

110–220 kV kuchlanishli havo elektr uzatish liniyalarida elektr energiyasini uzatishning chegaraviy rejimlarini texnik-iqtisodiy tahlil qilish va approksimatsiyalash usullari

Iles I. Baxadirov

PhD, dosent, Muhammad al-Xorazmiy nomidagi Toshkent Axborot Texnologiyalari Universiteti, Toshkent, 100084, O'zbekiston; bakhadirov1987@gmail.com <https://orcid.org/0000-0002-8754-7433>

Dolzarbli: 110–220 kV kuchlanishli havo elektr uzatish liniyalari mintaqaviy elektr energetika tizimlari va yirik sanoat korxonalari elektr ta'minotining asosiy tarkibiy qismlaridan biridir. Elektr yuklamalarining ortishi, iste'mol grafiklarining o'zgarishi, yangi sanoat obyektlarining ulanishi va taqsimlangan generatsiyaning rivojlanishi liniyalar ish rejimlarining o'zgaruvchanligini kuchaytirmoqda. Elektr energiyasi narxining oshishi esa texnik yo'qotishlarni kamaytirish va maqbul yuklanish darajasini aniqlashning ilmiy-texnik hamda iqtisodiy ahamiyatini oshirmoqda.

Optimal rejimni aniqlashda tokning o'rtacha qiymati bilan bir qatorda sutkalik va yillik yuklama grafiklari, maksimal yuklamadan foydalanish davomiyligi, iste'mol prognozi, atrof-muhit harorati, shamol tezligi, quyosh radiatsiyasi, o'tkazgichlar va kontaktlarning texnik holati hamda liniyaning haqiqiy qarshiligi inobatga olinishi zarur. Ushbu omillar tok o'tkazish qobiliyati, qizish, energiya yo'qotishlari va ekspluatatsion ishonchlikni belgilaydi.

Mazkur kompleks yondashuv texnik cheklovlarni majburiy shart, iqtisodiy samaradorlikni esa optimal yechimni tanlash mezonini sifatida qo'llashga asoslanadi. Uning amalga oshirilishi texnik yo'qotishlar va umumiy xarajatlarni kamaytirish, mavjud tarmoq imkoniyatlaridan samarali foydalanish, uskunalar xizmat muddatini uzaytirish hamda rekonstruksiya va modernizatsiyani ilmiy asosda rejalashtirishga xizmat qiladi. Bunda elektr ta'minotining talab etilgan ishonchligi va elektr energiyasi sifati ta'minlanadi.

Maqsad: Elektr energiyasini uzatishning solishtirma diskontlangan xarajatlarini minimallashtirish mezonini asosida amaldagi 110–220 kV havo liniyalari faza o'tkazgichlarining iqtisodiy optimal tok yuklamasi va oqilona tok zichligini aniqlash metodologiyasini ishlab chiqish hamda ilmiy asoslashdir.

Usullar: Tadqiqotda texnik-iqtisodiy va qiyosiy tahlil, iqtisodiy-matematik modelashtirish hamda optimallashtirish usullari qo'llanildi.

Natijalar: Kesimning kattalashishi va yuklama grafigining zichlashishi yo'qotishlarni kamaytirish hamda o'tkazish qobiliyatidan samarali foydalanish orqali solishtirma xarajatlarni pasaytirishi asoslandi. Ko'rib chiqilgan sharoitlarda 110 kV liniyalardagi solishtirma xarajatlar 220 kV liniyalardagidan o'rtacha 10–12% yuqori bo'ldi. Optimal tokdan har ikki yo'nalishdagi sezilarli og'ish xarajatlarni oshirishi sababli haqiqiy tokni optimal qiymatga nisbatan $\pm 5\%$ chegarada saqlash tavsiya etildi.

Kalit so'zlar: havo elektr uzatish liniyasi, iqtisodiy optimallashtirish, faza o'tkazgichining ko'ndalang kesim yuzasi, solishtirma diskontlangan xarajatlar, elektr energiyasining texnik yo'qotishlari, iqtisodiy tok zichligi, elektr energiyasini uzatish rejimi.

Технико-экономический анализ и методы аппроксимации предельных режимов передачи электроэнергии в воздушных линиях электропередачи 110–220 кВ

Илес И. Бахадиров

PhD, доцент, Ташкентский университет информационных технологий имени Мухаммада ал-Хоразмий, Ташкент, 100084, Узбекистан; bakhadirov1987@gmail.com <https://orcid.org/0000-0002-8754-7433>

Актуальность. Воздушные линии электропередачи напряжением 110–220 кВ являются важнейшими элементами региональных электроэнергетических систем и систем электроснабжения крупных промышленных предприятий. Рост нагрузок, изменение графиков электропотребления, подключение новых промышленных объектов и развитие распределённой генерации усиливают изменчивость режимов их работы. Одновременно повышение стоимости электроэнергии увеличивает экономическую значимость технических потерь, что обуславливает актуальность определения оптимальной загрузки линий.

Для определения оптимального режима недостаточно учитывать только среднее значение тока. Необходимо анализировать суточные и годовые графики нагрузки, продолжительность использования максимальной нагрузки, прогноз электропотребления, температуру окружающей среды, скорость ветра, солнечную радиацию, техническое состояние проводов и контактов, а также фактическое сопротивление линии. Эти факторы определяют её пропускную способность, температурный режим, энергетические потери и эксплуатационную надёжность.

Комплексный подход предусматривает принятие технических ограничений в качестве обязательных условий, а экономической эффективности — в качестве критерия выбора оптимального решения. Его применение позволяет снизить потери электроэнергии и совокупные затраты, повысить эффективность

For citation: Baxadirov I.I. Techno-economic analysis and approximation methods for limiting power transmission modes in 110–220 kV overhead transmission lines. Scientific and technical journal of Problems of Energy and Sources Saving, 2026, no. 3 (1), pp. 160-174.

<https://doi.org/10.5281/zenodo.23471863>

Received: 17.04.2026

Revised: 10.05.2026

Accepted: 16.06.2026

Published: 19.10.2026

Copyright: © Iles I. Baxadirov, 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/>).



использования существующих сетевых активов, продлить срок службы оборудования и обосновать мероприятия по реконструкции и модернизации при обеспечении требуемой надёжности электроснабжения и нормативного качества электроэнергии.

Цель: Разработке и научном обосновании методологии определения экономически оптимальной токовой нагрузки и рациональной плотности тока в фазных проводах действующих воздушных линий электропередачи напряжением 110–220 кВ на основе критерия минимизации удельных дисконтированных затрат на передачу электрической энергии. .

Методы: В исследовании использованы технико-экономический и сравнительный анализ, экономико-математическое моделирование и оптимизация.

Результаты: Установлена зависимость оптимальной плотности тока от продолжительности использования максимальной нагрузки, напряжения, типа и сечения проводов, тарифа, климата и структуры эксплуатационных затрат. Увеличение сечения и уплотнение графика нагрузки снижают удельные затраты за счёт сокращения потерь и эффективного использования пропускной способности. В рассмотренных условиях удельные затраты для ВЛ 110 кВ в среднем на 10–12% выше, чем для ВЛ 220 кВ. Поскольку существенное отклонение тока от оптимума в обе стороны увеличивает затраты, рекомендовано поддерживать фактический ток в пределах $\pm 5\%$ от оптимального значения.

Ключевые слова: воздушная линия электропередачи, экономическая оптимизация, сечение фазного провода, удельные дисконтированные затраты, технологические потери электроэнергии, экономическая плотность тока, режим передачи мощности.

Techno-economic analysis and methods for approximating limiting power transfer conditions in 110–220 kV overhead transmission lines

Iles I. Baxadirov

PhD, docent, Tashkent University of Information Technologies named after Muhammad al-Khwarizmi, Tashkent, 100084, Uzbekistan; bakhadirov1987@gmail.com <https://orcid.org/0000-0002-8754-7433>

Relevance: Overhead transmission lines rated at 110–220 kV are essential components of regional power systems and the electricity supply infrastructure of large industrial enterprises. Increasing demand, changing consumption patterns, the connection of new industrial facilities, and the expansion of distributed generation make their operating conditions increasingly variable. Rising electricity prices further increase the economic significance of technical losses, highlighting the need to determine optimal line loading.

Determining the optimal operating regime requires more than an assessment of average current. Relevant factors include daily and annual load profiles, equivalent full-load hours, projected electricity demand, ambient temperature, wind speed, solar radiation, the condition of conductors and connections, and actual line resistance. These factors influence transmission capacity, conductor temperature, energy losses, and operational reliability.

This integrated approach treats technical constraints as mandatory conditions and economic efficiency as the criterion for selecting the optimal solution. Its application can reduce energy losses and overall costs, improve the utilisation of existing network assets, extend equipment service life, and support technically and economically justified reconstruction and modernisation while maintaining the required supply reliability and power quality.

Aim: Develop and scientifically substantiate a methodology for determining the economically optimal current loading and rational current density in the phase conductors of existing 110–220 kV overhead transmission lines, using the minimization of discounted electricity transmission costs per unit of energy transmitted as the optimization criterion.

Methods: The study employed techno-economic and comparative analysis, economic–mathematical modelling, and optimization.

Results: Optimal current density was found to depend on maximum-load utilization duration, voltage, conductor type and cross-sectional area, electricity tariff, climate, and operating cost structure. Increasing conductor size and flattening the load curve reduce unit costs through lower losses and more efficient use of transmission capacity. Under the conditions considered, unit costs for 110 kV overhead lines were, on average, 10–12% higher than those for 220 kV lines. Since substantial deviations from the optimal current in either direction increase costs, maintaining the actual current within $\pm 5\%$ of its optimal value was recommended.

Keywords: overhead transmission line, economic optimization, phase-conductor cross-sectional area, discounted unit transmission costs, technical energy losses, economic current density, power transmission operating conditions.

1. Kirish (Introduction)

O'tkazgichlarning yuklanish rejimlari va tok zichligini iqtisodiy optimallashtirish — texnik talablar va elektr ta'minoti ishonchliligini ta'minlagan holda, liniyaning hisobiy ekspluatatsiya davridagi umumiy keltirilgan yoki diskontlangan xarajatlarni minimallashtiruvchi parametrlarni aniqlashga qaratilgan kompleks texnik-iqtisodiy vazifadir. Bunda dastlabki kapital qo'yilmalar, texnik xizmat ko'rsatish, ta'mirlash, energiya yo'qotishlarini qoplash, uskunalarni yangilash va zarur ishonchlilikni ta'minlash xarajatlari hisobga olinadi. Elektr iste'molining o'sishi, energiya resurslari narxining oshishi va tarmoq infratuzilmasining eskirishi mazkur vazifaning dolzarbligini kuchaytiradi.

Havo liniyasi faza o'tkazgichlari yoki kabel tomirlarining ko'ndalang kesim yuzasi liniyaning aktiv qarshiligi, ruxsat etilgan tok yuklamasi, qizishi, quvvat yo'qotishlari, kuchlanish pasayishi, mexanik xususiyatlari va qurilish qiymatini belgilovchi asosiy loyihaviy parametrdir. Shu sababli uni tanlash faqat ruxsat etilgan davomli tok bo'yicha tekshirish bilan cheklanmay, texnik, iqtisodiy va ekspluatatsion omillarning kompleks tahliliga asoslanishi lozim.

Kesim yuzasining kattalashishi o'tkazgich materiali sarfi va massasini, shuningdek, tayanchlar, izolyatorlar hamda armaturalarga tushadigan mexanik yuklamalarni oshiradi. Bu ayrim hollarda mustahkamroq konstruksiyalar va poydevorlarni talab qilib, kapital qo'yilmalarni ko'paytiradi. Biroq bir xil tok yuklamasida aktiv qarshilik, quvvat va energiya yo'qotishlari, qizish hamda kuchlanish pasayishining aktiv tashkil etuvchisi kamayadi. Natijada ekspluatatsion xarajatlar qisqaradi, termik eskirish sekinlashadi va boshqa texnik cheklovlar imkon berganda liniyaning o'tkazish qobiliyati ortadi.

Kesim yuzasining kichrayishi dastlabki xarajatlarni kamaytiradi, ammo bir xil yuklamada qarshilik, energiya yo'qotishlari va qizishni oshirib, kuchlanish rejimini yomonlashtiradi. Ortiqcha qizish o'tkazgichlar va kontakt birikmalarining holatiga salbiy ta'sir ko'rsatishi, termik uzayish esa osilish salqiligini oshirib, me'yoriy gabaritlarning buzilishiga olib kelishi mumkin. Shuning uchun kesimni faqat qurilish xarajatlarini kamaytirish maqsadida tanlash iqtisodiy va texnik jihatdan yetarli asosga ega emas.

Iqtisodiy maqbul tok zichligi barcha sharoitlar uchun o'zgarmas qiymat emas; u kuchlanish sinfi, o'tkazgich turi va kesimi, fazalar joylashuvi, energiya qiymati va yuklama xususiyatlariga bog'liq. Boshqa shartlar o'zgarmaganda, energiya yo'qotishlari qiymatining oshishi kattaroq kesimni va pastroq tok zichligini iqtisodiy jihatdan maqsadga muvofiq qiladi. Maksimal yuklamadan foydalanish davomiyligining qisqarishi esa yillik yo'qotishlar xarajatini kamaytirishi va texnik talablar bajarilgan holda yuqori tok zichligini maqbul qilishi mumkin.

Elektr tarmoqlarini loyihalashning an'anaviy texnik-iqtisodiy hisoblarida sxemaviy yechimlar, tarmoq parametrlari va alohida elementlarning muqobil variantlarini taqqoslash uchun maqsad funksiyasi sifatida keltirilgan xarajatlar funksiyasi — $H(F)$ qo'llanilgan. Bunda F o'tkazgichning ko'ndalang kesim yuzasini ifodalaydi. Ushbu funksiya quyidagi ko'rinishda yoziladi:

$$H(F) = X + K S_m \cdot K_{ob} + Z \quad (1)$$

Mazkur funksiyaning minimal qiymati ko'rib chiqilayotgan muhandislik masalasining iqtisodiy jihatdan optimal yechimiga mos keladi [1, 2, 3].

bu yerda $K S_m = 0,12 \text{ yil}^{-1}$ — kapital qo'yilmalar samaradorligining me'yoriy koeffitsiyenti. Mazkur hisoblash yondashuvida ushbu koeffitsiyent mamlakat iqtisodiyotining holatini hisobga olgan holda vakolatli iqtisodiy va rejalashtirish organlari tomonidan belgilanadigan hamda muayyan davr davomida nisbatan barqaror deb qabul qilinadigan ko'rsatkichdir, K_{ob} — qurilayotgan obyektlarga yo'naltiriladigan bir martalik kapital qo'yilmalar, X — yillik ekspluatatsion xarajatlar, Z — elektr ta'minotidagi uzilishlar natijasida yuzaga keladigan yillik iqtisodiy zarar.

2. Materiallar va usullar (Methods and materials)

Simlarning kesim yuzasini tanlashning amaldagi usullari tahlili. Havo elektr uzatish liniyalari simlarining ko'ndalang kesim yuzasini oqilona tanlash elektr tarmoqlarini loyihalashdagi asosiy texnik-iqtisodiy masalalardan biridir. Tanlangan kesim yuzasi liniyaning talab etiladigan quvvatni uzatish imkoniyatini, elektr ta'minotining me'yoriy ishonchligini va elektr energiyasining sifat ko'rsatkichlarini ta'minlashi lozim. Shu bilan birga, u obyektning hisobiy xizmat muddati davomida iqtisodiy jihatdan asoslangan xarajatlar darajasiga mos kelishi zarur.

Mazkur masalaning iqtisodiy mohiyati kapital qo'yilmalar va ekspluatatsiya xarajatlarining o'zaro qarama-qarshi yo'nalishda o'zgarishi bilan belgilanadi. Simlarning kesim yuzasi kattalashishi o'tkazgich materiali sarfi va simlar massasining ortishiga, shuningdek, tayanchlar, traversalar, izolyatorlar hamda liniya armaturalariga tushadigan mexanik yuklamalarning oshishiga olib keladi. Natijada, liniyani qurish uchun zarur bo'lgan dastlabki kapital qo'yilmalar va amortizatsiya ajratmalari, ayrim hollarda esa texnik xizmat ko'rsatish hamda ta'mirlash xarajatlari ham ortadi. Ayni paytda, simlarning kesim yuzasi kattalashishi ularning aktiv elektr qarshiligini kamaytiradi. Bu aktiv quvvat va elektr energiyasi yo'qotishlarini hamda kuchlanish pasayishini kamaytirishga, simlarning qizishini cheklashga va liniyaning quvvat uzatish imkoniyatini oshirishga xizmat qiladi. Demak, simlar kesim yuzasining kattalashishi, bir tomondan, liniyani qurish xarajatlarini oshirsa, ikkinchi tomondan, elektr energiyasini uzatishdagi texnologik yo'qotishlar bilan bog'liq yillik ekspluatatsiya xarajatlarini kamaytiradi. Shu sababli iqtisodiy jihatdan maqbul kesim yuzasini aniqlash ushbu xarajatlar o'rtasidagi optimal nisbatni topishni talab etadi.

Tizimlararo elektr uzatish liniyalarini loyihalash amaliyotida simlarning iqtisodiy jihatdan maqbul kesim yuzasini aniqlash uchun, asosan, ikki usul — iqtisodiy tok zichligi usuli va iqtisodiy tok intervallari usuli qo'llaniladi. Har ikkala usul ham (1) ifoda bilan berilgan keltirilgan xarajatlar

funksiyasini minimallashtirishga asoslanadi. Biroq ular hisobiy elektr yuklamani ifodalash hamda muayyan kesim yuzasiga ega simlarni qo'llashning iqtisodiy jihatdan maqsadga muvofiq chegaralarini aniqlash yondashuvlari bilan bir-biridan farq qiladi.

Iqtisodiy tok zichligi usuli o'tkazgichning hisobiy kesim yuzasini liniyaning hisobiy tokini me'yoriy iqtisodiy tok zichligiga bo'lish orqali aniqlashga asoslanadi. Iqtisodiy tok zichligi o'tkazgich materialiga sarflanadigan xarajatlar bilan elektr energiyasi yo'qotishlari qiymati o'rtasidagi maqbul nisbatni ta'minlaydigan tokning kesim yuzasi birligiga to'g'ri keladigan miqdorini tavsiflaydi. Mazkur usulning asosiy afzalligi hisoblashlarning nisbatan soddaligi va loyihalashning dastlabki bosqichlarida qo'llash uchun qulayligidir. Biroq iqtisodiy tok zichligining me'yoriy qiymatlari o'rtachalashtirilgan bo'lib, muayyan liniyaning haqiqiy ish sharoitlarini, elektr energiyasi tariflari dinamikasini, uskunalarning qiymatini hamda elektr yuklamaning istiqboldagi o'zgarishlarini har doim ham to'liq aks ettirmaydi.

Iqtisodiy tok intervallari usuli muayyan standart kesim yuzasiga ega o'tkazgichdan foydalanish iqtisodiy jihatdan maqsadga muvofiq bo'ladigan hisobiy tok diapazonlarini aniqlashga asoslanadi. Ushbu intervallarning chegaralari ketma-ket joylashgan ikkita standart kesim varianti uchun keltirilgan xarajatlarni o'zaro taqqoslash va ularning tenglik shartini aniqlash orqali belgilanadi. Iqtisodiy tok zichligi usuliga nisbatan mazkur yondashuv o'tkazgichlarning standart kesimlari qatori diskretligini izchil hisobga olish hamda variantlarni bevosita texnik-iqtisodiy taqqoslash imkonini beradi. Shu bilan birga, hisoblash natijalarining ishonchiligi hisobiy tok yuklamasining aniqligi va uning ko'rib chiqilayotgan davrdagi o'zgarishini prognozlash asoslanganligiga sezilarli darajada bog'liq.

[1, 4, 10] manbalarda bayon etilgan, simlar va kabel tomirlarining kesim yuzasini iqtisodiy tok zichligi asosida tanlash uslubiyatida iqtisodiy jihatdan maqbul kesimni aniqlash uchun qabul qilinadigan hisobiy tok yuklamasini asoslash bo'yicha yetarlicha aniq tavsiyalar keltirilmagan. Mazkur manbalarda elektr tarmog'ining istiqboldagi rivojlanishini hamda kamida besh yil davomida elektr yuklamaning o'sishini hisobga olishga doir umumiy talab belgilangan. Biroq hisoblashning boshlang'ich yilini tanlash, yuklamaning prognoz o'zgarish dinamikasini shakllantirish va iste'molchilar elektr yuklamalari notekis o'sadigan sharoitda hisobiy tok qiymatini aniqlash bo'yicha yagona tartib yetarlicha aniqlashtirilmagan.

Hisobiy elektr yuklamani aniqlashning batafsil algoritmi mavjud emasligi kesim yuzasini tanlashda uslubiy noaniqlikni yuzaga keltiradi. Faqat boshlang'ich yil elektr yuklamasiga asoslanish talab etiladigan kesim yuzasining kichik tanlanishiga olib kelishi mumkin. Natijada, elektr yuklama ortib borishi bilan tanlangan kesim simlarning ruxsat etilgan qizishi, kuchlanish yo'qotilishi yoki liniyaning quvvat uzatish imkoniyati bo'yicha talablarga javob bermay qolishi mumkin. Aksincha, hisobiy davr oxiri uchun prognoz qilingan maksimal elektr yuklama asosida kesim tanlash dastlabki kapital qo'yilmalarning iqtisodiy jihatdan yetarlicha asoslanmagan holda oshishiga va liniyaning uzoq vaqt davomida past elektr yuklama bilan ishlashiga sabab bo'lishi mumkin. Shu sababli kesim yuzasini iqtisodiy mezon asosida tanlashda qo'llaniladigan hisobiy elektr yuklama butun tahlil davri mobaynida uzatiladigan quvvatning o'zgarish xususiyatlarini hisobga oluvchi, iqtisodiy jihatdan asoslangan ko'rsatkich sifatida aniqlanishi lozim. Bunda tanlangan kesim yuzasining istiqboldagi maksimal yuklama sharoitida texnik talablarga muvofiqligi ham alohida tekshirilishi zarur.

[5, 6, 7] manbalarda keltirilgan tadqiqot natijalariga ko'ra, 110–220 kV kuchlanishli elektr uzatish liniyalarining elektr yuklamasi ular ishga tushirilganidan o'tacha uch yil o'tgach loyihaviy qiymatga yetadi. Eksploatatsiyaning dastlabki bosqichida esa liniya elektr yuklamasi loyihaviy qiymatning taxminan 45 foizini tashkil etadi. Bu holat liniyaning quvvat uzatish imkoniyatidan qisman foydalaniladigan davr mavjudligini ko'rsatadi. Mazkur davrda kapital qo'yilmalar va eksploatatsiya xarajatlari o'rtasidagi nisbat loyihaviy elektr yuklama o'zlashtirilgan davrdagidan sezilarli darajada farq qiladi. Shu sababli ilgari qabul elektr qilingan elektr yuklama o'sish sur'atlarini qo'shimcha tahlil va tekshiruvsiz qo'llash loyihaviy yechimlarning yetarlicha asoslanmasligiga olib kelishi mumkin. Hisoblash natijalarining ishonchiligidini oshirish uchun boshlang'ich elektr yuklama darajasi, uning o'sish sur'ati, loyihaviy yuklamaga erishish muddati hamda keyingi elektr energiyasi iste'molining o'zgarish xususiyatlari bilan farqlanadigan bir nechta ehtimoliy ssenariyni ko'rib chiqish lozim. Bunday ssenariylar hisobiy davr mobaynida elektr yuklamaning bir maromda, jadallashgan, sekinlashgan, bosqichma-bosqich yoki nomuntazam o'sishini qamrab olishi mumkin.

Har bir senariy bo'yicha uzatiladigan quvvat, tok yuklamasi, maksimal elektr yuklamadan foydalanish soatlari soni, elektr energiyasi yo'qotishlari hamda uzatiladigan elektr energiyasining yillik hajmi va qiymatini aniqlash tavsiya etiladi. Shundan so'ng tegishli yillik xarajatlar diskontlash orqali yagona hisobiy vaqt nuqtasiga keltirilishi lozim. Mazkur yondashuv o'tkazgichning ko'ndalang kesim yuzasini yagona shartli tok qiymati asosida emas, balki liniyaning amalda yuzaga kelishi mumkin bo'lgan ish rejimlari majmuasini hisobga olgan holda iqtisodiy baholash imkonini beradi.

Elektr yuklamalarni prognozlashdagi noaniqliklarni hisobga olish alohida ahamiyatga ega. Elektr yuklamasining o'zgarishi iqtisodiy o'sish sur'atlari, yangi ishlab chiqarish quvvatlarining ishga tushirilishi, texnologik jarayonlarning takomillashtirilishi, tarif siyosati, iqlim sharoitlari, iste'molchilarning o'z elektr energiyasi ishlab chiqarish manbalariga ega bo'lishi hamda energiya

samaradorligini oshirish tadbirlarining amalga oshirilishi kabi omillarga bog'liq. Shu bois iqtisodiy jihatdan optimal kesim yuzasini asosiy prognoz bilan bir qatorda elektr yuklamaning minimal va maksimal o'sish ssenariylari uchun ham aniqlash maqsadga muvofiqdir. Ushbu natijalarni o'zaro taqqoslash tanlangan kesim yuzasining elektr yuklama o'zgarishlariga nisbatan iqtisodiy barqarorligini baholash va loyihaviy qarorning asoslanganligini oshirishga xizmat qiladi.

Havo elektr uzatish liniyasining tok yuklamasini iqtisodiy jihatdan optimallashtirish. Loyihalanayotgan elektr inshootlarini texnik-iqtisodiy tahlil qilish va ularning oqilona ish rejimlarini tanlashda keng qo'llaniladigan usullardan biri solishtirma xarajatlar ko'rsatkichlari asosida muqobil variantlarni taqqoslashdir. Mazkur yondashuv quvvat uzatish imkoniyati, uzatiladigan elektr energiyasi hajmi, nominal kuchlanishi, simlarning kesim yuzasi hamda quvvat yo'qotishlari bilan farqlanadigan texnik yechimlarni baholashda alohida ahamiyatga ega.

Iqtisodiy samaradorlikning umumlashtiruvchi mezon sifatida iste'molchiga yetkazib berilgan elektr energiyasi birligiga to'g'ri keladigan solishtirma diskontlangan xarajatlardan foydalanish tavsiya etiladi. Ushbu ko'rsatkich muayyan kuchlanish sinfi va funksional vazifaga ega havo elektr uzatish liniyasi orqali 1 kVt·soat elektr energiyasini yetkazib berishga sarflanadigan jami diskontlangan xarajatlarni ifodalaydi. Uni aniqlashda liniyani qurish yoki rekonstruksiya qilish uchun zarur bo'lgan dastlabki kapital qo'yilmalar, hisobiy davrdagi ekspluatatsiya, jumladan, texnik xizmat ko'rsatish va ta'mirlash xarajatlari hamda elektr energiyasining texnologik yo'qotishlari qiymati hisobga olinadi [1, 4, 10]. Bunda kapital qo'yilmalar va amortizatsiya ajratmalarini hisobga olish tartibi tanlangan iqtisodiy baholash usuliga muvofiq belgilanib, ayni xarajatlarning takroran hisobga olinishiga yo'l qo'yilmasligi lozim.

Solishtirma diskontlangan xarajatlardan foydalanish texnik parametrlari va elektr energiyasini uzatish hajmlari turlicha bo'lgan liniya variantlarini yagona iqtisodiy mezon asosida taqqoslash imkonini beradi. Mazkur mezon hisobiy davr doirasida liniyaning hayotiy sikli bilan bog'liq xarajatlarni hamda pul mablag'larining vaqt bo'yicha qiymatini hisobga oladi. Natijada, kapital qo'yilmalar va kelgusidagi ekspluatatsiya xarajatlarning iqtisodiy samaradorlikka birgalikdagi ta'sirini baholash imkoniyati yaratiladi.

Ushbu yondashuv havo elektr uzatish liniyasining iqtisodiy jihatdan maqbul tok yuklamasini asoslashga xizmat qiladi. Maqbul yuklama liniyaning quvvat uzatish imkoniyatini ta'minlashga sarflanadigan xarajatlar bilan elektr energiyasi yo'qotishlari qiymati o'rtasidagi optimal nisbatga muvofiq aniqlanadi. Bunda tok yuklamasi liniyaning ruxsat etilgan ish rejimlari doirasida tanlanishi hamda elektr ta'minotining ishonchiligi va elektr energiyasi sifatiga qo'yiladigan talablarni qanoatlantirishi lozim.

Havo elektr uzatish liniyasining tok yuklamasini iqtisodiy jihatdan optimallashtirish — 1 kVt·soat elektr energiyasini uzatishga sarflanadigan solishtirma diskontlangan xarajatlarni minimallashtiruvchi ish rejimini aniqlash jarayonidir. Liniyaning quvvat uzatish imkoniyatidan yetarlicha foydalanilmaganda, kapital qo'yilmalar va shartli doimiy ekspluatatsiya xarajatlarning uzatiladigan elektr energiyasi birligiga to'g'ri keladigan ulushi ortadi. Buning sababi ushbu xarajatlarning nisbatan kichik hajmdagi elektr energiyasiga taqsimlanishidir. Aksincha, tok yuklamasining haddan tashqari oshishi quvvat va elektr energiyasi yo'qotishlarining jadal ortishiga hamda o'tkazgichlarning qizishiga olib keladi. Ruxsat etilgan ish sharoitlarining buzilishi esa liniya elementlarining eskirishini tezlashtirishi, ekspluatatsion ishonchlikni pasaytirishi hamda texnik xizmat ko'rsatish va ta'mirlash xarajatlari oshirishi mumkin. Shu bois iqtisodiy jihatdan optimal tok yuklamasi liniyaning quvvat uzatish imkoniyatidan foydalanish darajasi bilan texnologik yo'qotishlar qiymati o'rtasidagi maqbul nisbat asosida, belgilangan texnik cheklovlar doirasida aniqlanadi.

Taklif etilayotgan yondashuv turli kuchlanish sinflariga mansub va turli funksional vazifalarni bajaruvchi havo elektr uzatish liniyalarini iqtisodiy baholashda qo'llanilishi mumkin. Solishtirma diskontlangan xarajatlar elektr energiyasini uzatish samaradorligini umumlashtiruvchi iqtisodiy ko'rsatkich bo'lib, variantlarni yagona hisoblash shartlari asosida taqqoslash imkonini beradi. Xususan, mazkur mezon nominal kuchlanishi, tayanchlar konstruksiyasi, faza simlarining turi va kesim yuzasi, zanjirlar soni, liniya uzunligi, yuklama grafigi, maksimal yuklamadan foydalanish soatlari soni hamda elektr energiyasi yo'qotishlarining qiymati bilan farqlanadigan yechimlarni tahlil qilishga xizmat qiladi. Ushbu yondashuv iqtisodiy jihatdan maqsadga muvofiq tok yuklamasi diapazonini aniqlash, mavjud havo liniyalaridan foydalanish samaradorligini oshirish, shuningdek, ularni rekonstruksiya qilish yoki quvvat uzatish imkoniyatini kengaytirish zaruratini asoslash uchun ilmiy-uslubiy asos yaratadi [1, 4, 10].

$$X_{s.o.d.} = \frac{X_d}{\sum_{t=0}^{T_r} W_t (1 + S_{st})} \quad (2)$$

bu yerda X_d — elektr uzatish liniyasini qurish va hisobiy davr mobaynida ekspluatatsiya qilish bilan bog'liq jami diskontlangan xarajatlar, so'm, W_t — hisobiy davrning t -yilida yetkazib berilgan elektr energiyasi miqdori, kVt·soat, S_{st} — diskont stavkasi, birlik ulushida.



Elektr energiyasining yuklamaga bog'liq yo'qotishlari, tojlanish hamda liniya izolyatsiyasidagi yo'qotishlarni hisobga olgan holda, elektr uzatish liniyasining birlik uzunligi uchun (3) ifoda quyidagi ko'rinishga ega bo'ladi:

$$X_{sol.d} = \frac{K_0 + \sum_{t=0}^{50} \left(I_{xiz} \cdot I_{ta} \cdot K_{sol.k} + 0,003 I_{nb}^2 r_0 \tau S + 8760 \Delta P_{toj} S + \frac{U_n^2 T_{HL} N_{gir}}{3 N_{iz} R_{iz}} S \right) \cdot (1 + S_{st})^{-t}}{\sum_{t=0}^{50} \sqrt{3} U_n I_{nb} T_{nb} \cos \varphi \cdot (1 + S_{st})^{-t}} \quad (3)$$

yoki

$$X_{sol.d} = \frac{K_0 + \sum_{t=0}^{50} \left(I_{xiz} \cdot I_{ta} \cdot K_{sol.k} + 0,003 I_{nb}^2 r_0 \tau S + 8760 \Delta P_{toj} S + \frac{U_n^2 T_{HL} N_{gir}}{3 N_{iz} R_{iz}} S \right) \cdot D}{\sum_{t=0}^{50} \sqrt{3} U_n I_{nb} T_{nb} \cos \varphi \cdot D} \quad (4)$$

bu yerda $K_{sol.k}$ — havo elektr uzatish liniyasini qurishga sarflanadigan solishtirma kapital qo'yilmalar, so'm/km, ΔP_{toj} — havo liniyasi simlarida tojlanish tufayli yuzaga keladigan solishtirma quvvat yo'qotishlari, kVt/km, I_{xiz} , I_{ta} — havo liniyasiga texnik xizmat ko'rsatish va uni ta'mirlash uchun ajratmalar koeffitsienti, I_{e.y.t.} — liniyaning maksimal elektr yuklama toki, A, U_n — liniyaning nominal kuchlanishi, kV; r_0 — liniyaning birlik uzunligiga to'g'ri keladigan aktiv qarshiligi, Om/km; T_{vl} — yil davomida nam ob-havo kuzatiladigan soatlarning o'rtacha soni, soat; R_{iz} — izolyatorlar shodasidagi bitta osma izolyatorning elektr qarshiligi, Om; N_{iz} — shodadagi izolyatorlar soni, dona; N_{gir} — havo liniyasining 1 km uzunligiga to'g'ri keladigan izolyatorlar shodalari soni, dona/km; Π — elektr energiyasi uchun qabul qilingan o'rtacha vaznli tarif, rubl/(kVt·soat); D — quyidagi ifoda orqali aniqlanadigan diskontlash ko'paytuvchisi:

$$D = \frac{1 - (1 + S_{st})^{-t}}{S_{st}} \quad (5)$$

bu yerda $\cos \varphi$ — quvvat koeffitsienti, T_{nb} — maksimal yuklamadan foydalanish davomiyligi, soat, η — maksimal quvvat yo'qotishlari vaqti, soat.

Maksimal quvvat yo'qotishlari vaqti quyidagi empirik ifoda yordamida aniqlanadi:

$$\tau = (0,124 + 10^{-4} T_{nb})^2 \cdot 8760 \quad (6)$$

Binobarin, (3) va (4) ifodalar qurilayotgan elektr uzatish liniyasining diskret texnik-iqtisodiy modelini tashkil etadi. Ushbu model 1 kVt·soat elektr energiyasini uzatishga sarflanadigan solishtirma diskontlangan xarajatlarning liniyaning nominal kuchlanishi U_n , maksimal yuklama toki I_{nb} , maksimal yuklamadan foydalanish davomiyligi T_{nb} , faza o'tkazgichlarining ko'ndalang kesim yuzasi va konstruktiv tuzilishi, liniya trassasi o'tadigan hududning muzlanish va SZA bo'yicha sharoitlari, diskontlash stavkasi E_{cp} hamda elektr energiyasi tarifi C ga bog'liqligini ifodalaydi. Shuningdek, model liniyaning boshqa texnik-iqtisodiy parametrlari va uning ish rejimini tavsiflovchi ko'rsatkichlarni ham hisobga oladi.

Mazkur model asosida loyiha yechimlari va ekspluatatsiya rejimlarining turli variantlarini o'zaro taqqoslash hamda ularning iqtisodiy samaradorligini baholash mumkin. Bunda boshqariladigan parametrlarni maqbul tanlash orqali elektr energiyasini uzatishda solishtirma diskontlangan xarajatlarning eng kichik qiymatini ta'minlaydigan ish rejimi aniqlanadi.

Berilgan ifodalarda $0,003 \cdot I_{nb}^2 \cdot r_0 \cdot \tau \cdot S$; $8760 \cdot \Delta P_{toj} \cdot S$; $\frac{U_n^2 T_{HL} N_{gir}}{3 N_{iz} R_{iz}} S$ ifodasining

suratidagi hadlar mos ravishda elektr uzatish liniyasidagi yuklama bilan bog'liq elektr energiyasi yo'qotishlari, tojlanish (korona) tufayli yuzaga keladigan yo'qotishlar hamda liniyaning osma izolyatorlaridagi yo'qotishlar qiymatini ifodalaydi [8].

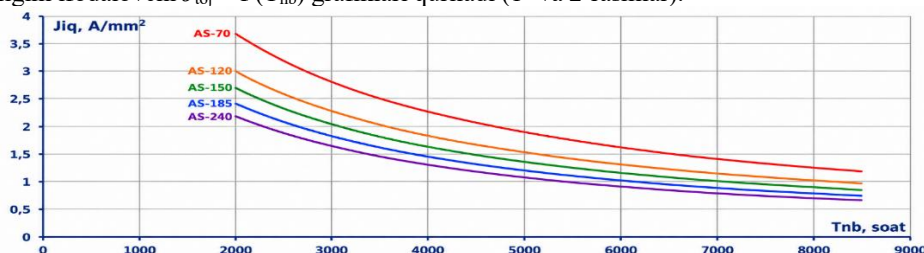
(4) ifodada keltirilgan solishtirma diskontlangan xarajatlarning yuklama toki bo'yicha hosilasini $X_{sol.d}/dI$ aniqlab, uni nolga tenglashtirish hamda hosil bo'lgan tenglamani I_{nb} ga nisbatan yechish orqali optimal yuklama toki (I_{nbopt}) aniqlanadi. Ushbu tok qiymati elektr energiyasini uzatishga sarflanadigan solishtirma diskontlangan xarajatlarning minimumiga mos keladi.

$$(I_{nb}^{taj})' = \sqrt{\frac{\left(\frac{K_0}{D \cdot U_n}\right) + \left(\frac{8760 \cdot \Delta P_{toj} \cdot S}{U_n}\right) + \left(\frac{K_0 \cdot I_{xiz} \cdot I_{ta}}{U_n}\right) + \left(\frac{U_n^2 T_{HL} N_{gir}}{3 \cdot N_{iz} R_{iz}} S\right)}{\left(\frac{0,003 \cdot r_0 \cdot S \cdot \tau}{U_n}\right)}} \quad (7)$$

So'ngra optimal yuklama tokining hisoblangan qiymatlari I_{nb} va simlarning qabul qilingan standart ko'ndalang kesim yuzalari asosida havo elektr uzatish liniyalari simlaridagi tuzatilgan tok zichligi J_{toj} quyidagi formula yordamida aniqlanadi:

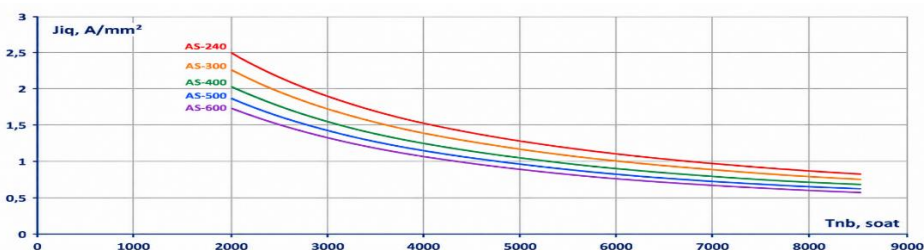
$$J_{toj} = \frac{(I_{nb}^{taj})'}{F_{iqt}} \quad (8)$$

bu yerda F_{iq} — elektr uzatish liniyasi simining tanlangan iqtisodiy ko'ndalang kesim yuzasi. Hisoblash natijalari asosida tuzatilgan tok zichligining maksimal yuklamadan foydalanish davomiyligiga bog'liqligini ifodalovchi $J_{\text{toj}} = f(T_{\text{nb}})$ grafiklari quriladi (1- va 2-rasmlar).



1-rasm. Muzlanish bo'yicha I va II mintaqalarda temir-beton tayanchlarda qurilgan 110 kV kuchlanishli havo elektr uzatish liniyasi simlaridagi iqtisodiy jihatdan optimal tok zichligi J_{toj} ning atmosfera ifloslanishining III darajasi sharoitida maksimal yuklamadan foydalanish davomiyligi T_{nb} soatga bog'liqligi

Fig.1. Dependence of the economically optimal current density J_{toj} in the conductors of a 110 kV overhead transmission line constructed on reinforced concrete supports in ice-loading zones I and II, under atmospheric pollution level III conditions, on the annual maximum-load utilization duration T_{nb} (h)



2-rasm. Muzlanish bo'yicha I va II hamda atmosfera ifloslanishi bo'yicha III mintaqalarda temir-beton tayanchlarda qurilgan 220 kV kuchlanishli havo elektr uzatish liniyasi simlaridagi iqtisodiy jihatdan optimal tok zichligi J_{cor} ning maksimal yuklamadan foydalanish davomiyligi T_{nb} soatga bog'liqligi.

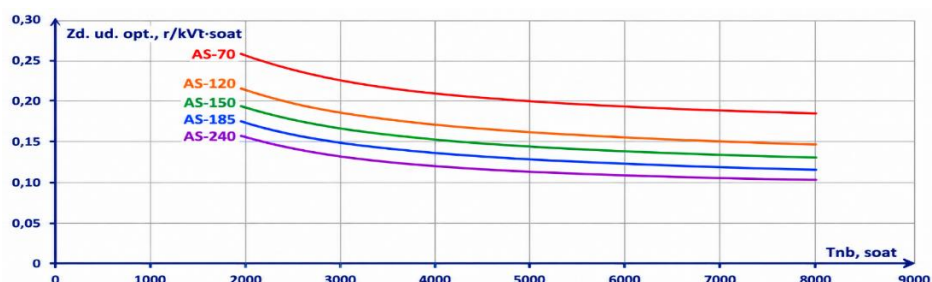
Fig.2. Dependence of the economically optimal current density J_{cor} in the conductors of a 220 kV overhead transmission line constructed on reinforced concrete supports in ice-loading zones I and II, under atmospheric pollution level III conditions, on the annual maximum-load utilization duration T_{nb} (h).

Optimal yuklama toki I_{nbopt} ning qiymatini (4) ifodaga qo'yish orqali 110 kV kuchlanishli havo elektr uzatish liniyasida 1 kVt·soat elektr energiyasini uzatishga sarflanadigan solishtirma diskontlangan xarajatlarning optimal qiymatlari aniqlanadi. Hisoblash natijalari asosida $X_{\text{sol-opt.}} = f(T_{\text{nb}})$ grafik bog'liqliklari quriladi (3- va 4-rasmlar). Ushbu bog'liqliklardan ko'rinadiki, yuklama grafigining to'ldirilish darajasi va simlarning ko'ndalang kesim yuzasi F ortishi bilan solishtirma diskontlangan xarajatlar kamayadi. Bu holat uzatiladigan elektr energiyasi birligiga to'g'ri keladigan yuklama va tojlanish bilan bog'liq yo'qotishlar xarajatlarning kamayishi bilan izohlanadi.

3- va 4-rasmlarda keltirilgan bog'liqliklarning qiyosiy tahlili ko'rib chiqilgan hisobiy sharoitlarda 110 kV kuchlanishli liniyadagi solishtirma diskontlangan xarajatlar 220 kV kuchlanishli havo liniyasidagi tegishli xarajatlardan o'rtacha 10–12 % yuqori ekanligini ko'rsatadi. Biroq ushbu natija 110 kV va undan past kuchlanishli liniyalarni qurishdan voz kechish uchun yetarli asos bo'la olmaydi. Chunki liniyaning nominal kuchlanishi iqtisodiy mezonlar bilan bir qatorda uning funksional vazifasi, uzunligi, uzatiladigan quvvati, elektr energiyasining yillik hajmi hamda tutash elektr tarmoqlarining kuchlanish darajasi kabi texnik omillarni hisobga olgan holda tanlanadi.

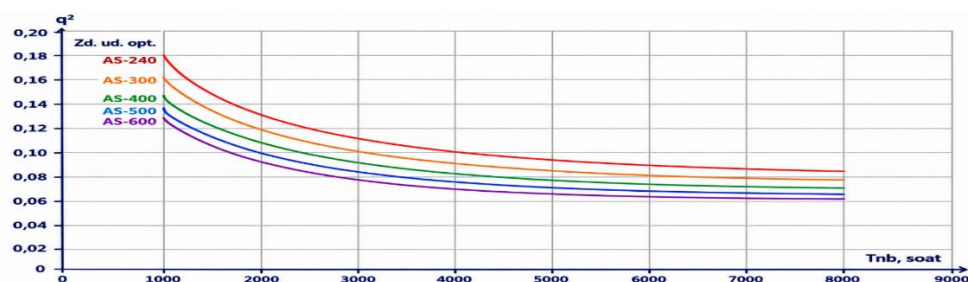
$J_{\text{toj}} = f(T_{\text{nb}})$ bog'liqliklari simlarining ko'ndalang kesim yuzasi oldindan belgilangan mavjud liniyalarda iqtisodiy jihatdan maqbul tok zichligini keng diapazonda aniqlash imkonini beradi. Aniqlangan qiymatlar asosida, ruxsat etilgan texnik cheklovlar doirasida, liniyaning yuklanishini boshqarish elektr energiyasini uzatishga sarflanadigan solishtirma diskontlangan xarajatlarni kamaytirish va ekspluatatsiya rejimini optimallashtirishga xizmat qiladi. Mazkur yondashuvning qo'llanilishi quyidagi hisoblash misolida ko'rib chiqiladi.

Hisoblash obyekti sifatida faza o'tkazgichlari AC-400 markali simlardan tashkil topgan, nominal kuchlanishi 220 kV bo'lgan havo elektr uzatish liniyasi qabul qilinadi. Liniya trassasi Shimoli-g'arbiy Arktika hududining muzlanish bo'yicha II hamda atmosfera ifloslanishi bo'yicha III mintaqalaridan o'tadi.



3-rasm. Muzlanish bo'yicha I va II hamda atmosfera ifloslanishi bo'yicha III mintaqalardan o'tuvchi, uzunligi 80 km bo'lgan 110 kV kuchlanishli havo elektr uzatish liniyasida elektr energiyasini uzatishga sarflanadigan optimal solishtirma diskontlangan xarajatlarning maksimal yuklamadan foydalanish davomiyligi T_{nb} soatga bog'liqligi.

Fig.3. Dependence of the optimal specific discounted costs of electricity transmission along an 80 km, 110 kV overhead transmission line passing through ice-loading zones I and II, under atmospheric pollution level III conditions, on the annual maximum-load utilization duration T_{nb} (h).



4-rasm. Muzlanish bo'yicha I va II hamda atmosfera ifloslanishi bo'yicha III mintaqalaridan o'tuvchi, uzunligi 120 km bo'lgan 220 kV kuchlanishli havo elektr uzatish liniyasida elektr energiyasini uzatishga sarflanadigan optimal solishtirma diskontlangan xarajatlarning maksimal yuklamadan foydalanish davomiyligi T_{nb} soatga bog'liqligi.

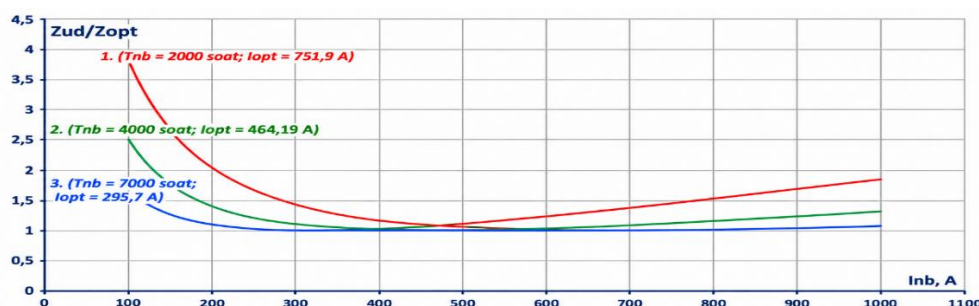
Fig.4. Dependence of the optimal specific discounted costs of electricity transmission along a 120 km, 220 kV overhead transmission line passing through ice-loading zones I and II, under atmospheric pollution level III conditions, on the annual maximum-load utilization duration T_{nb} (h).

Hisoblash uchun quyidagi boshlang'ich ma'lumotlar qabul qilinadi:

- Maksimal yuklamadan foydalanish davomiyligi T_{nb} — 2000, 4000 va 7000 soat.
- Maksimal yuklama toki I_{nb} — 100–1000 A. Tokning ushbu oralqida o'zgarishi simlardagi tok zichligining ham tegishli o'zgarishiga olib keladi.
- Yil davomida nam ob-havo kuzatiladigan vaqtning o'rtacha davomiyligi T_{vl} — 492 soat [9].
- Izolyatorlar shodasidagi bitta osma izolyatorning qarshiligi R_{iz} — 915 kΩ.
- Bitta shodadagi izolyatorlar soni N_{iz} — 16 dona.
- Liniyaning har bir kilometriga to'g'ri keladigan izolyatorlar shodalari soni N_{gir} — 9,8 dona/km.
- Liniya simlaridagi tojlanish tufayli yuzaga keladigan solishtirma quvvat yo'qotishlari ΔP_{kor} — 0,924 kVt/km [8].
- Elektr energiyasining qabul qilingan o'rtacha vaznli tarifi T_s — 2 so'm/(kVt·soat).
- Diskontlash ko'paytuvchisi D — 9,9148.

Elektr qurilmalarini o'rnatish qoidalarida belgilangan iqtisodiy tok zichligi hamda (9) ifoda asosida aniqlangan optimal tok zichligi bo'yicha elektr energiyasini uzatish rejimlarini 1 kVt·soat energiyaga to'g'ri keladigan solishtirma diskontlangan xarajatlar nuqtayi nazaridan taqqoslaymiz. 5-rasmda keltirilgan $Z_{ud,d}/Z_{opt} = f(I_{nb})$ bog'liqliklari shuni ko'rsatadiki, liniyaning maksimal yuklama toki I_{nb} optimal qiymatdan farqlanganda, elektr energiyasini uzatishga sarflanadigan solishtirma diskontlangan xarajatlar minimal qiymatga nisbatan ortadi. Bunday holat yuklama grafigining to'ldirilish darajasi past bo'lgan, kam yuklangan liniyalarda ham, yuqori tok yuklamasi bilan ishlaydigan liniyalarda ham kuzatiladi. Natijada liniyaning ish rejimi iqtisodiy jihatdan optimal rejimdan chetlashadi.

Hisoblash natijalariga ko'ra, yuklama grafigining to'ldirilish darajasi past bo'lgan liniyalarda ushbu ko'rsatkich yuqori bo'lgan liniyalarga nisbatan kattaroq maksimal yuklama tokini qabul qilish iqtisodiy jihatdan maqbul bo'lishi mumkin. Bunday liniyalarda tok qiymati $I_{nb, opt}$ dan sezilarli darajada oshganda ham solishtirma diskontlangan xarajatlarning minimal qiymatga nisbatan ortishi bir necha foizdan oshmaydi (5-rasm, 1-egri chiziq). Bunda yuklama tokini oshirish liniyaning ruxsat etilgan texnik chegaralari doirasida amalga oshirilishi lozim.



5-rasm. Muzlanish bo'yicha I va II mintaqalardan o'tuvchi, atmosfera ifloslanishining III darajasi sharoitida ishlaydigan, AC-400 markali simlar bilan jihozlangan 220 kV kuchlanishli havo elektr uzatish liniyasida 1 kVt·soat elektr energiyasini uzatishga sarflanadigan solishtirma diskontlangan xarajatlarning maksimal yuklama toki I_{nb} erkin o'zgargandagi qiymatining ushbu tokning optimal qiymatidagi xarajatlarga nisbatining I_{nb} ga bog'liqligi.

Fig.5. Ratio of the specific discounted cost of transmitting 1 kWh of electrical energy at a variable maximum load current I_{nb} to the corresponding cost at the optimal current, as a function of I_{nb} , for a 220 kV overhead transmission line equipped with AC-400 conductors, traversing icing zones I and II and operating under atmospheric pollution level III conditions.

Mavjud havo elektr uzatish liniyasining iqtisodiy jihatdan maqbul yuklanish diapazonida ishlashini ta'minlash uchun elektr tarmog'idagi quvvat oqimlari taqsimotini optimallashtirish zarur. Bunda asosiy maqsad liniyaning haqiqiy yuklama tokini hisoblangan iqtisodiy optimal qiymatga yaqinlashtirishdan iborat. Ish rejimining iqtisodiy maqbulligi solishtirma diskontlangan xarajatlarning minimal qiymatga nisbatan ortishi orqali baholanadi. Mazkur hisoblashlarda ushbu ortishning ruxsat etilgan chegarasi 5 % deb qabul qilinadi.

Tarmoqdagi yuklama taqsimotini tugun podstansiyalarining operativ sxemalarini oqilona tanlash, tarmoq topologiyasini o'zgartirish, shina seksiyalari va tizimlarida tegishli kommutatsiyalarni amalga oshirish hamda ishga ulangan kuch uskunalarining soni va tarkibini optimallashtirish orqali boshqarish mumkin. Kommutatsiya amallarini o'zaro muvofiqlashtirish tarmoqning parallel shoxobchalari o'rtasida aktiv va reaktiv quvvat oqimlarini qayta taqsimlash imkonini beradi. Natijada ayrim liniyalarning ortiqcha yuklanishini cheklash, elektr energiyasi yo'qotishlarini kamaytirish hamda ko'rib chiqilayotgan liniyaning yuklama tokini iqtisodiy jihatdan maqbul qiymatga yaqinlashtirish uchun sharoit yaratiladi.

Ish rejimini tanlashda solishtirma diskontlangan xarajatlarni minimallashtirish bilan bir qatorda elektr energetika tizimining texnik cheklovlari ham hisobga olinishi lozim. Bunday cheklovlarga o'tkazgichlarning ruxsat etilgan qizish harorati, liniyaning o'tkazish qobiliyati, tugunlardagi kuchlanishning ruxsat etilgan qiymatlari, statik va dinamik barqarorlik shartlari hamda elektr ta'minotining belgilangan ishonchlilik talablari kiradi. Tegishli tarmoqlarda N-1 mezonini, ya'ni bitta element ishdan chiqqanda tizimning ruxsat etilgan ish rejimini saqlab qolish sharti ham ta'minlanishi kerak. Shu sababli yuklama tokini iqtisodiy optimallashtirish texnik jihatdan ruxsat etilgan va ishonchli ish rejimlari doirasida amalga oshiriladi.

Havo elektr uzatish liniyasining quvvat oqimlari va yuklanish rejimini boshqarishda quyidagi texnik vositalardan foydalanish mumkin:

1. Reaktiv quvvat manbalari. Ushbu guruhga podstansiya shinalariga ulanadigan kondensator batareyalari, sinxron kompensatorlar va boshqa rostlanadigan reaktiv quvvat kompensatsiyasi qurilmalari kiradi. Ular reaktiv quvvat balansini rostlash, zarur kuchlanish darajasini saqlash hamda liniya orqali uzatiladigan reaktiv quvvatni kamaytirishga xizmat qiladi. Tegishli kompensatsiya sharoitida liniya tokining reaktiv tashkil etuvchisi va aktiv quvvat yo'qotishlari kamayadi. Natijada liniyaning tok bo'yicha o'tkazish qobiliyatidan aktiv quvvatni uzatish uchun samaraliroq foydalanish imkoniyati yuzaga keladi.

2. Shunt reaktorlari. Havo liniyasining qabul qiluvchi uchiga yoki podstansiya shinalariga kommutatsiya apparatlari orqali ulanadigan shunt reaktorlari liniya sig'imi hisobiga hosil bo'ladigan ortiqcha reaktiv quvvatni kompensatsiyalash uchun qo'llanadi. Ular, ayniqsa, uzun liniyalarning kam yuklangan rejimlarida kuchlanish ortishini cheklash va reaktiv quvvat balansini ta'minlashda muhim ahamiyatga ega. Reaktorlarning quvvati va ulanish rejimi liniyaning haqiqiy yuklanishi hamda tarmoqning turg'un ish rejimi parametrlariga muvofiq tanlanadi.

3. Bo'ylama kompensatsiya qurilmalari. Liniyaga ketma-ket ulanadigan kondensator qurilmalari uning induktiv qarshiligini qisman kompensatsiyalaydi. Natijaviy bo'ylama reaktiv qarshilikning kamayishi liniyaning quvvat uzatish imkoniyatini kengaytiradi va parallel shoxobchalar o'rtasidagi aktiv quvvat taqsimotini o'zgartiradi. Bu yuklama tokini iqtisodiy optimal qiymatga yaqinlashtirishga hamda quvvat uzatishning statik barqarorlik chegarasini oshirishga yordam beradi.

4. Faza siljitivchi qurilmalar. Faza siljitivchi transformatorlar va boshqa shu turdagi qurilmalar

tarmoq shoxobchasiga rostlanadigan qo'shimcha faza siljishini kiritish orqali aktiv quvvat oqimini boshqaradi. Uzatiladigan aktiv quvvat kuchlanishlarning qiymatlari va liniyaning reaktiv qarshiligi bilan bir qatorda kuchlanish vektorlari orasidagi faza burchagi δ ga ham bog'liq. Shu sababli faza siljishini rostlash quvvat oqimlarini maqsadli qayta taqsimlash imkonini beradi. Bunday qurilmalar quvvat oqimlarining tabiiy taqsimoti iqtisodiy maqbul rejimga mos kelmaydigan halqasimon va murakkab berk tarmoqlarda qo'llanishi mumkin [5].

Mavjud havo elektr uzatish liniyasining iqtisodiy optimal tok rejimini ta'minlash kompleks operativ-texnik masala hisoblanadi. Uni hal etish tarmoqning operativ sxemasi, ishga ulangan uskunalar tarkibi, reaktiv quvvat balansi va tugunlararo bog'lanishlarning elektr parametrlarini o'zaro muvofiqlashtirib boshqarishni talab etadi. Mazkur yondashuv elektr energiyasi yo'qotishlari va ekspluatatsiya xarajatlarini kamaytirish, mavjud liniyalarning o'tkazish qobiliyatidan samaraliroq foydalanish hamda ishonchlik va ekspluatatsiya xavfsizligi talablarini ta'minlagan holda elektr energiyasini uzatishning iqtisodiy samaradorligini oshirishga xizmat qiladi [5].

3. Natijalar (Results)

O'tkazgichlarning ko'ndalang kesim yuzasini tanlashning mavjud usullari tahlili iqtisodiy tok zichligi va iqtisodiy tok intervallari usullarini ekspluatatsiyadagi havo elektr uzatish liniyalariga qo'llash har doim ham yetarli aniqlikni ta'minlamasligini ko'rsatdi. Iqtisodiy tok zichligining me'yoriy qiymatlari o'rtachalashtirilgan bo'lib, haqiqiy yuklama grafiklari, elektr energiyasi tariflarining o'zgarishi, liniyaning texnik holati, elektr energiyasi iste'moli dinamikasi hamda texnologik yo'qotishlarning qiymatini to'liq aks ettirmaydi. Shuningdek, tahlil qilingan ko'rsatmalarda prognoz davrida yuklama o'zgarganda hisobiy yuklamani aniqlash tartibi yetarlicha batafsil yoritilmagan.

Tadqiqot doirasida elektr energiyasini uzatishga sarflanadigan solishtirma diskontlangan xarajatlarni liniyaning nominal kuchlanishi, maksimal yuklama toki, maksimal yuklamadan foydalanish davomiyligi, faza o'tkazgichining ko'ndalang kesim yuzasi, aktiv qarshilik, iqlim sharoitlari, tojlanish va izolyatsiyadagi yo'qotishlar, elektr energiyasi tarifi hamda diskontlash stavkasi bilan bog'lovchi diskret texnik-iqtisodiy model ishlab chiqildi. Mazkur model texnik va ekspluatatsion ko'rsatkichlari turlicha bo'lgan havo liniyalarini qurish, rekonstruksiya qilish va ulardan foydalanish variantlarini o'zaro taqqoslash imkonini beradi.

Maqsad funksiyasini minimallashtirish orqali solishtirma diskontlangan xarajatlarning eng kichik qiymatini ta'minlaydigan optimal yuklama toki aniqlandi. Ushbu tok va faza o'tkazgichining qabul qilingan standart ko'ndalang kesim yuzasi asosida optimal tok zichligi hisoblandi. Olingan bog'liqliklar optimal tok zichligi o'zgarmas kattalik emasligini, balki liniyaning texnik-iqtisodiy parametrlari, jumladan, maksimal yuklamadan foydalanish davomiyligiga bog'liq ravishda o'zgarishini ko'rsatdi.

Hisoblash misoli sifatida AC-400 markali faza o'tkazgichlari bilan jihozlangan, muzlanish bo'yicha II hamda atmosfera ifloslanishi bo'yicha III mintaqada joylashgan 220 kV kuchlanishli havo elektr uzatish liniyasi ko'rib chiqildi. Hisoblashlarda quyidagi boshlang'ich ma'lumotlar qabul qilindi:

- faza o'tkazgichining ko'ndalang kesim yuzasi — 400 mm²;
- maksimal yuklamadan foydalanish davomiyligi — yiliga 2000, 4000 va 7000 soat;
- maksimal yuklama tokining o'zgarish diapazoni — 100–1000 A;
- nam ob-havo kuzatiladigan vaqtning o'rtacha davomiyligi — yiliga 492 soat;
- bitta osma izolyatorning qarshiligi — 915 kΩ;
- bitta izolyatorlar shodasidagi izolyatorlar soni — 16 dona;
- liniyaning har bir kilometriga to'g'ri keladigan izolyatorlar shodalari soni — 9,8 dona/km;
- tojlanish tufayli yuzaga keladigan solishtirma quvvat yo'qotishlari — 0,924 kVt/km;
- elektr energiyasining o'rtacha vaznli tarifi — 2 so'm/(kVt·soat);
- diskontlash ko'paytuvchisi — 9,9148.

Hisoblash natijalariga ko'ra, maksimal yuklamadan foydalanish davomiyligi yiliga 2000, 4000 va 7000 soat bo'lganda optimal yuklama toki mos ravishda 751,9; 464,19 va 295,7 A ni tashkil etdi. Ushbu qiymatlarga mos optimal tok zichliklari 1,88; 1,16 va 0,74 A/mm² ga teng bo'ldi. Maksimal yuklamadan foydalanish davomiyligi 2000 soatdan 7000 soatgacha ortganda optimal yuklama toki va tok zichligi taxminan 60,7 % ga kamaydi.

Solishtirma diskontlangan xarajatlarning hisobiy bog'liqliklari maksimal yuklamadan foydalanish davomiyligi T_{nb} va o'tkazgichning ko'ndalang kesim yuzasi ortishi bilan optimal xarajatlarni kamayishini ko'rsatdi. Ko'rib chiqilgan parametrlar diapazonida uzunligi 80 km bo'lgan 110 kV kuchlanishli havo liniyasi uchun mazkur xarajatlarni taxminan 0,26 dan 0,10 so'm/(kVt·soat) gacha, uzunligi 120 km bo'lgan 220 kV kuchlanishli liniya uchun esa 0,18 dan 0,06 so'm/(kVt·soat) gacha kamaydi. Tadqiqotda keltirilgan qiyosiy baholashga ko'ra, 110 kV liniyalardagi solishtirma diskontlangan xarajatlarni 220 kV liniyalardagi tegishli xarajatlardan o'rtacha 10–12 % yuqori bo'lgan.

Maksimal yuklamadan foydalanish davomiyligi kichik bo'lgan liniyalarda yuklama tokining optimal qiymatdan oshishi solishtirma diskontlangan xarajatlarning nisbatan kam, ya'ni bir necha foizga ortishiga olib kelishi aniqlandi. Yuklama grafigining to'ldirilish darajasi yuqori bo'lgan liniyalarda, xususan, $T_{nb} = 7000$ soat sharoitida tokning optimal qiymatdan chetlashishi iqtisodiy ko'rsatkichlarga kuchliroq ta'sir ko'rsatadi. Bu yuklamaga bog'liq quvvat yo'qotishlarining tok kvadratiga mutanosibli hamda yuqori yuklama bilan ishlash davomiyligining ortishi bilan izohlanadi.

Tadqiqotning amaliy natijasi mavjud havo elektr uzatish liniyalarining yuklama tokini iqtisodiy optimal qiymatga yaqin diapazonda boshqarish bo'yicha tavsiyalarni ishlab chiqishdan iborat. Iqtisodiy maqbul diapazonni belgilashda solishtirma diskontlangan xarajatlarning minimal qiymatga nisbatan ortishini 5 % bilan cheklash mezonini qabul qilinadi. Ushbu mezonga mos tok chegaralari har bir liniya uchun uning texnik parametrlari va yuklama grafigi asosida alohida aniqlanishi lozim. Bunday rostdashlar tugun podstantsiyalarining operativ sxemalarini, tarmoq konfiguratsiyasini hamda ishga ulangan uskunalar tarkibini oqilona tanlash orqali amalga oshiriladi. Shuningdek, parallel shox-obchalar o'rtasida quvvat oqimlarini qayta taqsimlash, reaktiv quvvatni kompensatsiyalash, shunt reaktorlari, bo'yлама kompensatsiya qurilmalari va faza siljituвchi transformatorlardan foydalanish liniyaning iqtisodiy jihatdan maqbul ish rejimini ta'minlashga xizmat qiladi.

4. Munozara (Discussion)

Olingan natijalar iqtisodiy jihatdan optimal tok zichligini muayyan kuchlanish sinfiga mansub barcha havo elektr uzatish liniyalari uchun yagona va o'zgarmas me'yoriy ko'rsatkich sifatida qabul qilish maqsadga muvofiq emasligini ko'rsatadi. Elektr qurilmalarini o'rnatish qoidalarida keltirilgan iqtisodiy tok zichligining jadval qiymatlari o'rtachalashtirilgan hisobiy sharoitlarga asoslangan bo'lib, o'tkazgichlarning ko'ndalang kesim yuzasini dastlabki tanlashda qulay hisoblanadi. Biroq mavjud liniyalarning ish rejimlarini optimallashtirishda ushbu qiymatlar obyektning o'ziga xos ekspluatatsion, iqlimiy va iqtisodiy xususiyatlarini to'liq aks ettirmaydi.

Taklif etilgan metodologiya solishtirma diskontlangan xarajatlar mezonini qo'llash orqali an'anaviy yondashuvni kengaytiradi. Mazkur mezon liniyaning iqtisodiy samaradorligini bir yillik ko'rsatkichlar bilan cheklamasdan, qabul qilingan hisobiy davr davomida baholash imkonini beradi. Bunda bir martalik kapital qo'yilmalar hamda elektr energiyasi yo'qotishlari, texnik xizmat ko'rsatish va ta'mirlash bilan bog'liq xarajatlar ularning vaqt bo'yicha taqsimlanishini hisobga olgan holda baholanadi. Uskunalarining eskirishi bilan bog'liq xarajatlar esa modelda tegishli tarkibiy qismlar nazarda tutilgan hollarda hisobga olinadi.

Optimal tok zichligining maksimal yuklamadan foydalanish davomiyligiga bog'liqligi ekspluatatsion jihatdan muhim ahamiyatga ega. Yuklama grafigining to'ldirilish darajasi yuqori bo'lganda tokning optimal qiymatdan oshishi uzoq davom etadigan yuklanish sharoitida elektr energiyasi yo'qotishlarining sezilarli ortishiga olib kelishi mumkin. Maksimal yuklamadan foydalanish davomiyligi kichik bo'lgan liniyalarda esa yuqoriroq tok zichligida ishlash solishtirma diskontlangan xarajatlarning nisbatan kam ortishi bilan kechishi mumkin. Shu sababli elektr energiyasini iste'mol qilish rejimlari keskin farqlanadigan liniyalarga bir xil iqtisodiy tok zichligini qo'llash ularning individual xususiyatlarini yetarlicha hisobga olmaydi.

Ko'rib chiqilgan hisobiy sharoitlarda 220 kV kuchlanishli havo liniyalarining 110 kV liniyalarga nisbatan solishtirma diskontlangan xarajatlar bo'yicha afzalligi bir xil aktiv quvvatni va quvvat koeffitsientini saqlagan holda elektr energiyasini kichikroq tok bilan uzatish imkoniyati bilan izohlanadi. Bu yuklamaga bog'liq quvvat yo'qotishlarini kamaytirishga xizmat qiladi. Biroq turli kuchlanish sinflarini iqtisodiy taqqoslashda podstantsiya uskunolari, izolyatsiya, tayanchlar, kommutatsiya apparatlari hamda zarur gabaritlarni ta'minlash bilan bog'liq kapital xarajatlar ham hisobga olinishi lozim. Shuning uchun nominal kuchlanishni tanlash bo'yicha yakuniy qaror faqat liniyaning solishtirma xarajatlariga asoslanmasdan, elektr ta'minoti tizimining kompleks texnik-iqtisodiy tahlili asosida qabul qilinishi kerak.

Taklif etilayotgan iqtisodiy optimallashtirish yondashuvi, ayniqsa, quvvat oqimlarining haqiqiy taqsimoti vaqt o'tishi bilan loyihaviy ko'rsatkichlardan chetlashgan mavjud elektr tarmoqlari uchun dolzarbdir. Bunday o'zgarishlar yangi iste'molchilarning ulanishi, tarmoq konfiguratsiyasining o'zgarishi, taqsimlangan generatsiyaning rivojlanishi yoki yuklamaning hududlar bo'yicha notekis ortishi natijasida yuzaga kelishi mumkin. Ushbu sharoitlarda liniyani rekonstruksiya qilish yoki simlarni almashtirish zarurati operativ optimallashtirish imkoniyatlari bilan birgalikda baholanishi lozim. Ayrim hollarda mavjud tarmoq imkoniyatlaridan samaraliroq foydalanish va quvvat oqimlarini qayta taqsimlash orqali iqtisodiy samaraga erishish mumkin.

Haqiqiy yuklama tokini iqtisodiy optimal qiymatga yaqinlashtirish barcha tegishli texnik cheklovlar bajarilgan holda amalga oshirilishi lozim. Bunda o'tkazgichlarning uzoq muddatli ruxsat etilgan harorati, tugunlardagi kuchlanish darajalari, mexanik mustahkamlik, simlarning osilish salqiligi va zarur gabaritlar, shuningdek, statik va dinamik barqarorlik hamda elektr ta'minoti

ishonchligi hisobga olinadi. Tojlanish bilan bog'liq yo'qotishlar va tegishli tarmoqlarda N-1 mezonining bajarilishi ham baholanishi kerak. Demak, hisoblangan iqtisodiy optimum texnik jihatdan ruxsat etilgan ish rejimlari doirasida erishilishi ko'zda tutiladigan maqsadli qiymat sifatida qaraladi.

Usulni amaliy qo'llash dolzarb va ishonchli boshlang'ich ma'lumotlardan foydalanishni talab etadi. Bunday ma'lumotlarga haqiqiy yuklama grafiklari, amaldagi tariflar va elektr energiyasi narxining prognozlari, harorat hamda texnik holatga bog'liq o'tkazgich qarshiligi, liniya trassasining iqlimiy xususiyatlari, kontakt birikmalarining holati va ishonchlik ko'rsatkichlari kiradi. Optimallashtirish natijalarining aniqligi ushbu ma'lumotlarning sifati va hisobiy sharoitlarga muvofiqligiga bevosita bog'liq.

Keyingi tadqiqotlarning istiqbolli yo'nalishi ishlab chiqilgan modelni avtomatlashtirilgan dispetcherlik boshqaruvi tizimlari, elektr tarmog'ining raqamli modellari hamda o'tkazgichlar harorati va osilish salqiligi kuzatish tizimlari bilan integratsiyalashdan iborat. Bunday integratsiya iqtisodiy jihatdan maqbul yuklanish diapazonini o'zgaruvchan ekspluatatsiya sharoitlariga muvofiq aniqlash hamda quvvat oqimlari taqsimotini tezkor rostdlash imkonini beradi.

5. Xulosa (Conclusion)

Olingan natijalar optimal tok zichligining o'zgarish diapazoni Elektr qurilmalarini o'rnatish qoidalarida (PUE) keltirilgan me'yoriy iqtisodiy tok zichligi qiymatlariga nisbatan kengroq ekanligini ko'rsatadi. Bu me'yoriy jadval qiymatlarining o'rtachalashtirilgan hisobiy sharoitlarga asoslanganligi hamda muayyan elektr uzatish liniyasining individual texnik, ekspluatatsion va iqtisodiy xususiyatlarini to'liq aks ettirmasligi bilan izohlanadi. Optimal tok zichligidan foydalanish o'tkazgichning ko'ndalang kesim yuzasini iqtisodiy jihatdan asoslangan holda tanlash va mavjud liniyaning maqbul yuklanish diapazonini aniqlash imkonini beradi. Bunda iqtisodiy jihatdan asossiz katta kesimlarni tanlashning oldi olinadi, ortiqcha tok yuklanishini cheklash esa tegishli texnik shartlarni tekshirish orqali ta'minlanadi.

1. O'tkazgichning ko'ndalang kesim yuzasini tanlashning texnik-iqtisodiy samaradorligi. Tadqiqot natijalari faza o'tkazgichining iqtisodiy jihatdan maqbul ko'ndalang kesim yuzasini tanlashda ruxsat etilgan qizish, mexanik mustahkamlik, tojlanish va kuchlanish pasayishi shartlari bilan bir qatorda, butun hisobiy ekspluatatsiya davridagi diskontlangan xarajatlarni ham hisobga olish zarurligini ko'rsatadi. Ushbu yondashuv dastlabki qurilish xarajatlari, elektr energiyasi yo'qotishlari hamda liniyaga texnik xizmat ko'rsatish bilan bog'liq uzoq muddatli xarajatlarni birgalikda baholash imkonini beradi. Shu asosda tanlangan kesim kapital qo'yilmalar va ekspluatatsiya xarajatlari o'rtasidagi iqtisodiy maqbul nisbatni ta'minlashga hamda elektr energiyasini uzatish samaradorligini oshirishga xizmat qiladi.

2. Elektr uzatish liniyasi parametrlarini iqtisodiy-matematik modellashtrish. Solishtirma diskontlangan xarajatlar mezonini asosida ishlab chiqilgan iqtisodiy-matematik model havo elektr uzatish liniyasining asosiy loyiha parametrlari, ish rejimlari va iqtisodiy ko'rsatkichlari o'rtasidagi miqdoriy bog'liqliklarni ifodalaydi. Modelda nominal kuchlanish, faza o'tkazgichlarining ko'ndalang kesim yuzasi va turi, uzatiladigan elektr energiyasi hajmi, liniya uzunligi, maksimal yuklama toki, maksimal yuklamadan foydalanish davomiyligi, quvvat va energiya yo'qotishlari, kapital qo'yilmalar, ekspluatatsiya xarajatlari, hisobiy davr hamda diskontlash ko'paytuvchisi hisobga olinadi. Mazkur model nominal kuchlanishi, uzatish quvvati, konstruktiv tuzilishi va ekspluatatsion xususiyatlari turlicha bo'lgan liniyalarni qurish yoki rekonstruksiya qilish variantlarini kompleks texnik-iqtisodiy taqqoslash imkonini beradi. Natijada elektr ta'minoti ishonchligi, elektr energiyasi sifati va o'tkazgichlarning ruxsat etilgan tok yuklamasi talablarini bajaradigan variantlar orasidan eng kam diskontlangan xarajatlarni ta'minlovchi yechimni tanlash uchun ilmiy asos yaratiladi.

3. Havo elektr uzatish liniyasining ish rejimini optimallashtirish. Taklif etilgan metodologiya yuklama xususiyatlarini hisobga olgan holda mavjud yoki loyihalashtirilayotgan havo liniyasining iqtisodiy jihatdan maqbul ish rejimini aniqlash imkonini beradi. Bunda elektr energiyasi yo'qotishlarining qiymati, texnik xizmat ko'rsatish va ta'mirlash xarajatlari hamda modelda nazarda tutilgan boshqa xarajatlarni birgalikda baholanadi. Berilgan texnik parametrlar va yuklama grafigi uchun optimal rejim solishtirma diskontlangan xarajatlarning eng kichik qiymatini ta'minlaydigan yuklama toki orqali aniqlanadi. Metodologiyaning amaliy qo'llanilishi texnologik yo'qotishlarni kamaytirish, liniyaning o'tkazish qobiliyatidan samaraliroq foydalanish hamda uni rekonstruksiya qilish, o'tkazish qobiliyatini oshirish yoki mavjud simlar bilan ekspluatatsiyani davom ettirish variantlarini asoslashga xizmat qiladi.

4. Optimal tok zichligining o'zgarish qonuniyatlari. Optimal tok zichligi o'zgarmas kattalik bo'lmay, liniyaning nominal kuchlanishi, faza o'tkazgichlarining ko'ndalang kesim yuzasi va turi, maksimal yuklamadan foydalanish davomiyligi, elektr energiyasi tarifi hamda boshqa hisobiy sharoitlarga bog'liq ravishda aniqlanadi. O'tkazgichning kesim yuzasi ortishi liniyani qurishga sarflanadigan kapital qo'yilmalarni oshiradi. Shu bilan birga, boshqa sharoitlar, jumladan, yuklama toki bir xil bo'lganda, aktiv qarshilik va yuklamaga bog'liq quvvat hamda elektr energiyasi



yo'qotishlari kamayadi. Shuning uchun yangi liniyalarni loyihalash yoki mavjud liniyalarni rekonstruksiya qilishda kesim va unga mos iqtisodiy tok zichligini tanlash qo'shimcha kapital qo'yilmalar bilan kelgusidagi ekspluatatsiya xarajatlarining kamayishi o'rtasidagi maqbul nisbatga asoslanishi lozim. Kesimi o'zgarmaydigan mavjud liniyalarda esa optimallashtirishning asosiy vazifasi texnik cheklovlar doirasida eng kam solishtirma diskontlangan xarajatlarni ta'minlaydigan yuklama rejimini aniqlashdan iborat.

ADABIYOTLAR

1. Rasulov A.N., Raxmonov I.U. Elektr tarmoqlari va tizimlari: darslik. — Toshkent: Fan va texnologiya, 2018. — 328 b. Katalog.
2. Gayibov T.Sh., Pulatov B.M., Shanazarov A.E. Elektr tarmoqlari va tizimlari. Misol va masalalar to'plami: o'quv qo'llanma. — Toshkent: ToshDTU, 2020. — 175 b. Katalog.
3. Gayibov T., Latipov S., Uzakov B. Power system mode optimization by piecewise-linear approximation of energy characteristics of power plants // E3S Web of Conferences. — 2019. — Vol. 139. — Article 01086. — DOI: 10.1051/e3sconf/201913901086.
4. Gayibov T., Reymov K., Aytbaev A. Mathematical model of the problem of accounting for losses in electrical networks when optimizing the loads of electrical consumers // E3S Web of Conferences. — 2021. — Vol. 289. — Article 07024. — DOI: 10.1051/e3sconf/202128907024.
5. Федотов А.И., Геркусов А.А. Проблема энергосбережения при выборе сечений проводов воздушных линий 110–500 кВ // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. — 2000. — № 11–12. — С. 54–61. Библиографик тасдиқ.
6. Геркусов А.А. Оптимизация потерь электроэнергии, передаваемой по воздушным линиям напряжением 110 кВ и выше // Научно-технические ведомости СПбГПУ. — 2015. — № 1 (214). — С. 89–96. Мақола.
7. Геркусов А.А., Макаров В.М. Техничко-экономическое обоснование выбора параметров и режимов работы проектируемых линий электропередачи // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. — 2016. — № 2. — С. 66–73. — DOI: 10.17588/2072-2672.2016.2.066-073.
8. Геркусов А.А., Габдулвалиева Е.И. Экономическая коррекция плотностей тока в проводах действующих воздушных линий 110–220 кВ // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. — 2018. — Т. 20, № 9–10. — С. 25–33. — DOI: 10.30724/1998-9903-2018-20-9-10-25-33.
9. Геркусов А.А. Влияние отклонений действующего напряжения воздушных линий от номинального значения на относительные потери электроэнергии и удельные дисконтированные затраты на ее передачу // Вестник МЭИ. — 2020. — № 1. — С. 39–48. — DOI: 10.24160/1993-6982-2020-1-39-48.
10. Лыкин А.В. Электрические системы и сети: учебник. — Новосибирск: Издательство НГТУ, 2017. — 363 с. Каталог.
11. Герасименко А.А., Федин В.Т. Передача и распределение электрической энергии: учебное пособие. — 3-е изд., перераб. — М.: КНОРУС, 2012. — 648 с. Каталог.
12. Бурман А.П., Розанов Ю.К., Шакарян Ю.Г. Управление потоками электроэнергии и повышение эффективности электроэнергетических систем: учебное пособие. — М.: Издательский дом МЭИ, 2012. — 336 с. Библиографик тасдиқ.
13. Kiessling F., Nefzger P., Nolasco J.F., Kaintzyk U. Overhead Power Lines: Planning, Design, Construction. — Berlin; Heidelberg: Springer, 2003. — XXVIII, 759 p. — DOI: 10.1007/978-3-642-97879-1.
14. Weedy B.M., Cory B.J., Jenkins N., Ekanayake J.B., Strbac G. Electric Power Systems. — 5th ed. — Chichester: John Wiley & Sons, 2012. — 512 p. Нашриёт.
15. Wood A.J., Wollenberg B.F., Sheblé G.B. Power Generation, Operation, and Control. — 3rd ed. — Hoboken: John Wiley & Sons, 2013. — 656 p. Нашриёт.
16. Machowski J., Lubošny Z., Bialek J.W., Bumby J.R. Power System Dynamics: Stability and Control. — 3rd ed. — Hoboken: John Wiley & Sons, 2020. — 888 p. Нашриёт.
17. Milano F. Power System Modelling and Scripting. — London: Springer, 2010. — XLVI, 558 p. — DOI: 10.1007/978-3-642-13669-6.
18. Zimmerman R.D., Murillo-Sánchez C.E., Thomas R.J. MATPOWER: Steady-state operations, planning, and analysis tools for power systems research and education // IEEE Transactions on Power Systems. — 2011. — Vol. 26, No. 1. — P. 12–19. — DOI: 10.1109/TPWRS.2010.2051168.
19. Stott B., Jardim J., Alsac O. DC power flow revisited // IEEE Transactions on Power Systems. — 2009. — Vol. 24, No. 3. — P. 1290–1300. — DOI: 10.1109/TPWRS.2009.2021235.
20. Karimi S., Musilek P., Knight A.M. Dynamic thermal rating of transmission lines: A review // Renewable and Sustainable Energy Reviews. — 2018. — Vol. 91. — P. 600–612. — DOI: 10.1016/j.rser.2018.04.001.

21. Michiorri A., Nguyen H.-M., Alessandrini S., Bremnes J.B., Dierer S., Ferrero E., Nygaard B.-E., Pinson P., Thomaidis N., Uski S. Forecasting for dynamic line rating // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. — 2015. — Vol. 52. — P. 1713–1730. — DOI: 10.1016/j.rser.2015.07.134.
22. Boyd S., Vandenberghe L. *Convex Optimization*. — Cambridge: Cambridge University Press, 2004. — 716 p. Муаллифлар саҳифаси.
23. Nocedal J., Wright S.J. *Numerical Optimization*. — 2nd ed. — New York: Springer, 2006. — XXII, 664 p. — DOI: 10.1007/978-0-387-40065-5.
24. Trefethen L.N. *Approximation Theory and Approximation Practice*. — Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics, 2013. — 305 p. Муаллиф саҳифаси.
25. Berrut J.-P., Trefethen L.N. Barycentric Lagrange interpolation // *SIAM Review*. — 2004. — Vol. 46, No. 3. — P. 501–517. — DOI: 10.1137/S0036144502417715.

REFERENCES

1. Rasulov A.N., Raxmonov I.U. *Electrical Networks and Systems: textbook*. — Tashkent: Fan va texnologiya, 2018. — 328 p. (In Uzbek).
2. Gayibov T.Sh., Pulatov B.M., Shanazarov A.E. *Electrical Networks and Systems: A Collection of Examples and Problems: study guide*. — Tashkent: Tashkent State Technical University, 2020. — 175 p. (In Uzbek).
3. Gayibov T., Latipov S., Uzakov B. Power system mode optimization by piecewise-linear approximation of energy characteristics of power plants // *E3S Web of Conferences*. — 2019. — Vol. 139. — Article 01086. — DOI: 10.1051/e3sconf/201913901086.
4. Gayibov T., Reymov K., Aytbaev A. Mathematical model of the problem of accounting for losses in electrical networks when optimizing the loads of electrical consumers // *E3S Web of Conferences*. — 2021. — Vol. 289. — Article 07024. — DOI: 10.1051/e3sconf/202128907024.
5. Fedotov A.I., Gerkusov A.A. Energy conservation in the selection of conductor cross-sections for 110–500 kV overhead transmission lines // *Power Engineering: Research, Equipment, Technology*. — 2000. — No. 11–12. — P. 54–61. (In Russian).
6. Gerkusov A.A. Optimization of electrical energy losses in overhead transmission lines rated at 110 kV and above // *St. Petersburg State Polytechnical University Journal*. — 2015. — No. 1 (214). — P. 89–96. (In Russian).
7. Gerkusov A.A., Makarov V.M. Technical and economic justification for selecting the parameters and operating conditions of planned power transmission lines // *Vestnik of Ivanovo State Power Engineering University*. — 2016. — No. 2. — P. 66–73. (In Russian). — DOI: 10.17588/2072-2672.2016.2.066-073.
8. Gerkusov A.A., Gabdulvalieva E.I. Economic correction of current densities in the conductors of existing 110–220 kV overhead transmission lines // *Power Engineering: Research, Equipment, Technology*. — 2018. — Vol. 20, No. 9–10. — P. 25–33. (In Russian). — DOI: 10.30724/1998-9903-2018-20-9-10-25-33.
9. Gerkusov A.A. Effect of deviations of overhead line operating voltage from its nominal value on relative electrical energy losses and specific discounted transmission costs // *Bulletin of MPEI*. — 2020. — No. 1. — P. 39–48. (In Russian). — DOI: 10.24160/1993-6982-2020-1-39-48.
10. Lykin A.V. *Electrical Systems and Networks: textbook*. — Novosibirsk: Novosibirsk State Technical University Publishing House, 2017. — 363 p. (In Russian).
11. Gerasimenko A.A., Fedin V.T. *Transmission and Distribution of Electrical Energy: study guide*. — 3rd revised ed. — Moscow: KNORUS, 2012. — 648 p. (In Russian).
12. Burman A.P., Rozanov Yu.K., Shakaryan Yu.G. *Power Flow Control and Efficiency Improvement in Electric Power Systems: study guide*. — Moscow: MPEI Publishing House, 2012. — 336 p. (In Russian).
13. Kiessling F., Nefzger P., Nolasco J.F., Kaintzyk U. *Overhead Power Lines: Planning, Design, Construction*. — Berlin; Heidelberg: Springer, 2003. — XXVIII, 759 p. — DOI: 10.1007/978-3-642-97879-1.
14. Weedy B.M., Cory B.J., Jenkins N., Ekanayake J.B., Strbac G. *Electric Power Systems*. — 5th ed. — Chichester: John Wiley & Sons, 2012. — 512 p.
15. Wood A.J., Wollenberg B.F., Sheblé G.B. *Power Generation, Operation, and Control*. — 3rd ed. — Hoboken: John Wiley & Sons, 2013. — 656 p.
16. Machowski J., Lubošny Z., Bialek J.W., Bumby J.R. *Power System Dynamics: Stability and Control*. — 3rd ed. — Hoboken: John Wiley & Sons, 2020. — 888 p.
17. Milano F. *Power System Modelling and Scripting*. — London: Springer, 2010. — XLVI, 558 p. — DOI: 10.1007/978-3-642-13669-6.
18. Zimmerman R.D., Murillo-Sánchez C.E., Thomas R.J. MATPOWER: Steady-state operations, planning, and analysis tools for power systems research and education // *IEEE Transactions on Power Systems*. — 2011. — Vol. 26, No. 1. — P. 12–19. — DOI: 10.1109/TPWRS.2010.2051168.

19. Stott B., Jardim J., Alsaç O. DC power flow revisited // IEEE Transactions on Power Systems. — 2009. — Vol. 24, No. 3. — P. 1290–1300. — DOI: 10.1109/TPWRS.2009.2021235.
20. Karimi S., Musilek P., Knight A.M. Dynamic thermal rating of transmission lines: A review // Renewable and Sustainable Energy Reviews. — 2018. — Vol. 91. — P. 600–612. — DOI: 10.1016/j.rser.2018.04.001.
21. Michiorri A., Nguyen H.-M., Alessandrini S., Bremnes J.B., Dierer S., Ferrero E., Nygaard B.-E., Pinson P., Thomaidis N., Uski S. Forecasting for dynamic line rating // Renewable and Sustainable Energy Reviews. — 2015. — Vol. 52. — P. 1713–1730. — DOI: 10.1016/j.rser.2015.07.134.
22. Boyd S., Vandenberghe L. Convex Optimization. — Cambridge: Cambridge University Press, 2004. — 716 p.
23. Nocedal J., Wright S.J. Numerical Optimization. — 2nd ed. — New York: Springer, 2006. — XXII, 664 p. — DOI: 10.1007/978-0-387-40065-5.
24. Trefethen L.N. Approximation Theory and Approximation Practice. — Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics, 2013. — 305 p.
25. Berrut J.-P., Trefethen L.N. Barycentric Lagrange interpolation // SIAM Review. — 2004. — Vol. 46, No. 3. — P. 501–517. — DOI: 10.1137/S0036144502417715.