



# 0,4–6–10 kV elektr taqsimlash tarmoqlarida energiya balansini ta'minlovchi ko'p bosqichli topologiyaning matematik modeli

Xurshid A. Sattarov

t.f.n., prof., Muhammad al-Xorazmiy nomidagi Toshkent axborot texnologiyalari, Toshkent, 100084, O'zbekiston; s.xurshid@tuit.uz <https://orcid.org/0000-0001-6942-0618>

**Dolzarblik:** mazkur maqolada ENERNET konsepsiyasiga asoslangan ko'p bosqichli, ko'pburchakli topologiyaga ega taqsimlangan elektr tarmoqlarida elektr energiyasi balansini ta'minlashning nazariy asoslari tadqiq etildi. Mavjud 0,4–6–10 kV shahar elektr taqsimlash tarmoqlarining texnik va ekspluatatsion kamchiliklari tahlil qilinib, energiya oqimlarini boshqarish hamda elektr energiyasi yo'qotishlarini kamaytirishga qaratilgan yangi topologik yechim taklif etildi. Tadqiqotda tugun kuchlanishlari usuliga asoslangan matematik model ishlab chiqildi va tugunlarning xususiy hamda o'zaro o'tkazuvchanliklari matritsasi orqali elektr tarmog'ining o'rnatilgan ish rejimlari nazariy jihatdan tahlil qilindi. Taklif etilgan model energiya saqlash qurilmalarini elektr yuklama tugunlariga integratsiyalash orqali ishlab chiqarilayotgan va iste'mol qilinayotgan elektr energiyasi o'rtasidagi muvozanatni real vaqt rejimida ta'minlash imkonini beradi. Tadqiqot natijalari ko'rsatishicha, taklif etilgan topologiya elektr energiyasi yo'qotishlarini kamaytirish, elektr ta'minoti ishonchligini oshirish, taqsimlangan generatsiya manbalaridan samarali foydalanish hamda Smart Grid va ENERNET raqamli energetika tizimlarini rivojlantirish uchun samarali ilmiy-amaliy asos bo'lib xizmat qiladi.

**Maqsad:** topologiyaga ega elektr tarmog'ida elektr energiyasi balansini ta'minlash shartlarini aniqlashdan iborat.

**Usullar:** taqsimlash tarmog'ini boshqarish tarmoq topologiyasini o'zgartirish hamda transformatorlarning elektr yuklama ostida kuchlanishni rostdlash.

**Natijalar:** ishlab chiqarish va iste'mol hajmlari o'rtasidagi nomutanosiblik tufayli yuzaga keladigan energiya yo'qotishlarini kamaytiradi, qo'shimcha energiya saqlash liniyalari hisobiga elektr qabul qilgichlarning elektr ta'minoti ishonchligini oshiriladi, elektr yuklama grafigining bazaviy va maksimal (pik) qismlaridagi energiya tannarxi farqini kamaytirish orqali elektr energiyasi xarajatlarini pasaytiradi, elektr energetika uskunalarining xizmat qilish muddatini uzaytiradi.

**Kalit so'zlar:** ENERNET, Smart Grid, taqsimlangan generatsiya, elektr taqsimlash tarmog'i, energiya balans, energiya saqlash tizimi, elektr energiyasi yo'qotishlari, tugun kuchlanishlari usuli, tugun o'tkazuvchanliklari matritsasi, elektr tarmog'i topologiyasi, ko'p bosqichli elektr tarmog'i, energiya samaradorligi, elektr ta'minoti ishonchligi, matematik modellashirish.

## Математическая модель многоступенчатой топологии, обеспечивающей энергетический баланс в электрических распределительных сетях 0,4–6–10 кВ

Хуршид А. Саттаров

к.т.н., проф., Ташкентский университет информационных технологий им. Мухаммада ал-Хоразми, Ташкент, 100084, Узбекистан; s.xurshid@tuit.uz <https://orcid.org/0000-0001-6942-0618>

**Актуальность:** в данной статье исследуются теоретические основы обеспечения баланса электроэнергии в распределённых электрических сетях с многоступенчатой полигональной топологией, разработанной на основе концепции ENERNET. Проведён анализ технических и эксплуатационных недостатков существующих городских распределительных электрических сетей напряжением 0,4–6–10 кВ, а также предложено новое топологическое решение, направленное на повышение эффективности управления потоками электроэнергии и снижение её потерь. В рамках исследования разработана математическая модель, основанная на методе узловых напряжений, и выполнен теоретический анализ установившихся режимов работы электрической сети с использованием матрицы собственных и взаимных проводимостей узлов. Предлагаемая модель обеспечивает возможность балансирования процессов генерации и потребления электроэнергии в режиме реального времени за счёт интеграции систем накопления энергии в узлы электрической нагрузки. Результаты исследования свидетельствуют о том, что предложенная топология представляет собой эффективную научно-практическую основу для снижения потерь электроэнергии, повышения надёжности

**For citation:** Kh.A. Sattarov. Mathematical model of a multi-stage topology that ensures energy balance in electrical distribution networks 0,4–6–10 kV. Scientific and technical journal of Problems of Energy and Sources Saving, 2026, no. 3, pp. 132-146.

<https://doi.org/10.5281/zenodo.23219564>

Received: 17.02.2026  
Revised: 25.03.2026  
Accepted: 20.04.2026  
Published: 25.09.2026

**Copyright:** © Khurshid A. Sattarov, 2026. 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/>).



электроснабжения, рационального использования распределённых источников генерации, а также дальнейшего развития интеллектуальных энергетических систем Smart Grid и ENERNET.

**Цель:** определить условия обеспечения баланса электроэнергии в электрической сети с многоступенчатой полигональной топологией.

**Методы:** управление режимами работы распределительной электрической сети, изменение её топологии, а также регулирование напряжения силовыми трансформаторами под нагрузкой.

**Результаты:** снижение потерь электроэнергии обусловленных дисбалансом между объёмами её генерации и потребления, повышение надёжности электроснабжения потребителей за счёт интеграции систем накопления энергии, сокращение затрат на электроэнергию благодаря уменьшению разницы в её стоимости в базовой и пиковой зонах графика электрической нагрузки, а также увеличение срока службы электроэнергетического оборудования.

**Ключевые слова:** ENERNET, интеллектуальная электрическая сеть, распределённая генерация, распределительная электрическая сеть, баланс электроэнергии, система накопления энергии, потери электроэнергии, метод узловых напряжений, матрица проводимостей узлов, топология электрической сети, многоступенчатая электрическая сеть, энергоэффективность, надёжность электроснабжения, математическое моделирование.

## A mathematical model of a multi-stage topology that ensures energy balance in electrical distribution networks 0,4–6–10 kV

Khurshid A. Sattarov

c.t.s., prof., Tashkent University of Information Technologies named after Muhammad al-Khwarizmi, Tashkent, 100084, Uzbekistan; s.xurshid@tuit.uz <https://orcid.org/0000-0001-6942-0618>

**Relevance:** in this article examines the theoretical foundations of ensuring the balance of electricity in distributed electric networks with a multi-stage polygonal topology developed on the basis of the ENERNET concept. The analysis of the technical and operational disadvantages of existing urban electric distribution networks has been carried out. 0,4–6–10 A new topological solution has also been proposed, aimed at improving the efficiency of managing electricity flows and reducing its losses. As part of the study, a mathematical model based on the nodal voltage method was developed and a theoretical analysis of the steady-state operating modes of the electrical network was performed using a matrix of intrinsic and mutual conductivities of the nodes. The proposed model provides the ability to balance the processes of electricity generation and consumption in real time by integrating energy storage systems into electrical load nodes. The results of the study indicate that the proposed topology represents an effective scientific and practical basis for reducing electricity losses, improving the reliability of power supply, rational use of distributed generation sources, as well as further development of Smart Grid and ENERNET intelligent energy systems.

**Aim:** to determine the conditions for ensuring the balance of electricity in an electric grid with a multi-stage polygonal topology.

**Methods:** control of the operating modes of the distribution electrical network, changing its topology, as well as voltage regulation of power transformers under load.

**Results:** reducing electricity losses caused by an imbalance between the volumes of its generation and consumption, increasing the reliability of electricity supply to consumers through the integration of energy storage systems, reducing energy costs by reducing the difference in its cost in the base and peak zones of the electric load schedule, as well as increasing the service life of electric power equipment.

**Keywords:** ENERNET, intelligent electric grid, distributed generation, electric distribution network, electric power balance, energy storage system, electric power losses, node voltage method, node conductivity matrix, electrical network topology, multi-stage electrical network, energy efficiency, reliability of power supply, mathematical modeling.

### 1. Kirish (Introduction)

Muqobil energetikaning rivojlanishi natijasida ENERNET deb nomlangan elektr tarmog'ining arxitekturasini va topologiyasini ishlab chiqish vazifasi yuzaga kelmoqda [1].

ENERNET tarmog'ining asosini tarkibida muqobil energiya manbalari (shamol generatorlari, quyosh panellari va boshqa qurilmalar), energiya saqlash tizimlari, elektr energiyasi hamda raqamli axborotni uzatish uchun yagona fizik muhit bilan birlashtirilgan intellektual boshqaruv tizimi (IBT) mavjud bo'lgan mahalliy elektr tarmoqlari tashkil etadi.

Bunday mahalliy elektr tarmoqlari keyingi, yuqori darajadagi tarmoqlarga birlashtirilishi yoki tarkibida elektr energiyasi ishlab chiqaruvchi quvvatlar (IES, GES, AES) mavjud bo'lgan markazlashgan elektr energetika tizimiga ulanishi mumkin.

Tarmoq tizimining barcha elementlariga o'rnatilgan raqamli "aqlli" datchiklar elektr tarmog'ining texnik holatini, shuningdek, energiya manbalari, energiya saqlash qurilmalari va iste'molchilar o'rtasidagi energiya almashinuv jarayonlarini real vaqt rejimida nazorat qilishi kerak [2].

Mazkur konsepsiyani amaliyotga joriy etish va tegishli standartlarni ishlab chiqish uchun mahalliy elektr tarmog'ida elektr energiyasining uzatilish jarayonini ifodalovchi hisoblash formulalarini ishlab chiqish zarur. Ushbu formulalar tarmoqning fizik parametrlari, elektr yuklama qiymati, energiya saqlash qurilmalarining sig'imi, shuningdek, muqobil energiya manbalari va energiya iste'molchilarining hududiy zichligiga bog'liq holda energiya oqimlarini tavsiflashi lozim.

Tizimning barcha elementlari standartlashtirilgan bo'lishi, mahalliy tarmoq esa belgilangan standart talablarini bajargan taqdirda turli ishlab chiqaruvchilar tomonidan tayyorlangan yangi qurilmalarni o'rnatish imkonini beruvchi ochiq arxitektura ega bo'lishi kerak.

Xuddi INTERNET tamoyillari kabi, ENERNET tizimi ham ochiqlik prinsipiga asoslangan holda rivojlanishi lozim.

Elektr energetika tarmoqlariga bunday yondashuv elektr energiyasini uzoq masofalarga uzatish zaruratini kamaytirish va energiya manbalarini elektr energiyasi iste'molchilariga amalda mahalliy darajada yaqinlashtirish imkonini beradi.

Bu esa elektr energiyasini uzoq masofalarga uzatish jarayonida yuzaga keladigan energiya yo'qotishlarini kamaytirishga xizmat qiladi. Energiya saqlash tizimlaridan foydalanish elektr energiyasi narxini pasaytirish imkonini beradi. Bunga elektr yuklama minimal bo'lgan davrlarda elektr energiyasini past tariflarda xarid qilish va elektr yuklama maksimal bo'lgan soatlarda uni yuqori tariflarda sotish orqali erishiladi [3,4].

Bunday tarmoqni joriy etishning yana bir muhim samarasi, INTERNET tajribasi ko'rsatganidek, taqsimlangan generatsiya konsepsiyasini amalga oshirishdan iborat. Ya'ni, muqobil energetika manbalari asosida ishlovchi kichik quvvatli elektr ishlab chiqarish qurilmalarini mahalliy elektr tarmog'iga ulash imkoniyati yaratiladi.

Har bir mahalliy elektr tarmog'i keyingi darajadagi, masalan, ma'lum hududdagi turli obyektlarni birlashtiruvchi hududiy tarmoqning tarkibiy qismi bo'ladi. O'z navbatida, hududiy tarmoq milliy elektr energetika tizimining bir qismiga aylanishi mumkin.

Bunday ierarxik tuzilma elektr tarmog'ining boshqaruvchanligini sezilarli darajada oshiradi va tizim faoliyatidan maksimal iqtisodiy samaradorlikka erishish imkonini beradi.

Tarmoq elementlari sonining ortishi va uning ko'p bosqichli tuzilishga ega bo'lishi o'lchash hamda hisobga olish jarayonlarini real vaqt rejimida ta'minlash uchun yangi raqamli texnologiyalarga o'tishni talab qiladi.

O'lchash tizimlarining asosiy vazifalari quyidagi funksiyalarni bajarishdan iborat bo'ladi:

- uskunalarining texnik holatini baholash;
- tarmoq ish rejimlarini optimallashtirish (intellektual boshqarish);
- ma'lumotlarni uzluksiz monitoring qilish;
- telekommunikatsiya tizimlari orqali energiya iste'molchilari bilan to'g'ridan-to'g'ri axborot almashinuvini ta'minlash;
- elektr tarmoqlari mijozlari darajasida energiya iste'molchilarini intellektual boshqarish;
- energiya oqimlarini energiya saqlash tizimlari yordamida boshqarish.

Mahalliy elektr tarmoqlari arxitekturasining rivojlanishi texnologik yo'nalishdagi qator muammolarni hal etishni talab qiladi. Bular jumlasiga muqobil energiya manbalaridan (shamol generatorlari, quyosh batareyalari va boshqalar) foydalanish uchun iqtisodiy samaradorligi yuqori bo'lgan energiya o'zgartirgichlarini yaratish, elektr energiyasini o'ta o'tkazuvchan materiallar yordamida doimiy tok asosida uzatish, yangi fizik tamoyillarga asoslangan kuch elektronikasini rivojlantirish hamda yuqori haroratli o'ta o'tkazuvchanlik (YHO'O') asosida ishlaydigan o'ta o'tkazuvchan energiya saqlash tizimlarini yaratish kiradi [5–7].

Ushbu texnologiyalarning rivojlanishi, o'z navbatida, elektr energiyasi uchun oylik xarajatlarni kamaytirishga, uglevodorodlarning yonishi natijasida hosil bo'ladigan mahsulotlarning atmosferaga chiqarilishini qisqartirishga hamda maksimal elektr yuklama davrlarida elektr energiyasi iste'molini sezilarli darajada kamaytirishga yordam beradi.

ENERNET intellektual tarmog'i qayta tiklanuvchi energiya manbalaridan (masalan, quyosh batareyalari) va issiqlik elektr markazlaridan yanada samarali foydalanish imkonini beradi. Shuningdek, u mahalliy iste'molchilarning zaxira generatsiya quvvatlariga bo'lgan bog'liqligini kamaytiradi.

Tarmoq texnologiyalari sohasidagi strategiya yaxshi himoyalangan, kompleks elektr infratuzilmasini yaratishni o'z ichiga olishi kerak. Bunday infratuzilma butun energiya ta'minoti tizimini - elektr energiyasi ishlab chiqaruvchi stansiyalardan tortib, uy xo'jaliklari va korporativ

iste'molchilargacha bo'lgan barcha bo'g'inlarni - yagona yaxlit tizim sifatida boshqarish imkonini beradi.

O'rnatilgan intellektual funksiyalar yordamida bunday tarmoq talab va taklifdagi o'zgarishlarni faol aniqlashi, ularga tezkor ravishda javob berishi, elektr energiyasini yetkazib berish xavfsizligi va ishonchlilikini oshirishi hamda joriy ekspluatatsiya xarajatlarini optimallashtirishi mumkin.

Elektr toki oqimlarini boshqarish axborot oqimlarini boshqarishga o'xshash bo'lgani sababli, ENERNET tarmoqlarining ishlash tamoyillari INTERNET tarmoqlarining ishlash tamoyillariga yaqin hisoblanadi.

Biroq, elektr tarmoqlarining o'ziga xos jihati shundaki, ular tarkibiga axborot tarmoqlariga nisbatan ancha ko'p tarmoq tugunlari kiritilishi mumkin. Shu sababli, mavjud tarmoqlarni integratsiya qilish, muhim axborotlarni qayta ishlash va ushbu ma'lumotlardan foydalanish orqali elektr energiyasi iste'molini optimallashtirish tajribasini qo'llash zarur.

IP protokoliga asoslangan Smart Grid texnologiyasi intellektual elektr tarmog'ining bir qismiga aylanayotgan iste'molchilar uchun samarali yechim hisoblanadi. Ushbu texnologiya foydalanuvchilarga energiya ishlab chiqarish va iste'mol qilish jarayonlarini boshqarish, shuningdek, intellektual hisoblagichlar yordamida ushbu jarayonlarni optimallashtirish imkonini beradi.

Mazkur texnologiya har bir foydalanuvchi uchun amaliy va real afzalliklarni taqdim etadi.

Xorijiy tadqiqotlar natijalari shuni ko'rsatadiki [8–10], bunday texnologiyalar elektr energiyasi iste'molini 10 foizgacha kamaytirish imkonini beradi. Bundan tashqari, maishiy texnika qurilmalari (idish yuvish mashinalari, kir yuvish mashinalari va boshqalar) elektr energiyasi tariflari eng maqbul bo'lgan vaqt oralig'ida ishga tushiriladigan qilib dasturlansa, energiya tejamkorligi 15 foiz va undan ham yuqori darajaga yetishi mumkin.

Vaqt o'tishi bilan maksimal elektr yuklama soatlarida energiya iste'molini kamaytirish mamlakat energetika bozorida kutilayotgan generatsiya quvvatlari yetishmovchiligining oldini olishga yordam beradi. Bugungi kunda elektr energiyasini iste'mol qilayotgan foydalanuvchilar kelajakda uning yetkazib beruvchilariga ham aylanishi mumkin. Hozirgi kunda elektr energiyasi, asosan, neft va gaz asosida ishlaydigan issiqlik elektr stansiyalarida ishlab chiqariladi. ENERNET tarmog'i joriy etilgandan so'ng esa zaxira generatsiya quvvatlari kamida qisman iste'molchilarning o'zlari tomonidan ta'minlanishi mumkin bo'ladi.

Natijada elektr uzatish tarmoqlaridagi xarajatlar kamayadi, bu esa elektr energiyasi ishlab chiqaruvchilari va iste'molchilari uchun sezilarli iqtisodiy samara beradi. Yuqorida keltirilgan fikrlarga asoslanib, intellektual elektr energetika tarmog'iga quyidagi tavsifni berish mumkin [11]:

Intellektual elektr energetika tarmog'i — bu to'liq integratsiyalashgan, o'zini-o'zi boshqaruvchi va o'zini-o'zi tiklovchi elektr energetika tizimi bo'lib, u tarmoq topologiyasiga ega hamda barcha energiya ishlab chiqaruvchi manbalarni, magistral va taqsimlovchi elektr tarmoqlarini, barcha turdagi elektr energiyasi iste'molchilarini o'z ichiga oladi. Mazkur tizim real vaqt rejimida yagona axborot-boshqaruv qurilmalari tarmog'i orqali boshqariladi.

ENERNET tizimining asosini raqamli va energetika texnologiyalarining rivojlanishidagi sinergiya, shuningdek, kuch elektronikasidagi yutuqlar, o'ta o'tkazuvchanlik texnologiyalari, muqobil energiya manbalari, katta hajmdagi ma'lumotlarni qayta ishlash (Big Data) texnologiyalari, elektronika va nanoelektronika sohalaridagi innovatsiyalar hamda ushbu yo'nalishlar asosida energetika tizimining elementlari va qismlari faoliyatini tahlil qilish hamda hisobga olishga mo'ljallangan intellektual datchiklarni yaratish tashkil etadi.

Elektr tarmoqlarining ko'p bosqichli (ierarxik) tarmoq tuzilmasi rivojlanishi bilan uning turli darajalari o'rtasida elektr energiyasini uzatish jarayonida yuzaga keladigan yo'qotishlar muqarrar ravishda ortadi.

Shu sababli elektr energiyasi yo'qotishlarini kamaytirish maqsadida tarmoqning optimal topologiyasini tanlash va uning elementlari o'rtasida elektr energiyasini uzatishning eng samarali usullarini aniqlash masalasi yuzaga keladi.

Elektr energiyasi manbai (EEM)dan elektr energiyasi iste'molchisi (EEI)gacha bo'lgan an'anaviy elektr energiyasini uzatish usullarini ko'rib chiqamiz.

Elektr energiyasini uzatish jarayonida quyidagi asosiy elementlardan foydalaniladi [12–14]:

- elektr generatorlari (EG);
- yuqori va past kuchlanishli taqsimlash qurilmalari (YUKTQ, PKTQ);
- havo yoki kabel elektr uzatish liniyalari (HEUL, KEUL);
- kuchaytiruvchi va pasaytiruvchi transformator podstansiyalari (TP).

Ushbu usullarda elektr energiyasi yuqori kuchlanishda energiya manbalaridan transformator podstansiyalarigacha uzatiladi, so'ngra past kuchlanishli taqsimlash tarmoqlariga yetkaziladi. Taqsimlash tarmoqlari elektr yuklama tugunlariga ulanadi va ushbu tugunlardan elektr energiyasi elektr qabul qiluvchi qurilmalarga uzatiladi.

Qisqa tutashuv toklarini kamaytirish, elektr ta'minoti ishonchlilikini oshirish hamda elektr energiyasi yo'qotishlarini kamaytirish maqsadida taqsimlash tarmoqlari parallel ishlash rejimiga

kiritiladi, avtomatik zaxirani ulash qurilmalari (AZU) bilan jihozlanadi va elektr yuklamalari markaziga (EYM) bosh pasaytiruvchi podstantsiya (BPP) o'rnatiladi.

Energiya tejash va energiya samaradorligini oshirish vazifalari nafaqat elektr energiyasini uzatish hamda o'zgartirishning turli bosqichlarida yuzaga keladigan yo'qotishlarni kamaytirishni, balki elektr energetika tizimida ishlab chiqarilayotgan energiya bilan turli ish rejimlarida elektr qabul qiluvchi qurilmalar tomonidan iste'mol qilinayotgan energiya o'rtasidagi muvozanatni saqlashni ham talab qiladi.

Elektr qabul qiluvchi qurilmalar sonining ortishi va elektr energetika tizimlarining murakkablashuvi natijasida bunday muvofiqlashtirishni an'anaviy usullar yordamida amalga oshirish ancha qiyinlashadi. Bu esa o'z navbatida energiya yo'qotishlarining ortishiga va bunday tizimlarning energiya samaradorligi pasayishiga olib keladi.

Mavjud elektr energiyasini uzatish usullarining asosiy xususiyati — elektr energiyasini ishlab chiqarish, taqsimlash va iste'mol qilish jarayonlarining bir vaqtning o'zida yoki sinxron ravishda amalga oshirilishidir. Bunday energiya uzatish usullarini sinxron uzatish usullari deb atash mumkin.

Bu holat elektr generatorlari, elektr uzatish liniyalari va iste'molchilarning elektr qurilmalarida sodir bo'ladigan jarayonlarning elektromagnit xususiyati bilan bog'liq.

Elektr qabul qiluvchi qurilmalar sonining ko'payishi natijasida elektr stansiyalar soni ortadi, taqsimlash tarmoqlarining tuzilishi murakkablashadi va elektr energetika tizimlarini boshqarishga qo'yiladigan talablar oshadi.

Elektr stansiyalari ayni vaqtda elektr qabul qiluvchi qurilmalar talab qilayotgan miqdordagi elektr energiyasini ishlab chiqarishi kerak.

Mazkur masala energetika tizimlarining dispetcherlik xizmatlari tomonidan kelgusidagi davr uchun yuklama grafiklarini rejalashtirish va elektr stansiyalarida ishlab chiqariladigan quvvat hajmini tartibga solish orqali hal etiladi.

Rejalashtirish avvalgi vaqt davrlaridagi elektr yuklama grafiklarini statistik tahlil qilish natijalari asosida amalga oshiriladi. Bunda energetika tizimining ishlashida quyidagi maqsadlarga erishish vazifasi qo'yiladi:

- elektr energiyasini ishlab chiqarish va taqsimlash rejasini bajarish, shu jumladan maksimal elektr yuklama qiymatlarini qoplash;
- elektr qurilmalari va energiya ta'minoti tizimlarining uzluksiz ishlashini ta'minlash;
- iste'molchilarga yetkazib beriladigan elektr energiyasining kuchlanish va chastota bo'yicha talab etilgan sifat ko'rsatkichlarini ta'minlash.

Energetika tizimlarining ishlashini boshqaruvchi dispetcherlik punktlari nazorat, boshqaruv va aloqa vositalari, shuningdek, elektr stansiyalari, elektr uzatish liniyalari (EUL) va podstantsiyalarning aniq mnemonik sxemalari bilan jihozlangan bo'lishiga qaramay, elektr energiyasini sinxron uzatish usulida ishlab chiqarilayotgan va iste'mol qilinayotgan energiya o'rtasidagi muvozanatga to'liq erishish imkoni mavjud emas. Buning asosiy sabablari quyidagilardan iborat:

- elektr qabul qiluvchi qurilmalar sonining juda ko'pligi va ularning ayni vaqtdagi holati to'g'risidagi ma'lumotlarning yetarli emasligi sababli real vaqt rejimidagi elektr yuklamani aniq hisobga olish imkoni yo'q. Natijada joriy vaqtda zarur bo'lgan elektr energiyasi hajmini aniq aniqlash qiyinlashadi;
- mavjud elektr tarmoqlari konfiguratsiyasi taqsimlangan generatsiya tamoyiliga hamda elektr energiyasi manbalarini iste'molchilarga yaqinlashtirish prinsipiga to'liq mos kelmaydi;
- turli kuchlanish darajalaridagi transformator podstantsiyalarida elektr energiyasining katta miqdorda yo'qotilishi;
- muqobil energiya manbalaridan foydalanadigan mahalliy elektr tarmoqlari bilan mavjud energetika tizimlarining ishlashini texnik jihatdan muvofiqlashtirish murakkabligi.

Bularning barchasi elektr energiyasi iste'molining kamayishi natijasida ishlab chiqarilgan elektr energiyasi va iste'mol o'rtasidagi muvozanatning buzilishi sababli muqarrar energiya yo'qotishlariga yoki elektr energiyasi iste'moli ortgan holatlarda energiya tanqisligiga olib keladi. Bundan tashqari, qo'shimcha xarajatlar ham yuzaga keladi, chunki elektr yuklama grafigining bazaviy va maksimal (pik) qismlaridagi energiya tannarxi nisbati 400 dan ortiq qiymatga yetadi [15].

Ishonchlikni oshirish va elektr energiyasi yo'qotishlarini kamaytirish maqsadida [12] ishda elektr energiyasini uzatishning quyidagi usuli taklif etilgan. Ushbu usulga ko'ra, elektr energiyasi elektr uzatish liniyalari va taqsimlash tarmoqlarining kabel liniyalari orqali elektr yuklama tugunlariga uzatiladi. Bunda har bir elektr yuklama tuguni ta'minlovchi elektr liniyasi, zaxira elektr liniyasi va tranzit elektr liniyasiga ega bo'ladi.

Elektr yuklama tugunlari o'zaro bog'lanib, xizmat ko'rsatilayotgan hududda joylashgan olti burchak shaklidagi fazoviy tuzilmaning uchlarini hosil qiladi. Elektr qabul qiluvchi qurilmalar energiya manbalariga imkon qadar yaqin joylashgan elektr yuklama tugunlariga ulanadi. Bu esa adaptiv-taqsimlangan elektr tarmoqlari tamoyiliga mos keladi. Mazkur elektr tarmog'i ko'p bosqichli tuzilishda amalga oshiriladi:

- birinchi darajadagi tarmoqda 6–10 kV kuchlanishga mo'ljallangan taqsimlash punktlari sifatida xizmat qiluvchi elektr yuklama tugunlari joylashtiriladi;
- ikkinchi darajadagi tarmoqda 110–220 kV kuchlanishli taqsimlash punktlari joylashtiriladi;
- uchinchi va undan yuqori darajadagi tarmoqlarda 220 kV va undan yuqori kuchlanishli taqsimlash punktlari qo'llaniladi.

Garchi mazkur elektr energiyasini uzatish usuli mohiyatan sinxron usul bo'lib qolsa-da, chunki elektr energiyasini ishlab chiqarish, taqsimlash va iste'mol qilish jarayonlari bir vaqtning o'zida amalga oshadi, ushbu elektr tarmog'i topologiyasi ishonchlilikni oshirish va energiya yo'qotishlarini kamaytirish imkonini beradi.

Ko'rib chiqilgan energiya uzatish usulining muhim kamchiligi — elektr qabul qiluvchi qurilmalar elektr yuklamalarining tasodifiy va oldindan bashorat qilib bo'lmaydigan o'zgarishlari natijasida ishlab chiqarilgan hamda iste'mol qilingan energiya hajmlari o'rtasida nomutanosiblik yuzaga kelishi, ya'ni energiya balansiga erishish imkonining cheklanganligidir.

Energiya tejash va energiya samaradorligini oshirish vazifalari nafaqat elektr energiyasini uzatish va o'zgartirishning turli bosqichlarida yuzaga keladigan yo'qotishlarni kamaytirishni, balki elektr energetika tizimida turli ish rejimlarida ishlab chiqarilayotgan energiya bilan elektr qabul qiluvchi qurilmalar tomonidan iste'mol qilinayotgan energiya o'rtasidagi muvozanatni saqlashni ham talab qiladi.

Ko'rib chiqilgan elektr energiyasini uzatish usulining muhim kamchiligi shundan iboratki, elektr qabul qiluvchi qurilmalar elektr yuklamalarining tasodifiy va oldindan bashorat qilib bo'lmaydigan o'zgarishlari natijasida ishlab chiqarilgan hamda iste'mol qilingan energiya hajmlari o'rtasida nomutanosiblik yuzaga keladi. Bu esa energiya balansiga erishish imkoniyatini cheklaydi.

Energiya tejash va energiya samaradorligini oshirish vazifalari nafaqat elektr energiyasini uzatish va o'zgartirishning turli bosqichlarida yuzaga keladigan yo'qotishlarni kamaytirishni, balki elektr energetika tizimida turli ish rejimlarida ishlab chiqarilayotgan energiya bilan elektr qabul qiluvchi qurilmalar tomonidan iste'mol qilinayotgan energiya o'rtasidagi muvozanatni saqlashni ham talab qiladi.

Jahonning ko'plab energetika tizimlari qayta tiklanuvchi energiya manbalarini integratsiya qilishga bo'lgan ehtiyojning ortishi, mavjud uskunalarning eskirishi, energiya samaradorligini oshirish bo'yicha talablarning kuchayishi hamda energetika bozorlarini liberallashtirish sharoitida mustaqil ishtirokchilar sonining ko'payishi natijasida tizim zaifligi bilan bog'liq xavotirlarning ortishi ta'sirida sezilarli o'zgarishlarni boshdan kechirmoqda.

Elektr tarmoqlari obyektlarini ekspluatatsiya qilish jarayoni tobora murakkablashib bormoqda va xavfsizlik, iqtisodiy samaradorlik hamda tizim samaradorligini ta'minlash uchun yangi avtomatlashtirilgan va intellektual boshqaruv tizimlarini joriy etishni talab qilmoqda. Bu esa "aqli energetika tizimlari" - Smart Grid konsepsiyasining shakllanishi uchun zarur shart-sharoitlarni yaratmoqda [6]. Elektr energiya iste'molchilarining xududiy elektr tarmoqlari O'zbekiston energetika tizimining bir qismi bo'lib, mamlakatning aksariyat aholisi yashaydigan hududlarni qamrab oladi.

## 2. Materiallar va usullar (Materials and methods)

Taqsimlash elektr tarmoqlarida Smart Grid konsepsiyasini amalga oshirish bugungi kunda yangi texnologik boshqaruv qurilmalari va aloqa vositalarini joriy etish orqali ta'minlanishi mumkin [1].

Kichik quvvatli generatsiya manbalarining keng tarqalishi, shuningdek, reaktiv quvvatni kompensatsiyalash qurilmalaridan foydalanish elektr tarmog'ining ish rejimini boshqarish imkonini beradi. Bundan tashqari, taqsimlash tarmog'ini boshqarish tarmoq topologiyasini o'zgartirish hamda transformatorlarning elektr yuklama ostida kuchlanishni rostlash qurilmalari (KRQ) yordamida rostlash tarmoqlari orqali amalga oshirilishi mumkin.

Ushbu boshqaruv vositalari taqsimlash tarmoqlarining ishonchliligi va samaradorligini oshirishga imkon beruvchi samarali boshqaruv tizimini yaratish uchun xizmat qiladi. Boshqaruv parametrlarining o'zaro bog'liqligini ta'minlash tarmoq ish rejimining optimallik mezonlari funksiyasini minimallashtirish algoritmini ishlab chiqish orqali amalga oshirilishi mumkin. Asosiy optimallik mezonlari sifatida quyidagilarni keltirish mumkin:

- elektr ta'minoti ishonchliligi;
- elektr energiyasi yo'qotishlari;
- tarmoqdagi kuchlanish darajalari;
- ta'minlovchi markazlarning yuklanish darajasi.

Mazkur masala ko'p mezonli optimallashtirish masalasiga kiradi. Shu sababli tarmoqning optimal ish rejimi faqat bitta mezonni to'liq qanoatlantiruvchi holat bo'lishi mumkin. Qolgan mezonlar esa ushbu masalada cheklovlar sifatida hisobga olinadi [2].

Elektr tizimlari va zanjirlarining turg'un ish rejimi dastlabki ma'lumotlarni berish usullariga, hisoblashning fizik mohiyati va maqsadiga qarab turli usullar yordamida aniqlanadi.

Ushbu bo'limda eng ko'p uchraydigan va nisbatan sodda bo'lgan holat ko'rib chiqiladi. Bunda



elektr zanjirining barcha passiv elementlari qarshiliklari va o'tkazuvchanliklari ma'lum deb qabul qilinadi.

Bundan tashqari, barcha tugunlardagi tok manbalarining doimiy qiymatlari,  $P$  va  $Q$  bo'yicha balanslovchi tugundan tashqari, barcha elektr yurituvchi kuchlar (EYuK), shuningdek, kuchlanish bo'yicha bazaviy tugunning kuchlanish qiymati berilgan.

Aniqlanishi kerak bo'lgan kattaliklar:

- $n$  - ta tugundagi kuchlanishlar;
- $m$  - ta shoxobchadagi toklar.

Umumiy holda, kuchlanish bo'yicha bazis tuguni hamda aktiv va reaktiv quvvatlar ( $P$  va  $Q$ ) bo'yicha balanslovchi tugunlar bir-biriga mos kelmasligi mumkin. Biroq, elektr energetikasi tizimlarining rejimlarini hisoblashda, odatda, ushbu tugunlarning o'zaro mos kelishi qabul qilinadi. Keyingi bayonlarda tushuntirishni soddalashtirish maqsadida kuchlanish bo'yicha bazis tugun hamda  $P$  va  $Q$  bo'yicha balanslovchi tugun bir xil -  $n+1$ -tugun deb qaraladi. Ushbu tugun qisqacha balanslovchi tugun deb yuritiladi.

Kirxgofning birinchi qonuniga asoslangan mustaqil tenglamalar soni mustaqil tugunlar soniga, ya'ni  $n$  ga teng.  $n+1$ -tugun uchun tuziladigan Kirxgofning birinchi qonuni tenglamasi esa qolgan  $n$  ta tugun uchun yozilgan tenglamalardan kelib chiqadi va mustaqil tenglamalar tarkibiga kiritilmaydi.

Agar noma'lum kattaliklar sifatida  $n$  ta tugunning kuchlanishlari qabul qilinsa, elektr tizimining o'rnatilgan (barqaror) rejimini aniqlash uchun faqat Kirxgofning birinchi qonuni va Om qonunidan kelib chiqadigan tugun kuchlanishlari tenglamalarini yechish yetarli bo'ladi.

Tugun kuchlanishlari tenglamalari Kirxgofning birinchi qonunidan hosil qilinadi. Bunda barcha tarmoqlardagi toklar tugun kuchlanishlari va tarmoqlarning o'tkazuvchanliklari orqali ifodalanadi. Tugun kuchlanishlari tenglamalarining soni mustaqil tugunlar soniga teng bo'lib,  $n$  ta tenglamadan tashkil topadi. Bunda tugunlardan birining, ya'ni  $n+1$ -tugunning kuchlanishi ixtiyoriy ravishda berilishi mumkin va ko'pincha u nolga teng deb qabul qilinadi.

$n$  ta noma'lumli  $n$  ta tugun kuchlanishlari tenglamalari tizimi yechilgandan so'ng barcha tugunlarning kuchlanishlari aniqlanadi. Shundan keyin tarmoqlardagi toklar Om qonuni yordamida hisoblanadi, chunki ular tugun kuchlanishlarining ma'lum qiymatlari orqali bir qiymatli aniqlanadi.

Ushbu usul elektr tizimlarida tarmoqlar soni, odatda, tugunlar sonidan ancha katta bo'lganligi sababli, mustaqil tarmoqlardagi  $m$  ta tokni aniqlash uchun Kirxgofning birinchi va ikkinchi qonunlariga asoslangan  $m$  ta tenglamalar tizimini yechishga nisbatan samaraliroq hisoblanadi.

Masalan, balanslovchi tugunning kuchlanishi  $U_b = 0$  deb qabul qilingan to'rt tugunli o'zgarmas tok tarmog'i uchun tugun kuchlanishlari tenglamalarini quyidagi ko'rinishda yozish mumkin:

$$\begin{cases} Y_{11}U_1 + Y_{12}U_2 + Y_{13}U_3 = I_1; \\ Y_{21}U_1 + Y_{22}U_2 + Y_{23}U_3 = I_2; \\ Y_{31}U_1 + Y_{32}U_2 + Y_{33}U_3 = I_3. \end{cases} \quad (1)$$

bu yerda  $I_k$  -  $k$ -tugunning berilgan toki, bunda  $k = 1, 2, 3, \dots$ ,  $U_k$  - noma'lum tugun kuchlanishi, ya'ni  $k$ -tugun bilan kuchlanish bo'yicha bazis tugun bilan mos keluvchi balanslovchi tugun orasidagi kuchlanish,  $Y_{kj}$ ,  $k \neq j$  -  $j$  va  $k$  tugunlar orasidagi o'zaro o'tkazuvchanlik,  $Y_{kk}$  -  $k$ -tugunning xususiy o'tkazuvchanligi.

$j$  va  $k$  tugunlar orasidagi o'zaro o'tkazuvchanlik ushbu tugunlarni bog'lovchi tarmoqlar o'tkazuvchanliklari yig'indisining manfiy ishora bilan olingan qiymatiga teng.

Agar elektr zanjiri sxemasida ikkita tugun orasida hech qanday tarmoq mavjud bo'lmasa, u holda tegishli o'zaro o'tkazuvchanlik qiymati **nolga teng** bo'ladi.

Agar  $k$  va  $j$  tugunlar  $Z_i$  qarshilikka va  $Y_i$  o'tkazuvchanlikka ega bo'lgan bitta tarmoq orqali ulangan bo'lsa, u holda:

$$Y_{kj} = -Y_L = -\frac{1}{Z_L}. \quad (2)$$

$k$ -tugunning xususiy o'tkazuvchanligi  $Y_{kk}$  tugun  $k$  bilan ulangan barcha tarmoqlarning o'tkazuvchanliklari yig'indisiga teng (bu tarmoqlar qatoriga kuchlanishi nolga teng bo'lgan balanslovchi tugun bilan  $k$  tugunini bog'lovchi tarmoqlar ham kiradi). Agar bunday tarmoqlar mavjud bo'lmasa, u holda tugunning xususiy o'tkazuvchanligi  $Y_{kk}$  barcha o'zaro o'tkazuvchanliklar  $Y_{kl}$  ning yig'indisini qarama-qarshi ishora bilan olingan qiymatiga teng bo'ladi. Agar  $k$  tuguniga  $m$  ta tarmoq ulangan bo'lsa, unda:

agar  $k$ -tugunga bevosita ulangan tarmoqlar mavjud bo'lmasa, uning xususiy o'tkazuvchanligi  $Y_{kk}$  barcha o'zaro o'tkazuvchanliklar  $Y_{kl}$  yig'indisining manfiy qiymati sifatida aniqlanadi;

agar  $k$ -tugun bilan  $m$  ta tarmoq ulangan bo'lsa, u holda tugunning xususiy o'tkazuvchanligi quyidagi ifoda orqali aniqlanadi:

$$Y_{\lambda k} = \sum_{l=1}^m Y_l = -\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^{n+1} Y_{kj}; \quad (3)$$

$n+1$  - elektr tarmog'idagi tugunlarning umumiy sonini bildiradi, bunda ulardan  $n$  tasi mustaqil tugunlar hisoblanadi.

Masalan, to'rtta tugundan tashkil topgan ushbu tarmoq uchun:



$$Y_{11} = - \sum_{j=2}^4 Y_{1j}.$$

Elektr energetik tizimlarining ish rejimlarini hisoblash jarayonida  $k$ -tugun uchun berilgan tok  $I_k$  mazkur tugunga ulangan barcha tok manbalarining algebratik yig'indisi sifatida aniqlanadi. Bunda elektr energiyasini ishlab chiqarishga (generatsiyaga) yoki iste'mol qilishga mos keluvchi toklar qarama-qarshi ishoralar bilan qabul qilinadi.

Agar elektr zanjirida elektr yurituvchi kuch (EYuK) manbalari mavjud bo'lsa,  $k$ -tugunning berilgan toki  $I_k$  tarkibiga  $k$ -tugunga ulangan tarmoqlardagi EYuK manbalarining o'tkazuvchanliklar bilan ko'paytmasining algebratik yig'indisi ham kiritiladi. Keyingi hisoblashlarda tugunlarning xususiy va o'zaro o'tkazuvchanliklaridan tashkil topgan matritsadan foydalaniladi:

$$Y_Y = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Tugunlardagi toklar vektori  $I$  va tugun kuchlanishlari vektori  $U$  (ustun ko'rinishidagi vektorlar) dan foydalaniladi.

$$I = \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{bmatrix}, \quad U = \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Matritsalarini ko'paytirish qoidalariga asosanib, tugun kuchlanishlari tenglamalar tizimi (1) quyidagi matritsa shaklida ifodalanadi:

$$Y_Y U = I. \quad (6)$$

O'zgaruvchan tok zanjirlarini hisoblashda tugun kuchlanishlari, tugun toklarining qiymatlari hamda tugunlarning xususiy va o'zaro o'tkazuvchanliklari kompleks kattaliklar sifatida qaraladi.

(4) va (5) tenglamalardagi kabi, elementlari  $Y_{kj}$  kompleks qiymatlardan tashkil topgan tugunlarning xususiy va o'zaro o'tkazuvchanliklari matritsasi  $Y_Y$ , shuningdek, elementlari  $I_k$  va  $U_k$  bo'lgan tugun faza toklarining  $I$  hamda tugunlararo kuchlanishlarning  $U$  kompleks ustun-vektorlari kiritilsa, u holda o'zgaruvchan tok zanjiri uchun tugun kuchlanishlari tenglamalar tizimi quyidagi matritsaviy shaklda ifodalanadi:

$$Y_Y U = \sqrt{3} \underline{I}. \quad (7)$$

Mazkur matritsaviy ifodaning to'g'riligini kompleks elementli matritsalarini ko'paytirish qoidalaridan foydalanib osongina isbotlash mumkin.

O'zgaruvchan tok elektr tarmog'i uchun tugun kuchlanishlari tenglamalarini dasturiy ta'minoti (DT) yordamida yechishda, odatda, ushbu tenglamalar tizimi  $2n$ -tartibli haqiqiy sonli tenglamalar tizimiga keltiriladi. Bu yerda  $n$  - mustaqil tugunlar sonini bildiradi.

Bunday o'zgartirishni amalga oshirish uchun kompleks elementlardan tashkil topgan matritsalar va ustun-vektorlar haqiqiy elementlarga ega bo'lgan matritsalar hamda ustun-vektorlarning yig'indisi shaklida ifodalanadi. Bunda har bir kompleks element alohida ravishda haqiqiy va mavhum qismlarning yig'indisi ko'rinishida yozilishi hamda matritsalarini qo'shish qoidalariga qat'iy rioya qilinishi lozim:

$$\left. \begin{aligned} \underline{Y}_Y &= G_Y - jB_Y \\ \underline{U} &= U' - jU'' \\ \underline{I} &= I' - jI'' \end{aligned} \right\}. \quad (8)$$

(8) ifodani (7) tenglamaga o'rniqa qo'yish natijasida quyidagi ifoda hosil qilinadi:

$$(G_Y - jB_Y) (U' - jU'') = \sqrt{3} (I' - jI''). \quad (9)$$

Oxirgi tenglamadagi haqiqiy va mavhum qismlarga tegishli matritsaviy hadlarni alohida ko'rinishda ifodalaymiz:

$$G_Y U' + B_Y U'' = \sqrt{3} I'; \quad (10)$$

$$-B_Y U' + G_Y U'' = \sqrt{3} I''. \quad (11)$$

Demak, o'zgaruvchan tok elektr zanjiri uchun tugun kuchlanishlari tenglamalar tizimi quyidagi matritsa shaklida ifodalanishi mumkin:

$$\begin{bmatrix} G_Y & B_Y \\ -B_Y & G_Y \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U' \\ U'' \end{bmatrix} = \sqrt{3} \begin{bmatrix} I' \\ I'' \end{bmatrix}. \quad (12)$$

(12) ifoda  $I_n$  tartibli haqiqiy tenglamalar tizimini ifodalaydi. Ushbu tizim tugun kuchlanishlarining haqiqiy va mavhum qismlaridan tashkil topgan  $(2n)$  ta noma'lum qiymatni  $U'_k, U''_k$  o'z ichiga oladi.

Balanslovchi tugun kuchlanishi  $U_\delta = 0$  ga teng bo'lgan holatda, to'rt tugundan tashkil topgan o'zgaruvchan tok elektr tarmog'i uchun tugun kuchlanishlari tenglamalar tizimi quyidagi ko'rinishda ifodalanadi:



$$\left. \begin{aligned} Y_{11}U_1 + Y_{12}U_2 + Y_{13}U_3 + Y_{14}U_4 &= I_1; \\ Y_{21}U_1 + Y_{22}U_2 + Y_{23}U_3 + Y_{24}U_4 &= I_2; \\ Y_{31}U_1 + Y_{32}U_2 + Y_{33}U_3 + Y_{34}U_4 &= I_3; \\ Y_{41}U_1 + Y_{42}U_2 + Y_{43}U_3 + Y_{44}U_4 &= I_4. \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

(13) ifodaga o'xshash to'liq tugun kuchlanishlari tenglamalar tizimi  $n+1$  ta tugundan tashkil topgan o'zgaras tok elektr tarmog'i uchun quyidagi matritsa ko'rinishida ifodalanishi mumkin:

$$Y_{Y\Sigma}U_{\Sigma} = I_{\Sigma}; \quad (14)$$

bu yerda  $Y_{Y\Sigma}$  -  $n+1$ -tartibli to'liq tugun o'tkazuvchanliklari matritsasi,  $I_{\Sigma}$  va  $U_{\Sigma}$  esa mos ravishda  $n+1$ -tartibli tugun toklarining hamda tugun kuchlanishlarining ustun-vektorlaridir. Tugunlardagi toklarning algebraik yig'indisi nolga teng bo'ladi. Agar yerga nisbatan ulangan o'tkazuvchanliklar hisobga olinmasa, to'liq tugun o'tkazuvchanliklari matritsasi  $Y_{Y\Sigma}$  simmetrik va singulyar (ayniyangan) xususiyatga ega bo'ladi.

To'liq  $Y_{Y\Sigma}$  matritsaning singulyarligi (3) ifodadan kelib chiqadi. Shuning uchun (13) yoki (14) ko'rinishdagi to'liq tugun kuchlanishlari tenglamalar tizimi chiziqli bog'langan bo'ladi. Ushbu tizimda faqat  $n$  ta tugun kuchlanishlari tenglamasi mustaqil hisoblanadi.

(13) yoki (14) tenglamalar tizimini yechishda odatda quyidagi usuldan foydalaniladi. Tizim tugunlaridan biri, masalan,  $n+1$ -tugun, kuchlanish bo'yicha tayanch (bazis) tugun va tok bo'yicha balanslovchi tugun sifatida qabul qilinadi. Umumiy holatda ushbu ikki vazifani bajaruvchi tugunlar bir xil bo'lishi shart emas.

Balanslovchi tugundagi kuchlanish  $U_{n+1}$  oldindan ma'lum deb qabul qilinadi, uning toki  $I_{n+1}$  esa noma'lum bo'lib, qolgan  $n$  ta tugun toklarining algebraik yig'indisiga teng bo'ladi. Qolgan tugunlardagi tok qiymatlari berilgan, ulardagi kuchlanishlar esa aniqlanishi kerak bo'lgan noma'lum kattaliklardir.

Shu sababli to'liq  $Y_{Y\Sigma}$  matritsali singulyar tizim (13) yoki (14) o'rniga,  $Y_y$  to'liq bo'lmagan matritsaga ega bo'lgan  $n$  ta mustaqil tugun kuchlanishlari tenglamalari tizimi yechiladi.

Mazkur tenglamalar tizimi (13) yoki (14) ifodalardan oxirgi satrni chiqarib tashlash orqali hosil qilinadi. Bunda ma'lum hadlar, ya'ni  $U_b$   $Y_{kb}$  ko'paytmalari chap tomondan o'ng tomonga o'tkaziladi:

$$\left. \begin{aligned} Y_{11}U_1 + Y_{12}U_2 + Y_{13}U_3 &= I_1 - Y_{16}U_6; \\ Y_{21}U_1 + Y_{22}U_2 + Y_{23}U_3 &= I_2 - Y_{26}U_6; \\ Y_{31}U_1 + Y_{32}U_2 + Y_{33}U_3 &= I_3 - Y_{36}U_6. \end{aligned} \right\}; \quad (15)$$

yoki quyidagi matritsa shaklida ifodalanadi:

$$Y_{Y\Sigma}U = I - Y_6U_6; \quad (16)$$

bu yerda  $Y_6U_6$  ustun-vektorining  $k$ -elementi  $Y_kU_6$  ko'rinishida aniqlanadi, ya'ni:

$$Y_6U_6 = \begin{bmatrix} Y_{16}U_6 \\ Y_{26}U_6 \\ Y_{36}U_6 \end{bmatrix}. \quad (17)$$

Agar tugun kuchlanishlari tenglamalar tizimida  $Y_{k6}$  kattaligi (3) ifodaga asosan o'tkazuvchanliklar yig'indisi ko'rinishida ifodalanishi mumkinligi hisobga olinsa, u holda, masalan:

$$Y_6 = -Y_{11} - Y_{12} - Y_{13};$$

shunda (15) tenglamani quyidagi ko'rinishda ifodalash mumkin:

$$\left. \begin{aligned} Y_{11}(U_1 - U_6) + Y_{12}(U_2 - U_6) + Y_{13}(U_3 - U_6) &= I_1; \\ Y_{21}(U_1 - U_6) + Y_{22}(U_2 - U_6) + Y_{23}(U_3 - U_6) &= I_2; \\ Y_{31}(U_1 - U_6) + Y_{32}(U_2 - U_6) + Y_{33}(U_3 - U_6) &= I_3. \end{aligned} \right\}$$

$k$ -elementi  $k$ -tugun kuchlanishi bilan balanslovchi tugun kuchlanishi orasidagi farqqa teng bo'lgan  $\|U - U_6\|$  ustun-vektoridan foydalanamiz. Ya'ni, to'rtta tugundan tashkil topgan elektr tizimi uchun:

$$U - U_6 = \begin{bmatrix} U_1 - U_6 \\ U_2 - U_6 \\ U_3 - U_6 \end{bmatrix}. \quad (18)$$

Shunda  $U_6 \neq 0$  holat uchun tugun kuchlanishlari tenglamalari (15) matritsa ko'rinishida quyidagicha ifodalanadi:

$$Y_y(U - U_6) = I. \quad (19)$$

Yuqorida keltirilgan (6) tenglama  $U_b = 0$  bo'lgan holat uchun (19) tenglamaning xususiy ko'rinishi hisoblanadi.

Endi tugunlardagi toklar berilgan holda balanslovchi tugun hamda barcha boshqa tugunlarning kuchlanishlarini bir xil qiymatga o'zgartiramiz. Bunday o'zgartirish natijasida tugunlar orasidagi potentsiallar farqi o'zgarmaydi. Ikki tugunni bog'lovchi tarmoqdagi tok esa ushbu tugunlar orasidagi kuchlanishlar farqining mazkur tarmoq o'tkazuvchanligiga ko'paytmasi bilan aniqlanadi.

Demak, chiziqli elektr zanjirida barcha tugun kuchlanishlari bir xil qiymatga siljirilganda tarmoqlardagi toklar, tarmoqlardagi quvvat oqimlari, quvvat yo'qotishlari hamda zanjirdagi umumiy quvvat yo'qotishlari o'zgarmaydi.

Agar barcha  $n+1$  ta tugundagi toklarning algebraik yig'indisi nolga teng bo'lsa, chiziqli elektr zanjirida qaysi tugun tok bo'yicha balanslovchi tugun sifatida qabul qilinishidan qat'i nazar, tugun kuchlanishlari va tarmoq toklarining qiymatlari o'zgarishini isbotlash mumkin.

Shu sababli balanslovchi tugunni tanlash va uning kuchlanish qiymatini belgilash masalan,  $U_6 = 0$  yoki  $U_6 \neq 0$  chiziqli elektr tizimlarining o'rnatilgan rejimini hisoblash natijalariga ta'sir qilmaydi. Shu nuqtayi nazardan, chiziqli tugun kuchlanishlari tenglamalari (6) va (19) o'zaro ekvivalent hisoblanadi.

O'zgaruvchan tok elektr tarmog'i uchun tugun kuchlanishlari tenglamalar tizimi (16) ifodaga o'xshash holda  $n$ -tartibli kompleks tenglamalar tizimi ko'rinishida ifodalanishi mumkin:

$$\underline{Y}_y \underline{U} = \sqrt{3} \underline{I}' - \underline{Y}_6 \underline{U}_6; \quad (20)$$

bu yerda  $\underline{Y}_y \underline{U}_6$  - ustun-vektor bo'lib, uning  $k$ -elementi  $\underline{U}_6 \underline{Y}_{k6}$  ko'rinishida aniqlanadi (17-ifodaga qarang).

(8) ifodalardan foydalanib, (20) tenglamani (12) ifodaga o'xshash holda  $(2n)$ -tartibli haqiqiy tenglamalar tizimi ko'rinishida ifodalash mumkin. Masalan,  $(U_6'' = 0)$  shartda quyidagi natijaga ega bo'ladi

$$\left\| \begin{matrix} G_y B_y \\ -B_y G_y \end{matrix} \right\| \cdot \left\| \underline{U}' \right\| = \sqrt{3} \left\| \underline{I}' \right\| - \left\| \begin{matrix} g_6 U_6 \\ -b_6 U_6 \end{matrix} \right\|; \quad (21)$$

bu yerda  $g_6 U_6$  va  $-b_6 U_6$  - (17) ifodadagi kabi aniqlanadigan ustun-vektorlar hisoblanadi. Bunda  $g_{k6}$ ,  $b_{k6}$  mos ravishda  $k$ -tugun bilan balanslovchi tugun orasidagi aktiv hamda reaktiv o'zaro o'tkazuvchanliklarni ifodalaydi.

**Tugunlarning xususiy va o'zaro o'tkazuvchanliklari matritsasi  $Y_y$  elektr energetik tizimlarning** o'rnatilgan ish rejimlarini hisoblashda asosiy ahamiyatga ega bo'lgan matematik apparatlardan biridir.

Elektr energetik tizimlarning o'rnatilgan rejimlarini hisoblashda dastlabki ma'lumotlar sifatida, odatda, bo'ylama tarmoqlarning (elektr uzatish liniyalari va transformatorlarning) qarshiliklari, yerga ulangan shoxobchalarning o'tkazuvchanliklari (elektr uzatish liniyalari va reaktorlar uchun), shuningdek, elektr tizimi sxemasining topologik tuzilishi, ya'ni tugunlar va tarmoqlarning o'zaro bog'lanish sxemasi beriladi.

Sxemaning topologiyasi, odatda, o'zaro tarmoqlar orqali bog'langan tugunlar raqamlari juftligi ko'rinishida beriladi. Tugun o'tkazuvchanliklari matritsasi  $Y_y$  ning elementlari DT yordamida hisoblab chiqiladi. Ushbu hisoblash jarayoni nisbatan sodda bo'lib, asosan tarmoqlarning o'zaro o'tkazuvchanliklarini aniqlash hamda tugunlarning xususiy o'tkazuvchanliklarini hisoblashdan iborat.

Tugunning xususiy o'tkazuvchanligi mazkur tugun bilan ulangan barcha tarmoqlarning o'zaro o'tkazuvchanliklari yig'indisining manfiy ishorali qiymati sifatida aniqlanadi.

Tugunlarning xususiy va o'zaro o'tkazuvchanliklari matritsasi  $Y_y$  simmetrik xususiyatga ega, ya'ni uning elementlari uchun  $Y_k = Y_k$  tenglik bajariladi.

$Y_y$  matritsasining eng muhim xususiyatlaridan biri - unda nol qiymatli elementlarning ko'pligi, ya'ni matritsaning siyrak tuzilishga ega ekanligidir. Avval qayd etilganidek, agar ikki tugun o'zaro tarmoq orqali bog'lanmagan bo'lsa, ularning o'zaro o'tkazuvchanligi nolga teng bo'ladi.

Amaliy elektr tizimlarida har bir tugun odatda faqat cheklangan sondagi qo'shni tugunlar bilan bog'langan bo'ladi. Masalan, 100 ta tugundan tashkil topgan elektr tizimida birinchi tugun 10 ta boshqa tugun bilan bog'langan bo'lsa,  $Y_y$  matritsasining birinchi satri va birinchi ustunida faqat 10 ta noldan farqli o'tkazuvchanlik mavjud bo'ladi, qolgan 90 ta element esa nol qiymatga ega bo'ladi.

Ko'pgina elektr tizimlarida tugunlarning bog'lanish soni bundan ham kichik bo'ladi. O'rnatilgan rejimlarni hisoblash uchun mo'ljallangan ko'plab mahalliy va xorijiy dasturiy ta'minotlarda elektr tizimidagi tarmoqlarning maksimal soni tugunlar sonining taxminan 1,5 baravarigacha bo'lishi mumkin deb qabul qilinadi. Masalan, bunday dasturlar yordamida 300 tagacha tugun va 450 tagacha tarmoqdan iborat elektr tizimlarining o'rnatilgan rejimlarini hisoblash mumkin.

Matritsaning simmetrikligi hisobga olinganda, elektr tizimidagi tarmoqlar soniga teng bo'lgan noldan farqli o'zaro o'tkazuvchanliklarni hamda tugunlar soniga teng bo'lgan xususiy o'tkazuvchanliklarni saqlash yetarli hisoblanadi.

Elektr tizimining ulanish sxemasi haqidagi ma'lumotlarni saqlash uchun odatda tarmoqlar soniga teng miqdorda xotira yacheykalari talab etiladi.

Shunday qilib,  $Y_y$  matritsasining faqat noldan farqli elementlarini saqlash to'liq matritsaning barcha  $n_2$  ta elementlarini saqlashga nisbatan ancha kam xotira talab qilishini ko'rsatadi.

Tenglamalar tizimi matritsalarining siyrak tuzilishidan samarali foydalanish imkoniyati o'rnatilgan rejimlarni hisoblashning turli usullarini taqqoslashda hisobga olinishi zarur bo'lgan muhim omillardan biridir.

Umuman olganda, tugun kuchlanishlari tenglamalari murakkab elektr energetik tizimlarning o'rnatilgan rejimlarini DT yordamida hisoblashda keng qo'llaniladigan samarali usullardan biri hisoblanadi.

### 3. Natijalar (Results)

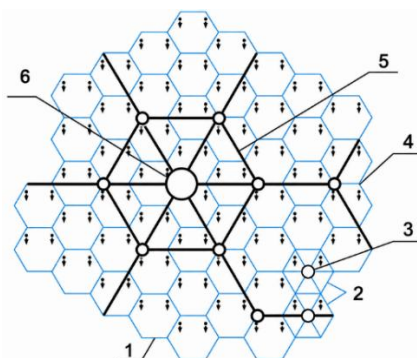
Ishlab chiqarilayotgan va iste'mol qilinayotgan elektr energiyasi hajmlari o'rtasidagi nomutanosiblikni kamaytirish maqsadida taklif etilayotgan tarmoq topologiyasi asosida yangi texnik natijaga erishishni ta'minlovchi usul ko'rib chiqiladi. Mazkur texnik natija elektr energiyasini manbalardan iste'molchilarga uzatish jarayonida energiya samaradorligi va energiya tejamkorligini oshirish, shuningdek, elektr ta'minoti tizimining ishonchliligini yaxshilashdan iborat.

Ushbu texnik natijaga quyidagicha erishiladi: taklif etilayotgan elektr energiyasini uzatish usulida xizmat ko'rsatilayotgan hudud bo'ylab bir tekis joylashtirilgan ko'p darajali elektr tarmog'ini hosil qiluvchi olti burchaklar uchlarida joylashgan elektr yuklama tugunlari an'anaviy ta'minlovchi, tranzit va rezerv elektr liniyalaridan tashqari qo'shimcha ravishda energiya to'plovchi liniyalar bilan jihozlanadi.

Energiya to'plovchi liniya har bir olti burchakdagi elektr yuklama tugunini energiya oqimlarini boshqaruvchi energiya saqlash qurilmasi bilan bog'laydi. Natijada olti burchaklar doirasida hamda butun ko'p darajali elektr tarmog'ida ishlab chiqarilayotgan va iste'mol qilinayotgan elektr energiyasi o'rtasidagi uzluksiz muvozanatni saqlash imkoniyati yaratiladi.

Taklif etilayotgan usul mohiyati tegishli chizmalar va sxemalar yordamida izohlanadi.

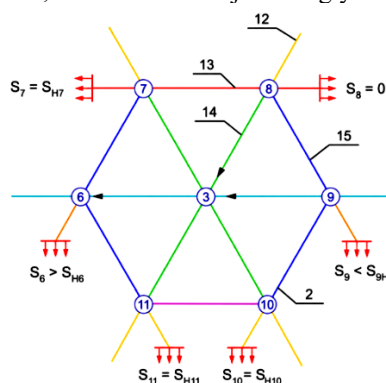
1-rasmda taqsimlangan elektr tarmog'ining umumiy sxemasi, 2-rasmda esa mazkur tarmoqning alohida qismi keltirilgan.



**1-rasm.** Taqsimlangan elektr tarmog'ining umumiy sxemasi

**Fig.1.** General diagram of a distributed power grid

1 - taqsimlovchi elektr tarmog'i, 2 - o'zaro bog'langan olti burchakli tuzilmalar, 3 - birinchi darajali energiya saqlash qurilmalari, 4 - elektr yuklama tugunlari, 5 - ikkinchi darajali o'zaro bog'langan ko'pburchakli tuzilmalar, 6 - ikkinchi darajali energiya saqlash qurilmalari.



**2-rasm.** Taqsimlangan elektr tarmog'ining bir qismi: 6-11 - elektr yuklama tugunlari, 12 - ta'minlovchi elektr liniyasi, 13 - energiya saqlash liniyasi, 14 - zaxira elektr liniyasi

**Fig.2.** Part of a distributed power grid

1-rasmda taqsimlovchi elektr tarmog'i 1 o'zaro bog'langan olti burchaklardan 2 tashkil topgan ikki darajali konfiguratsiya ko'rinishida keltirilgan. Ushbu olti burchaklarning uchlarida elektr yuklama tugunlari 4 joylashgan bo'lib, ular birinchi darajadagi energiya saqlash qurilmalari 3 bilan bog'langan. Ikkinchi darajadagi o'zaro bog'langan ko'pburchakli tuzilmalar 5 esa ikkinchi darajadagi energiya saqlash qurilmasi 6 bilan ulanadi. Birinchi va ikkinchi darajadagi boshqa olti burchaklar ham xuddi shunday ulanish sxemasiga ega 1-rasmda ko'rsatilmagan.

2-rasmda 6-11 raqamli elektr yuklama tugunlariga mos ravishda iste'mol quvvatlari  $S_6-S_{11}$  hamda nominal quvvatlari  $SH_6-SH_{11}$  bo'lgan elektr qabul qilgichlar ulangan. Har bir elektr

yuklama tuguni 6–11 tarkibida ta'minlovchi 12, tranzit 13, energiya saqlovchi 14 va zaxira 15 elektr liniyalari mavjud.

Taqsimlovchi elektr tarmog'i invariant xususiyatga ega. Ya'ni zarur holatlarda ta'minlovchi liniya tranzit yoki rezerv liniya sifatida, tranzit liniya ta'minlovchi liniya sifatida, rezerv liniya esa tranzit liniya sifatida ishlashi mumkin.

Bundan tashqari, 2-rasmda olti burchak markazida birinchi darajali energiya saqlash qurilmasi 3 joylashgan bo'lib, u 6–11 elektr yuklama tugunlarining har biri bilan energiya saqlovchi liniyalar 14 orqali bog'langan.

Taklif etilayotgan usul quyidagi tartibda amalga oshiriladi. Elektr energiyasi elektr uzatish liniyalari hamda taqsimlovchi tarmoqlarning kabel liniyalari orqali joriy vaqt momentida 6–11 elektr yuklama tugunlariga uzatiladi (2-rasm). Ushbu elektr yuklama tugunlari kuchlanish ostida bo'lib, S6–S11 quvvatga ega elektr qabul qilgichlarni energiya bilan ta'minlaydi.

Faraz qilaylik, ma'lum vaqt momentida 2-olti burchak tarkibidagi 6–11 elektr yuklama tugunlarida iste'mol qilinayotgan quvvatlar S6–S11 ularning nominal quvvatlari SH 6–SH 11 ga teng emas va quyidagi shartlarni qanoatlantiradi:

$$S_6 > S_H 6; S_7 = S_H 7; S_8 = 0; S_9 < S_H 9; S_{10} = S_H 10; S_{11} = S_H 11.$$

Natijada 2-olti burchak ichida S8+SH9-S9 qiymatga teng bo'lgan ortiqcha quvvat hosil bo'ladi. Ushbu ortiqcha quvvat (2-rasmda strelkalar yordamida ko'rsatilgan) energiya saqlash qurilmasiga 3 uzatiladi.

Energiya saqlash qurilmasi 3 ortiqcha energiyani to'playdi va keyinchalik uni energiya tanqisligi mavjud bo'lgan elektr yuklama tugunlari orasida qayta taqsimlaydi. Ko'rib chiqilayotgan holatda energiya 6- elektr yuklama tuguniga uzatiladi, chunki ushbu tugundagi iste'mol quvvati S6) nominal quvvat SH qiymatidan katta, ya'ni S6>SH6. Energiya saqlash qurilmasidan 6- elektr yuklama tuguniga energiya uzatish yo'nalishi 2-rasmda strelka bilan belgilangan.

Taqsimlovchi elektr tarmog'ining boshqa kuchlanish pog'onalarida ham elektr quvvatini to'plash va qayta taqsimlash jarayonlari xuddi shunday amalga oshiriladi. Taqsimlovchi tarmoqda ma'lum vaqt davomida hosil bo'lgan ortiqcha energiya energiya saqlash qurilmasida jamlanadi, zarurat tug'ilganda esa iste'mol quvvati oshgan elektr qabul qilgichlarga qayta uzatiladi.

Demak, ushbu elektr energiyasini uzatish usulida energiya saqlash qurilmasining "zaryadlash–razryadlash" sikliga mos keluvchi vaqt oralig'i mavjud bo'ladi. Shu davr mobaynida elektr energiyasini ishlab chiqarish, taqsimlash va iste'mol qilish jarayonlarining bir vaqtning o'zida sodir bo'lish tamoyili buziladi. Mazkur tamoyil an'anaviy sinxron energiya uzatish usullarining asosiy xususiyatlaridan biridir.

Shu sababli taklif etilayotgan elektr energiyasini uzatish usulini asinxron uzatish usuli deb atash mumkin.

Asinxron elektr energiyasini uzatish usuli ishlab chiqarilayotgan va iste'mol qilinayotgan elektr energiyasi o'rtasida samarali muvozanatni ta'minlash imkonini beradi.

Taklif etilayotgan energiya uzatish usulining amaliy joriy etilishi quyidagi afzalliklarni ta'minlaydi:

- ishlab chiqarish va iste'mol hajmlari o'rtasidagi nomutanosiblik tufayli yuzaga keladigan energiya yo'qotishlarini kamaytiradi;
- qo'shimcha energiya saqlash liniyalari hisobiga elektr qabul qilgichlarning elektr ta'minoti ishonchlilikini oshiradi;
- elektr yuklama grafigining bazaviy va maksimal (pik) qismlaridagi energiya tannarxi farqini kamaytirish orqali elektr energiyasi xarajatlarini pasaytiradi;
- elektr energetika uskunalarning xizmat qilish muddatini uzaytiradi.

#### 4. Muhokama (Discussion)

Elektr yuklama tugunlari ko'pburchaklarning uchlarida joylashtirilgan, shuningdek, energiya saqlash qurilmalarini elektr yuklama tugunlari bilan bog'lovchi ta'minlovchi, rezerv va energiya saqlovchi liniyalarga ega bo'lgan o'zaro bog'langan ko'pburchaklar asosidagi ko'p darajali elektr taqsimlovchi tarmoq topologiyasi energiya oqimlarini tarmoqning barcha pog'onalarida joylashgan energiya saqlash qurilmalari yordamida boshqarish imkonini beradi. Natijada tarmoqda ishlab chiqarilayotgan va iste'mol qilinayotgan elektr energiyasi hajmlari o'rtasidagi nomutanosiblik kamayadi.

Mazkur yondashuv qator ijobiy texnik va ekspluatatsion natijalarga olib keladi. Energiya oqimlarini samarali boshqarish uchun generatsiya darajasi, iste'mol holati hamda energiya saqlash qurilmalarining ish rejimi to'g'risidagi ma'lumotlarni uzluksiz olishni ta'minlaydigan teleaxborot tarmog'i talab etiladi. Bunday axborotlarni yig'ish uchun ko'p sonli arzon o'lchov datchiklari va

zamonaviy aloqa vositalaridan foydalanish zarur. Ushbu vazifani global INTERNET tarmog'i imkoniyatlaridan foydalanish asosida amalga oshirish mumkin.

Katta hajmdagi ma'lumotlarni yig'ish, saqlash va qayta ishlash masalalari esa bulutli hisoblash texnologiyalari hamda sun'iy intellektga asoslangan Big Data texnologiyalari yordamida samarali hal etiladi.

## 5. Xulosa (Conclusion)

ENERNET konsepsiyasiga mos ko'p bosqichli va ko'pburchakli topologiyaga ega taqsimlangan elektr tarmog'ining matematik modeli ishlab chiqildi hamda elektr energiyasi balansini ta'minlashning nazariy asoslari shakllantirildi. Tugun kuchlanishlari usuliga asoslangan matematik apparat elektr tarmog'ining o'rnatilgan ish rejimlarini yuqori aniqlikda tahlil qilish, energiya oqimlarini optimallashtirish va tugunlararo quvvat almashinuvini baholash imkonini berishi aniqlandi. Energiya saqlash qurilmalarining elektr yuklarni tugunlari bilan integratsiyalashuvi ishlab chiqarilayotgan va iste'mol qilinayotgan energiya o'rtasidagi nomutanosiblikni kamaytirishga, elektr energiyasi yo'qotishlarini qisqartirishga hamda elektr ta'minoti ishonchligini sezilarli darajada oshirishga xizmat qilishi asoslandi. Taklif etilgan topologik yechim taqsimlangan generatsiya manbalari va qayta tiklanuvchi energiya resurslarini elektr tarmoqlariga samarali integratsiyalash, Smart Grid va ENERNET platformalarini rivojlantirish hamda zamonaviy raqamli elektr energetika tizimlarining energiya samaradorligi va ekspluatatsion barqarorligini ta'minlash uchun ilmiy-uslubiy asos bo'lib xizmat qiladi. Mazkur tadqiqot natijalari istiqbolda adaptiv boshqaruv algoritmlarini ishlab chiqish, raqamli egizak (Digital Twin) texnologiyalarini joriy etish va intellektual elektr taqsimlash tarmoqlarini loyihalash bo'yicha ilmiy izlanishlarni yanada rivojlantirish uchun muhim nazariy va amaliy ahamiyatga ega.

## ADABIYOT

1. AJ. Arsenio. Experimental Setup and Efficiency of Zero-Field-Cooled ZFC YBCO Magnetic Bearings. // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2017. – Vol. 27, No. 4. – Art. 3601105.
2. Bayat H. Energy Management System for Smart House with Multi-Sources Using PI-CA Controller. // 4th Iranian Conference on Renewable Energy and Distributed Generation (CREDG). – 2016. – P. 24–31.
3. Beckermann J., Heinbockel S. Device and Method for the Formation, Storage and Transmission of Electrical Energy. Patent of the Russian Federation No. 2496208, IPC H02J7/34. – Publ. 20.10.2013.
4. Belov V.F., Rozhkova N.N. Modern High Technologies. – 2016. – No. 5. – P. 20–26.
5. Coster E.J. Distribution Grid Operation Including Distributed Generation. – Enschede: Ipskamp Drukkers, 2010. – 205 p.
6. Farafontov D.V. Experimental Evaluation of the Model of Optimal Control of Electric Energy. // Digital Energy. – 2018. – No. 5. – P. 17–24.
7. Fotuhi-Firuzabad M., Moeini-Agtaie M., Zareipour H.A. Probabilistic Energy Management // IEEE Transactions on Smart Grid. – 2017. – Vol. 8, No. 5. – P. 2217–2227.
8. Lecture 8: Smart Grid / Dr. Gleb V. Tcheslavski. – Lamar University, 2013.
9. Lin X., Lei Y., Zhu Y. A Novel Superconducting Magnetic Energy Storage System Design Based on a Three-Level T-Type Converter and Its Energy-Shaping Control Strategy. // Electric Power Systems Research. – 2018. – Vol. 162. – P. 64–73.
10. Raul E.V. Prospects for the Use of Energy Storage for 0.4 kV Power Supply Networks. // Vestnik MPEI. – 2013.
11. Smart Power Grids – Talking about a Revolution. // IEEE Emerging Technology Portal. – 2009.
12. Smolentsev N.I., Kondrin S.A. Superconducting Electrokinetic Energy Storage for Local Electric Networks // Proceedings of the Higher Educational Institutions. Energy Sector Problems. – 2017. – Vol. 19, No. 3–4. – P. 53–60.
13. Smolentsev N.I., Kondrin S.A., Bondarev Y.L., Gilmetdinov M.F., Kazantsev A.M., Sirekanyan V.V. Some Issues of Development and Mathematical Modeling of Superconducting Electrokinetic Energy Storage Unit. // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2017.
14. Sun Q., Zhang Y., Ma H.D. A Novel Energy Function-Based Stability Evaluation and Nonlinear Control Approach for Energy Internet. // IEEE Transactions on Smart Grid. – 2017. – Vol. 8, No. 3. – P. 1195–1210.
15. Bakhadirov I.I. Electricity Consumption Forecast and Grouping for Forecasting / International Scientific and Practical Conference "Modern Views and Research". – England, 2022.

16. Bakhadirov I.I., Musajanova D.A., Ostonova M.B., Musajanova N.A. The Model of Intelligent Control of the State of Parameters in Digital Power Grids. // Eurasian Journal of Mathematical Theory and Computer Sciences. – 2024. – Vol. 4, No. 2. – P. 30–39.
17. Muratov A., Saparniyazova Z., Bakhadirov I., Bijanov A. Analysis of Electricity Loss Calculation Methods in Distribution Networks. // E3S Web of Conferences. – 2021. – Vol. 289. – Art. 07117.
18. Niyofov N., Khushbokov B., Saidova G.E., Bakhadirov I. Energy Efficiency of Concrete Work Technology // AIP Conference Proceedings.
19. Sattarov Kh.A., Bakhadirov I.I. Application Energy Management is an Effective Energy Saving System and Solving Problems of Its Implementation. // Science and Innovation International Scientific Journal. – 2024. – Vol. 3, Issue 2. – P. 161–172.
20. Sattarov Kh.A., Bakhadirov I.I. Digitalization of the Electric Power Industry as a Way to Improve the Efficiency of Large Grid Companies. // Journal of Modern Educational Achievements (JMEA). – 2023. – Vol. 11. – P. 26–32.
21. Sattarov Kh.A., Bakhadirov I.I., Umarov R.T. Energy Efficiency through ISO 50001 Energy Management System. // Science and Innovation International Scientific Journal. – 2024. – Vol. 3, Issue 2. – P. 157–160.
22. Булатов Б.В., Тарасенко В.В. Алгоритмы интеллектуального управления режимом распределительной сети. // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. – 2012. – № 37. – С. 18–22.
23. Дерзский В.Г., Скиба В.Ф. Многокритериальная оптимизация режимов распределительных электросетей в условиях случайности. // Энергетика. – 2011.
24. Кобец Б.Б., Волкова И.О. Инновационное развитие электроэнергетики на основе концепции Smart Grid. – М.: ИАЦ Энергия, 2010.
25. Лоскутов А.Б., Соснина Е.Н., Лоскутов А.А., Зырин Д.В. Городские распределительные сети 10–20 кВ с гексагональной конфигурацией. // Электротехника и электроэнергетика. – 2013. – № 12. – С. 309–315.
26. Лоскутов А.Б., Соснина Е.Н., Лоскутов А.А. Способ передачи электрической энергии. Патент РФ № 2475918, МПК H02J4/00. – Опубл. 20.02.2013. – Бул. № 5.

## REFERENCES

1. AJ. Arsenio. Experimental Setup and Efficiency of Zero-Field-Cooled ZFC YBCO Magnetic Bearings. // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2017. – Vol. 27, No. 4. – Art. 3601105.
2. Bayat H. Energy Management System for Smart House with Multi-Sources Using PI-CA Controller / 4th Iranian Conference on Renewable Energy and Distributed Generation (CREDG). – 2016. – P. 24–31.
3. Beckermann J., Heinbockel S. Device and Method for the Formation, Storage and Transmission of Electrical Energy. Patent of the Russian Federation No. 2496208, IPC H02J7/34. – Publ. 20.10.2013.
4. Belov V.F., Rozhkova N.N. Modern High Technologies. – 2016. – No. 5. – P. 20–26.
5. Coster E.J. Distribution Grid Operation Including Distributed Generation. – Enschede: Ipskamp Drukkers, 2010. – 205 p.
6. Farafontov D.V. Experimental Evaluation of the Model of Optimal Control of Electric Energy. // Digital Energy. – 2018. – No. 5. – P. 17–24.
7. Fotuhi-Firuzabad M., Moeini-Agtaieh M., Zareipour H.A. Probabilistic Energy Management. // IEEE Transactions on Smart Grid. – 2017. – Vol. 8, No. 5. – P. 2217–2227.
8. Lecture 8: Smart Grid / Dr. Gleb V. Tcheslavski. – Lamar University, 2013.
9. Lin X., Lei Y., Zhu Y. A Novel Superconducting Magnetic Energy Storage System Design Based on a Three-Level T-Type Converter and Its Energy-Shaping Control Strategy. // Electric Power Systems Research. – 2018. – Vol. 162. – P. 64–73.
10. Raul E.V. Prospects for the Use of Energy Storage for 0.4 kV Power Supply Networks. // Vestnik MPEI. – 2013.
11. Smart Power Grids – Talking about a Revolution. // IEEE Emerging Technology Portal. – 2009.
12. Smolentsev N.I., Kondrin S.A. Superconducting Electrokinetic Energy Storage for Local Electric Networks. // Proceedings of the Higher Educational Institutions. Energy Sector Problems. – 2017. – Vol. 19, No. 3–4. – P. 53–60.
13. Smolentsev N.I., Kondrin S.A., Bondarev Y.L., Gilmetdinov M.F., Kazantsev A.M., Sirekanyan V.V. Some Issues of Development and Mathematical Modeling of Superconducting Electrokinetic Energy Storage Unit. // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. –



2017.

14. Sun Q., Zhang Y., Ma H.D. A Novel Energy Function-Based Stability Evaluation and Nonlinear Control Approach for Energy Internet. // IEEE Transactions on Smart Grid. – 2017. – Vol. 8, No. 3. – P. 1195–1210.

15. Bakhadirov I.I. Electricity Consumption Forecast and Grouping for Forecasting. // International Scientific and Practical Conference "Modern Views and Research". – England, 2022.

16. Bakhadirov I.I., Musajanova D.A., Ostonova M.B., Musajanova N.A. The Model of Intelligent Control of the State of Parameters in Digital Power Grids. // Eurasian Journal of Mathematical Theory and Computer Sciences. – 2024. – Vol. 4, No. 2. – P. 30–39.

17. Muratov A., Saparniyazova Z., Bakhadirov I., Bijanov A. Analysis of Electricity Loss Calculation Methods in Distribution Networks. // E3S Web of Conferences. – 2021. – Vol. 289. – Art. 07117.

18. Niyozov N., Khushbokov B., Saidova G.E., Bakhadirov I. Energy Efficiency of Concrete Work Technology. // AIP Conference Proceedings.

19. Sattarov Kh.A., Bakhadirov I.I. Application Energy Management is an Effective Energy Saving System and Solving Problems of Its Implementation. // Science and Innovation International Scientific Journal. – 2024. – Vol. 3, Issue 2. – P. 161–172.

20. Sattarov Kh.A., Bakhadirov I.I. Digitalization of the Electric Power Industry as a Way to Improve the Efficiency of Large Grid Companies. // Journal of Modern Educational Achievements (JMEA). – 2023. – Vol. 11. – P. 26–32.

21. Sattarov Kh.A., Bakhadirov I.I., Umarov R.T. Energy Efficiency through ISO 50001 Energy Management System. // Science and Innovation International Scientific Journal. – 2024. – Vol. 3, Issue 2. – P. 157–160.

22. Bulatov B.V., Tarasenko V.V. Algorithms of intelligent control of the distribution network mode. // Bulletin of the South Ural State University. Series: Energy. 2012. No. 37. pp. 18–22.

23. Derzskiy V.G., Skiba V.F. Multicriteria optimization of distribution power grids under random conditions. // Energy. – 2011.

24. Kobets B.B., Volkova I.O. Innovative development of the electric power industry based on the Smart Grid concept. Moscow: IAC Energia, 2010.

25. Loskutov A.B., Sosnina E.N., Loskutov A.A., Zyryin D.V. Urban distribution networks of 10–20 kV with a hexagonal configuration. // Electrical engineering and electric power industry. 2013. No. 12. pp. 309–315.

26. Loskutov A.B., Sosnina E.N., Loskutov A.A. Method of electric energy transmission. Patent of the Russian Federation No. 2475918, IPC H02J4/00. – Published on 02/20/2013. – Byul. No. 5.