



0,4 kV kuchlanishli tarmoqlarda elektr energiyasi sifatini yaxshilash va tahlil qilishda innovatsion yondashuvlar

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

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

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

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

Dolzarbliigi: hozirgi zamonaviy taraqqiyot sharoitida 0,4 kV kuchlanishli elektr tarmoqlari ko'plab ishlab chiqarish va yuqori kuchlanishli tarmoqlarni uzluksiz elektr energiyasi bilan ta'minlashda muhim ahamiyat kasb etmoqda. Elektr energiyasi sifati (EES) — kuchlanish darajasi, chastota va garmonik tarkibning barqarorligi hamda elektr iste'molchilarning samaradorligi va uzoq muddatli ishlashining hal qiluvchi omili hisoblanadi. Tarmoqda yuzaga keladigan kuchlanishning o'zgarishlari, garmonik buzilishlar va reaktiv quvvat bilan bog'liq muammolari barcha energiyaning samarasiz sarflanishiga, shuningdek, uskuna va qurilmalarning tez ishdan chiqishiga ham olib keladi. Bu shuni anglatadiki, EESni yangi innovatsion izlanishlar natijasida yaxshilash mumkin, ya'ni mavsumiy davrlarda muntazam monitoring olib borish, zamonaviy uskunalarining boshqaruv tizimini kontaktsiz kommutatsiyalashda kontaktsiz qurilmalarni qo'llash hamda raqamlashishda qo'llaniladigan mikrokontrollerlar boshqaruvini zamonaviy dasturlar va algoritmlar asosida boshqarish dolzarb masaladir. Ushbu yo'nalishdagi ilmiy-tadqiqot ishlari energetika tizimining ishonchliligi va samaradorligini oshirishga xizmat qiladi.

Maqsad: 0,4 kV kuchlanishli elektr tarmoqlarida EESni ta'sir etuvchi omillarni tahlil qilish, mavjud muammolarni aniqlash va ularni bartaraf etishda innovatsion texnologiyalarni joriy etish orqali elektr ta'minoti samaradorligini oshirishdan iborat.

Usullari: ushbu maqolada 0,4 kV kuchlanishli elektr tarmoqlarida EESni ta'sir qiluvchi omillar o'rganilib, ilmiy tadqiqot usuli sifatida tajriba, modellashtirish va raqamli tahlillar qo'llanildi. Real tarmoqlarda o'lchovlar olib boriladi, garmonik tarkib buzilishlari, kuchlanish tebranishlari va nosimmetriklik darajalari baholandi. Electronics Workbench va MATLAB R2014a dasturlari orqali simulyatsiyalar amalga oshirildi. Innovatsion usul sifatida avtomatlashtirilgan monitoring tizimlari (elektr energiyasini nazorat qilish va hisobga olishning avtomatlashtirilgan tizimi), sun'iy intellekt yordamida tahlil va EES ko'rsatkichlarini yaxshilash strategiyalari ishlab chiqiladi. Olingan natijalar amaliyotda qo'llanilishi mumkin bo'lgan tavsiyalar shaklida taqdim etiladi.

Natijalar: 0,4 kV kuchlanishli elektr tarmoqlarida energiya sifati muhim ahamiyatga ega. Ushbu tadqiqotda kuchlanishning stabililigini ta'minlash, yuqori garmonikalarni kamaytirish, reaktiv quvvatni kompensatsiyalash kabi muammolar o'rganildi. Innovatsion yechimlar sifatida raqamli monitoring tizimlari, kontaktsiz kommutatsiyalovchi qurilmalar va avtomatlashtirilgan boshqaruv tizimlari taklif etildi. Tahlil natijalariga ko'ra, mazkur yondashuvlar asosida energiya isroflarini kamaytirish va elektr ta'minoti ishonchliligi va barqarorligini yaxshilash mumkin. Shu bilan birga, elektr energiyasi iste'molini samarali boshqarish imkoni ham paydo bo'ladi. Xulosa qilib aytganda, taklif qilinayotgan innovatsion texnologiyalar (kontaktsiz kommutatsiyalovchi qurilmalar) tarmoqdagi elektr energiya sifatini yaxshilashda muhim o'rin tutadi.

Kalit so'zlar: elektr iste'molchilar, elektr energiyasi sifati (EES), elektr ta'minoti, volt qo'shuvchi transformator (VQT), havo elektr uzatish liniyasi (HEUL), transformator podstansiyasi (TP), o'zini ko'taruvchi izolyatsiyalangan sim (SIP), boshqaruv tizimi, kontaktsiz rele, tiristor, kondensator, Electronics Workbench, MATLAB R2014a.

Инновационные подходы к анализу и улучшению качества электроэнергии в сетях напряжением 0,4 кВ

Махсуд К. Бобожанов¹, Элдор Г. Усманов^{1,b}, Рахматилло Ч. Каримов^{1,a)}

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

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

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

Актуальность: в современных условиях важную роль в бесперебойном обеспечении электроэнергией большого количества производственных и высоковольтных сетей играют электрические сети напряжением 0,4 кВ. Качество электроэнергии зависит от таких факторов как параметры напряжения, частоты и гармонического состава, а также эффективности и продолжительности работы электропотребителей. Изменения напряжения, возникающие в сети, гармонические нарушения и

For citation: M.K. Bobojanov, E.G. Usmanov, R.Ch. Karimov. Innovative Approaches to Improving and Analyzing Power Quality in 0.4 kV Networks. Scientific and technical journal of Problems of Energy and Sources Saving, 2025, no. 3, pp. 58-74.

<https://doi.org/10.5281/zenodo.16935182>

Received: 16.07.2025

Revised: 25.07.2025

Accepted: 13.08.2025

Published: 23.08.2025

Copyright: © Maxsud K. Bobojanov, 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/>).



проблемы, связанные с реактивной мощностью, приводят к неэффективному расходу всей энергии, что впоследствии приводит к быстрому износу оборудования и устройств. Это означает, что качество электроэнергии необходимо улучшать, используя новые инновационные исследования, что требует регулярного автоматического мониторинга в сезонные периоды, использование бесконтактных коммутирующих устройств систем автоматического управления современным оборудованием, а также управление микроконтроллерами, используемые для цифровизации, на основе современных программ и алгоритмов. Проводимые научно-исследовательские работы в этом направлении служат повышению надежности и эффективности энергетической системы.

Цель: анализ факторов, влияющих на качество электроэнергии в электрических сетях напряжением 0,4 кВ, выявление существующих проблем и повышение эффективности электроснабжения за счет внедрения инновационных технологий для их устранения.

Методы: при написании данной статьи были изучены факторы, влияющие на качество электроэнергии в электрических сетях напряжением 0,4 кВ, и в качестве метода научного исследования были проведены эксперимент, моделирование и численный анализ. В реальных энергетических сетях проводились измерения, оценивались уровни гармонических искажений, колебаний напряжений и несимметрии. Моделирование проводилось с помощью программ Electronics Workbench и MATLAB R2014a. Для исследования автоматизированных систем мониторинга (автоматизированная система контроля и учета электроэнергии) с применением инновационного метода проводился анализ с помощью искусственного интеллекта и стратегии улучшения показателей качества электроэнергии. Полученные результаты представлены в виде рекомендаций, которые могут быть применены на практике.

Результаты: в электрических сетях напряжением 0,4 кВ качество энергии имеет большое значение. В данном исследовании были изучены такие проблемы, как обеспечение стабильности напряжения, уменьшение высших гармоник, компенсация реактивной мощности. В качестве инновационных решений были предложены цифровые системы мониторинга, бесконтактные коммутирующие реле и автоматизированные системы управления. Согласно результатам анализа, на основе этих подходов можно снизить потери энергии и улучшить стабильность электроснабжения. Вместе с тем появится возможность эффективного управления потреблением электроэнергии. Таким образом, предлагаемые инновационные технологии (бесконтактные коммутационные устройства) играют важную роль в улучшении качества сетевой электроэнергии.

Ключевые слова: электропотребители, качество электроэнергии (КЭ), электроснабжение, вольтодобавочный трансформатор (ВДТ), воздушная линия электропередачи (ВЛЭП), трансформаторная подстанция (ТП), самонесущий изолированный провод (СИП), система управления, бесконтактное реле, тиристор, конденсатор, Electronics Workbench, MATLAB R2014a.

Innovative Approaches to Improving and Analyzing Power Quality in 0.4 kV Networks

Maxsud K. Bobojanov¹, Eldor G. Usmanov¹, Raxmatillo Ch. Karimov^{1,a)}

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

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

^{1,a)} 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: in modern conditions of development, 0.4 kV electrical networks play an important role in the uninterrupted power supply of a large number of industrial and high-voltage systems. The quality of electric power depends on factors such as voltage parameters, frequency, and harmonic composition, as well as the efficiency and operating duration of electrical consumers. Voltage fluctuations in the network, harmonic disturbances, and issues related to reactive power lead to inefficient energy consumption, which subsequently causes rapid wear and tear of equipment and devices. This means that the quality of electric power must be improved through new innovative research, which requires regular automatic monitoring during seasonal periods, the use of contactless switching devices in automatic control systems of modern equipment, as well as microcontroller-based management used for digitalization, based on modern software and algorithms. The ongoing research in this field contributes to enhancing the reliability and efficiency of the energy system.

Aim: analysis of factors affecting power quality in 0.4 kV electrical networks, identification of existing problems, and improvement of power supply efficiency through the implementation of innovative technologies to eliminate them.

Methods: in the preparation of this article, the factors affecting the power quality in 0.4 kV electrical networks were studied, and experiment, modeling, and numerical analysis were conducted as methods of scientific research. In real power networks, measurements were conducted to assess the levels of harmonic distortion, voltage fluctuations, and asymmetry. The modeling was carried out using Electronics Workbench and MATLAB R2014a software. To study automated monitoring systems (automated electricity metering and control system) using an innovative method, an analysis was carried out with the help of artificial intelligence and a strategy for improving power quality indicators. The obtained results are presented as recommendations that can be applied in practice.

Results: in 0.4 kV electrical networks, power quality is of great importance. This study examined issues such as

voltage stability enhancement, harmonic distortion reduction, and reactive power compensation. As innovative solutions, digital monitoring systems, contactless switching relays, and automated control systems were proposed. According to the analysis results, these approaches can reduce energy losses and improve the stability of power supply. At the same time, it will become possible to manage electricity consumption efficiently. Thus, the proposed innovative technologies (contactless switching devices) play an important role in improving the quality of network electricity.

Key words: electrical consumers, quality of electricity (QE), power supply, Voltage-boosting transformer (VBT), overhead power line (OPL), transformer substation (TS), self-supporting insulated wire (SSIW), control system, contactless relay, thyristor, capacitor, Electronics Workbench, MATLAB R2014a.

1. Kirish (Introduction)

O'zbekiston hududining qishloq joylarida iste'mol qilinadigan quvvat va iste'molchilar sonining o'sishi, taqsimlovchi tarmoqlar uzunligining oshishi va elektr uskunalarning eskirishi kuchlanishning nostabilligiga, elektr energiyasining sezilarli isroflariga va eng uzoq nuqtadagi iste'molchilarda kuchlanishning ruxsat etilgan darajadan pasayishiga olib keladi. Elektr tarmog'i parametrlarining nominal qiymatlardan chetga chiqishi elektr iste'molchilarning ish sifatini pasaytiradi va ularga moddiy hamda iqtisodiy zarar yetkazadi [1-2].

Qishloq joylardagi aholi punktlarining elektr ta'minoti sanoat korxonalarini va shaharlarning elektr ta'minotiga nisbatan bir qator o'ziga xos xususiyatlari bilan farq qiladi. Ulardan asosiysi - katta hududda tarqalgan nisbatan kichik quvvatli ko'p sonli obyektlarga elektr energiyasini yetkazib berish zaruriyati mavjud. Shuni ta'kidlash lozimki, Respublika bo'yicha qishloq aholi punktlariga sug'oriladigan yerlar ko'pligi sababli, 0,4 kV kuchlanishli taqsimlovchi tarmoqlar katta uzunlikka ega, ya'ni ba'zi hududlarda 1-1,5 km dan ham oshadi. Natijada tarmoqlarning uzunligi (iste'molchilarning quvvat birligiga nisbatan) boshqa tarmoqlarga ko'ra bir necha barobar katta bo'ladi [1-3].

Taqsimlovchi tarmoqlarning eskirishi va ishdan chiqish jarayonlari asosan 0,4 kV kuchlanishli HEULga tegishlidir. Ushbu muammoning zaruriy yechimi sifatida 10/0,4 kV kuchlanishli taqsimlovchi tarmoqlarini qayta qurish, elektr ta'minoti markazlarini kichiklashtirish hamda hudud bo'ylab taqsimlangan o'zgarimas yuklamali tarmoqlar uchun 0,4 kV kuchlanishli kichik uzunlikdagi tarmoqlangan liniyalar tarmog'ini qurish hisoblanadi. Aksariyat hollarda yaxshi bog'lanmagan tuman markaziy podstantsiyasi (MP) va HEULLar katta iqtisodiy va moddiy xarajatlarni talab qiladi hamda ularni qisqa muddatlarda amalga oshirish qiyin, ya'ni Respublika bo'yicha qishloq aholi punktlarining joylashuvi xususiyatlarining cheklanganligi tufayli amalga oshirib bo'lmaydi. Qishloq joylarida ayrim posyolkalarda elektr tarmoqlari kompleksini chuqur modernizatsiya qilinishi, yuklamalarning mavsumiyligi sababli maqsadga muvofiq emas. Natijada, ma'nan eskirgan HEULLarda kuchlanishning uzoq muddatli nostabilligi, sezilarli darajadagi isroflar va eng uzoqda joylashgan iste'molchilarda kuchlanishning sezilarli og'ishi kuzatiladi. Ushbu muammolar, asosan 0,4 kV kuchlanishli HEULLarining uzunligi katta bo'lgan qishloq taqsimlovchi tarmoqlarida ko'proq namoyon bo'ladi. Hozirgi vaqtda 0,4-10 kV kuchlanishli taqsimlovchi tarmoqlarni qurish konseptual jihatdan bir necha yo'nalishlarda olib borilmoqda [1-4]:

- 0,4-10 kV kuchlanishli taqsimlovchi tarmoqlarni MP quvvatini bo'lish yo'li bilan qayta qurish va notekis taqsimlangan yuklamali tarmoqlar uchun 0,4 kV kuchlanishli tarqalgan tarmoq qurish;
- hududiy rivojlantirish, yuklamani yanada oshishi va taqsimlash istiqbollari bilan tarmoqni 10 kV kuchlanishli, 10/0,4 kV to'plamli TP va har bir KTPdan iste'molchilarning qat'iy belgilangan sonini ta'minlaydigan tarmoqlarni qurish;
- kuchlanish o'zgarishini zudlik bilan boshqarish uchun 0,4 kV kuchlanishli VQTLarni o'rnatish.

Dastlabki ikki yo'nalish 0,4-10 kV kuchlanishli elektr tarmoqlar kompleksini qayta qurish va yangisini qurish bo'yicha asosiy texnik tadbirlar hisoblanadi. Yangi qurilish deganda, elektr tarmoqlari majmuasi uchun yangi ajratilgan yer uchastkalarida ishlab chiqariladigan yangi maishiy va ishlab chiqarish quvvatlarini yaratish uchun elektr ta'minoti obyektlari (HEUL, KTP, TP, texnologik inshootlar, kommunikatsiyalar, binolar) qurilishi tushuniladi. Tugatilayotgan, texnik-iqtisodiy yoki ekologik mezonlar bo'yicha keyinchalik foydalanish maqsadga muvofiq emas deb topilgan elektr ta'minoti obyekti o'rniga yangi elektr ta'minoti obyektini qurishni ham yangi qurilish jumlasiga kiritish lozim [1-5].

Qishloq hududlarining elektr ta'minoti tizimlarini loyihalashda va ulardan foydalanish jarayonida eng yaxshi texnik-iqtisodiy ko'rsatkichlarga ega bo'lgan variantni tanlash masalalari muntazam ravishda hal qilinadi. Bunday vazifalarga quyidagilar kiradi [1-3]:

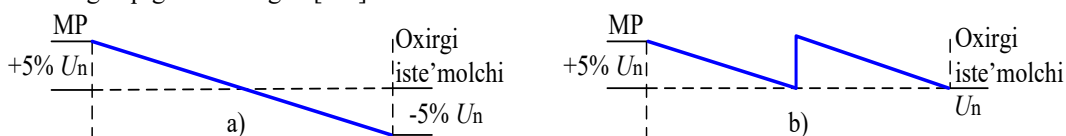
- simlarning ko'ndalang kesim yuzasi va TP quvvatlarini tanlash;
- tarmoqlarni rivojlantirishning optimal variantini tanlash;
- elektr energiyasi isrofini kamaytirish tadbirlari;
- elektr ta'minoti ishonchligini oshirish.

Loyiha variantidagi kapital xarajatlar, ishlab chiqarishning joriy yillik xarajatlari va ekspluatatsiya xarajatlari bilan farqlanadi. Kapital xarajatlar va ishlab chiqarish xarajatlari kamroq

bo'lgan variant eng yaxshisidir.

Aksariyat hollarda variantlar bir-biridan keskin farq qilishi mumkin, ya'ni ba'zida kapital xarajatlar ko'p bo'lsa, boshqalarida ishlab chiqarish xarajatlari yuqori bo'ladi. Shuning uchun ko'rib chiqilayotgan variantlarni boshqa teng sharoitlarda, ya'ni mahsulot hajmi va uning sifati bir xil bo'lganda taqqoslash zarur. Elektr ta'minoti tizimlari uchun bu, iste'molchilarga beriladigan EES va elektr ta'minoti ishonchligining me'yoriy daraja-lariga javob beradigan bir xil qiymatini anglatadi. Yuqorida ta'kidlanganidek, Respublikadagi mavjud qishloq aholi punktlarida 0,4 kV kuchlanishli elektr uzatish liniyalari 1-1,5 km dan ortiq uzunlikka ega bo'lib, maishiy va sanoat zonalarida elektr energiyasi iste'molining o'sishi kuzatilmoqda, shuning uchun ushbu tarmoqlarda katta kuchlanish isroflari va natijada energiya isroflari kuzatilmoqda [1-6].

Tadqiqotlarimiz natijasi shuni ko'rsatdiki, taqsimlovchi tarmoqlarni ajratishda VQTLardan foydalanish tarmoqdagi kuchlanish isrofi va elektr energiyasi isrofini kamaytirish hamda 0,4 kV kuchlanishli HEULni qisman simmetriyalash kabi bir qancha masalalarni yechishga olib keladi. 1-rasmda taqsimlovchi tarmoq uzunligi bilan bog'liq holda, elektr iste'molchilarda kuchlanish o'zgarishi ko'rsatilgan bo'lib, bu yerda, a - VQTDan foydalanmasdan hamda b - VQTDan foydalangan holda bog'liqligi ko'rsatilgan [1-6].



1-rasm. Taqsimlovchi tarmoq uzunligi bilan bog'liq holda elektr iste'molchilar kuchlanishining o'zgarish grafigi
Fig.1. Graph of voltage variation of electric consumers in relation to the length of the distribution network

Ma'lumki, kuchlanishni mavsumiy ravishda nominaldan $\pm 10\%$ ga o'zgartirish imkonini beruvchi qurilma (ПБВ - переключение без возбуждения)si mavjud TP-10/0,4 kV tipli transformatorlar qo'llaniladi. Biroq, fermer xo'jaliklarining ko'payishi va Respublikaning qishloq joylarida yashovchi aholi farovonligining oshishi iste'mol qilinadigan elektr energiyasining oshishiga olib keladi, buning natijasida ruxsat etilganidan ortiq kuchlanish isroflari ham ortadi. Shunday qilib, 0,4 kV kuchlanishli taqsimlovchi tarmoqlarda kuchlanishni avtomatik va tekis rostdash imkonini beradigan VQTLarini ishlab chiqish va yaratish zarurati tug'ilmoqda [1-6].

Shuni aytish mumkinki, Respublikamiz misolida VQTLar ochiq havoda o'rnatiladi, bu yerda yozgi davrda havo harorati 50^0-60^0S va undan yuqori bo'lishi mumkin. Shuning uchun VQTLarni avtomatik rostdash qurilmalariga qo'yiladigan talablar quyidagilardan iborat, ya'ni atrof-muhitning ijobiy haroratlariga chidamli va xizmat ko'rsatuvchi xodimlardan maxsus bilimlarni talab qilmaydigan sodda sxemalarni ishlab chiqishga ehtiyoj mavjud.

2. Usullar va materiallar (Methods and materials)

Jahon elektr tarmoqlari kompaniyalari uchun ham kuchlanishning me'yoriy darajasiga rioya qilish dolzarb muammo hisoblanadi. Ishlab chiqarish va hayotiy turmush tarzimizda ko'plab elektr iste'molchilar qo'llanilib, ularning tarkibiga kuchlanishning ruxsat etilgan qiymatlaridan o'zgarishiga yetarlicha sezgir bo'lgan qurilmalar ham ishlatiladi. Ularning ishdan chiqishi uskunalarning ishdan chiqishiga yoki texnologik jarayonlarning buzilishiga sabab bo'lishi mumkin. O'z navbatida, bu elektr tarmoqlari korxonalar uchun iqtisodiy yo'qotishlarga olib kelishi mumkin, chunki iste'molchilar nafaqat ishdan chiqqan uskunalarni almashtirishni, balki elektr energiyasini to'liq yetkazib bermaganlik uchun pul mablag'lari (kompensatsiya)ni ham talab qilishga haqlidir [1-6].

Mavzuning tanlanishi xizmat muddati tugagan HEULarida kuchlanish pasayishi bilan bog'liq muammolarni hal qilishni yechadigan, shuningdek, iqtisodiy samaradorlikni ta'minlaydigan VQTNi o'rnatish orqali talab juda yuqori bo'lgan past kuchlanishli taqsimlovchi tarmoqlarda EESni yaxshilash zarurati bilan asoslangan.

Har qanday ishlab chiqarish korxonalarida elektr tarmoqlarida shunday energetik obyektlar mavjudki, ulardagi iste'molchilardan EES bo'yicha doimiy ravishda shikoyatlar kelib tushadi. Buning asosiy sababi HEULning uzunligi bo'lib, dastlabki qurilish paytida ular bunchalik ko'p yangi ulanishlarga mo'ljallanmagan edi.

EESning asosiy ko'rsatkichlari ro'yxati O'zDSt 1044:2003 (2003 yil 18-iyuldan kuchga kirgan) bilan tartibga solinadi va quyidagi ko'rinishga ega [1]:

- kuchlanishning barqarorlashgan og'ishi;
- kuchlanishning o'zgarish kengligi;
- kuchlanish pasayishining davomiyligi;
- kuchlanishning n-chi garmonik tashkil etuvchi koeffitsiyenti;
- kuchlanish sinusoidaligini buzilish koeffitsiyenti;
- kuchlanishning teskari ketma-ketlik bo'yicha nosimmetriklik koeffitsiyenti;

- kuchlanishni nol ketma-ketlik bo'yicha nosimmetriklik koeffitsiyenti;
- chastota og'ishi;
- vaqtinchalik o'ta kuchlanish koeffitsiyenti va h.k.

O'zDSt 1044:2003 davlat standartiga ko'ra, elektr energiyasini uzatish qisqichlaridagi kuchlanishning og'ishi bir hafta ichida 100% vaqt oralig'ida nominal kuchlanish qiymatining 10% dan oshmasligi kerak [1].

Kuchlanish darajasini ruxsat etilgan darajagacha oshirishni quyidagi usullar bilan tiklash mumkin:

- 0,4 kV kuchlanishli eski uzatish liniyasini rekonstruksiya qilish yo'li bilan, o'tkazgichning nominal kesim yuzasini oshirish;
- 0,4 kV kuchlanishli yangi uzatish liniyasi yoki yangi pasaytiruvchi transformator podstansiyasini qurish bilan kuchlanishning yuqoriroq sinfini elektr iste'molchilarga yaqinlashtirish.

Ammo ushbu usullar katta iqtisodiy xarajatlarni, shuningdek, ularni amalga oshirish uchun uzoq vaqtni talab qiladi.

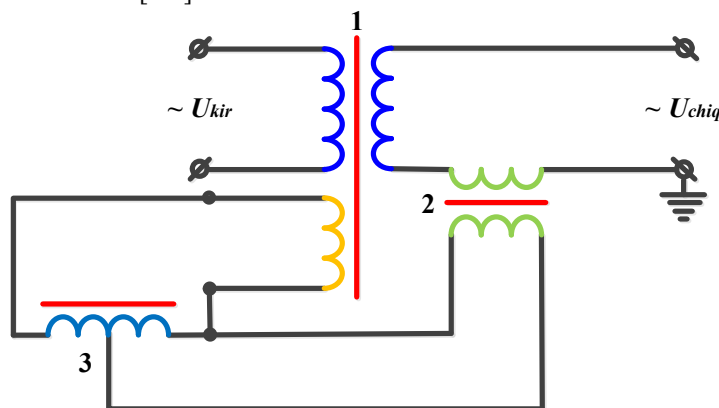
VQTni o'rnatish bo'yicha misol tariqasida "Hududiy elektr tarmoqlari" AJning Surxondaryo viloyati hududiy filiali Boysun tumani elektr tarmoqlari korxonasini ko'rib chiqamiz. U yerda bugungi kunda yuklamalarning mavjud o'sishini hisobga olmagan holda o'tgan asrning 70 yillarida loyihalashtirilgan eski (bugungi kunda samarasiz) tarmoqlar muammosi hal qilinmoqda. Bir nechta obyektlar bo'yicha eski uzatish liniyalarini rekonstruksiya qilishga ehtiyoj bor va bugungi kunda navbatmanavbat moliyalashtirilgan obyektlar bo'yicha SIP kabellarga almashtirilmoqda. Tumandagi ko'plab aholi yashash punktlarida elektr iste'molchilarning past kuchlanishdan shikoyatlari tez-tez uchraydigan muammoli hududlar mavjud. Shunga ko'ra, obyektini rekonstruksiya qilishdan oldin vaqtinchalik chora sifatida EESni oshirish va kuchlanish og'ishini yaxshilash uchun 0,4 kV kuchlanishli tarmoqlarda VDTni qo'llash maqsadga muvofiqdir [1-6].

VQT - yuklama manbaidagi kuchlanishni rostdlash yoki yaxshilash uchun o'zining ikkilamchi chulg'ami bilan boshqa transformatorning ikkilamchi chulg'ami zanjiriga ketma-ket ulanadigan o'zgaruvchan transformatsiya koeffitsiyentiga ega bo'lgan transformatoridir. VDTning birlamchi chulg'ami asosiy transformatorning rostlanuvchi past kuchlanishli avtotransformatori orqali ta'minlanadi.

VDTning yana bir turi - kuchlanishni rostdlash uchun liniya transformatorlari bo'lib, ular tarmoq kuchlanishini uning qiymatini o'zgartirmasdan faza bo'yicha siljitish imkonini beradi, ya'ni bunda har bir fazaning rostlanuvchi avtotransformatorining birlamchi chulg'ami qolgan ikki fazaning liniya kuchlanishiga ulanadi. Bundan quvvat koeffitsiyentini yaxshilash orqali elektr tarmog'idagi kuchlanish isroflarini kamaytirishga erishiladi.

VQT - kuchlanishni oshirish uchun past kuchlanishli iste'molchilarga bevosita yaqin joylarga o'rnatiladigan qurilmadir. Qurilmaning tuzilishi ixcham bo'lib, o'lchamlari - eni 482 mm, uzunligi 360 mm va balandligi 974 mm. Bir ustunli tayanchlarga oson o'rnatiladi va og'irligi 170 kg dan oshmaydi. Transformatorning asosiy chiqish kuchlanishining qiymati har bir fazadan alohida bosqichma-bosqich rostlanadigan uchta avtotransformatorlarga bog'liq bo'lib, qurilmaning ishga tushish vaqti (kuchlanish qiymatini stabilashtirish vaqti) 300 ms. Shuningdek, qurilma zaruriy himoya vositalari, o'ta kuchlanish cheklagichlari va saqlagichlar to'plamiga ham egadir.

2-rasmda VQTni ulashning prinsipl sxemasi ko'rsatilgan bo'lib, unda 1 - asosiy transformator; 2 - VQT; 3 - avtotransformator [2-6].



2-rasm. VQTning prinsipl sxemasi

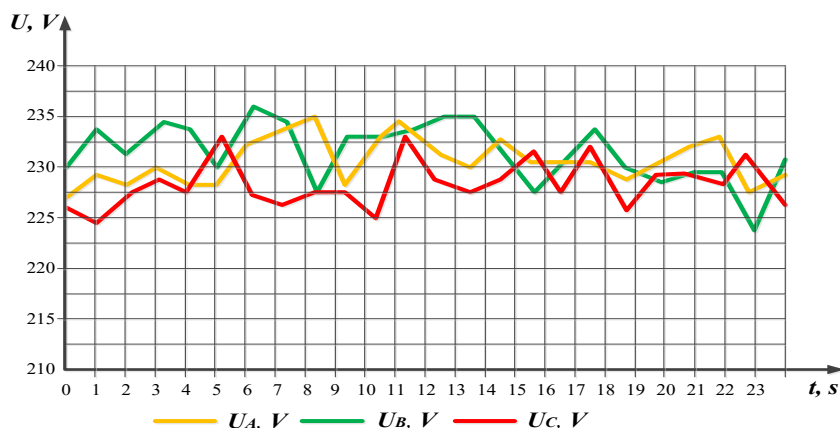
Fig.2. The schematic diagram of a VBT

Past kuchlanishli elektr iste'molchilarda kuchlanish og'ishi muammosi ko'p kuzatilishidan, Ensto-Booster kompaniyasi tomonidan ishlab chiqilgan VB45K-3P-003 tipli VQTni tahlil qilish orqali, mavjud muammoni bartaraf etishga tavsiyalar ishlab chiqildi. Shundan, 1-jadvalda VQTning asosiy texnik tavsiflari keltirilgan.

1-jadval. Transformatorning texnik xarakteristikalari
Table 1. Technical specifications of the transformer

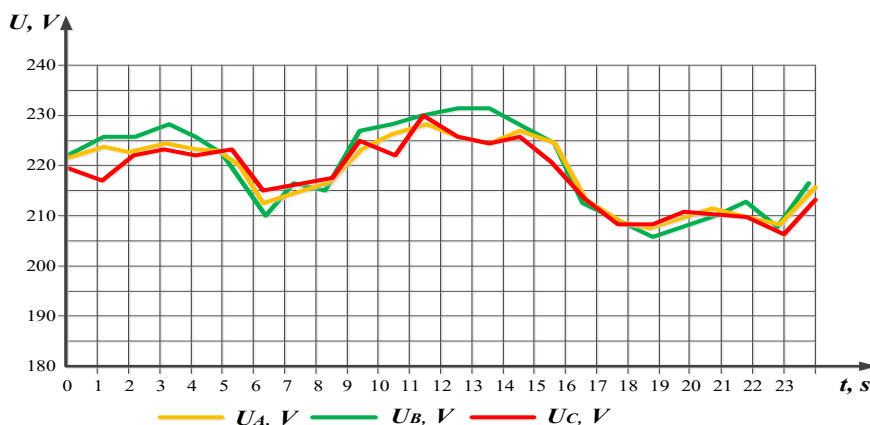
Asosiy xarakteristikalar	Qiymatlar
Nominal quvvati, kVA	45
Nominal tok, A	3x65
Kirishidagi maksimal tok, A	3x75
Korpus	Bo'yalgan-ruxlangan po'lat, IP55
Tarmoq	220 V, AS, 50 Gs, 3-fazali, TN (TN-C)
Stabillashtirish vaqti, ms	300
FIK, %	98
Og'irligi, kg	170
Rostlash darajalari	$U_{kir}=165 \dots 198 \text{ V (20\%);}$ $U_{kir}=198 \dots 209 \text{ V (13,3\%);}$ $U_{kir}=209 \dots 222 \text{ V (6,5\%).}$
Pasaytirilgan kuchlanish bo'yicha baypas	$U_{kir} > 222 \text{ V}$
Nominal kuchlanish bo'yicha baypas	$U_{kir} < 165 \text{ V}$
Atrof-muhitning ruxsat etilgan harorati, °C	-50...+60

VQT o'rnatilgandan so'ng o'rnatilgan transformatorgacha bo'lgan hududda, ya'ni, transformatorni o'rnatishdan oldin va keyin liniya oxirida AKE-824 analizatori qurilmasi bilan kuchlanish darajasi o'lchandi. Masalan, 0,4 kV kuchlanishli HEULning taqsimlovchi qurilmasi (RU-0,4 kV)dan oxirgi tayanchgacha bo'lgan masofasi (uzunligi) 0,796 km, simning markasi - A-35. Kuchlanish darajasining kunlik qiymatlari olib tashlangandan so'ng, quyidagi natijalar olindi (3-rasm), bu yerda U_A , U_B , U_C - mos ravishda A, B, C fazalardagi kuchlanish [2-6].



3-rasm. VQT kirishidagi kuchlanish o'zgarishi (U_{kir})ning vektor diagrammasi
Fig.3. The VBT (U_{inp}) at the input of the transformer vector diagram

3-rasmidagi vektor diagrammadan ko'rinib turibdiki, VQT kirishidagi kuchlanish darajasi ruxsat etilgan me'yorda va O'zDSt 1044:2003 davlat standartiga mos keladi hamda HEULning uzunligi RU-0,4 kV taqsimlovchi qurilmasidan o'rnatilgan VQT gacha 0,6 km masofani tashkil etadi.

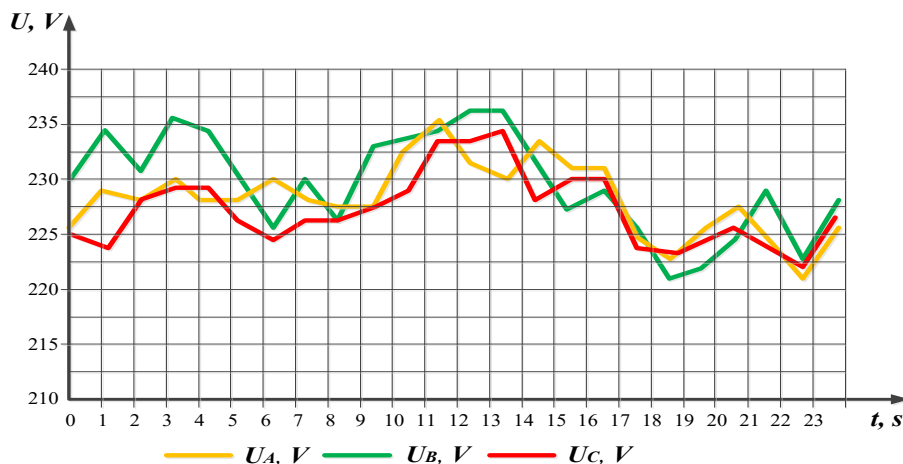


4-rasm. VQTni o'rnatilishdan oldin HEUL oxiridagi kuchlanish o'zgarishining vektor diagrammasi
Fig.4. Vector diagram of voltage variation at the end of the OPT line before the installation of the VBT



4-rasmda keltirilgan vektor diagrammada VQT o'rnatilgunga qadar liniya oxiridagi kuchlanish qiymatlari ko'rsatilgan bo'lib, bu yerda maksimal yuklamalar paytida (masalan, soat 6 dan 8 gacha va soat 17 dan 23 gacha) kuchlanish darajasi ruxsat etilgan og'ishiga yaqin qiymatlargacha pasaygan ($\pm 10\%$). Ushbu HEULga yana bir iste'molchining ulanishi texnologik jarayonning buzilishiga va natijada iste'molchilar elektr uskunalarining ishdan chiqishlarga olib kelishi mumkin [1-6].

VQT o'rnatilgandan so'ng, o'tkazilgan tadqiqotlar natijasiga ko'ra, HEUL oxiridagi elektr iste'molchidagi kuchlanish sezilarli darajada yaxshilandi va nominaldan ($U_{nom}=220\text{ V}$) 1-7% ga og'adigan darajada stabilashdi, buning natijasi 5-rasmda keltirilgan diagrammada tasvirlangan [1-6].



5-rasm. VQT o'rnatilganidan so'ng HEUL oxiridagi kuchlanish o'zgarishining diagrammasi
Fig.5. Diagram of the voltage variation at the end of the OPT line after the installation of a VBT

Masofasi 0,796 km bo'lgan HEUL oxiridagi faza kuchlanishining qiymatlari ham VQT o'rnatilganidan so'ng, O'zDSt 1044:2003 davlat standartida belgilangan chegaralarga to'liq mos keladi [1].

2021 yilgacha Respublikaning aksariyat hududlari HEUL oxirida elektr yuklamalarning o'sishi va kuchlanishning og'ishi tufayli kuchlanish qiymatini ruxsat etilgan darajagacha tiklash vazifasini mavjud liniyalarni rekonstruksiya qilish yoki yangi 0,4 kV kuchlanishli liniya qurish yoki muammoli hududlarga yaqinroq joylarda pasaytiruvchi TPni o'rnatish orqali hal qilingan. Hozirda esa, ushbu muammolarni VQT o'rnatish orqali ham hal qilish mumkin.

Tadqiqot natijasi sifatida 3 ta variantni ko'rib chiqamiz va taqqoslaymiz, ya'ni ishchi-xodimlar mehnatining sarf-xarajatlari, iste'molchilarning EESni yaxshilash uchun ishlatilgan materiallar hamda ishga tushirish-sozlash ishlari bo'lib, bular individual sinovlar va uskunalarini kompleks sinovdan o'tkazishga tayyorgarlik ko'rish va o'tkazish davrida bajariladigan ishlar majmuasidir.

Misol tariqasida yuqoridagi uchta variantni taqqoslaymiz:

1. Ko'rilayotgan HEUL simini katta kesim yuzali simga almashtirish bilan rekonstruksiya qilish, ya'ni SIP-2 3x50+1x54,6 tipli sim tanlandi;
 2. TP o'rnatilgan 10 kV kuchlanishli HEULni va elektr iste'molchilargacha 0,4 kV kuchlanishli HEUL qismini qurish;
 3. Mavjud 0,4 kV kuchlanishli HEULda VQT o'rnatish.
- 2-jadvalda modernizatsiyani amalga oshirish xarajatlar natijalari keltirilgan.

2-jadval. Elektr iste'molchilarda past kuchlanishni bartaraf etish usullarining qiyosiy tahlili

Table 2. Comparative analysis of methods for eliminating low voltage in electricity consumers

Ishning hajmi*	Modernizatsiya variantlari		
	1-variant	2-variant	3-variant
Materiallar narxi	32 100 096	284 075 589	101 578 176
Montaj narxi	6 470 940	24 702 174	3 655 743
Ishga tushirish-sozlash ishlari narxi	2 611 749	6 269 697	402 045
Jami	41 182 785	315 047 460	105 635 964

*Barcha xarajatlar narxlari so'mda ko'rsatilgan (2021 yil holatiga)

Tadqiqot natijasiga ko'ra, 2-jadvaldan ko'rinib turibdiki elektr iste'molchilarda kuchlanish og'ishini bartaraf etishning eng qimmat usuli, bu 2-variant hisoblanadi. Bundan, TP o'rnatilganda 10 kV kuchlanishli HEUL va elektr iste'molchilargacha 0,4 kV kuchlanishli HEUL hududlarini qurish nazarda tutilgan. Ushbu variant nafaqat narx jihatidan qimmatligi bilan, balki aholi punktlarida

qurilish uchun joy yo'qligi sababli ham kamroq qo'llaniladi. Shu bilan birga, ushbu usul taqdim etilgan usullarning eng ishonchlisi hisoblanib, ma'lum bir joylarda elektr tarmoqlarni rivojlantirish istiqbollari katta bo'lgan paytlarda qo'llanilishi mumkin [2-6].

Ko'rilayotgan 2-jadvalning 1-variantida ko'rsatilgan materiallar (sim, mahkamlash tasmasi, kronshteynlar, xomutlar, tarmoqlanuvchi va ankerli qisqichlar va h.k.) xarajatlari bo'yicha simni katta kesim yuzali simga almashtirish bilan HEULni rekonstruksiya qilish eng foydali hisoblanadi. Biroq tezkor xizmat ko'rsatishda buning iloji yo'q. Chunki hududiy elektr tarmoq tashkilotlari kapital ta'mirlash va yangi liniyalar qurish uchun budget mablag'larini oldindan rejalashtirib-tasdiqlab qo'yadilar. Bundan, iste'molchilarni sifatli elektr energiyasi bilan ta'minlash muammosini tezroq hal qilish masalasi ko'tarilganda, mavjud muammoni tezda hal qilish imkonini bermaydigan ko'plab nozik jihatlar paydo bo'ladi. Avvalo, bu aksariyat hududiy elektr tarmoq tashkilotlarida har chorakda o'tkaziladigan asbob-uskunalar va materiallarga buyurtma natijalariga bog'liqdir.

Shuningdek, 2-jadvalning 3-varianti bo'yicha mavjud 0,4 kV kuchlanishli HEULda VQT o'rnatish masalasiga kelsak, bu yerda shuni ta'kidlash mumkinki, kelgusi yil uchun budgetni rejalashtirishda xizmat ko'rsatiladigan elektr tarmoqlari soniga qarab bir nechta qo'shimcha transformatorlarni qo'yish va ulardan zarur hollarda foydalanish mumkin. Bundan, VQTning bir qancha afzalliklarini ko'rish mumkin, shuningdek, VQTni bir muammoli hududdan boshqasiga o'tkazish imkoniyati mavjuddir. Kuchlanish og'ishi masalasini hal qilish maqsadida, kapital xarajatli ishlarni talab qiladigan obyektlarda VQTni o'rnatish orqali 0,4 kV kuchlanishli HEULni yanada mayda qismlarga bo'lish yoki rekonstruksiya qilish bilan masalaning vaqtinchalik yechimi sifatida qo'llash mumkin. Shunday qilib, favqulodda holatlarda mavjud muammolarni bartaraf qilish, iste'molchilar shikoyatlariga iloji boricha shoshilinch javob berish va xizmat ko'rsatish maqsadida ushbu variantni qo'llash mumkin. Vaqt o'tishi bilan, kapital xarajatli ishlar olib borilganda yoki VQT kerak bo'lmay qolganda, uni osongina kuchlanishni oshirishni talab qiladigan boshqa obyektga o'tkazish mumkin.

Umumiy foydalanayotgan HEULni yanada mayda qismlarga bo'lishning imkoniyati bo'lmaganda yoki 6(10) kV kuchlanishli tarmoqni alohida olib kelish imkoniyati bo'lmaganda yoki qo'shimcha KTPni o'rnatish imkoniyati bo'lmaganda yoki 0,4 kV kuchlanishli HEULni kichik bo'laklarga bo'lish xarajatlari HEULni o'rnatish narxidan bir necha baravar yuqori bo'lgan tor sharoitlarda, katta uzunlikdagi 0,4 kV kuchlanishli HEULda kuchlanish og'ishi muammosining yakuniy yechimi sifatida VQTDan foydalanish eng samarali hisoblanadi [1-6].

Adabiyotlar tahlili. Qishloq elektr tarmoqlari energiya samaradorligini oshirish va EESni yaxshilashga yo'naltirilgan ilmiy-tadqiqotlar dunyoning yetakchi ilmiy markazlari va oliy ta'lim muassasalarida, jumladan California Institute of Technology (AQSH), University of Michigan (AQSH), Zhejiang University (Xitoy), University of Waterloo (Kanada), Tsinghua University (Xitoy), Dresden University of Technology (Germaniya), Tokyo technology institute (Yaponiya), University of California Berkeley (SSHA), University of Malayzia (Malayziya), Polytechnic University of Milan (Italiya), Hong Kong Polytechnic University (Xitoy), MEI Milliy tadqiqot universiteti (Rossiya), Qozon davlat energetika universiteti (Rossiya), N.E.Bauman nomidagi Moskva davlat texnika universiteti (Rossiya), M.S.Osimi nomidagi Tojikiston texnika universiteti (Tojikiston), Toshkent davlat texnika universiteti (O'zbekiston), Energetika muammolari instituti (O'zbekiston) va boshqalar tomonidan olib borilmoqda [2-6].

Elektr tarmoqlari energiya samaradorligini oshirish, elektr tarmoqlarida EESning umumiy masalalari, kuchlanishni rostdash muammolari, kuchlanish og'ishlari, shuningdek ularni hal qilishning texnik usullari bo'yicha Ya.Barkan, N.Melnikova, I.A.Budzko, M.S.Levin, T.B.Leshinskaya, I.V.Sukmakov, N.M.Popov, Yu.S.Jelezko, I.V.Jejelenko va boshqa xorijiy olimlar katta hissa qo'shgan [9].

Mahalliy olimlaridan X.F.Fozilov, T.X.Nosirov, T.M.Qodirov, A.S.Karimov, H.A.Alimov, A.N.Rasulov, T.Sh.Gayibov, E.X.Abduraimov va boshqalarning ilmiy ishlari elektr tarmoqlaridagi isroflarni kamaytirish, EESni ta'minlash, kontaktsiz kommutatsiyalovchi qurilmalarni tadqiq qilish masalalariga bag'ishlangan [7-8, 10-15].

Elektr energiyasi isroflarini kamaytirish uchun EESni yaxshilash tizimning dolzarbligi va muhim texnik tajribalariga qaramay past kuchlanishli qishloq elektr tarmoqlarida kuchlanishni uzluksiz tekis rostlovchi tizimlarni qo'llash masalalari yetarli darajada o'rganilmagan.

3. Usullar va materiallar (Methods and materials)

Yuqori quvvatli kontaktsiz yarim o'tkazgichli uskunalarni keng tarqalishi, elektr texnikaning bir qator yo'nalishlarida yarim o'tkazgichlar texnikasini qo'llanish doirasi kengayib, ularning yutuqlari elektr texnik uskunalarining yangi sinfini o'zlashtirishga imkon berdi. 6÷10 kV o'zgaruvchan kuchlanishli sanoat obyektlarining elektr ta'minoti tizimlarida yuqori kuchlanishli katta quvvatli kontaktsiz yarim o'tkazgichli uskunalarni yaratish katta ahamiyatga ega, chunki ushbu kuchlanish ko'p sonli maishiy iste'molchilar nominal kuchlanish hisoblanadi [7-8, 10].

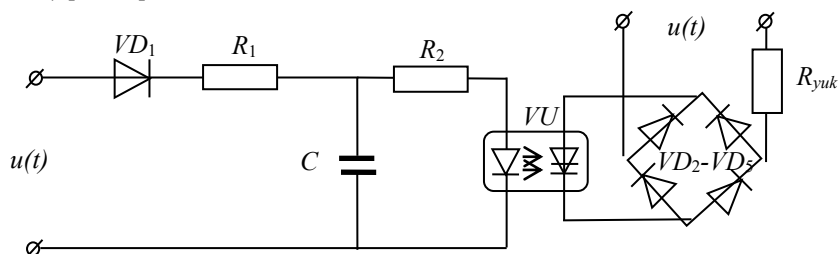
Ko'rsatilgan uskunalar, odatiy elektr mexanik uskunalar bilan birgalikda, sanoat obyektlarining

elektr ta'minotidagi ko'p sonli muammolarini yechishda va hozirgi elektr ta'minoti tizimlarining texnik darajasini yuqoriga ko'tarishga yordam beradi. Shular bilan bir qatorda, yuqori quvvatli kontaktisiz yarim o'tkazgichli uskunalar tez ta'sir etuvchi tokni chegaralash muammosini yechishga, xususan 6÷10 kV kuchlanishli reaktorsiz tarmoqlarda yuzaga keladigan avariyaaviy zarbaviy toklarni chegaralash, elektr ta'minoti tizimi elementlariga termik va dinamik ta'sirni kamaytirish, tez o'zgaruvchan zarbaviy yuklamali elektr uskunalarni ulanish sxemasini soddalashtirish, katta quvvatli elektr mashinalarini o'z-o'zini ishgah tushirishini ta'minlash, tarmoq reaktiv elementlarini boshqarish (reaktorlar, kondensator batareyalari va h.k.), taqsimlovchi tarmoqlarda elektr energiyasi sifatini oshirish hamda elektr ta'minoti tizimini qurishdagi sarf-xarajatlarni kamaytirishga imkon beradi [6].

Ma'lumki, modellashtirish qurilmani matematik tenglamalar tizimi (fizikaviy model) va tadqiq qilinayotgan qurilmani turli rejimlarda ishlashida zarur xarakteristikalarini talab qilinayotgan darajada aniqlashga imkon beradi. Bu yerda, VQTning almashtirish sxemasi elementlarida o'tkinchi jarayon normal va avariyaaviy rejimlarda davomiyligi, shuningdek tok va kuchlanishni amplituda qiymatlarini aniqlash masalasi muhim hisoblanadi. Boshqaruv elementlarini tadqiq qilish uchun, kerakli parametrlar va yig'ilgan elementli blok sxemasi ko'rinishida keltirib, zaruriy soddalashtirishga erishish mumkin. Ma'lumki blok sxemasi ikki asosiy ko'rsatkichlar bilan xarakterlanadi, ya'ni elementlar to'plami (qarshiliklar, kondensatorlar, induktiv g'altaklar, energiya manbalari va boshqalar) va ularning ulanish usuli. Blok sxemasi (modellashtirilgan) tarmoq manbai va VQT parametrlarini fizik modelga keltirib, tasvirlashdan iborat [3, 6, 8].

VQT parametrlarini modellashtirish jarayonida yarim o'tkazgichli elementlar blok sxemasini qo'llash, transformator tuzilishini o'zgartirmaydi, lekin o'zgartirgich turiga qarab algoritimga muvofiq ventilli kommutatsiya vaqtida yarim o'tkazgichli qurilmani ochiq va yopiq holatida rezistorni qarshiligi o'zgaradi. VQTni kontaktisiz kommutatsiyalash maqsadida, kontaktisiz kuchlanish relesining boshqarish tizimida, turli nohiziqli elektr zanjirlarni filtr sifatida ishlatish mumkin. Bunday elektr zanjirlarni tahlil qilishning samarali usullarini yaratish, elektr ta'minoti, avtomatlashtirish, hisoblash texnikasi uchun ishonchli, yuqori sifatli qurilmalarni ishlab chiqishda muhim ahamiyatga ega. Hozirgi vaqtda nohiziqli elektr zanjirlarini tahlil qilishni turli xil analitik, grafikli, grafik-tahlil va mashina usullari ishlatiladi [6-7].

Nohiziqli elektr zanjirlar asosida yaratilgan qurilmalar avtomatika, radioelektronika, hisoblash texnikasi va elektr ta'minoti sohalarida keng qo'llanilmoqda. Avtomatik qurilmalar uchun boshqaruv tizimlarini ishlab chiqilishini turli sxemalar orqali hal qilish mumkin. Biz ko'rib chiqayotgan nohiziqli elektr zanjirda VD diod, R_1 aktiv qarshilik va C sig'imga parallel ulangan R_2 aktiv qarshilik elementlari ketma-ket, hamda yuklama qismida VU optotristor, diodli ko'priklar va R_{yuk} aktiv qarshilik ulangan (6-rasm) [12-13].



6-rasm. Nohiziqli elektr zanjir sxemasi
Fig.6. Nonlinear electrical circuit diagram

Hozirgi vaqtda bunday zanjirlarni tahlil qilishning turli usullari mavjud bo'lib, klassik usul yordamida yechish va tahlil qilishini ko'rib chiqamiz.

Zanjir kuchlanishi quyidagi qonuniyat asosida o'zgaradi:

$$u = U_m \sin \omega t. \quad (1)$$

Zanjirning tarmoq kuchlanishiga ulanish burchagi φ ni nolga teng deb qabul qilamiz. O'tkinchi jarayon diodning har bir ochilish davrida hisoblanadi. Bunda sig'imdagi kuchlanishni tavsiflovchi tenglama quyidagi ko'rinishga keladi:

$$U_C = U_m \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} \left(1 - e^{-\frac{R_1 + R_2}{R_1 \cdot R_2 \cdot C} t} \right); \quad (2)$$

bu yerda, U_m – tarmoq kuchlanishining maksimal qiymati, R_1 , R_2 va C zanjir elementlari.

Diod xarakteristikasini ideal deb qabul qilib, $U_{kir} = U_m \sin \omega t$ ni olamiz. $t=0$ lahzadan t_1 lahzagacha diodni ochiq deb, $0 \leq t \leq t_1$ shart bajarilganida zanjir holat tenglamasini quyidagi ko'rinishda yozamiz:

$$U_m \sin \omega t = R_1 i + U_C; \quad (3)$$

bu yerda, $i = C \frac{du_C}{dt}$ ekanligini hisobga olsak:



$$U_m \sin \omega t = R_1 \left(C \frac{du_C}{dt} + \frac{U_C}{R_2} \right) + U_C, \quad (4)$$

kelib chiqadi.

Keltirilgan (4) tenglamadan $\frac{du_C}{dt}$ ni topamiz:

$$\begin{aligned} R_1 C \frac{du_C}{dt} + R_1 \frac{U_C}{R_2} &= U_m \sin \omega t - U_C; \\ R_1 C \frac{du_C}{dt} &= U_m \sin \omega t - U_C - R_1 \frac{U_C}{R_2}; \\ \frac{du_C}{dt} &= \frac{U_m \sin \omega t}{R_1 C} - \frac{U_C}{R_1 C} - \frac{R_1 U_C}{R_1 C R_2}. \end{aligned} \quad (5)$$

Bundan:

$$\frac{du_C}{dt} = \frac{1}{R_1 C} \left(U_m \sin \omega t - U_C \left(1 + \frac{R_1}{R_2} \right) \right); \quad (6)$$

hosil qilamiz.

Ko'rilayotgan nohiziqli elektr zanjirning differensial tenglamasi yechimini keltirilgan (6) ifodani Eylerning sonli usullari bilan ko'rib chiqamiz. 6-rasmda keltirilgan nohiziqli elektr zanjir differensial tenglamasini Eylerning sonli usuli yordamida yechamiz. Bunda taxminiy oraliqda differensial tenglamaning yechimini aniqlaymiz:

$$\frac{dy}{dt} = f(t, y). \quad (7)$$

Ushbu ifodani teng n ta qismlarga ajratib, quyidagicha belgilaymiz:

$$t_1 - t_0 = t_2 - t_1 = \dots = t_n - t_{n-1} = \Delta t = h. \quad (8)$$

(8) tenglamadagi $t_0, t_1, t_2, \dots, t_n$ nuqtalarning har birini asosiy hosila farqlari nisbati bilan almashtiramiz, unda:

$$\Delta y = f(t, y) \cdot \Delta t. \quad (9)$$

Birinchi uchastkada $u_1 - u_0 = \Delta u$ va $\Delta t = h$ ga ega bo'lamiz va bundan:

$$y_1 - y_0 = f(t_0, y_0)h; \quad (10)$$

kelib chiqadi.

Bu tenglikda y_0, t_0, h ma'lum, demak:

$$y_1 = y_0 + f(t_0, y_0)h; \quad (11)$$

$t = t_1$ bo'lganda (9) tenglamadan quyidagiga erishamiz:

$$\Delta y = f(t, y) \cdot h;$$

bundan:

$$y_2 - y_1 = f(t_0, y_0)h. \quad (12)$$

U holda:

$$y_2 = y_1 + f(t_1, y_1)h, \quad (13)$$

bo'ladi.

Qolgan uchastkalar uchun ham shu tartibda yozamiz:

$$\begin{cases} y_3 = y_2 + f(t_2, y_2)h \\ \dots \\ y_n = y_{n-1} + f(t_{n-1}, y_{n-1})h \end{cases} \quad (14)$$

Shunday qilib, (14) ifoda orqali u funksiyasining $t_0, t_1, t_2, \dots, t_n$ nuqtalaridagi taxminiy qiymati topiladi. Ushbu nuqtalarni birlashtirib, "Eylerning chiziqli liniyasi" deb nomlanuvchi yechimga ega bo'lamiz.

(6) tenglamani Eylerning sonli usuli yordamida yechish quyidagicha amalga oshiriladi:

$$U_{C(k+1)} = U_{Ck} + f(U_{Ck}, t_k) \cdot h; \quad (15)$$

bundan:

$$f(U_{Ck}, t_k) = \frac{1}{R_1 C} \left[U_m \sin \omega t - U_C \left(1 + \frac{R_1}{R_2} \right) \right], \quad (16)$$

kelib chiqadi, hamda bu yerda, $k=0,1,2,\dots$; h – integrallash qadami.

0 dan $t=t_1$ lahzagacha bo'lgan sig'imdagi kuchlanish (sanoat chastotasida diodning ochilish va yopilish intervali har 0,01 sek oralig'ida yuz beradi), nolinch boshlang'ich shart bilan (15) tenglama orqali aniqlanadi. $t=t_1$ lahzadan boshlab diodning yopilish jarayoni sodir bo'lib, zanjir tenglamasi C va R_2 elementlarda quyidagi qonuniyat asosida amalga oshadi:

$$C \frac{du_C}{dt} = -\frac{U_C}{R_2};$$

yoki:

$$\frac{du_C}{dt} = -\frac{U_C}{CR_2}. \quad (17)$$

(17) tenglama ham Eylar sonli usuli yordamida yechiladi:

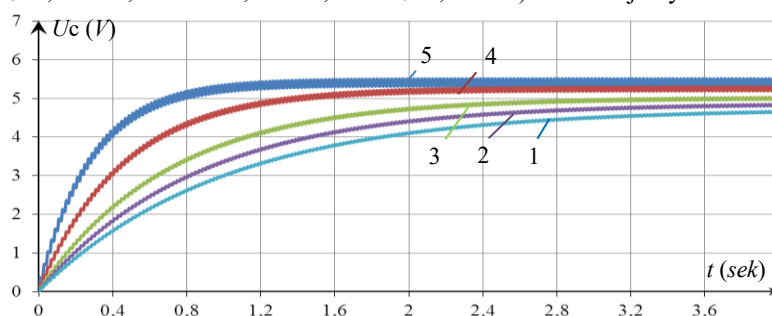
$$U_{C(k+1)} = U_{Ck} + f(U_{Ck}, t_k) \cdot h; \quad (18)$$

bu yerda, o'zgartirish kiritilib, $f(U_{Ck}, t) = -\frac{U_C}{CR_2}$ ga teng deb qabul qilamiz.

6-rasmda keltirilgan noxiziqli elektr zanjirini tahlil qilishda, ushbu usulning amaliy tadbirini ko'rib chiqamiz. Noxiziqli elektr zanjiri kuchlanish manbaiga ulanganida, dinamik jarayonni tahlil qilish talab qilinadi. Klassik usulning tahlili asosida, ushbu zanjirning differensial tenglamasini (6) ifoda yordamida yechib, dinamik jarayonni sig'imdagi kuchlanishni tavsiflovchi (18) tenglama orqali hisoblanishiga erishdik [12-13].

Keltirilgan (18) ifoda yordamida noxiziqli elektr zanjirining dinamik jarayonini EHMda aniqlash orqali, sig'im kuchlanishining o'zgarish egri chizig'i xarakteristikalarini aniqlaymiz. Bunda, nolinch boshlang'ich shartlari qabul qilingan bo'lib, egri chiziq o'zgarish oilasi tahlilini EHMda hisoblashdan, zanjir differensial tenglamasini sonli yechimi natijalari bir xillikni ko'rsatdi.

7-rasmda tarmoq kuchlanishi $U_m=18$ V, sig'im $C=1$ mkF, qarshilik $R_2=3,0$ kOm o'zgaruvchan holda integrallash qadami $h=0,001$ va R_1 qarshilikning 5 xil qiymatida (1 – $R_{11}=0,3$ kOm; 2 – $R_{12}=0,5$ kOm; 3 – $R_{13}=0,8$ kOm; 4 – $R_{14}=1,0$ kOm; 5 – $R_{15}=1,2$ kOm) dinamik jarayonlari tahlili keltirilgan.

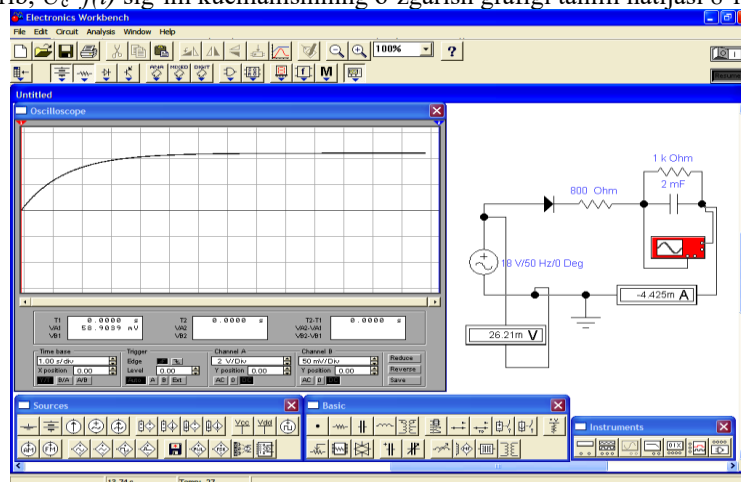


7-rasm. Sig'im kuchlanishining o'zgarish grafigi $U_C=f(t)$

Fig.7. The graph of capacitor voltage variation is $U_C=f(t)$

Yuqorida keltirilgan xarakteristikalar natijasidan xulosa qilish mumkinki, R_1 qarshilikni o'zgartirish orqali, kontaktsiz kuchlanish relesi tiristori boshqaruv elektrodini ochish kuchlanishini vaqt bo'yicha o'zgarishi hamda sabr vaqtini aniqlanishiga erishish mumkin.

Electronics Workbench modellashtirish dasturi o'zgaruvchan va o'zgaruvchan tokli murakkab elektr texnik zanjirlarning ishlashini normal ish holatida aniqlab, modellashtirish va tahlil qilish uchun mo'ljallangan. 6-rasmda keltirilgan noxiziqli elektr zanjirini Electronics Workbench dasturi yordamida modellashtirib, $U_C=f(t)$ sig'im kuchlanishining o'zgarish grafigi tahlili natijasi 8-rasmda keltirilgan.



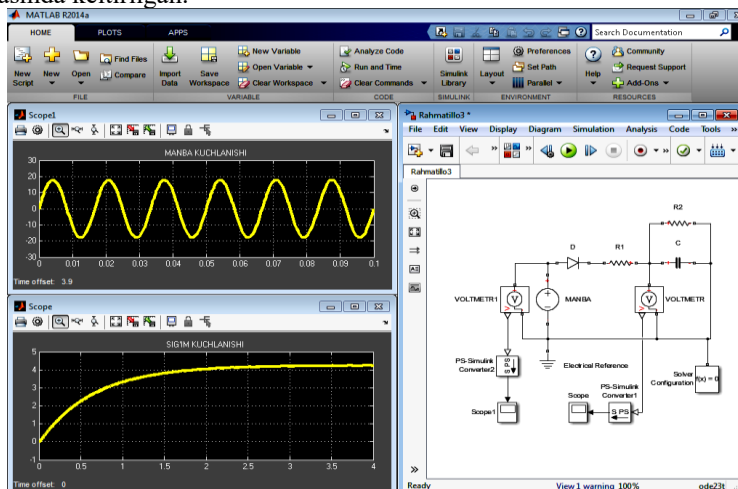
8-rasm. Electronics Workbench dasturida yordamida modellashtirish jarayoni

Fig.8. The modeling process using the Electronics Workbench software

Modellashtirish vaqtida 6-rasmda keltirilgan noxiziqli elektr zanjirini Electronics Workbench dasturi yordamida tahlil qilib, jarayonni vaqtga bog'liq holda va chastota oraliqlarida amalga oshirildi.

Shuningdek, dastur raqamli-analog va raqamli qurilmalarni tahlil qilish imkoniyatini berdi [12-13].

Zamonaviy kompyuterlar dastur ta'minotchilari matematik hisoblashlarni avtomatlashtirish uchun MATLAB, Mathcad, Mathematica va boshqa dasturiy tizimlar to'plamini taklif qiladi. Shular orasidan, MATLAB dasturi o'zining imkoniyatlarini yuqoriligi bilan ajralib turadi. 6-rasmda keltirilgan nohiziqli elektr zanjirini MATLAB R2014a dasturining Simulink Library Browser va SimPower Systems bloklari orqali modellashtirib, sig'im kuchlanishining $U_c=f(t)$ o'zgarish grafigi tahlili va natijalari 9-rasmda keltirilgan.

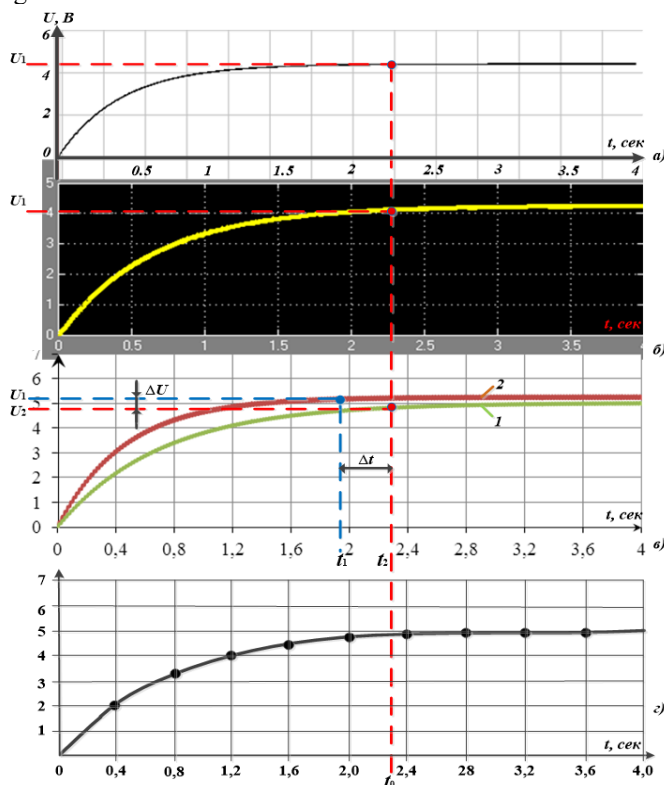


9-rasm. MATLAB R2014a dasturi yordamida modellashtirish jarayoni

Fig.9. The modeling process using MATLAB R2014a software

Modellashtirish vaqtida 6-rasmda keltirilgan nohiziqli elektr zanjirini MATLAB R2014a dasturining Simulink bloki orqali tahlil qilinib, jarayonni vaqtga bog'liq holda va chastota oraliqlarida amalga oshirildi. Shuningdek, tahlil natijalaridan shuni anglash mumkinki, keyingi modellashtirish jarayonlarini Simulink bloki orqali olib borish maqsadga muvofiqdir, chunki natijalarni aniq ko'rish va ko'proq ma'lumotlar kiritib tahlil qilish imkoniyati keng ekan.

10-rasmda nohiziqli elektr zanjirining yuqorida keltirilgan usullardagi tahlili natijalarini taqqoslanishi ko'rsatilgan.



10-rasm. Nohiziqli elektr zanjiri tahlili natijalarini taqqoslash jarayoni

Fig.10. The process of comparing the results of a nonlinear electrical circuit analysis

Taqqoslash vaqtida: *a* - Electronics Workbench; *b* - MATLAB R2014a va *v* - Microsoft Excel dasturlari tahlillarining natijalari matematik usullar asosida modellashtirib, *g* - eksperimental tahlil



natijasi bilan o'zaro solishtirilgan. Sig'im kuchlanishi o'zgarish grafiklarining tahlili shuni ko'rsatdiki, xatolik farqi taxminan 1,5-2% ni tashkil etdi. Shundan, nohiziqli elektr zanjiridagi o'zgarish grafiklarini matematik modellashtirish tahlilida keltirilgan usullarning barchasida o'zgarish natijalarga erishildi.

4. Natijalar (Results)

O'zgaruvchan kuchlanishni stabilash, rostdlash, sifatini yaxshilash zarurati barcha o'zgaruvchan tok tarmoqlari va ayniqsa "aqli" tarmoqlar uchun dolzarb hisoblanib, katta quvvatlarga mo'ljallangan tegishli VQTlarini yaratishni talab qiladi [3-6, 8].

EESni yaxshilash muammosi EESni oshiruvchi qurilmalarni ishlab chiqishda dolzarb bo'lib, ularga reaktiv quvvat kompensatorlari, aktiv filtrlar, kuchlanishning pasayishi, nosimmetriya, flikker kompensatorlari hamda asinxron va sinxron dvigatellarni, ayniqsa yuqori kuchlanishli dvigatellarni sekin ishga tushirish qurilmalarini kiritish mumkin. Bu dvigatellarni ishga tushirishda katta toklarni hosil bo'lishi tufayli o'tkinchi jarayonni sodir bo'lishi dolzarb hisoblanib, ta'minot manbaidagi kuchlanishning keskin pasayishiga olib keladi.

Maishiy elektr iste'molchilar uchun kuchlanish qiymatini nominal qiymatdan $\pm 5\%$ dan ortiq farq qilmaydigan sifatli elektr energiyasini ta'minlash uchun kuchlanishni yaxshilash chora-tadbirlarini amalga oshirish tavsiya etiladi. Asosiy vosita sifatida tuman taqsimlovchi podstansiyasida kuchlanishni qarama-qarshi rostdlash va iste'molchi transformator podstansiyalarida tegishli tarmoqlarni tanlash qo'llaniladi.

Kuchlanishni qarama-qarshi rostdlash deganda, tarmoqlarda eng katta yuklamalar davrida kuchlanishni majburiy oshirish va eng kichik yuklamalar davrida kuchlanishni pasaytirish tushuniladi. Tuman podstansiyalarida kuchlanishni qarama-qarshi rostdlash va iste'mol podstansiyalari transformatorlarida tarmoqlarni tanlash yordamida kuchlanishning yo'l qo'yiladigan darajasini olish mumkin bo'lmagan hollarda kuchlanishni guruhli yoki mahalliy rostdlashdan boshqa usullar bilan foydalaniladi.

Kuchlanishni guruhli rostdlash vositalari sifatida VQTlar yoki bo'yama sig'imli kompensatsiyalovchi qurilmalar qo'llaniladi. Mahalliy rostdlash vositalari sifatida yuklama ostida kuchlanishni rostlovchi (transformatsiya koeffitsiyentini o'zgartiruvchi) qurilma (*ППН - регулировка под нагрузкой*)si mavjud transformatorlardan foydalaniladi.

Hozirgi vaqtda, eng ko'p tarqalgan 10/0,4 kV kuchlanishli transformatorlardan keng foydalaib, ularda iste'molchi kuchlanishi o'chirilib, manba kuchlanishini qo'l bilan boshqarishda qo'zg'atishsiz qayta ulagich qurilmasi (*ЛБВ - переключения без возбуждения*) yordamida uzib-ulab qo'yiladi. Bunda, transformatorning yuqori kuchlanishli chulg'amida $\pm 2 \times 2,5\%$ oraliqda ta'minlovchi shoxobchalar bosqichlari yordamida rostdlash ko'zda tutilgan.

Pasaytiruvchi transformatorlarning salt ishlashida nominal rostdlash pog'onasining (0%) ikkilamchi tomonida doimiy kuchlanish qo'shimchasi $+5\%$ ga teng bo'ladi. Umuman olganda, rostdlashni beshta bosqichining har birida mos ravishda $\pm 4 \times 2,5\%$ oraliqda qo'shimcha kuchlanish paydo bo'ladi [1].

Transformatorlar uchun tegishli tarmoqni tanlanishi past kuchlanishli elektr tarmoqlarini loyihalash jarayonida ham, ulardan foydalanishda ham amalga oshiriladi. Minimal va maksimal yuklamalar rejimida podstansiyaning yuqori kuchlanishli shinalaridagi kuchlanish darajasidan kelib chiqib, kerakli tarmoqlanish, ya'ni tegishli qo'shimchalar tanlanadi. Past kuchlanishli taqsimlovchi tarmoqlarni loyihalashda va haqiqiy yuklama grafiklarini o'rnatilishi qiyin bo'lgan shartlarda, tarmoqlarni tanlash uchun ikkita shartli hisob rejimlari beriladi (100% maksimal yuklama va 25% minimal yuklama). Har bir rejim uchun transformator shinalaridagi kuchlanish darajalari va uning ruxsat etilgan tebranishlari topiladi ($\pm 5\%$). Transformator podstansiyalarini ekspluatatsiya qilish jarayonida iste'molchilar kuchlanishi darajasi nominal qiymatidan $\pm 5\%$ dan ortiq farq qilmasligini hisobga olgan holda, transformator tarmoqlarini tanlash kerak.

Iste'molchi kuchlanishining nominaldan og'ishi quyidagi ifoda orqali aniqlanadi:

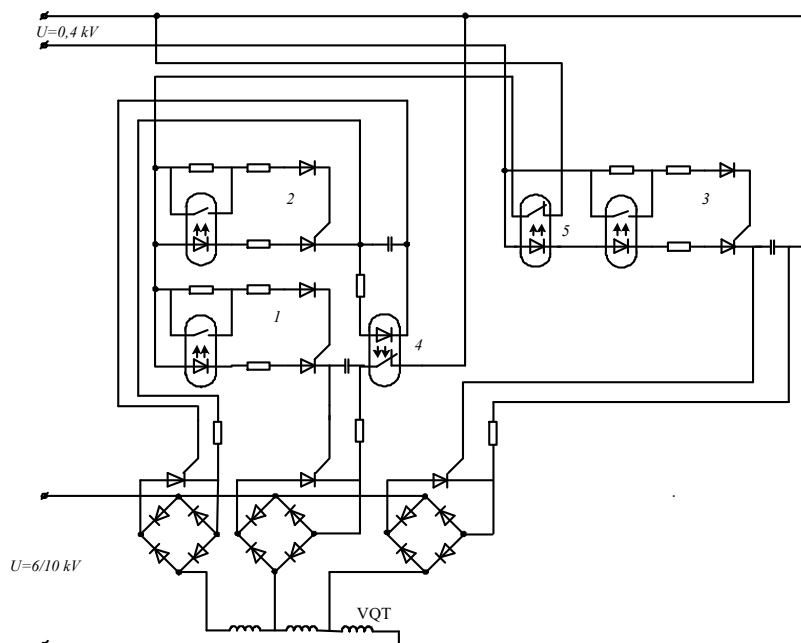
$$\Delta U_{\text{ist.}} = ((U_{\text{ist.}} - U_{\text{nom}}) / U_{\text{nom}}) \cdot 100\% . \quad (19)$$

Pasaytiruvchi transformatorlar shoxobchalarini qo'lda boshqarish asosan mavsumiy amalga oshiriladi, bu esa har doim ham iste'molchilar tomonidan qo'yiladigan elektr energiyasi sifatiga qo'yiladigan talablarga javob bermaydi [2-6].

Ushbu maqolada, transformator chulg'amlari shoxobchalarini PBV qurilmasi yordamida avtomatik ravishda kontaktsiz ulab-uzish masalalari ko'rib chiqilgan bo'lib, 11-rasmda transformator koeffitsiyentining ikkilamchi chulg'am kuchlanishi funksiyasida o'zgartirishning bir fazali kontaktsiz qurilma yordamida boshqarishning bir chiziqli prinsipial sxemasi ko'rsatilgan.

Taklif etilayotgan qurilma uchta (1-, 2-, 3-) kontaktsiz kuchlanish relelaridan iborat bo'lib, uchta kuchli diodli ko'priklarning diagonallarida kuchli tiristorlari ulangan bo'lib, bunda 2- va 3-kontaktsiz relelar qo'shimcha ravish kontaktlari 4-, 5- normal ulangan optorele bilan ta'minlangan.

PBV qurilmasi ishlashini bir fazadagi kuchlanishni rostdlash misolida ko'rib chiqamiz [7-8, 10].



11-rasm. Bir fazali kontaktless qurilmaning prinsipial sxemasi
Fig.11. Schematic diagram of a single-phase contactless device

Iste'molchi kuchlanishi 220 Voltga teng bo'lganda, 1-rele ishga tushadi va transformator ansaftning nolli qisqichini ulaydi, kuchlanish 215 Voltgacha pasayganda 2-rele ishga tushib, ansaftning birinchi qisqichini ulaydi va nominal kuchlanish (U_n)dan +5% kuchlanishni qo'shadi, shu bilan birga, 4-optorelega signal beradi hamda u o'zining normal yopiq kontaktini uzib, 1-kontaktless rele zanjirini toksizlantiradi. Kuchlanish oshganda 3-kontaktless rele ishga tushib, kuchlanishni U_n dan -5% ga pasaytiruvchi ansaft qisqichini ulashga signal beradi, bu rele bir vaqtning o'zida 1- va 2-kontaktless kuchlanish relelari zanjirida o'zining normal yopiq kontaktini uzadigan 5-optorelega signal beradi.

5. Muhokama (Discussion)

Tahlil va takliflar (Analysis and Recommendations). Bizga ma'lumki, elektr energiyasi mahsulot sifatida ishlab chiqariladi, uzatiladi va taqsimlanadi. Shuning uchun, har qanday mahsulot kabi elektr energiyasi ham ushbu mahsulot iste'molchilari tomonidan qo'yiladigan ma'lum talablarni bajarish qobiliyatini xarakterlovchi xususiyatlarga, ya'ni mahsulot sifatiga ega. EESni miqdoriy baholash ko'rsatkichlari O'zDSt 1044:2003 (2003 yil 18-iyul-dan kuchga kirgan)da belgilangan [1-6].

Har bir elektr iste'molchilarga EES ko'rsatkichlari turlicha ta'sir ko'rsatadi. Shuning uchun, barcha elektr iste'molchilar uchun quyidagilarni ajratib ko'rsatish mumkin [1]:

- kuchlanishning oshishi maishiy asboblardan sanoat qurilmalarining tok o'tkazuvchi qismlarining qizib ketishiga, ba'zan esa elektr iste'molchining ishdan chiqishiga olib keladi;
- past kuchlanish esa, o'z navbatida, maishiy asboblardan foydalanishni cheklab qo'yadi (yoritish lampalarining yorug'lik oqimi, elektr mashinalarining unumdorligi pasayadi va h.k.), texnologik jarayon vaqtining cho'zilishiga va ishlab chiqarilayotgan mahsulotlarning yaroqsizligiga olib keladi;
- chastotaning o'zgarishi asinxron mashinalarning aylanish tezligining o'zgarishiga olib keladi;
- kuchlanishning nosinusoidaligi elektron apparatlar (televizor, kompyuter, radiouzatgich va h.k.)ning ishlashiga ta'sir ko'rsatadi, shuningdek, kondensator batareyalarining qizishiga olib keladi;
- kuchlanishning tebranishi elektr iste'molchilarning ishlash muddatini qisqartiradi, yoritish lampalarining yorug'lik oqimi (flikler) tebranishini keltirib chiqaradi, bu esa odamlarning sog'lig'iga salbiy ta'sir ko'rsatadi.

Respublikamiz qishloq joylarida elektr ta'minoti asosan ularning uzunligi bilan bog'liq bo'lgan kuchlanish pasayishining katta foiziga ega bo'lgan HEULlari orqali amalga oshiriladi. Hozirgi vaqtda uy-joy sektorlarida elektr energiyasi iste'molining intensiv o'sishi kuzatilmoqda. Bularning barchasi o'tgan asrning ikkinchi yarmidagi elektr energiyasi iste'moli me'yorlari bo'yicha loyihalashtirilgan elektr uzatish liniyalarining zarur o'tkazuvchanlik qobiliyatiga ega emasligiga va iste'molchilarning EES uning me'yorlariga tobora mos kelmasligiga olib kelmoqda. EES talablariga javob bermaydigan elektr tarmog'i orqali uzatilganda, uning energiya isrofi ham ortadi. Bundan, 0,4 kV kuchlanishli taqsimlovchi tarmoqlarda EESni oshirishning samarali chora-tadbirlarini ishlab chiqish masalasi dolzarb muammo bo'lib qoladi [1-6, 15].

Shuningdek, nisbatan kam sonli fiderlarga ulangan kichik quvvat tufayli 0,4 kV kuchlanishli tarmoqlarda reaktiv quvvatni kompensatsiyalash va yuqori garmonikalarni filtrlash iqtisodiy jihatdan



samarasiz deb hisoblanadi. Shuning uchun 0,4 kV kuchlanishli tarmoqlarda iste'molchilarga uzatilayotgan EESni yaxshilash uchun sodda, ishonchli va arzon qurilmalarni ishlab chiqish dolzarb hisoblanadi [2-6, 9, 14-15].

0,4 kV kuchlanishli tarmoqlar uchun EESning asosiy ko'rsatkichlaridan biri, bu kuchlanishning tekis og'ishi va nol ketma-ketlik bo'yicha nosimmetriklik koeffitsiyenti hisoblanadi.

Kuchlanishning og'ishlari (nominal kuchlanishga nisbatan pasayishi yoki oshish kabi og'ish nazarda tutilgan) elektr energiyasining uzatish nuqtasida bir hafta davomida 100% vaqt oralig'ida nominal yoki ruxsat etilgan kuchlanish qiymatining 10% dan oshmasligi kerak.

110 kV dan past kuchlanishli HEULlari orqali elektr energiyasini uzatishda doimiy ravishda kuchlanishning pasayishi kuzatiladi, bu kompleks kattalik hisoblanib, liniyaning boshidagi kuchlanish va uning oxiridagi kuchlanishning arifmetik farqi sifatida aniqlanadi:

$$\Delta U = \frac{PR - QX}{U_n} \quad (20)$$

Bu ifodadan ko'rinadiki, liniya qarshiligini kamaytirish yoki Q reaktiv quvvatni kompensatsiyalash yo'li orqali kuchlanish isrofini kamaytirish mumkin ekan. HEULlarining qarshiligini kamaytirish ancha qimmatga tushadigan tadbir bo'lganligi sababli, aksariyat hollarda past kuchlanishli tarmoqlarda iste'mol qilinmaydigan kuchlanish isrofi kamaytirish maqsadida va bundan, aktiv quvvatning isrofiga olib keladigan reaktiv quvvatni kompensatsiyalash mumkin.

Ushbu tadqiqotda, 0,4 kV kuchlanishli liniyada VQTni ulash va boshqarish tizimini yaratish, ta'minlovchi liniya kuchlanishining o'zgarish funksiyasida qo'shimcha transformator o'zagini magnitlash masalasi ko'rib chiqilgan.

Adabiyotlar tahlil asosida parallel ulangan nochiziqli va chiziqli induktivliklar bilan ketma-ket ulangan sig'imlardan tashkil topgan parametrik tebranish konturida yuqorida ko'rsatilgan elementlarning parametrlari va ta'minot manbai kuchlanishining ma'lum bir kombinatsiyalarida asosiy chastotada stabil parametrik tebranishlar paydo bo'lishi ko'rsatilgan. Bunda, ko'rilayotgan zanjirning tarmoqlanmagan qismidagi tokning boshlang'ich fazasi berilgan kuchlanishning boshlang'ich fazasiga nisbatan quyidagicha aniqlanadi [2-6, 9, 14]:

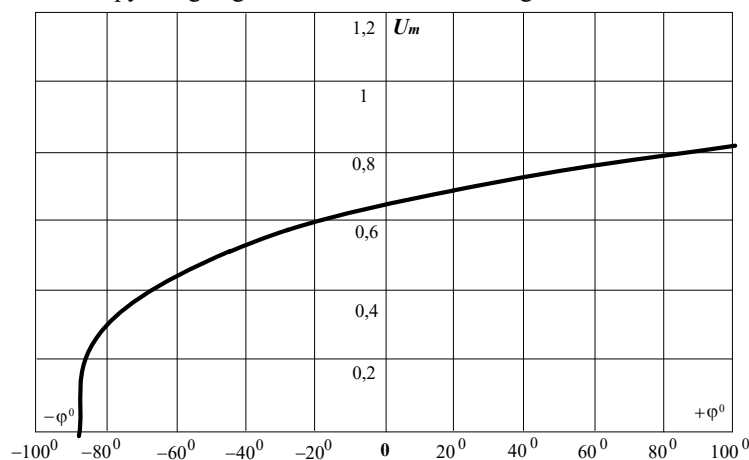
$$\operatorname{tg} \varphi = - \frac{(X_m^6 - 1) \operatorname{tg} \psi \frac{\gamma}{\beta}}{(X_m^6 - 1) \frac{\gamma}{\beta} \operatorname{tg} \psi} \quad (21)$$

bu yerda X_m - nisbiy birlikdagi oqim; $\beta = \omega^2 CL_0$; $\gamma = \omega L_0 g$ - o'lchamsiz koeffitsiyentlar; $\operatorname{tg} \psi = \frac{\beta(1 - X_m^6) \cdot 1}{\gamma}$ - berilgan kuchlanish va oqim orasidagi boshlang'ich fazalar burchagi.

Tarmoq kuchlanishi nisbiy birliklarda quyidagi ifoda orqali aniqlanadi:

$$U_m = \sqrt{[\beta(1 - X_m^6)]^2 - \gamma^2} \quad (22)$$

12-rasmda (21) va (22)-ifodalar asosida qurilgan tarmoqlanmagan qismdagi tokni boshlang'ich fazasining siljish burchagiga berilgan kuchlanish qiymatiga bog'liqligi ko'rsatilgan. Ushbu bog'liqlikdan ko'rinib turibdiki, tokning boshlang'ich faza siljishi φ kirish kuchlanishining minimal qiymatlarida o'zining maksimal qiymatiga ega va kirish kuchlanishining ortishi bilan tekis kamayadi.



12-rasm. Zanjirning tarmoqlanmagan qismidagi tokning boshlang'ich fazasini siljish burchagiga berilgan kuchlanish qiymatiga bog'liqlik grafiği

Fig.12. The graph of the dependence of the initial phase of the current in the untapped part of the winding on the voltage value given to the phase shift angle



6. Xulosa (Conclusion)

Maqolada keltirilgan tadqiqot natijalari bo'yicha quyidagi xulosalarni berish mumkin:

- nohiziqli elektr zanjir tahlili uchun, differensial tenglamalarning matematik modellari ishlab chiqib, EHM dasturlarining virtual-tajribasi asosida sig'im kuchlanishini o'zgarish vaqti rezistiv-sig'im zanjiri parametrlariga bog'liqligi aniqlandi;
- kontaktli qurilmaning yangi sxemasi ishlab chiqildi hamda taklif etilayotgan ushbu kontaktli qurilmadan PBV qurilmasi o'rnida foydalanish mumkin, bundan iste'molchilardagi kuchlanishni mavsumiy emas, balki 0,4 kV kuchlanishli magistral tarmoqdagi haqiqiy qiymatga qarab o'zgartirish imkonini beradi;
- parallel rezonans konturli zanjirlar asosidagi VQTLarni avtomatik boshqarish tizimlarini tadqiq qilinishi va ishlab chiqish natijasi shuni ko'rsatdiki, bunday yangi sxemalar kuchlanishni rostlash qurilmalariga qo'yiladigan talablarga to'liq javob beradi hamda bunday sxema iste'mol quvvati 10 Vt dan oshmaydi, lekin yuzlab kVt quvvatli iste'molchilarni boshqarishi mumkin;
- bunday qurilmalarni 0,4 kV kuchlanishli tarmoqlarning uchta faza kesishmasiga ulash natijasi-dan, kuchlanish va energiya isroflari kamayadi hamda ushbu tarmoqlardagi nosimmetriyani ham qisman bartaraf etib, bundan energiya isroflarini yanada kamayishiga olib kelishi mumkin.

ADABIYOT

1. Государственный стандарт Узбекистана О'zDSt 1044:2003. Методы измерений и анализа показателей качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения (протокол №05-19 от 18 июля 2003 г. -С.27).
2. Л.В.Фетисов, и др. Повышение качества электрической энергии в сетях низкого напряжения. //Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2018. Т.20. №11-12. С.99-106. DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-11-12-99-106.
3. О.А.Булатов. Анализ измерений качества электроэнергии после установки бустерного трансформатора. /Материалы Международной научно-практической конференции «Достижения, проблемы и перспективы развития нефтегазовой отрасли». Альметьевск: Альметьевский государственный нефтяной институт, 2017. -С.86-90.
4. Д.Е.Дулупов, Т.Кондраненкова. Снижение потерь и повышение качества электрической энергии при несимметричных режимах в сельских распределительных электрических сетях. Электроэнергетика глазами молодежи-2017: /Материалы VIII Международной научно-технической конференции. -Самара: Самарский государственный технический университет, 2017. -С.328-331.
5. Д.М.Журавлев, и др. Анализ технических решений для обеспечения требуемых показателей качества электроэнергии у потребителей в электрической сети 0,4 кВ. //Энергетик. 2013. №9. -С.16-19.
6. А.И.Федотов, и др. Обеспечение нормативного уровня напряжения в распределительных сетях 0,4-10 кВ с помощью вольтодобавочных трансформаторов. //Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2011. №9-10. С.40-45.
7. Э.Г.Усманов, Э.Х.Абдураимов, Р.Ч.Каримов. Оптоэлектронное бесконтактное реле напряжения. Агентство по интеллектуальной собственности РесУз. Патент на изобретение №IAP 05122. 29.10.2015.
8. Э.Х. Абдураимов, Р.Ч. Каримов, М.Р. Рузиназаров. Программа расчета параметров бустерных трансформаторов. Агентство по интеллектуальной собственности РесУз. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ №DGU 05850. 06.11.2018.
9. А.А. Асабин и др. Способы плавного регулирования величины выходного напряжения тиристорного регулятора вольтодобавки.//Энергетические системы и комплексы. Труды НГТУ им. Р.Е.Алексеева, №4(123), 2018. -С.69-75.
10. Э.Усманов, Э.Абдураимов, Д.Халманов, Р.Каримов. Оптоэлектронное бесконтактное реле напряжения с выдержкой времени. Агентство по интеллектуальной собственности при Министерстве Юстиции Республики Узбекистан. Патент на изобретение №IAP 06122. 28.12.2019.
11. M.Bobojanov, S.Mahmutkhonov, and S.Aytbaev. Investigation of the problems nonsinusoidal of the voltage form. AIP Conference Proceedings, 2552, 050011, (2023), <https://doi.org/10.1063/5.0113890>.
12. R.Karimov, M.Bobojanov. Analysis of voltage stabilizers and non-contact relays in power supply systems. E3S Web of Conferences, 216, 01162, (2020), <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202021601162>.
13. R.Ch.Karimov, M.K.Bobojanov, A.N.Rasulov, E.G.Usmanov. Controlled switching circuits based on non-linear resistive elements. E3S Web of Conferences, 139, 01039, (2019), <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201913901039>.



14. Э.Усманов, Б.Хусанов. Устройство для автоматического изменения коэффициента трансформации у трансформаторов 6-10/0,4 кВ. //Проблемы энерго- и ресурсосбережения. Специальный выпуск. 2021, -С.115-118.

15. R.Ch.Karimov, D.Sh.Xushvaktov, D.X.Khalmanov. The Problem of Improving Electrical Energy Quality Indicators as an Example of the Economic Development of Boysun District. AIP Conference Proceedings, 3152(1), 040024, (2024), <https://doi.org/10.1063/5.0218807>.

REFERENCES

1. Uzbekistan State Standard O'zDSt 1044:2003. Methods for Measuring and Analyzing Power Quality Parameters in General-Purpose Electrical Power Supply Systems (Protocol № 05-19 of July 18, 2003, p.27). (in Russ.).

2. L.V.Fetisov, et al. Improving the Quality of Electric Power in Low Voltage Networks. Proceedings of Higher Educational Institutions. Problems of Power Engineering. 2018. Vol. 20. №11-12. pp. 99-106. DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-11-12-99-106. (in Russ.).

3. O.A.Bulatov. Analysis of Power Quality Measurements After the Installation of a Booster Transformer. Proceedings of the International Scientific and Practical Conference "Achievements, Problems, and Prospects for the Development of the Oil and Gas Industry". Almetyevsk: Almetyevsk State Oil Institute, 2017. pp.86-90. (in Russ.).

4. D.E.Dulepov, T.Kondranenkova. Reduction of Losses and Improvement of Power Quality under Asymmetrical Conditions in Rural Distribution Electric Networks. Electrical Power Engineering Through the Eyes of Youth-2017: Proceedings of the 8th International Scientific and Technical Conference. Samara: Samara State Technical University, 2017. pp.328-331. (in Russ.).

5. D.M.Zhuravlev et al. Analysis of Technical Solutions for Ensuring the Required Power Quality Indicators for Consumers in a 0.4 kV Electrical Network. Energetik, 2013, No. 9, pp.16-19.

6. A.I.Fedotov et al. Ensuring the standard voltage level in 0.4–10 kV distribution networks using boost transformers. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Problemy Energetiki, №9-10, 2011, pp. 40-45. (in Russ.).

7. E.G.Usmanov, E.Kh.Abdurayimov, R.Ch.Karimov. Optoelectronic Non-Contact Voltage Relay. Intellectual Property Agency of the Republic of Uzbekistan. Patent for Invention №IAP 05122. 29.10.2015. (in Russ.).

8. E.Kh.Abduraimov, R.Ch.Karimov, M.R.Ruzinazarov. Software for Calculating Parameters of Booster Transformers. Intellectual Property Agency of the Republic of Uzbekistan. Certificate of Official Registration of Computer Program №DGU 05850. 06.11.2018. (in Russ.).

9. A.A.Asabin et al. Methods of Smooth Regulation of the Output Voltage Magnitude of a Thyristor Voltage Booster Regulator. Energy Systems and Complexes. Proceedings of Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, №4(123), 2018, pp.69-75. (in Russ.).

10. E.G.Usmanov, E.X.Abdurayimov, D.X.Khalmanov, R.Ch.Karimov. Optoelectronic Non-Contact Voltage Relay with Time Delay. Agency on Intellectual Property under the Ministry of Justice of the Republic of Uzbekistan. Patent for Invention №IAP 06122. Dated: December 28, 2019. (in Russ.).

11. M.Bobojanov, S.Mahmutkhonov, and S.Aytbaev. Investigation of the problems nonsinusoidal of the voltage form. AIP Conference Proceedings, 2552, 050011, (2023), <https://doi.org/10.1063/5.0113890>.

12. R.Karimov, M.Bobojanov. Analysis of voltage stabilizers and non-contact relays in power supply systems. E3S Web of Conferences, 216, 01162, (2020), <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202021601162>.

13. R.Ch.Karimov, M.K.Bobojanov, A.N.Rasulov, E.G.Usmanov. Controlled switching circuits based on non-linear resistive elements. E3S Web of Conferences, 139, 01039, (2019), <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201913901039>.

14. E.Usmanov, B.Khusanov. Device for Automatic Change of the Transformation Ratio in 6-10/0.4 kV Transformers. Problems of Energy and Resource Saving. Special Issue, 2021, pp.115-118. (in Russ.).

15. R.Ch.Karimov, D.Sh.Xushvaktov, D.X.Khalmanov. The Problem of Improving Electrical Energy Quality Indicators as an Example of the Economic Development of Boysun District. AIP Conference Proceedings, 3152(1), 040024, (2024), <https://doi.org/10.1063/5.0218807>.