-13.
7. А.Г.Арутюнян. О расчете дополнительных потерь мощности в трехфазных четырехпро-



- водных сетях. //Электричество. 2015, №10. – С.55-58.
8. В.К.Хлебников, Д.Э. Подгорный. Методика расчета потерь электроэнергии в сети 0,38 кВ по измерениям напряжений и токов с учетом схемно-технической информации. //Изв. вузов. Электромеханика. 2004, №6(1). – С.28-31.
9. Т.Т.Оморов, Б.К.Такырбашев. Идентификация и мониторинг потерь электроэнергии в распределительной сети в составе АСКУЭ. //Электричество. 2016, №11. – С.4-11.
10. O‘zbekiston Respublikasining 2024 yil 7-avgustdagi O‘RQ-940-son "Energiyani tejash, undan oqilona foydalanish va energiya samaradorligini oshirish to‘g‘risida"gi Qonuni.
11. O‘zDSt 1044:2003-son “Umumiy elektr ta‘minot uchun mo‘ljallangan tizimlarda elektr energiyasining sifat ko‘rsatkichlarini o‘lchash va analiz qilish usullari” davlat standarti, 18.07.2003.
12. И.В.Наумов, Г.В.Лукина, С.В.Сукьясов, и др. Методика расчета показателей несимметрии токов и напряжений в сети 0.38 кВ с симметрирующим устройством. //Вестник АлтГАУ им И.И. Ползунова. 2001, №2. – С.49-56.
13. В.В.Карчин, В.Т.Сидорова, А.Н.Леухин. Улучшение показателей качества электроэнергии в сельских распределительных сетях 0,4 кВ с помощью компенсации реактивной мощности. //Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2015, №(1-2). – С.61-67.
14. Г.В.Лукина, С.И.Бондаренко, Е.В.Самаркина. Экспериментальное исследование показателей качества электрической энергии на физической модели сети 0,38 кВ с симметрирующим устройством. // «Вестник ИрГСХА». 2016, №72. – С.138-146.
15. Н.В.Савина, Н.С.Бодруг. Проблемы нормирования качества электроэнергии при переходе на интеллектуальные электроэнергетические системы. //Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2016. №5-6. – С.19-26.
16. R.Ch.Karimov, D.Sh.Xushvaktov, D.X.Xalmanov. The problem of improving electrical energy quality indicators as an example of the economic development of Boysun district. /AIP Conference Proceedings 3152, 040024 (2024), <https://doi.org/10.1063/5.0218807>.
17. Sh.D.Dzhuraev, R.A.Rahimov, R.Ch.Karimov, et al. Study and Analysis of Power Quality in the Electrical Networks of the Outdoor Lighting of the Dushanbe City. Proceedings of the 2022 Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus 2022, pp.1167-1169. DOI: 10.1109/ElConRus54750.2022.9755782.
18. Л.В.Фетисов, Н.В.Роженцова, О.А.Булатов. Повышение качества электрической энергии в сетях низкого напряжения. //Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2018, №20(11-12). – С.99-106.
19. R.Ch.Karimov, M.K.Bobojanov, et al. Development and experimental study of circuits of contactless device for automation of compensation of reactive power of capacitor batteries. /E3S Web of Conferences 289, 07012 (2021), <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202128907012>.
20. О.С.Рахимов, Д.Н.Мирзоев, Е.И.Грачева. Экспериментальное исследование показателей качества и потерь электроэнергии в низковольтных сельских электрических сетях. //Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2021, Т.23. №3. – С.209-222. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-3-209-222.
21. Р.Ч.Каримов, Ш.Дж.Джураев, С.Т.Исмоилов, Д.Ш.Хушвактов. Исследование качества электроэнергии в системе электроснабжения потребителей напряжением 0,4 кВ. //Научный журнал «Проблемы энерго- и ресурсосбережения» (ISSN: 2091-5985). 2023, №4. – С.172-182.
22. R.Ch.Karimov, D.Sh.Xushvaktov. Past kuchlanishli elektr iste'molchilarda elektr energiyasi sarfini hisoblash dasturi. O‘zbekiston Respublikasi Adliya Vazirligi tomonidan EHM uchun yaratilgan dasturning rasmiy ro‘yxatdan o‘tkazilganligi to‘g‘risida №DGU 45043-sonli guvohnomasi. 04.12.2024 yil.
23. M.K.Bobojanov, E.G.Usmanov, R.Ch.Karimov. 0,4 kV kuchlanishli tarmoqlarda elektr energiyasi sifatini yaxshilash va tahlil qilishda innovatsion yondashuvlar. //Energiya va resurs tejash muammolari, (ISSN: 2091-5985). 2025, №3, 58-74 betlar.

REFERENCES

1. A.A.Sapronov, S.L.Kuzhekov, V.G.Tynyansky. Operational Detection of Uncontrolled Electricity Consumption in Electrical Networks with Voltage up to 1 kV. Proceedings of Higher Educational Institutions. Electromechanics, 2004, №1, pp. 55-58.
2. Т.Т.Оморов, В.К.Такырбашев. Identification of the State of a Distribution Electrical Network in Automated Energy Metering and Management Systems. Mechatronics, Automation, Control. 2016, №10. pp. 651-656. DOI: 10.17587/mau.17.651-656.
3. Т.Т.Омаров, В.К.Такырбашев. On the Problem of Optimizing Asymmetrical Operating Modes of Distribution Networks. Instruments and Systems: Control, Monitoring, Diagnostics. – 2016, №6. pp. 11-15.
4. F.D.Kosoukhov, N.V.Vasiliev, A.O.Filippov. Reduction of Losses Due to Current Asymmetry



and Improvement of Power Quality in 0.38 kV Networks with Residential and Utility Loads. *Electrotechnics*, 2014, №6, pp. 8-12. DOI: 10.3103/S106837121406008X.

5. O.N.Voitov, V.A.Mantrov, L.V.Semenova. Analysis of Asymmetrical Operating Modes of Electric Power Systems and Their Control. *Electricity*. 1999, №10, pp. 2-18.

6. S.V.Kochergin, A.V.Kobelev, N.A.Khrebto, P.A.Kitashin, K.I.Terekhov. Modeling of Rural Distribution Electric Networks 10/0.4 kV. *Fractalsimulation*. 2013, №1, pp. 5-13.

7. A.G.Arutyunyan. On the Calculation of Additional Power Losses in Three-Phase Four-Wire Networks. *Elektrichestvo*, 2015, №10, pp. 55-58.

8. V.K.Khlebnikov, D.E.Podgorny. Methodology for Calculating Energy Losses in a 0.38 kV Network Based on Voltage and Current Measurements with Consideration of Circuit and Technical Information. *Izvestiya VUZov. Elektromekhanika*. 2004, №6(1), pp. 28-31.

9. T.T.Omorov, B.K.Takyrbashev. Identification and Monitoring of Power Losses in a Distribution Network as Part of an Automated Electricity Metering System. *Electricity*, 2016, №11, pp. 4-11.

10. Law of the Republic of Uzbekistan №O'RQ-940 of 7 August 2024 "On Energy Saving, Rational Use of Energy, and Improving Energy Efficiency".

11. O'zDSt 1044:2003 — "Methods for Measuring and Analyzing Power Quality Indicators in Systems Intended for General Power Supply" state standard, 18.07.2003.

12. I.V.Naumov, G.V.Lukina, S.V.Sukyayov, et al. Methodology for Calculating Indicators of Current and Voltage Unbalance in a 0.38 kV Network with a Symmetrizing Device. *Bulletin of Altai State Technical University named after I.I. Polzunov*. 2001, №2, pp. 49-56.

13. V.V.Karchin, V.T.Sidorova, A.N.Leukhin. Improving Power Quality Indicators in 0.4 kV Rural Distribution Networks Through Reactive Power Compensation. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Problems of Energy*. 2015, №1-2, pp. 61-67.

14. G.V.Lukina, S.I.Bondarenko, E.V.Samarkina. Experimental Study of Power Quality Indicators on a Physical Model of a 0.38 kV Network with a Symmetrizing Device. *Bulletin of Irkutsk State Agricultural Academy*, 2016, №72, pp. 138-146.

15. N.V.Savina, N.S.Bodrug. Problems of Power Quality Standardization During the Transition to Intelligent Energy Systems. *Proceedings of Higher Educational Institutions. ENERGY PROBLEMS*, 2016, №5-6, pp. 19-26.

16. R.Ch.Karimov, D.Sh.Xushvaktov, D.X.Xalmanov. The problem of improving electrical energy quality indicators as an example of the economic development of Boysun district. *AIP Conference Proceedings* 3152, 040024 (2024), <https://doi.org/10.1063/5.0218807>.

17. Sh.D.Dzhuraev, R.A.Rahimov, R.Ch.Karimov, et al. Study and Analysis of Power Quality in the Electrical Networks of the Outdoor Lighting of the Dushanbe City. *Proceedings of the 2022 Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus 2022*, pp.1167-1169. DOI: 10.1109/ElConRus54750.2022.9755782.

18. L.V.Fetisov, N.V.Rozhentsova, O.A.Bulatov. Improving the Quality of Electrical Energy in Low-Voltage Networks. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Problems of Power Engineering*. 2018, №20(11-12), pp. 99-106.

19. R.Ch.Karimov, M.K.Bobojanov, et al. Development and experimental study of circuits of contactless device for automation of compensation of reactive power of capacitor batteries. *E3S Web of Conferences* 289, 07012 (2021), <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202128907012>.

20. O.S.Rakhimov, D.N.Mirzoev, E.I.Gracheva. Experimental Study of Power Quality Indicators and Energy Losses in Low-Voltage Rural Electric Networks. *Proceedings of Higher Educational Institutions. ENERGY PROBLEMS*. 2021, Vol. 23, №3, pp. 209-222. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-3-209-222.

21. R.Ch.Karimov, Sh.Dj.Dzhuraev, S.T.Ismoilov, D.Sh.Khushvaktov. Investigation of Power Quality in the 0.4 kV Consumer Power Supply System. *Scientific Journal "Problems of Energy and Source Saving"* (ISSN: 2091-5985). 2023, №4, pp. 172-182.

22. R.Ch.Karimov, D.Sh.Khushvaktov. Program for Calculating Electricity Consumption in Low-Voltage Consumers. Officially registered by the Ministry of Justice of the Republic of Uzbekistan for computer use under certificate №DGU 45043, dated 04.12.2024.

23. M.K.Bobojanov, E.G.Usmanov, R.Ch.Karimov. Innovative Approaches to Improving and Analyzing the Quality of Electric Power in 0.4 kV Networks. *Problems of Energy and Source Saving* (ISSN: 2091-5985), 2025, №3, pp. 58-74.