

10–35 kV kabel taqsimlovchi elektr tarmoqlarida energiya samaradorligini texnik-iqtisodiy baholash

Abduraxim D. Taslimov¹, Shohrux S. Samiyev^{1,a)}

¹ DSc, prof., Toshkent davlat texnika universiteti, Toshkent, 100095, O'zbekiston; ataslimov@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2856-6287>

^{1,a)} Assistant. Toshkent davlat texnika universiteti, Toshkent, 100095, O'zbekiston; shohruxsamiyev96@gmail.com <https://orcid.org/0009-0009-6833-3075>

Dolzarbli: 10–35 kV taqsimlovchi elektr tarmoqlarida nominal kuchlanish va kabel o'tkazgich kesimini asosli tanlash elektr energiyasi isroflari, kuchlanish og'ishlari hamda kapital va ekspluatatsion xarajatlarga bevosita ta'sir ko'rsatadi. Amaldagi loyihalash amaliyotida ushbu parametrlar ko'pincha alohida baholanadi. Biroq yuklamaning o'sishi, elektr energiyasi narxining oshishi va tarmoq elementlari qiymatining o'zgarishi ularni o'zaro bog'liq texnik-iqtisodiy mezonlar asosida tanlashni talab etadi. Shu sababli o'rta kuchlanishli kabel tarmoqlarining energiya samaradorligini diskontlangan xarajatlar, ruxsat etilgan qizish, qisqa tutashuv toki va kuchlanish yo'qotishlarini hisobga olgan holda baholash dolzarb masala hisoblanadi.

Maqsad: 10, 20 va 35 kV kabel taqsimlovchi elektr tarmoqlarida nominal kuchlanish va kabel o'tkazgichining ko'ndalang kesim yuzasini texnik cheklovlar hamda diskontlangan xarajatlar asosida ratsional tanlash usulini ishlab chiqishdan iborat.

Usullari: kabel liniyalarining hisobiy toki va iqtisodiy tok zichligini aniqlash, normal hamda qisqa tutashuv rejimlarida qizish bo'yicha tekshirish, kuchlanish yo'qotishlarini hisoblash, aktiv quvvat va elektr energiyasi isroflarini aniqlash hamda diskontlangan xarajatlarni qiyosiy baholash usullaridan foydalaniladi. Hisoblashlarda 10, 20 va 35 kV kabel liniyalari uchun texnik-iqtisodiy ko'rsatkichlar o'zaro solishtiriladi.

Natijalar: kabel liniyasining kuchlanishi oshishi bilan bir xil quvvatni uzatish uchun hisobiy tok va aktiv quvvat isroflari kamayishi aniqlandi. 20 kV kabel tarmoqlaridan foydalanish 10 kV tarmoqlariga nisbatan kabel kesimini kamaytirish, ruxsat etilgan kuchlanish yo'qotishlarida liniyaning xizmat ko'rsatish radiusini oshirish hamda elektr energiyasi isroflarini kamaytirish imkonini beradi. 35 kV variantida kabel liniyasi bo'yicha xarajatlar kichik bo'lishi mumkin, biroq yakuniy tanlovda podstantsiya va kommutatsiya uskunalari uchun kapital xarajatlarni ham hisobga olish lozimligi asoslandi. Taklif etilgan yondashuv texnik jihatdan ruxsat etilgan variantlar ichidan minimal diskontlangan xarajatli yechimni tanlash imkonini beradi.

Kalit so'zlar: kabel elektr tarmog'i, nominal kuchlanish, kabel kesimi, tokning iqtisodiy zichligi, kuchlanish yo'qotilishi, elektr energiyasi isrofi, diskontlangan xarajatlar, energiya samaradorligi.

For citation: Taslimov A.D., Samiev Sh.S. Techno-Economic Assessment of Energy Efficiency in 10–35 kV Cable Distribution Networks Relevance. Scientific and technical journal of Problems of Energy and Sources Saving, 2026, no. 3(1), pp. 88–96.

<https://doi.org/10.5281/zenodo.23464704>

Received: 03.04.2026

Revised: 25.04.2026

Accepted: 05.06.2026

Published: 19.10.2026

Copyright: © Abdurakhim D. Taslimov., Shohrux S. Samiev. 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/>).

Технико-экономическая оценка энергоэффективности кабельных распределительных электрических сетей напряжением 10–35 кВ

Абдурахим Д. Таслимов¹, Шохрух С. Самиев^{1,a)}

¹ DSc, проф., Ташкентский государственный технический университет, Ташкент, 100095, Узбекистан; ataslimov@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2856-6287>

^{1,a)} Ассистент. Ташкентский государственный технический университет, Ташкент, 100095, Узбекистан; shohruxsamiyev96@gmail.com <https://orcid.org/0009-0009-6833-3075>

Актуальность: В распределительных электрических сетях напряжением 10–35 кВ обоснованный выбор номинального напряжения и сечения кабельного проводника непосредственно влияет на потери электрической энергии, отклонения напряжения, а также капитальные и эксплуатационные затраты. В существующей практике проектирования данные параметры зачастую оцениваются раздельно. Однако рост нагрузки, повышение тарифов на электроэнергию и изменение стоимости элементов сети требуют их выбора на основе взаимосвязанных технико-экономических критериев. В связи с этим оценка энергоэффективности кабельных сетей среднего напряжения с учётом дисконтированных затрат, допустимого нагрева, токов короткого замыкания и потерь напряжения является актуальной задачей.

Цель: Разработка метода рационального выбора номинального напряжения и сечения кабельного проводника в кабельных распределительных электрических сетях напряжением 10, 20 и 35 кВ на основе технических ограничений и дисконтированных затрат.

Методы: Используются методы определения расчётного тока и экономической плотности тока, проверки кабелей по нагреву в нормальном режиме и при коротком замыкании, расчёта потерь напряжения, активной мощности и электрической энергии, а также сравнительной оценки дисконтированных затрат. Выполнено сопоставление технико-экономических показателей кабельных линий напряжением 10, 20 и 35 кВ.

Результаты: Установлено, что при повышении напряжения кабельной линии для передачи одинаковой мощности снижаются расчётный ток и потери активной мощности. Использование кабельных сетей напряжением 20 кВ по сравнению с сетями 10 кВ позволяет уменьшить сечение кабеля, увеличить радиус



обслуживания при допустимых потерях напряжения и сократить потери электрической энергии. Обосновано, что при оценке варианта 35 кВ наряду с затратами на кабельную линию необходимо учитывать капитальные затраты на подстанционное и коммутационное оборудование. Предложенный подход обеспечивает выбор варианта с минимальными дисконтированными затратами среди технически допустимых решений.

Ключевые слова: кабельная электрическая сеть, номинальное напряжение, сечение кабеля, экономическая плотность тока, потери напряжения, потери электрической энергии, дисконтированные затраты, энергоэффективность.

Techno-Economic Assessment of Energy Efficiency in 10–35 kV Cable Distribution Networks

Abdurakhim D. Taslimov¹, Shohrukh S. Samiev^{1,a)}

¹ DSc, Prof., Tashkent State Technical University, Tashkent, 100095, Uzbekistan; ataslimov@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2856-6287>

^{1,a)} Assistant. Tashkent State Technical University, Tashkent, 100095, Uzbekistan; shohruxsamiyev96@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0009-6833-3075>

Relevance: In 10–35 kV distribution networks, the justified selection of nominal voltage and cable conductor cross-section directly affects electrical energy losses, voltage deviations, capital investment, and operating costs. In conventional design practice, these parameters are often assessed separately. However, load growth, increasing electricity tariffs, and changes in the cost of network components require their selection based on interconnected technical and economic criteria. Therefore, assessing the energy efficiency of medium-voltage cable networks while considering discounted costs, permissible heating, short-circuit currents, and voltage losses is an important task.

Aim: to develop a method for the rational selection of nominal voltage and cable conductor cross-section in 10, 20, and 35 kV cable distribution networks based on technical constraints and discounted costs.

Methods: The study applies methods for determining the calculated current and economic current density, checking cable heating under normal and short-circuit conditions, calculating voltage losses, active power and electrical energy losses, and comparatively assessing discounted costs. The technical and economic indicators of 10, 20, and 35 kV cable lines are compared.

Results: The results show that increasing the cable-line voltage reduces the calculated current and active power losses when transmitting the same power. Compared with 10 kV networks, the use of 20 kV cable networks makes it possible to reduce cable cross-section, increase the service radius under permissible voltage-loss conditions, and decrease electrical energy losses. It is substantiated that the final assessment of the 35 kV option should consider not only cable-line costs but also capital costs for substation and switching equipment. The proposed approach enables the selection of the technically feasible solution with the minimum discounted cost.

Keywords: cable distribution network, nominal voltage, cable cross-section, economic current density, voltage loss, electrical energy loss, discounted costs, energy efficiency.

1. Kirish (Introduction)

Bugungi kunda elektr energiyasi iste'molining barqaror o'sishi, urbanizatsiya jarayonlarining jadallashuvi, sanoat korxonalari va maishiy iste'molchilar yuklamalarining ortishi elektr ta'minoti tizimlariga qo'yiladigan talablarni keskin kuchaytirmoqda. Elektr tarmoqlarining asosiy vazifasi iste'molchilarni belgilangan sifat ko'rsatkichlarida, uzluksiz va iqtisodiy jihatdan maqbul elektr energiyasi bilan ta'minlashdan iborat. Bunda elektr energiyasi isroflarini kamaytirish, kuchlanish og'ishlarini me'yoriy chegaralarda ushlab turish, tarmoqning o'tkazuvchanlik qobiliyatini oshirish hamda kapital va ekspluatatsion xarajatlarni optimallashtirish dolzarb masalalardan hisoblanadi. Taqsimlovchi elektr tarmoqlarida energiya samaradorligi, avvalo, tarmoqning ratsional parametrlarini tanlash bilan belgilanadi. Ushbu parametrlar qatoriga nominal kuchlanish, elektr uzatish liniyasining turi, o'tkazgich materiali va ko'ndalang kesim yuzasi kiradi. Mazkur parametrlarning noto'g'ri tanlanishi elektr energiyasi isroflarining ortishiga, kuchlanish pasayishiga, kabel liniyalarining ortiqcha yuklanishiga yoki aksincha, asossiz katta kapital xarajatlarning yuzaga kelishiga sabab bo'lishi mumkin [1–3]. O'rta kuchlanishli, ya'ni 10–35 kV kabel tarmoqlari shaharlarning zich qurilgan hududlari, yirik iste'molchilar va sanoat zonalarini elektr energiyasi bilan ta'minlashda keng qo'llaniladi. Kabel liniyalaridan foydalanish havo liniyalariga nisbatan yuqori ishonchlilik, tashqi muhit ta'siridan yaxshi himoyalanganlik hamda cheklangan hududlarda joylashtirish imkoniyatini beradi. Biroq kabel mahsulotlarining narxi yuqori bo'lganligi sababli kabel kesimini va nominal kuchlanish darajasini faqat texnik talablar asosida emas, balki texnik-iqtisodiy mezonlar asosida ham tanlash zarur.

Nominal kuchlanish darajasi uzatiladigan quvvat va liniya uzunligi bilan chambarchas bog'liq. Bir xil quvvat pastroq kuchlanishda uzatilganda liniyadagi tok ortadi. Tokning ortishi kabelning aktiv qarshiligida yuzaga keladigan quvvat isroflarini oshiradi, kuchlanish yo'qotishini ko'paytiradi va kattaroq kesimli kabelni tanlashni talab qiladi. Nominal kuchlanish oshirilganda esa hisobiy tok

kamayadi, buning hisobiga elektr energiyasi isroflari hamda kuchlanish yo'qotishlari qisqaradi. Shu bilan birga, yuqoriroq kuchlanishli kabel, kommutatsiya apparatlari va podstantsiya uskunalarning narxi o'zgaradi. Kuchlanish darajasini tanlashda faqat energiya isroflari emas, balki barcha xarajatlarning yig'indisi baholanishi lozim.

Kabel o'tkazgichining ko'ndalang kesim yuzasini tanlash ham ko'p mezonli masaladir. Tanlangan kesim normal rejimda kabelning ruxsat etilgan qizish shartini, qisqa tutashuv rejimida termik barqarorlik talabini hamda ruxsat etilgan kuchlanish yo'qotishi shartini qanoatlantirishi kerak. Biroq texnik jihatdan ruxsat etilgan eng kichik kesim har doim ham iqtisodiy jihatdan eng maqbul bo'lavermaydi. Elektr energiyasi narxining oshishi sharoitida kichik kesimli kabeldagi isroflarning qiymati ortadi va katta kesimli kabeldan foydalanish iqtisodiy jihatdan maqsadga muvofiq bo'lib qoladi. Shu sababli kabel kesimini tanlashda tokning iqtisodiy zichligi muhim mezon sifatida qo'llaniladi [4]. Tarmoq yechimlarining iqtisodiy samaradorligini baholashda kapital xarajatlarni alohida, ekspluatatsion xarajatlarni esa alohida ko'rib chiqish yetarli emas. Liniyani qurishga sarflanadigan boshlang'ich mablag'lar, texnik xizmat va ta'mirlash xarajatlari, shuningdek, elektr energiyasi isroflarini qoplash xarajatlari turli davrlarda yuzaga keladi. Shu bois ularni vaqt omilini hisobga olgan holda yagona diskontlangan xarajatlar mezoniga keltirish zarur. Diskontlangan xarajatlar usuli turli kuchlanish va kabel kesimi variantlarini bir xil iqtisodiy sharoitda qiyoslash hamda eng kam umumiy xarajatga ega variantni aniqlash imkonini beradi. Mazkur maqolada 10, 20 va 35 kV kabel taqsimlovchi elektr tarmoqlarining energiya samaradorligi kompleks texnik-iqtisodiy yondashuv asosida baholanadi [5,6]. Bunda kabel kesimi iqtisodiy tok zichligi bo'yicha aniqlanadi, so'ngra normal va qisqa tutashuv rejimlaridagi qizish shartlari, ruxsat etilgan kuchlanish yo'qotishi, aktiv quvvat va elektr energiyasi isroflari tekshiriladi. Yakuniy bosqichda kabel liniyasining kapital, texnik xizmat ko'rsatish hamda energiya isroflarini qoplash xarajatlari diskontlangan xarajatlar mezoni bo'yicha baholanadi.

Tadqiqot natijalari 10–35 kV kabel tarmoqlarida nominal kuchlanish va o'tkazgich kesimini ratsional tanlashga, elektr energiyasi isroflarini kamaytirishga, liniyalarning xizmat ko'rsatish radiusini oshirishga hamda tarmoqlarning umumiy energiya samaradorligini yaxshilashga xizmat qiladi.

2. Usullar va materiallar (Methods and materials)

Tadqiqotda o'rta kuchlanishli kabel taqsimlovchi tarmoqlarining energiya samaradorligi kompleks texnik-iqtisodiy yondashuv asosida baholandi. Ushbu yondashuvning mohiyati shundan iboratki, kabel liniyasining nominal kuchlanishi va o'tkazgich kesim yuzasi bir-biridan mustaqil parametrlar sifatida emas, balki uzatiladigan quvvat, liniya uzunligi, texnik cheklovlar va xarajatlar bilan o'zaro bog'liq holda tanlanadi. Kabel liniyasi parametrlarini tanlashda nominal kuchlanish asosiy omillardan biri hisoblanadi. Bir xil to'la quvvat uzatilganda nominal kuchlanish ortishi bilan liniyadagi hisobiy tok kamayadi. Tok qiymatining kamayishi kabel tomiridagi aktiv qarshilik isroflarini va kuchlanish yo'qotishlarini pasaytiradi. Bu holat kichikroq kesimli kabeldan foydalanish yoki mavjud kesimda kattaroq quvvatni uzatish imkonini yaratadi. Biroq kuchlanish darajasining oshishi kabel mahsulotlari, muftalar, kommutatsiya apparatlari hamda podstantsiya jihozlari qiymatining ortishi bilan ham bog'liq. Shu sababli 10, 20 va 35 kV variantlarini tanlash faqat elektr energiyasi isroflari bo'yicha emas, balki umumiy diskontlangan xarajatlar mezoni bo'yicha amalga oshirilishi lozim [7].

Kabel o'tkazgichining kesim yuzasini tanlash ikki o'zaro qarama-qarshi omilga asoslanadi. Kesim yuzasi kichik tanlanganda kabelning boshlang'ich qiymati kamayadi, ammo uning aktiv qarshiligi ortadi. Natijada quvvat va elektr energiyasi isroflari oshadi, shuningdek, kabelning qizish hamda kuchlanish yo'qotishi bo'yicha cheklovlari yuzaga kelishi mumkin. Kesim yuzasi orttirilganda esa kapital xarajatlar ko'payadi, biroq elektr energiyasi isroflari va undan kelib chiqadigan ekspluatatsion xarajatlar kamayadi. Demak, iqtisodiy tok zichligi kapital va ekspluatatsion xarajatlarning eng maqbul nisbatiga mos keluvchi kesim yuzasini dastlabki tanlash mezoni sifatida qo'llaniladi. Tanlangan kabel kesimi texnik talablar asosida majburiy tekshiriladi. Birinchi navbatda normal ish rejimida kabelning uzoq muddatli ruxsat etilgan toki hisobiy tokdan katta bo'lishi talab etiladi. Bu shart kabel izolyatsiyasining me'yoridan ortiq qizib ketishini oldini oladi va uning xizmat muddatini ta'minlaydi. Ruxsat etilgan tok qiymatiga muhit harorati, kabelning yotqizilish usuli, yonma-yon joylashtirilgan kabellar soni hamda tuproqning issiqlik qarshiligi ta'sir ko'rsatadi. Shu bois mazkur omillar tuzatish koeffitsiyentlari orqali hisobga olinadi [7-9].

Ikkinchi muhim texnik cheklov qisqa tutashuv rejimida kabelning termik barqarorligidir. Qisqa tutashuv vaqtida kabel tomiridan katta miqdordagi tok oqadi va qisqa muddat ichida sezilarli qizish yuzaga keladi. Agar kabel kesimi yetarli bo'lmasa, tomir yoki izolyatsiya shikastlanishi mumkin. Shuning uchun kabelning ruxsat etilgan qisqa tutashuv toki tarmoqning hisobiy qisqa tutashuv tokidan kichik bo'lmasligi kerak. Mazkur tekshiruv kabel liniyasining avariya rejimidagi ishonchlilikini ta'minlaydi. Kabel liniyasining qo'llanish sohasini belgilovchi navbatdagi mezon kuchlanish yo'qotishidir. Liniya uzunligi ortishi bilan kabelning aktiv va induktiv qarshiliklarida kuchlanish pasayishi yuzaga keladi. Liniya oxiridagi iste'molchiga yetib boradigan kuchlanish belgilangan

me'yorlardan past bo'lasligi uchun kuchlanish yo'qotishi ruxsat etilgan qiymatdan oshmasligi lozim. Ushbu shart orqali har bir nominal kuchlanish va kabel kesimi uchun maksimal ruxsat etilgan liniya uzunligi aniqlanadi. Natijada 10, 20 va 35 kV kabel tarmoqlarining uzatiladigan quvvat hamda masofaga bog'liq texnik qo'llanish sohalari belgilanadi. Energiya samaradorligini baholashda kabel liniyasidagi aktiv quvvat isrofi asosiy ko'rsatkichlardan biri hisoblanadi [10-12]. Aktiv quvvat isrofi liniya toki kvadratiga proporsional bo'lgani sababli, nominal kuchlanishning oshirilishi isroflarni sezilarli kamaytiradi. Maksimal yuklama soatlari soni orqali aniqlanadigan maksimal isroflar davomiyligi asosida yillik elektr energiyasi isrofi hisoblanadi. Mazkur isrof elektr energiyasi tarifi bilan baholanib, uning puldagi qiymati aniqlanadi. Kabel liniyasining iqtisodiy samaradorligi kapital xarajatlar, texnik xizmat va ta'mirlash xarajatlari hamda elektr energiyasi isroflarini qoplash xarajatlarini yagona mezonda jamlash orqali baholanadi. Ushbu xarajatlar turli vaqt davrlarida yuzaga kelishi sababli ular diskontlash usuli yordamida joriy qiymatga keltiriladi. Diskontlangan xarajatlar mezoni turli nominal kuchlanish va kabel kesimi variantlarini obyektiv qiyoslash hamda texnik cheklavlarni qanoatlantiruvchi eng kam xarajatli yechimni aniqlash imkonini beradi.

Tadqiqotda 10, 20 va 35 kV kuchlanishli, uzunligi 1 km bo'lgan uch fazali kabel liniyalari ko'rib chiqildi. Liniya choksimon polietilen izolyatsiyali, alyuminiy tomirli APvPu kabellardan tashkil topgan deb qabul qilindi [13]. Hisoblashlarning keyingi bosqichida kabel kesimini iqtisodiy tok zichligi bo'yicha aniqlash, qizish va qisqa tutashuv shartlari bo'yicha tekshirish, kuchlanish yo'qotishi hamda elektr energiyasi isroflarini hisoblash formulalari qo'llanildi.

Kabel o'tkazgichining dastlabki ko'ndalang kesim yuzasi tokning iqtisodiy zichligi bo'yicha aniqlandi, mm²;

$$F_{ekv} = \frac{I_{his}}{j_{ekv}} \quad (1)$$

bu yerda j_{ek} - tokning iqtisodiy zichligi, A/mm², I_{his} - kabel liniyasining hisobiy toki, A;

Alyumin tomirli polietilen izolyatsiyali kabel liniyalari uchun $T_{max}=3000-5000$ soat bo'lgan holatda; kabel liniyasining hisobiy toki, A, quyidagi formula bo'yicha hisoblanadi:

$$I_{his} = \frac{S_{his}}{\sqrt{3} \cdot U_n} \quad (2)$$

bu yerda: S_{his} - liniya orqali uzatiladigan hisobiy quvvat, kVA; U_n - liniyaning nominal kuchlanishi, kV.

Tanlangan ko'ndalang kesim yuzasi normal rejimdagi qizish shartiga ko'ra quyidagicha tekshiriladi:

$$I_{his} \leq I_{rux}, \quad (3)$$

bu yerda: I_{rux} - kabelning ruxsat etilgan toki, A.

$$I_{rux} = I_{jad} \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \quad (4)$$

bu yerda: k_1 - havoning yoki yerning haroratiga kiritilgan tuzatish koeffitsienti, nisbiy birlikda, $k_1=1$; k_2 - yonma-yon yotqizilgan kabellar soniga kiritilgan tuzatish koeffitsienti, nisbiy birlikda, $k_2=1$; k_3 - yerning o'zgarish qarshiligiga kiritilgan tuzatish koeffitsienti, nisbiy birlikda, $k_3=1$.

Tanlangan ko'ndalang kesim yuzasi qisqa tutashuv toki ta'sirida yuzaga keladigan qizish shartiga ko'ra tekshiriladi:

$$I_{qt} = I_{qt.rux} \quad (5)$$

bu yerda I_{qt} - qisqa tutashuv toki, kA, o'chirgichning nominal o'chirish toki bo'yicha qabul qilinadi; 35 kV uchun - $I_{qt}=20$ kA, 20 kV uchun - $I_{qt}=16$ kA, 10 kV uchun - $I_{qt}=12,5$ kA.

Kabelning ruxsat etilgan qisqa tutashuv toki, kA, quyidagi ifoda bilan hisoblanadi:

$$I_{qt.rux} = K \cdot I_{qt.1s} \quad (6)$$

$I_{qt.1s}$ - kabel uchun 1 soniyalik ruxsat etilgan qisqa tutashuv toki, kA; k - 1 soniyadan farqli qisqa tutashuv davomiyligi uchun tuzatish koeffitsienti:

$$K = \frac{1}{\sqrt{t}} \quad (7)$$

bu yerda t - qisqa tutashuv davomiyligi, s, qiymati 0,05 s qabul qilinadi, bu o'chirgichning to'liq o'chirish vaqti asosida aniqlanadi.

10, 20 va 35 kV kuchlanishlar uchun qisqa tutashuv toklaridan kelib chiqadigan minimal ko'ndalang kesim yuzalarni tanlash natijalari 2.8-jadvalda keltirilgan.

1-jadval. Qisqa tutashuv toklaridan kelib chiqadigan kabel liniyalarining minimal ko'ndalang kesim yuzalari

Table 1. Minimum cross-sectional areas of cable lines determined by short-circuit current conditions

U_{nom} , kV	I_{qt} , kA	$I_{qt.rux}$, kA	Minimal ko'ndalang kesim yuza, mm ²
10	12,5	15,46	35
20	16	21,01	50
35	20	21,01	50

Kabel liniyasidagi kuchlanish yo'qotishlari, %, quyidagi ifoda orqali hisoblanadi:

$$\Delta U_{KL} = \frac{S_{his} \cdot \cos \varphi \cdot r_0 + S_{his} \cdot \sin \varphi \cdot x_0}{U_n^2} \cdot l \cdot 100\% \quad (8)$$

bu yerda r_0 - liniyaning birlik uzunlikdagi aktiv qarshiligi, Om/km; x_0 - liniyaning birlik uzunlikdagi

induktiv qarshiligi, Om/km; $\cos\varphi$ - yuklamaning quvvat koeffitsienti, nisbiy birlikda, kabel liniyalari uchun $\cos\varphi=0,95$ qabul qilinadi, iste'molchining reaktiv quvvatni kompensatsiya qilishini hisobga olgan holda; L- liniya uzunligi, km; bu holda $L = 1$ km qabul qilinadi.

Kabel liniyasining maksimal uzunligi, ruxsat etilgan kuchlanish yo'qotishlari asosida quyidagicha hisoblanadi:

$$L_{rux} = \frac{\Delta U_{rux}}{\Delta U_{KL}}, \quad (9)$$

ΔU_{rux} - liniyada ruxsat etilgan kuchlanish yo'qotishlari, %, ΔU_{KL} -1 km liniyadagi kuchlanish yo'qotishi. Tadqiqotda ushbu qiymat 5 % deb qabul qilindi.

Kabel liniyasining iqtisodiy samaradorligi diskontlangan xarajatlar mezoni asosida baholandi:

$$Z = K_L + \sum_{t=t_0}^{T_{xuc}} \frac{Z_{tex.xiz} + Z_{isrof}}{(1+E)^t}, \quad (10)$$

bu yerda: K_L - kabel liniyasi uchun kapital mablag'lar, so'm; T_{his} - hisob-kitob davri, yillar (investitsion sikl davomiyligi), bu holda $T_{his}=5$ yil qabul qilinadi; $Z_{tex.xiz}$ - t bosqichdagi ob'ektni texnik xizmat ko'rsatish va ta'mirlash xarajatlari, so'm; Z_{isrof} - t bosqichdagi energiya yo'qotishlarini qoplash xarajatlari, so'm; E - diskont stavkasi, kapitalga minimal zarur foyda normasi sifatida qaraladi, nisbiy birlikda.

Kabel liniyasining kapital xarajatlari kabel qiymati, uch fazali tizimdagi kabel tomirlari soni, liniya uzunligi hamda montaj va ulash ishlari xarajatlari hisobga olgan holda aniqlandi:

$$K_L = 1,25 \cdot 3 \cdot K_{kabel} \cdot L, \quad (11)$$

bu yerda K_{kabel} - bir tomirli kabelning 1 km uzunlikdagi narxi, so'm/km; 3 - uch fazadagi kabel tomirlari soni; 1,25 - yotqizish, montaj va mufta ishlari uchun qo'shimcha xarajatlarni hisobga oluvchi koeffitsiyent.

Texnik xizmat ko'rsatish va ta'mirlash bo'yicha yillik xarajatlar quyidagicha aniqlandi:

$$Z_{tex.xiz} = \frac{\alpha_{tex.xiz}}{100} \cdot K_L, \quad (12)$$

bu yerda, $\alpha_{tex.xiz}$ - texnik xizmat ko'rsatish va ta'mirlash uchun ajratmalar normasi, %, 10 kV liniyalar uchun: $\alpha_{tex.xiz}=2$ %; 20 kV liniyalar uchun: $\alpha_{tex.xiz}=2$ %; 35 kV liniyalar uchun: $\alpha_{tex.xiz}=2$ %;

Kabel liniyasidagi aktiv quvvat isrofi quyidagi ifoda asosida aniqlandi, kVt,

$$\Delta P = 3 \cdot I_{his}^2 \cdot r_0 \cdot l \cdot 10^{-3}, \quad (13)$$

Kabel liniyasidagi yillik elektr energiya isrofi, MVt·soat,

$$\Delta W = \Delta P \cdot \tau \cdot 10^{-3}, \quad (14)$$

bu yerda ΔW - yillik elektr energiyasi isrofi, MWh; τ - maksimal isroflar davomiyligi, soat. Ushbu ko'rsatkich maksimal yuklama vaqtiga bog'liq holda aniqlandi:

$$\tau = \left(0,124 + \frac{T_{max}}{10^4}\right)^2 \cdot 8760, \quad (15)$$

bu yerda T_{max} - maksimal yuklama vaqti, soat (maksimal yuklama vaqtining umumiy davomiyligi), shaxar hududlari uchun $T_{max}=5000$ soat qabul qilinadi.

Kabel liniyasidagi energiya yo'qotishlarini qoplash bo'yicha yillik xarajatlar, so'm/yil, quyidagi formula bo'yicha hisoblanadi:

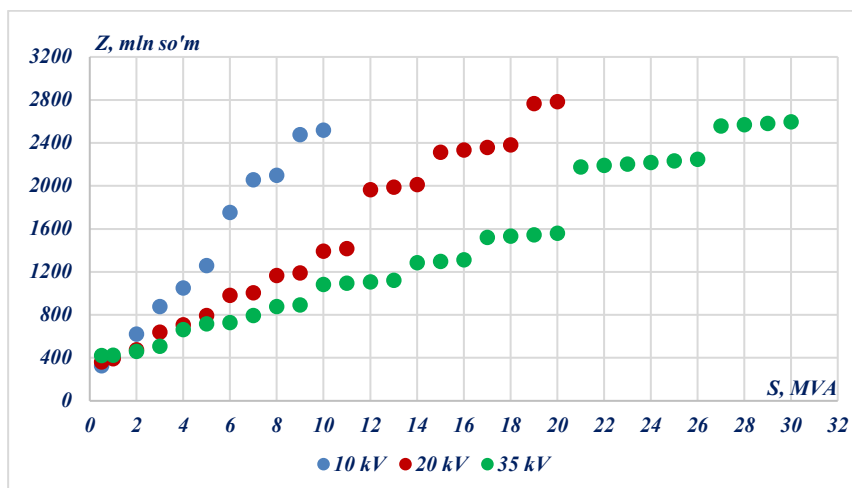
$$Z_{isrof} = \Delta W \cdot C_0, \quad (16)$$

bu yerda: C_0 - elektr energiyasining narxi, so'm/kVt·soat, Hisoblashlarda aholi va yuridik iste'molchilar tariflarining o'rtacha qiymati sifatida qabul qilindi.

Mazkur usullar asosida 10, 20 va 35 kV kabel liniyalari uchun kabel kesimi, kuchlanish yo'qotishi, ruxsat etilgan liniya uzunligi, aktiv quvvat isrofi, yillik elektr energiyasi isrofi hamda jami diskontlangan xarajatlar aniqlandi [14,15]. Olingan natijalar bo'yicha turli nominal kuchlanishlar uchun energiya samaradorligi va iqtisodiy maqsadga muvofiqlik qiyosiy baholandi.

3. Natijalar va muhokama (Results and discussion)

Taklif etilgan hisoblash usuli asosida 10, 20 va 35 kV kabel liniyalari uchun kabel kesim yuzasi, texnik cheklovlar hamda iqtisodiy ko'rsatkichlar aniqlandi. Barcha variantlar uchun hisobiy tok, normal rejimdagi qizish, qisqa tutashuvdagi termik barqarorlik va ruxsat etilgan kuchlanish yo'qotishi shartlari tekshirildi. Ushbu tekshiruvlar tanlangan kabel variantlarining texnik jihatdan qo'llashga yaroqliligini tasdiqladi. Keyingi bosqichda texnik jihatdan ruxsat etilgan variantlar kapital qo'yilmalar, texnik xizmat xarajatlari va elektr energiyasi isroflarini qoplash xarajatlari o'z ichiga olgan diskontlangan xarajatlar mezoni bo'yicha qiyoslandi. Olingan bog'lanishlar 1-rasmda keltirilgan [3,5,7].

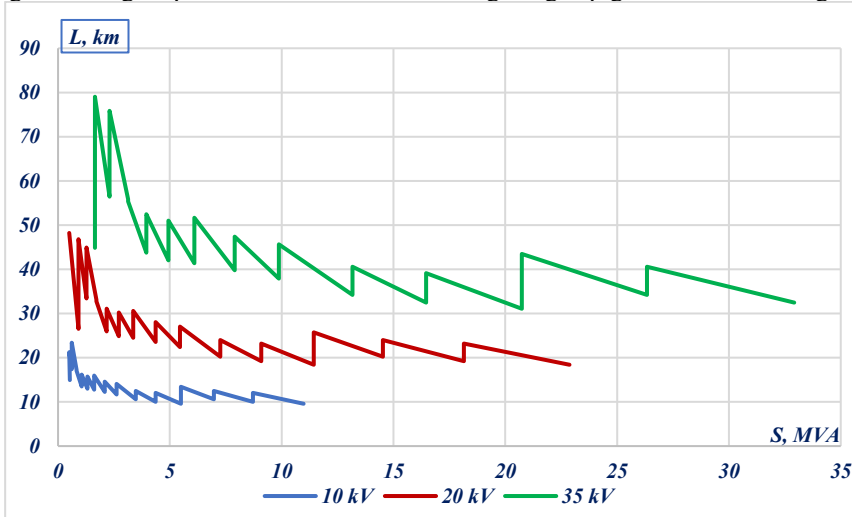


1-rasm. 1 km kabel liniyasining diskontlangan xarajatlarini uzatiladigan quvvat va nominal kuchlanishga bog'liqligi.

Fig.1. Discounted costs of a 1 km cable line as a function of transmitted power and nominal voltage

1-rasmdan ko'rinadiki, uzatiladigan quvvatning ortishi bilan barcha kuchlanish variantlari uchun diskontlangan xarajatlar o'zgaradi. Buning asosiy sababi uzatiladigan quvvat ortishi natijasida hisobiy tokning, kabel kesim yuzasining va elektr energiyasi isroflarining oshishidir. Shu bilan birga, 20 kV kabel liniyasining diskontlangan xarajatlari ko'rib chiqilgan quvvatlar oralig'ida 10 kV variantiga nisbatan kichikroq qiymatlarga ega bo'lishi kuzatiladi.

Mazkur natija 20 kV tarmoqda bir xil quvvat kichikroq tokda uzatilishi bilan izohlanadi. Tokning kamayishi kabeldagi aktiv quvvat isroflarini qisqartiradi va ayrim hollarda kichikroq kesimli kabelni tanlash imkonini beradi. Natijada kapital va ekspluatatsion xarajatlar o'rtasida maqbul nisbat shakllanadi. 35 kV variantida kabel liniyasining o'ziga tegishli diskontlangan xarajatlar eng kichik bo'lishi mumkin. Biroq 1-rasmdagi natijalar faqat kabel liniyasi xarajatlarini ifodalaydi. Shu bois 35 kV variantining yakuniy iqtisodiy samaradorligini baholashda podstantsiya, kommutatsiya apparatlari va himoya vositalariga sarflanadigan qo'shimcha kapital xarajatlar ham hisobga olinishi lozim. Kabel liniyasining energiya samaradorligi faqat xarajatlar bilan emas, balki uning ruxsat etilgan uzatish masofasi bilan ham belgilanadi [3,5,7]. Kuchlanish yo'qotishi bo'yicha aniqlangan maksimal liniya uzunligining uzatiladigan quvvat va nominal kuchlanishga bog'liqligi 2-rasmda keltirilgan.

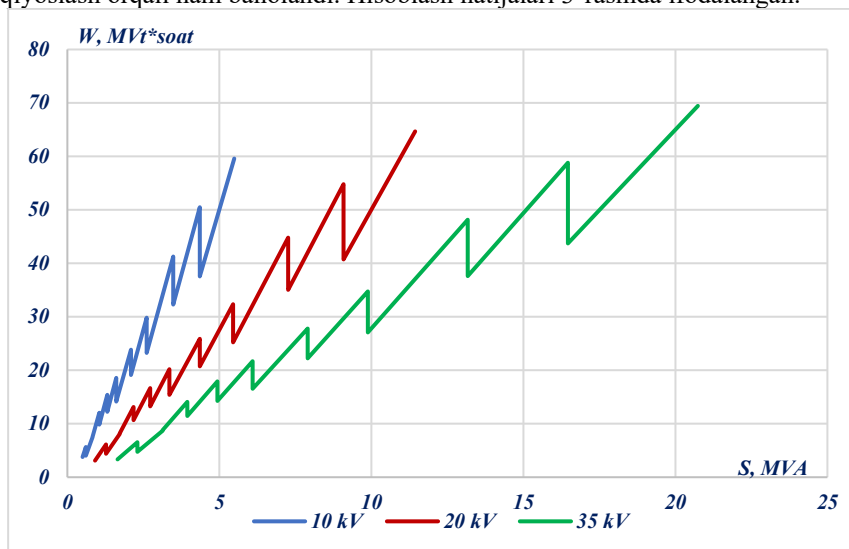


2-rasm. Kabel liniyasining ruxsat etilgan uzunligini uzatiladigan quvvat va nominal kuchlanishga bog'liqligi

Fig.2. Permissible cable line length as a function of transmitted power and nominal voltage

2-rasmda nominal kuchlanish oshishi bilan ruxsat etilgan liniya uzunligi ortishi yaqqol namoyon bo'ladi. Bunda 10 kV kuchlanishli kabel liniyalarida uzatiladigan quvvat ortishi bilan kuchlanish yo'qotishi tezroq oshadi va liniyaning qo'llanish masofasi cheklanadi. 20 kV kuchlanishga o'tish esa bir xil quvvatda tokni kamaytirish hisobiga kuchlanish yo'qotishini pasaytiradi hamda liniyaning xizmat ko'rsatish radiusini kengaytiradi[3,5,7]. 2-rasm natijalariga ko'ra, 20 kV kabel liniyalari 10 kV liniyalarga nisbatan uzunroq masofalarga elektr energiyasini ruxsat etilgan kuchlanish yo'qotishi

chegarasida uzatish imkonini beradi. Bu holat yangi qurilish hududlari, iste'molchilar tarqoq joylashgan shahar atrofi zonalari hamda taqsimlovchi podstantsiyalar sonini kamaytirish zarur bo'lgan sharoitlarda 20 kV tarmoqlarining afzalligini ko'rsatadi. 35 kV kuchlanishli liniyalar esa katta quvvatlarni eng uzoq masofalarga uzatish uchun texnik imkoniyatga ega ekanligi bilan ajralib turadi. Nominal kuchlanishning energiya samaradorligiga ta'siri kabel liniyasidagi elektr energiyasi isroflarini qiyoslash orqali ham baholandi. Hisoblash natijalari 3-rasmda ifodalangan.



3-rasm. Kabel liniyasidagi elektr energiyasi isroflarining uzatiladigan quvvat va nominal kuchlanishga bog'liqligi

Fig.3. Electrical energy losses in a cable line as a function of transmitted power and nominal voltage

3-rasmdan ko'rinadiki, uzatiladigan quvvat ortishi bilan kabel liniyasidagi elektr energiyasi isroflari ham ortadi. Bu qonuniyat aktiv quvvat isrofining tok kvadratiga proporsionalligi bilan izohlanadi. Bir xil uzatiladigan quvvatda nominal kuchlanish oshishi bilan elektr energiyasi isroflari kamayishi kuzatiladi. Xususan, 20 kV kabel liniyalarida aktiv quvvat isroflari 10 kV liniyalariga nisbatan 2–3 baravar kamroq bo'lishi aniqlandi [2,5]. Eng kichik isrof qiymatlari 35 kV kuchlanishli liniyalarda kuzatiladi. Biroq energiya isroflarining eng kam bo'lishi kuchlanish variantini tanlash uchun yagona mezon bo'la olmaydi, chunki yuqori kuchlanishli tarmoqlarda tegishli elektr jihozlarining qiymati ortadi. Olingan natijalar o'zaro bog'liq holda quyidagi ilmiy xulosani beradi: 10 kV kabel liniyalari qisqa masofalar va nisbatan kichik quvvatlar uchun maqsadga muvofiq bo'lsa, 20 kV kabel tarmoqlari energiya isroflari, ruxsat etilgan uzatish masofasi va diskontlangan xarajatlar bo'yicha ko'plab amaliy sharoitlarda maqbul variant hisoblanadi. 35 kV kuchlanish esa katta quvvatlarni uzoq masofalarga uzatishda samarali bo'lib, uning yakuniy tanlovi podstantsiya uskunalarini xarajatlarini ham hisobga olgan kompleks texnik-iqtisodiy baholash asosida amalga oshirilishi kerak.

4. Xulosa (Conclusion)

Tadqiqotda 10, 20 va 35 kV kabel taqsimlovchi elektr tarmoqlarining energiya samaradorligi kabel kesim yuzasi, ruxsat etilgan qizish, qisqa tutashuvdagi termik barqarorlik, kuchlanish yo'qotishi, elektr energiyasi isroflari hamda diskontlangan xarajatlar asosida kompleks baholandi. Taklif etilgan yondashuv texnik va iqtisodiy ko'rsatkichlarni o'zaro bog'liq holda hisobga olib, ratsional tarmoq variantini tanlash imkonini beradi. Hisoblashlar nominal kuchlanish oshishi bilan bir xil quvvatni uzatishdagi hisobiy tok, kabel liniyasidagi aktiv quvvat isrofi va kuchlanish yo'qotishi kamayishini ko'rsatdi. Shu sababli yuqoriroq kuchlanishli kabel liniyalarida elektr energiyasini uzoqroq masofaga ruxsat etilgan sifat ko'rsatkichlari doirasida uzatish imkoniyati kengayadi. 20 kV kabel tarmoqlari 10 kV tarmoqlariga nisbatan ko'rib chiqilgan sharoitlarda energiya isroflarini kamaytirish, kabel kesimini ratsional tanlash va liniyaning xizmat ko'rsatish radiusini oshirish imkonini berishi aniqlandi. Bu natija 20 kV kuchlanishli tarmoqlarni shahar va shahar atrofi hududlarida rivojlantirish texnik-iqtisodiy jihatdan maqsadga muvofiq ekanini ko'rsatadi. 35 kV kabel liniyalarida elektr energiyasi isroflari eng kichik qiymatga ega bo'lishi mumkin. Biroq mazkur variantni yakuniy tanlashda kabel liniyasi xarajatlaridan tashqari podstantsiya transformatorlari, kommutatsiya apparatlari va himoya vositalari uchun kapital qo'yilmalarni ham hisobga olish zarur. Nominal kuchlanish va kabel kesimini faqat bitta texnik ko'rsatkich asosida emas, balki diskontlangan xarajatlar va texnik cheklavlarni birgalikda hisobga olgan holda tanlash elektr tarmoqlarining energiya samaradorligini oshirish, elektr energiyasi isroflarini kamaytirish hamda investitsion qarorlarning asoslanganligini ta'minlaydi.



ADABIYOTLAR

1. Pralas A. Cost-Benefit Analysis of the Distribution Network Transition to 20 kV Operating Voltage // Proceedings of the 31st International DAAAM Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation. / Ed. B. Katalinic. – Vienna: DAAAM International, 2020. P. 885–889. – DOI: 10.2507/31st.daaam.proceedings.123
2. А.Ю. Ефимов, А.О. Молоков, И.Н. Артемов. Снижение потерь путем перехода в распределительных сетях 6/10 кВ на напряжение 20 кВ. //Интеллектуальная электротехника. 2019 №4. С. 17-25.
3. Черепанов В. В., Суворова И. А. Исследование технико-экономической целесообразности применения напряжения 20 кВ в городских электрических сетях // Энергобезопасность и энергосбережение. 2012. № 5. С. 12–14.
4. Майоров А.В., Осинцев К.А., Шунтов А.В. Особенности построения воздушных электрических сетей 20 кВ с низкоомным резистивным заземлением нейтрали // ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЯ. Передача и распределение, 2017, № 5(44). С. 78–82.
5. А.Д. Таслимов, Ф.М. Рахимов, Ф.М. Рахимов. Обоснование целесообразности использования напряжения 20 кВ в воздушных электрических сетях // Проблемы энерго- и ресурсосбережения. – Ташкент, 2023. № 84. – С. 61-72.
6. Saidxodjayev A.G., Vanin V.K., Alibekova T.Sh., Turdiyev U.M., Toshpulatov N.A. Prospects and development of electricity supply in the city of Tashkent // E3S Web of Conferences. – 2021. – Vol. 289. – Art. 07008. P. 1–2. DOI: 10.1051/e3sconf/202128907008.
7. Guseva S., Borscevskiy O., Petrichenko L., Breners N. Basic principles of process implementation on voltage level changing in the distribution networks // 2015 IEEE 5th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives (POWERENG). – Riga: IEEE, 2015. – P. 147–152. DOI: 10.1109/PowerEng.2015.7266309.
8. Taslimov A., Rakhimov F., Rakhimov F. Economic interval analysis of loads for selection of cross-section surfaces of electrical transmission lines // E3S Web of Conferences. – 2023. – Vol. 384. – Art. 01037. P. 1–4. – DOI: 10.1051/e3sconf/202338401037.
9. Правила устройства электроустановок. Раздел I. Общие правила / утверждены приказом начальника Государственного агентства по надзору в электроэнергетике «Узгосэнергонадзор» 04.11.2009 г. № 214. 1.3.25–1.3.29.
10. Suvorova I., Cherepanov V., Basmanov V. Peculiarity of Determination of Economic Current Density Values for 6–35 kV Power Lines under Modern Conditions // Applied Mechanics and Materials. – 2015. – Vol. 792. – P. 300–304. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.792.300.
11. Taslimov A.D., Berdishev A.S., Melikuziev M.V., Rakhimov F.M. Method of choosing the unification of cable sections of electric network cables under conditions of load development uncertainty // E3S Web of Conferences. – 2019. – Vol. 139. – Art. 01081. – P. 1–3. DOI: 10.1051/e3sconf/201913901081.
12. United Nations Industrial Development Organization; Industrial Development Centre for Arab States. Manual for Evaluation of Industrial Projects. – New York: United Nations, 1980. – XII, 139 p. – P. 39–48. – Sales No. E.80.II.B.2. – ISBN: 92-1-106111-3.
13. Götze U., Northcott D., Schuster P. Investment Appraisal: Methods and Models. – 2nd ed. – Berlin; Heidelberg: Springer, 2015. – XVI, 366 p. – P. 47–73; DOI: 10.1007/978-3-662-45851-8.
14. IEC 60287-3-2:2012. Electric cables - Calculation of the current rating - Part 3-2: Sections on operating conditions - Economic optimization of power cable size. - Geneva: International Electrotechnical Commission, 2012. - 77 p.
15. Татарникова А.Н. Экономика энергетики: Учебное пособие для студентов направления «Электроэнергетика и электротехника» всех форм обучения/ Рубцовский индустриальный институт. – Рубцовск, 2017. С. 52-55.

REFERENCES

1. Pralas, A. Cost-Benefit Analysis of the Distribution Network Transition to 20 kV Operating Voltage. In: Proceedings of the 31st International DAAAM Symposium on Intelligent Manufacturing and

- Automation; Katalinic, B., Ed.; DAAAM International: Vienna, Austria, 2020; pp. 885–889. <https://doi.org/10.2507/31st.daaam.proceedings.123>.
2. Efimov, A.Yu.; Molokov, A.O.; Artemov, I.N. Reduction of Losses through the Transition from 6/10 kV to 20 kV in Distribution Networks. *Intelligent Electrical Engineering* 2019, 4, 17–25.
 3. Cherepanov, V.V.; Suvorova, I.A. Study of the Technical and Economic Feasibility of Applying 20 kV Voltage in Urban Electrical Networks. *Energy Security and Energy Saving* 2012, 5, 12–14.
 4. Mayorov, A.V.; Osintsev, K.A.; Shuntov, A.V. Features of Constructing 20 kV Overhead Electrical Networks with Low-Resistance Neutral Grounding. *Electric Power: Transmission and Distribution* 2017, 5 (44), 78–82.
 5. Taslimov, A.D.; Rakhimov, F.M.; Rakhimov, F.M. Justification of the Feasibility of Using 20 kV Voltage in Overhead Electrical Networks. *Problems of Energy and Resource Saving* 2023, 84, 61–72.
 6. Saidxodjayev, A.G.; Vanin, V.K.; Alibekova, T.Sh.; Turdiyev, U.M.; Toshpulatov, N.A. Prospects and Development of Electricity Supply in the City of Tashkent. *E3S Web of Conferences* 2021, 289, 07008. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202128907008>.
 7. Guseva, S.; Borscevskiy, O.; Petrichenko, L.; Breners, N. Basic Principles of Process Implementation on Voltage Level Changing in Distribution Networks. In: *Proceedings of the 2015 IEEE 5th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives (POWERENG)*; IEEE: Riga, Latvia, 2015; pp. 147–152. <https://doi.org/10.1109/PowerEng.2015.7266309>.
 8. Taslimov, A.; Rakhimov, F.; Rakhimov, F. Economic Interval Analysis of Loads for Selecting Cross-Sectional Areas of Electrical Transmission Lines. *E3S Web of Conferences* 2023, 384, 01037. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202338401037>.
 9. Electrical Installation Regulations. Section I. General Rules. Approved by Order No. 214 of the Head of the State Agency for Supervision in the Electric Power Industry “Uzgosenergonadzor”, November 4, 2009; Clauses 1.3.25–1.3.29.
 10. Suvorova, I.; Cherepanov, V.; Basmanov, V. Peculiarity of Determining Economic Current Density Values for 6–35 kV Power Lines under Modern Conditions. *Applied Mechanics and Materials* 2015, 792, 300–304. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.792.300>.
 11. Taslimov, A.D.; Berdishev, A.S.; Melikuziev, M.V.; Rakhimov, F.M. Method for Selecting Unified Cable Cross-Sections in Electrical Networks under Load Development Uncertainty. *E3S Web of Conferences* 2019, 139, 01081. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201913901081>.
 12. United Nations Industrial Development Organization; Industrial Development Centre for Arab States. *Manual for Evaluation of Industrial Projects*; United Nations: New York, NY, USA, 1980; pp. 39–48. ISBN 92-1-106111-3.
 13. Götze, U.; Northcott, D.; Schuster, P. *Investment Appraisal: Methods and Models*, 2nd ed.; Springer: Berlin, Germany, 2015; pp. 47–73. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-45851-8>.
 14. International Electrotechnical Commission. IEC 60287-3-2:2012. *Electric Cables—Calculation of the Current Rating—Part 3-2: Sections on Operating Conditions—Economic Optimization of Power Cable Size*; IEC: Geneva, Switzerland, 2012; 77 p.
 15. Tatarnikova, A.N. *Power Engineering Economics: A Study Guide for Students of Electrical Power Engineering and Electrical Engineering Programmes*; Rubtsov Industrial Institute: Rubtsovsk, Russia, 2017; pp. 52–55.