



Tojlanish yo'qotishlarining ko'p omilli xususiyatlarini tahlil qilish va ularni kamaytirish qonuniyatlarini asoslash

Akram N. Tovboyev^{1a}, Islom B. Tog'ayev¹

^{1a}) DSc, prof., Navoiy davlat konchilik va texnologiyalar universiteti, Navoiy, 210100, O'zbekiston; info@ndki.uz
<https://orcid.org/0000-0003-2677-6977>

¹ Katta o'qituvchi., Navoiy davlat konchilik va texnologiyalar universiteti, Navoiy, 210100, O'zbekiston; info@ndki.uz
<https://orcid.org/0000-0002-4481-874X>

Dolzarbli: so'nggi yillarda dunyo energetika tizimlarida qayta tiklanuvchi energiya manbalarining ulushi ortishi, elektr tarmoqlarini raqamlashtirish va intellektualashtirish, energiya samaradorligini oshirish hamda elektr energiyasini uzatishdagi texnologik yo'qotishlarni kamaytirish masalalari ustuvor yo'nalishlardan biriga aylanmoqda. Mazkur jarayonlar O'zbekiston elektr energetika tizimida ham yuqori kuchlanishli elektr uzatish tarmoqlarining ishonchiligi va samaradorligiga qo'yiladigan talablarni oshirmoqda. Bunday sharoitda 220–500 kV kuchlanishli havo elektr uzatish liniyalarida yuzaga keladigan tojlanish hodisasi qo'shimcha aktiv quvvat va elektr energiyasi yo'qotishlariga, elektromagnit xalaqlar hamda ekspluatatsion ko'rsatkichlarning yomonlashishiga sabab bo'ladi. Tojlanish yo'qotishlarining miqdori ishchi kuchlanish, o'tkazgich geometriyasi, elektr maydon kuchlanganligi, havo harorati, namlik, atmosfera bosimi, yog'ingarchilik, changlanish va o'tkazgich sirtining holati kabi ko'plab o'zaro bog'liq omillarga bog'liq. Shu sababli tojlanish yo'qotishlarini alohida omillar asosida emas, balki ularning birgalikdagi ta'sirini hisobga olgan holda kompleks baholash, ko'p omilli qonuniyatlarini aniqlash hamda yo'qotishlarni kamaytirishning ilmiy asoslangan usullarini ishlab chiqish dolzarb hisoblanadi.

Maqsad: yuqori kuchlanishli havo elektr uzatish liniyalarida tojlanish yo'qotishlarining elektr, geometrik, meteorologik va ekspluatatsion omillarga bog'liq ko'p omilli xususiyatlarini tahlil qilish hamda ushbu yo'qotishlarni kamaytirishning ilmiy asoslangan qonuniyatlarini aniqlash.

Usullar: yuqori kuchlanishli havo elektr uzatish liniyalarida tojlanish yo'qotishlariga ta'sir etuvchi elektr, geometrik, meteorologik va ekspluatatsion omillarni qiyosiy tahlil qilish, eksperimental kuzatuv, hisobiy-tahliliy modelashtirish hamda statistik ma'lumotlarni qayta ishlash usullaridan foydalaniladi.

Natijalar: yuqori kuchlanishli havo elektr uzatish liniyalarida tojlanish yo'qotishlarining elektr, geometrik, meteorologik va ekspluatatsion omillarga bog'liq holda shakllanish qonuniyatlari aniqlanadi. Ko'p omilli tahlil asosida tojlanish intensivligiga eng katta ta'sir ko'rsatuvchi omillar ajratiladi, ularning o'zaro bog'liqligi baholanadi hamda tojlanish yo'qotishlarini kamaytirishga qaratilgan samarali texnik va ekspluatatsion choralar asoslanadi. Olingan natijalar asosida yuqori kuchlanishli havo elektr uzatish liniyalarining energiya samaradorligini oshirish va tojlanish bilan bog'liq elektr energiyasi yo'qotishlarini kamaytirish bo'yicha tegishli ilmiy-amaliy takliflar ishlab chiqiladi.

Kalit so'zlar: tojlanish, tojlanish yo'qotishlari, yuqori kuchlanishli havo elektr uzatish liniyalari, elektr maydon kuchlanganligi, ko'p omilli tahlil, elektr energiyasi yo'qotishlari, meteorologik omillar, o'tkazgich geometriyasi, ekspluatatsion parametrlar, tojlanishni kamaytirish, energiya samaradorligi.

Анализ многофакторных особенностей потерь на корону и обоснование закономерностей их снижения

Акрам Н. Товбоев^{1а}, Ислон Б. Тогаев¹

^{1a}) DSc, проф., Навоийский государственный горно-технологический университет, Навоий, 210100, Узбекистан; info@ndki.uz <https://orcid.org/0000-0003-2677-6977>

¹ Старший преподаватель., Навоийский государственный горно-технологический университет, Навоий, 210100, Узбекистан; info@ndki.uz <https://orcid.org/0000-0002-4481-874X>

Актуальность: В последние годы в мировых энергетических системах увеличение доли возобновляемых источников энергии, цифровизация и интеллектуализация электрических сетей, повышение энергоэффективности, а также снижение технологических потерь при передаче электрической энергии становятся одними из приоритетных направлений развития. Указанные процессы повышают требования к надежности и эффективности высоковольтных электрических сетей и в электроэнергетической системе Узбекистана. В этих условиях коронный разряд, возникающий на воздушных линиях электропередачи напряжением 220–500 кВ, приводит к дополнительным потерям активной мощности и электрической энергии, возникновению электромагнитных помех, а также ухудшению эксплуатационных показателей линий. Величина потерь на корону зависит от совокупного воздействия множества взаимосвязанных факторов, включая рабочее напряжение, геометрические параметры проводников, напряженность электрического поля, температуру и влажность воздуха, атмосферное давление, осадки, запыленность и состояние поверхности проводника. В связи с этим актуальной задачей является комплексная оценка потерь на корону с учетом совместного влияния указанных факторов, выявление многофакторных закономерностей их формирования, а также разработка научно обоснованных методов снижения данных потерь.

For citation: Tovbayev A.N., Tog'ayev I.B. Analysis of the multi-factor characteristics of corona losses and substantiation of the regularities of their reduction. Scientific and technical journal of Problems of Energy and Sources Saving, 2026, no. 3 (1), pp. 97-105.
<https://doi.org/10.5281/zenodo.23464735>

Received: 05.04.2026
Revised: 25.04.2026
Accepted: 05.06.2026
Published: 19.10.2026

Copyright: © Akram N. Tovbayev, Islom B. Togaev, 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/>).

Цель: Анализ многофакторных особенностей потерь на корону на высоковольтных воздушных линиях электропередачи, обусловленных электрическими, геометрическими, метеорологическими и эксплуатационными факторами, а также выявление научно обоснованных закономерностей снижения данных потерь.

Методы: Используются методы сравнительного анализа электрических, геометрических, метеорологических и эксплуатационных факторов, влияющих на потери на корону на высоковольтных воздушных линиях электропередачи, экспериментального наблюдения, расчётно-аналитического моделирования, а также статистической обработки данных.

Результаты: Выявляются закономерности формирования потерь на корону на высоковольтных воздушных линиях электропередачи в зависимости от электрических, геометрических, метеорологических и эксплуатационных факторов. На основе многофакторного анализа определяются факторы, оказывающие наибольшее влияние на интенсивность коронного разряда, оценивается степень их взаимосвязи, а также обосновываются эффективные технические и эксплуатационные мероприятия, направленные на снижение потерь на корону. На основе полученных результатов разрабатываются соответствующие научно-практические рекомендации по повышению энергоэффективности высоковольтных воздушных линий электропередачи и снижению потерь электрической энергии, обусловленных коронным разрядом.

Ключевые слова: коронный разряд, потери на корону, высоковольтные воздушные линии электропередачи, напряжённость электрического поля, многофакторный анализ, потери электрической энергии, метеорологические факторы, геометрия проводника, эксплуатационные параметры, снижение коронных потерь, энергоэффективность.

Analysis of the multifactor characteristics of corona losses and substantiation of the regularities of their reduction

Akram N. Tovboyev ^{1a}, Islom B. Tog'ayev ¹

^{1a)} DSc, prof., Navoi State University of Mining and Technology University, Navoi, 210100, Uzbekistan; info@ndki.uz
<https://orcid.org/0000-0003-2677-6977>

¹ Sen. Teach., Navoi State University of Mining and Technology University, Navoi, 210100, Uzbekistan; info@ndki.uz
<https://orcid.org/0000-0002-4481-874X>

Relevance: In recent years, the increasing share of renewable energy sources in power systems worldwide, the digitalization and intelligent transformation of electrical networks, improvements in energy efficiency, and the reduction of technological losses in electric power transmission have become key development priorities. These processes are also increasing the requirements for the reliability and efficiency of high-voltage transmission networks within the power system of Uzbekistan. Under such conditions, corona discharge occurring on 220–500 kV overhead transmission lines results in additional active power and energy losses, electromagnetic interference, and deterioration of the operational performance of transmission lines. The magnitude of corona losses depends on the combined influence of numerous interrelated factors, including operating voltage, conductor geometry, electric field intensity, air temperature and humidity, atmospheric pressure, precipitation, dust contamination, and the condition of the conductor surface. Therefore, a comprehensive assessment of corona losses that accounts for the combined effects of these factors, identification of their multifactorial formation patterns, and development of scientifically substantiated methods for reducing such losses constitute an important and relevant research task.

Aim: Analysis of the multifactor characteristics of corona losses in high-voltage overhead transmission lines as influenced by electrical, geometric, meteorological, and operational factors, and identification of scientifically substantiated regularities for reducing these losses.

Methods: The study employs comparative analysis of electrical, geometric, meteorological, and operational factors affecting corona losses in high-voltage overhead transmission lines, along with experimental observation, computational and analytical modeling, and statistical data processing methods.

Results: The regularities governing the formation of corona losses in high-voltage overhead transmission lines as a function of electrical, geometric, meteorological, and operational factors are identified. Based on multifactor analysis, the factors exerting the greatest influence on corona discharge intensity are determined, their interrelationships are evaluated, and effective technical and operational measures aimed at reducing corona losses are substantiated. Based on the obtained results, relevant scientific and practical recommendations are developed to improve the energy efficiency of high-voltage overhead transmission lines and reduce electrical energy losses associated with corona discharge.

Key words: corona discharge, corona losses, high-voltage overhead transmission lines, electric field strength, multifactor analysis, electrical energy losses, meteorological factors, conductor geometry, operational parameters, corona loss reduction, energy efficiency.

1. Kirish (Introduction)

Yuqori kuchlanishli havo elektr uzatish liniyalarida elektr energiyasini uzoq masofalarga uzatish jarayonining energetik samaradorligi liniyaning elektr, konstruktiv va ekspluatatsion parametrlariga bevosita bog'liq. Ushbu jarayonda tojlanish hodisasi yuqori va o'ta yuqori kuchlanishli elektr uzatish liniyalarining energetik hamda elektromagnit ko'rsatkichlariga ta'sir etuvchi asosiy elektro-fizik

jarayonlardan biri hisoblanadi. P.S. Maruvada tomonidan olib borilgan tadqiqotlarda tojlanish yuqori kuchlanishli o'zgaruvchan hamda o'zgaras tok liniyalarni loyihalash va ekspluatatsiya qilishda hisobga olinishi zarur bo'lgan muhim omil sifatida ko'rsatilgan [1]. Zamonaviy tadqiqotlarda esa tojlanish dissipativ va nohiziqli hodisa sifatida qaralib, uning yuzaga kelishi liniyada qo'shimcha aktiv energiya yo'qotishlari va elektr parametrlarining mahalliy o'zgarishiga sabab bo'lishi ta'kidlangan [2]. Tojlanish yo'qotishlarining muhim xususiyati ularning bir nechta o'zaro bog'liq omillar ta'sirida shakllanishidir. Ishchi kuchlanish, o'tkazgich radiusi, fazalararo masofa, o'tkazgichlar tutami konfiguratsiyasi va sirt holati elektr-geometrik omillarni tashkil etsa, havo harorati, namlik, atmosfera bosimi, yog'ingarchilik va shamol meteorologik omillar sifatida tojlanish xarakteristikalariga ta'sir ko'rsatadi. Bousiou va boshqalar tomonidan ACSR turidagi real o'tkazgichlarda o'tkazgich geometriyasi hamda atmosfera sharoitlarining tojlanish boshlanish maydoniga kompleks ta'siri miqdoriy jihatdan baholangan [3]. Riba va Moreno-Eguilaz esa tojlanish yo'qotishlari liniya konfiguratsiyasi, o'tkazgich geometriyasi, sirt holati, ishchi kuchlanish va ob-havo sharoitlariga sezilarli bog'liqligini qayd etgan [4]. Yuqoridagi tadqiqotlar tahlili shuni ko'rsatadiki, tojlanish yo'qotishlarini faqat bitta elektr yoki meteorologik parametr bilan izohlash yetarli emas. Chunki elektr maydon kuchlanganligi, o'tkazgich geometriyasi, sirt holati, atmosfera namligi, harorat, bosim va yog'ingarchilik kabi parametrlar o'zaro bog'liq holda tojlanishning boshlanish chegarasi va rivojlanish intensivligini belgilaydi [2–7]. Shu sababli mazkur tadqiqotda tojlanish yo'qotishlarining elektr, geometrik, meteorologik va ekspluatatsion omillarga bog'liq ko'p omilli xususiyatlarini kompleks tahlil qilish, dominant omillarni aniqlash hamda tojlanish yo'qotishlarini kamaytirish qonuniyatlarini ilmiy asoslash asosiy tadqiqot yo'nalishi sifatida qabul qilinadi.

2. Materiallar va usullar (Methods and materials)

Mazkur bo'limda yuqori kuchlanishli havo elektr uzatish liniyalarida tojlanish yo'qotishlarini ko'p omilli jarayon sifatida tadqiq etishning metodik asoslari ishlab chiqildi. Avvalgi kuzatuvlarda elektr maydon kuchlanganligi, liniya kuchlanishi, o'tkazgich parametrlari hamda atmosfera ko'rsatkichlarining vaqt bo'yicha o'zgarishi alohida baholangan bo'lsa, ushbu bosqichda mazkur parametrlar yagona omillar fazosiga birlashtirildi. Tadqiqotning asosiy metodologik g'oyasi tojlanishni bitta sababga bog'lash emas, balki elektr, geometrik, meteorologik va ekspluatatsion omillarning birgalikdagi hamda o'zaro ta'sirini miqdoriy jihatdan ajratishdan iborat. Bunday yondashuv tojlanishning qachon kuchayishi, qaysi kombinatsiyadagi omillar kritik holatni yuzaga keltirishi va qaysi boshqaruv yoki konstruktiv chora yo'qotishni eng samarali kamaytirishini aniqlashga imkon beradi [1–3]. Ko'p omilli tahlil uchun dastlabki ma'lumotlar to'rtta funksional guruhga ajratildi: elektr omillar, geometrik omillar, meteorologik omillar va ekspluatatsion omillar. Elektr omillar guruhiga faza kuchlanishi, liniya toki, aktiv va reaktiv yuklama, o'tkazgich sirtidagi elektr maydon ko'rsatkichi hamda rejimning barqarorlik darajasi kiritildi. Geometrik guruh o'tkazgich radiusi yoki diametri, fazalararo masofa, faza tarkibi, tutam mavjud bo'lsa uning geometriyasi, o'tkazgichning osilish balandligi va mahalliy geometrik notekisliklarni ifodalaydi. Meteorologik guruh harorat, nisbiy namlik, atmosfera bosimi, shamol va yog'ingarchilik holatini qamrab oladi. Ekspluatatsion guruh esa o'tkazgich sirtining ifloslanishi, namlanishi, eskirish alomatlari, armatura va ulanish nuqtalaridagi mahalliy maydon kuchayishi kabi holatlarni tavsiflaydi.

Ko'p omilli tahlilda faqat elektr maydonning mutlaq qiymatini emas, uning tojlanish boshlanish chegarasiga nisbatan qanchalik yaqin yoki undan qanchalik yuqori ekanini baholash maqsadga muvofiq. Shu sababli sirt elektr maydoni E_s va tegishli sharoit uchun aniqlangan tojlanish boshlanish maydoni E_b nisbatiga asoslangan o'lchamsiz faollik koeffitsiyenti 1-ifodada kiritiladi:

$$K_c = \frac{E_s}{E_{si}} \quad (1)$$

Bu yerda $K_c < 1$ bo'lganda barqaror tojlanish boshlanish chegarasidan past rejim, $K_c \approx 1$ bo'lganda chegaraviy zona, $K_c > 1$ bo'lganda esa tojlanish faolligi ortishi mumkin bo'lgan rejim sifatida qaraladi. Mazkur mezon mutlaq elektr maydonni atmosfera va sirt sharoitiga mos kritik qiymat bilan qiyoslashga imkon beradi. Amaliy ma'lumotlarda aniq chegara asbob xatosi, o'tkazgich sirtining notekisligi va qisqa muddatli impuls hodisalari sababli interval ko'rinishida baholanadi [2, 3]. Faollik koeffitsiyenti mustaqil yakuniy natija sifatida emas, balki quvvat yo'qotishi va meteorologik parametrlar bilan birgalikda tahlil qilinadi. Bu, masalan, K_c bir xil bo'lgan ikki holatda nisbiy namlik yoki sirt ifloslanishi turlicha bo'lsa, tojlanish yo'qotishining nima sababdan bir xil chiqmasligini tushuntirish imkonini beradi. Tojlanish yo'qotishlarining turli omillarga bog'liqligini miqdoriy ajratish uchun ikkinchi tartibli ko'p omilli regressiya modeli qabul qilinadi. Modelda chiziqli ta'sirlar bilan birga omillararo juft o'zaro ta'sir va nohiziqliklarni ifodalovchi kvadratik hadlar ham mavjud:



$$P_{toj} = \beta_0 + \sum \beta_i x_i + \sum \beta_{ij} x_i \cdot x_j + \sum \beta_{ii} (x_i)^2 + \varepsilon \quad (2)$$

Bu yerda P_{toj} – normallashtirilgan tojlanish quvvat yo‘qotishi, β_0 – erkin had, β_i – alohida omillarning chiziqli ta‘sir koeffitsiyentlari; β_{ij} – ikki omilning birgalikdagi ta‘sirini ifodalovchi koeffitsiyentlar; β_{ii} – nochiziqli javob koeffitsiyentlari; ε – model bilan tushuntirilmagan qoldiq komponent. Model tarkibi fizik mazmunga ega bo‘lmagan barcha mumkin bo‘lgan kombinatsiyalar bilan ortiqcha murakkablashtirilmaydi. Faqat tojlanish mexanizmi bilan asoslanadigan o‘zaro ta‘sirlar tanlanadi. Tojlanish quvvat yo‘qotishi faqat bir momentdagi quvvat qiymati bilan cheklanmaydi. Eksploatatsion samarani baholashda kuzatuv davrida to‘plangan elektr energiyasi yo‘qotishi aniqlanadi. Diskret monitoring ma‘lumotlari uchun integral yig‘indi ko‘rinishida quyidagicha hisoblanadi.

$$W_{toj} = \sum_k P_{toj} \cdot \Delta t_k \quad (3)$$

bu yerda: W_{toj} – tahlil intervalida tojlanish tufayli yo‘qotilgan elektr energiyasi; P_{toj} – k-vaqt oralig‘idagi tojlanish quvvat yo‘qotishi; Δt_k – tegishli interval davomiyligi. Vaqt qadami bir xil bo‘lsa, ifoda oddiy yig‘indiga aylanadi. Ushbu yondashuv qisqa muddatli yuqori tojlanish hodisasi bilan uzoq davom etuvchi o‘rtacha tojlanishning energetik natijasini bir xil mezonda qiyoslashga imkon beradi. Umumiy uzatilgan energiyaga nisbatan tojlanish yo‘qotishining ulushi quyidagi ko‘rsatkich bilan ifodalanadi:

$$\eta_{toj} = \frac{W_{toj}}{W_{ee}} \cdot 100\% \quad (4)$$

Bu yerda W_{ee} – shu davrda liniya orqali uzatilgan elektr energiyasi. Nisbiy ko‘rsatkich turli yuklama davrlarini yoki turli liniya uchastkalarini mutlaq quvvatdan mustaqilroq qiyoslash imkonini beradi. Tadqiqotning umumiy metodik ketma-ketligi monitoring va pasport ma‘lumotlarini birlashtirishdan boshlanib, sifat nazorati, o‘lchamsizlashtirish, ko‘p omilli modellash, sezgirlik tahlili, vaqt-hududiy integrallash va kamaytirish ssenariylarini qiyoslash bosqichlari orqali amalga oshiriladi. Metodologiyani muhim xususiyati shundaki, statistik model fizik jarayonni almashirmaydi. U fizik qonuniyatlar asosida tanlangan omillar orasidagi ta‘sir kuchini ma‘lumotlar yordamida quyidagi 1-rasmda keltiriladi.

Fazalarni optimal qayta fazalash algoritmining ilmiy-metodik ketma-ketligi:

1. Elektr tarmog‘i va yuklama parametrlarini shakllantirish
2. Dastlabki faza yuklamalari va nosimmetriyani hisoblash
3. Qayta fazalash mumkin bo‘lgan konfiguratsiyalarni shakllantirish
4. Nosimmetriyaning ruxsat etilgan chegarasini belgilash
5. Qayta ulashlar sonining global minimumini aniqlash
6. Minimal qayta ulashlar qatlamidagi barcha konfiguratsiyalarni nolinear elektr rejimi bo‘yicha hisoblash
7. Aktiv quvvat isrofi, faza kuchlanishlari va neytral tok bo‘yicha variantlarni taqqoslash
8. Minimal aktiv quvvat isrofini beruvchi optimal konfiguratsiyani tanlash
9. Optimal yechimning sezgirlik tahlili va amaliy samaradorligini baholash
10. Natijalarni taqqoslash va taklif qilingan yondashuvning samaradorligini asoslash

3. Natijalar (Results)

Tojlanish jarayonining energetik ko‘rsatkichi bitta omilning absolyut qiymatidan ko‘ra, omillar kombinatsiyasining kritik sohaga yaqinlashishi bilan aniqlanadi.

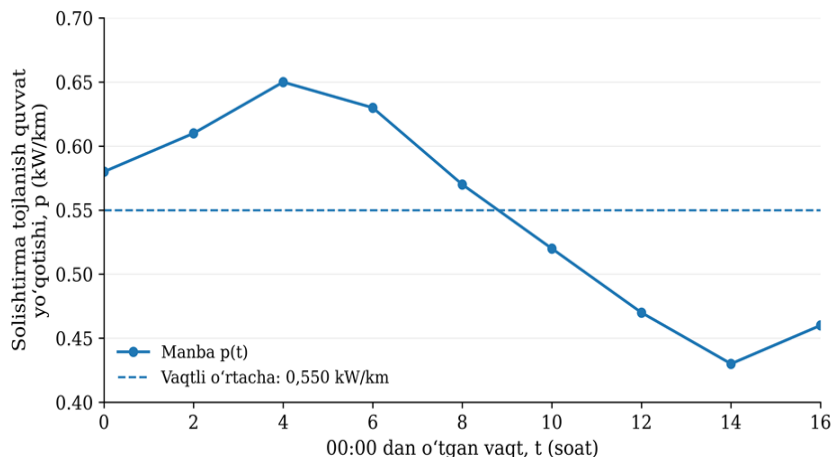
Yuqori kuchlanishli havo elektr uzatish liniyalarida sodir bo‘ladigan tojlanish hodisasi hamda uning ta‘sirida quvvat va elektr energiyasi yo‘qotishlarining hosil bo‘lish mexanizmlarini monitoring ma‘lumotlari asosida nazariy jihatdan o‘rganish murakkab ilmiy-texnik masalalardan biridir. Ushbu masalaning yechimi elektr energetika tizimlarida energiyani uzatish jarayonlarining fizik mohiyatini chuqur tadqiq etishni taqozo qiladi. Tojlanish o‘tkazgich sirtidagi elektr maydon kuchlanganligi kritik chegaradan ortganida gaz muhitining qisman ionlanishi bilan izohlanadi. Natijada yuqori kuchlanishli elektr uzatish liniyalarida noxiziqli xususiyatga ega, liniya elementlari hamda vaqt bo‘yicha o‘zgarib turadigan energiya yo‘qotishlari yuzaga keladi. Ushbu yo‘qotishlar elektr tarmog‘ining konstruktiv tuzilishi va parametrlari, o‘tkazgichlarning geometrik joylashuvi, fazalar orasidagi masofa, kuchlanish qiymatlari, yuklama rejimlari, shuningdek, atmosfera muhitining fizik holati bilan murakkab funksional bog‘lanishga ega.

Olib borilgan o‘rganishlar natijasida tungi soat 00:00–16:00 oralig‘idagi to‘qqizta nuqtada

yo'qotish maksimumi 04:00 da 0,65 kW/km, minimumi 14:00 da 0,43 kW/km deb qabul qilindi [1–3]. Amplituda 0,22 kW/km, maksimumga nisbatan pasayish 33,85 % dir. Bu o'zgarish vaqtli rejimlar farqini ifodalaydi, amalga oshirilgan tejash tadbirining natijasi emas. Ma'lumotlar to'liq sutkani emas, 16 soatlik fragmentni qamrab oladi. Ikki soatlik qadamdagi sakkizta interval uchun trapetsiyalar yig'indisi va vaqt bo'yicha o'rtacha quvvat quyidagi qiymatlarni berdi:

$$w_{\text{toj},0-16} = \sum_{i=1}^8 \frac{p_i + p_{i+1}}{2} (t_{i+1} - t_i) = 8.800 \text{ kWh/km} \quad (5)$$

$$\bar{p}_{\text{toj},0-16} = \frac{w_{\text{toj},0-16}}{16 \text{ h}} = 0.550 \text{ kW/km} \quad (6)$$

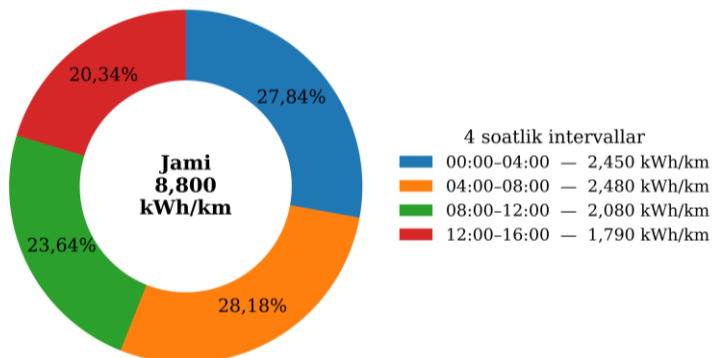


1-rasm. 16 soatlik fragmentda solishtirma tojlanish quvvati va vaqt bo'yicha o'rtacha qiymat
Fig.1. Specific corona power loss and its time-averaged value over a 16-hour interval

Mazkur rasm natijalariga ko'ra, elektr maydon kuchlanganligi taxminan 18,5 kV/sm dan 25,7 kV/cm gacha ortganda tojlanish quvvat yo'qotishi 0,48 kW/km dan 0,90 kW/km gacha oshadi. Demak, ko'rib chiqilgan oraliqda elektr maydon kuchlanganligining qariyb 39 % ga ortishi tojlanish yo'qotishining taxminan 87,5 % ga ko'payishi bilan kuzatiladi. Bu holat tojlanish jarayonining elektr maydon intensivligiga yuqori sezgiriligini ko'rsatadi. 8,800 kWh/km natija aynan mavjud vaqt oralig'iga tegishli. 0,550 kW/km o'rtacha qiymat interval davomiyligi bilan og'irlashtirilgan.

Integral energiya tahlilini vaqt bo'yicha aniqroq ifodalash maqsadida kuzatuv davri to'rtta teng davomiylikdagi, ya'ni har biri 4 soatdan iborat bo'lgan vaqt oralig'iga ajratildi. Bunday guruhlash yondashuvi umumiy energiya yo'qotishlarining sutka davomida qanday taqsimlanganini ko'rsatish, shuningdek, qaysi vaqt oralig'ida elektr energiyasi yo'qotishlari nisbatan yuqori ekanligini aniqlash imkonini beradi. Har bir 4 soatlik interval uchun tegishli davrda hisoblangan energiya yo'qotishlari alohida jamlanib, keyinchalik ularning sutkalik integral qiymatdagi ulushi aniqlanadi. Shu orqali vaqt omilining umumiy energiya yo'qotishlariga ta'sirini taqqoslash imkoniyati yaratiladi.

Diagrammada keltirilgan foizli qiymatlar hisoblangan energiya yo'qotishlari yig'indisiga nisbatan aniqlangan bo'lib, ular tegishli vaqt oralig'ining umumiy energiya yo'qotishlaridagi ulushini ifodalaydi. Bunda manba ma'lumotlarida bevosita mavjud bo'lmagan yoki alohida hisoblanmagan «namlik hissasi», «elektr maydon hissasi» va shu kabi qo'shimcha omillarga foizli ulushlar birlashtirilmadi. Shu sababli diagrammadagi har bir sektor faqat tegishli 4 soatlik vaqt oralig'ida aniqlangan energiya yo'qotishlari asosida shakllantirildi. Mazkur yondashuv diagrammadagi natijalarning dastlabki hisoblash ma'lumotlariga mosligini saqlab, energiya yo'qotishlarining vaqt bo'yicha taqsimlanishini xolis va qayta tekshiriladigan shaklda ifodalashga xizmat qiladi.

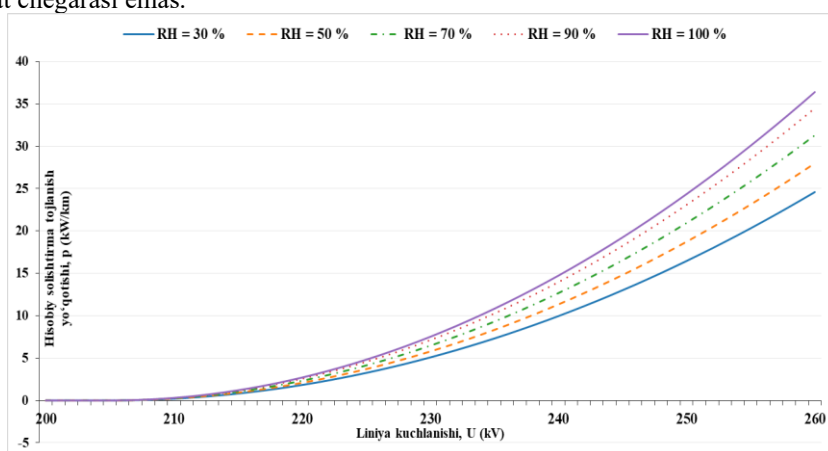


2-rasm. 00:00–16:00 fragmentidagi 8,800 kWh/km energiyaning 4 soatlik intervallarga taqsimlanishi
Fig.2. Distribution of 8.800 kWh/km of energy over 4-hour intervals within the 00:00–16:00 period

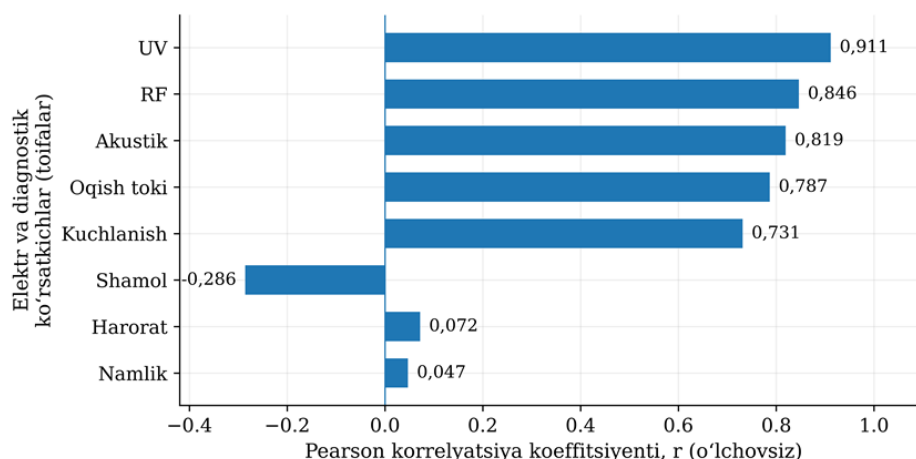
Jadval 1. Aylana diagrammaning hisobiy asoslari.**Table 1.** Calculation basis of the pie chart

Vaqt oralig'i	Energiya, kWh/km	Jami energiyadagi ulush, %
00:00–04:00	2,450	27,84
04:00–08:00	2,480	28,18
08:00–12:00	2,080	23,64
12:00–16:00	1,790	20,34
Jami	8,800	100,00

Eng katta ulush 04:00–08:00 intervaliga to'g'ri keladi: 2,480 kWh/km yoki 28,18 %. 12:00–16:00 intervalida 1,790 kWh/km yoki 20,34 % olindi. Dastlabki sakkiz soat jami energiyaning 56,02 % ini tashkil etdi. Bu natija nazoratni vaqt bo'yicha rejalashtirish uchun tavsifiy asos bo'la oladi, biroq faqat bitta fragmentdan doimiy sutkalik qonuniyat chiqarilmaydi. Hisobiy matritsada kuchlanish oshgan sari yo'qotishning o'sish sur'ati tezlashadi. RH = 70 % holatida 210–220 kV kesmadagi o'rtacha sezgirlik 0,207841 (kW/km)/kV, 240–250 kV kesmada esa 0,829285 (kW/km)/kV ni tashkil etadi. Bu qavariq, noxiziqli hisobiy javobni ifodalaydi. 200–260 kV oralig'i modelni tekshirish diapazonidir, ekspluatatsion ruxsat chegarasi emas.

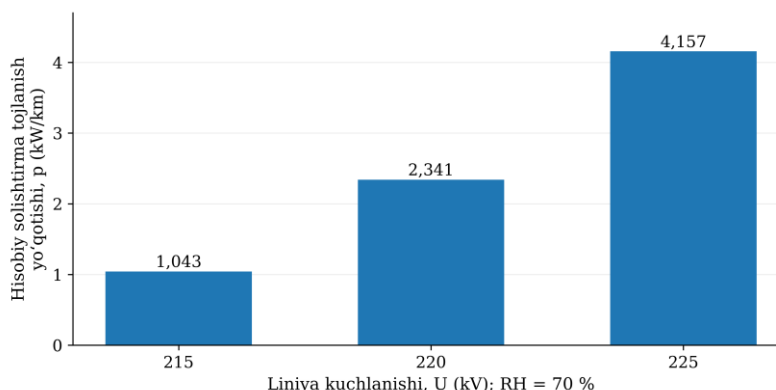
**3-rasm.** Turli nisbiy namliklarda hisobiy solishtirma tojlanish yo'qotishining kuchlanishga bog'lanishi.**Fig.3.** Voltage dependence of the calculated specific corona loss at different relative humidity levels

Tayyor korrelyatsiya matritsasida tojlanish yo'qotishi bilan eng katta juft bog'lanish UV kanalida 0,911320, RF kanalida 0,846491 va akustik kanalda 0,819282 bo'lgan. Oqish toki uchun 0,786770, kuchlanish uchun 0,731480 qayd etilgan.

**4-rasm.** Elektr, meteorologik va diagnostik ko'rsatkichlarning tojlanish yo'qotishi bilan juft korrelyatsiyasi**Fig.4.** Pairwise correlation of electrical, meteorological, and diagnostic indicators with corona losses.

RF va akustik kanal o'rtasidagi 0,988124 korrelyatsiya ularning juda o'xshash o'zgarishini ham ko'rsatadi. Shuning uchun yuqori juft koeffitsiyentlarni mustaqil axborot hissalariga aylantirish yoki

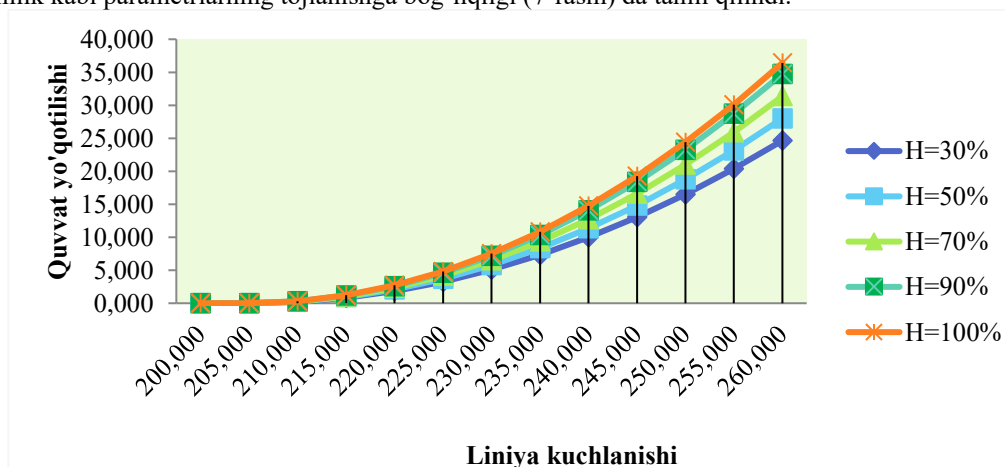
foiz sifatida qo'shish noto'g'ri. Amaliy modelda takroriy axborot va multikollinearlik nazorat qilinishi lozim. Nisbiy namlik uchun 0,046802 qiymat faqat ushbu qatorda zaif chiziqli assotsiatsiyani bildiradi. Bundan namlik ta'siri mavjud emasligi ham, uning noxiziqli ta'siri isbotlanganligi ham kelib chiqmaydi. Bir xil RH = 70 % sharoitida 220 dan 215 kV ga o'tish hisobiy solishtirma yo'qotishni 2,340814 dan 1,042676 kW/km gacha, ya'ni 55,457 % kamaytiradi. 225 kV holatida esa 4,156823 kW/km olinadi.



5-rasm. Bir xil nisbiy namlikda uchta hisobiy kuchlanish rejimining qiyosi

Fig.5. Comparison of three calculated voltage regimes at the same relative humidity

Bir xil uzatlayotgan to'liq quvvat va aktiv qarshilik shartida kuchlanishni 220 dan 215 kV ga pasaytirish tokni oshiradi; Joul yo'qotishlari taxminan 4,71 % ortadi. Shuning uchun faqat to'jlanish minimumini emas, liniyaning jami aktiv yo'qotishlari va rejim cheklavlarini birgalikda tekshirish zarur. Mavjud materialdan qayta tiklanadigan natijalar–16 soat uchun 8,800 kWh/km integral energiya, 48 nuqtada gibrid hisobning 0,291055 kW/km RMSE qiymati va U–RH matritsasining kuchlanishga nisbatan tezlashuvchi hisobiy javobidir. Kamaytirishning asoslangan yo'nalishi sirt maydonini cheklash, sirt holatini nazorat qilish hamda rejimni jami yo'qotishlar mezoni bo'yicha baholashdan iborat. To'jlanish monitoringida elektr rejim parametrlari 32 % tarkibiy ulush bilan asosiy diagnostik manba hisoblanadi. Elektromagnit monitoring 30 %, akustik monitoring 20 % va meteorologik korreksiya 15 % ulush bilan to'jlanish holatini kompleks baholashni ta'minlaydi. Monitoring vaqtida kuchlanish, namlik kabi parametrlarning to'jlanishga bog'liqligi (7-rasm) da tahlil qilindi.

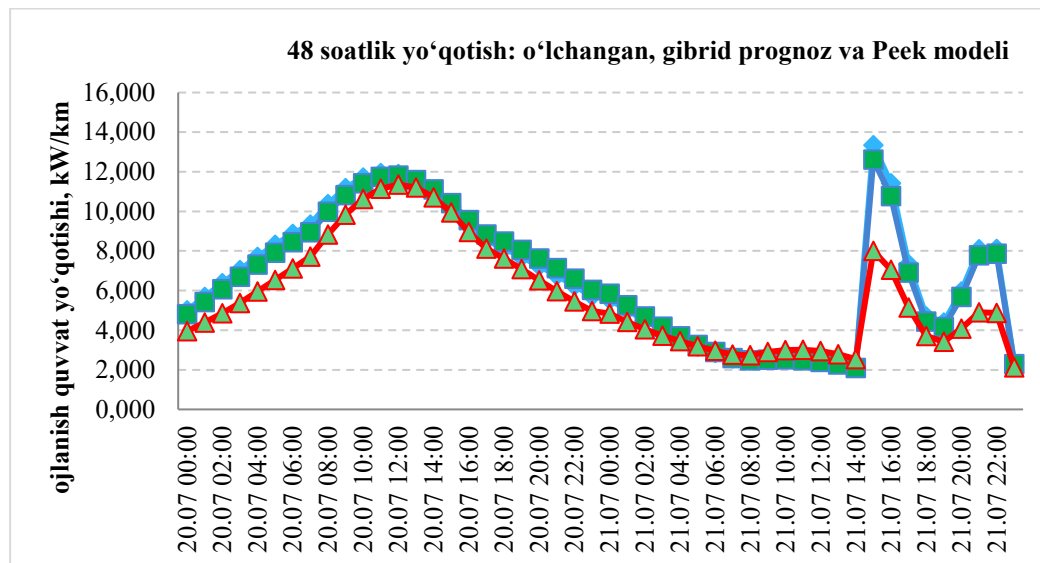


6-rasm. Kuchlanish va namlikning to'jlanish yo'qotishlari sezgirligiga bog'liqlik matritsasi

Fig.6. Matrix of corona-loss sensitivity dependence on voltage and humidity

Grafikdan ko'rinadiki, liniya kuchlanishi 210 kV dan oshgach to'jlanish quvvat yo'qotishlari keskin ortadi. Nisbiy namlik oshishi bilan yo'qotishlar ham ko'payib, eng yuqori qiymat H=100% holatida kuzatiladi. To'jlanish razryadi paytida hosil bo'ladigan qisqa davomli elektromagnit impulsar radiochastota diapazonida tarqaladi. Ushbu signallarning amplitudasi, chastotasi, impulsar soni va spektral zichligi orqali to'jlanishning mavjudligi hamda rivojlanish darajasi aniqlanadi. Shu bilan birga quruq va nam sharoitda monitoring o'tkazish ham bevosita quyidagi (4-rasm) dagi grafiklarni olish imkonini beradi. Grafik to'jlanish razryadi hosil qiladigan radiochastotali signal amplitudasining chastota bo'yicha o'zgarishini ifodalaydi. Nam sharoitda signal amplitudasi quruq sharoitga nisbatan yuqori bo'lib, bu o'tkazgich sirtidagi namlik ta'sirida to'jlanish intensivligining kuchayishini ko'rsatadi. To'jlanish hodisasini monitoring qilishda ilmiy-analitik boshqaruv panelidan foydalanib, ma'lum bir vaqt oralig'ini qabul qilamiz. 2026-yilning 20–21-iyul kunlari davomida 48 soat oralig'ida

to'jlanish bilan bog'liq quvvat yo'qotishlarining o'lchangan qiymatlari, gibril bashoratlashtirish natijalari hamda nazariy Peek modeli bo'yicha hisoblangan qiymatlarini o'zaro taqqoslandi. Grafikdan ko'rinishicha, gibril bashoratlashtirish egri chizig'i o'lchangan ma'lumotlarning umumiy dinamikasi va keskin o'zgarishlarini yuqori darajada takrorlaydi. Ayniqsa, 20-iyulning kunduzgi soatlaridagi bosqichma-bosqich o'sish hamda 21-iyul soat 15:00 atrofida kuzatilgan keskin maksimum bashoratlashtirish modeli tomonidan yetarlicha aniq aks ettirilgan (7-rasm).



7-rasm. 48 soat davomida to'jlanish yo'qotishlarining o'lchangan qiymatlari, gibril prognoz natijalari va Peek modeli bo'yicha nazariy hisoblarning taqqoslanishi.

Fig. 7. Comparison of measured corona losses over 48 hours, hybrid forecasting results, and theoretical calculations based on the peek model

Grafikda 48 soat davomida o'lchangan to'jlanish yo'qotishlari gibril prognoz va Peek modeli natijalari bilan taqqoslangan. Gibril prognoz o'lchangan qiymatlarga yaqin bo'lib, keskin o'zgarishlarni Peek modeliga nisbatan aniqroq aks ettirgan.

4. Xulosa (Conclusion)

To'jlanish yo'qotishlarini kamaytirishning konstruktiv qonuniyatlari o'tkazgich va fazalar konfiguratsiyasini shunday muvofiqlashtirishga yo'naltiriladiki, bunda elektr maydonining mahalliy kuchayishi cheklanib, razryad boshlanishiga nisbatan zarur zaxira ta'minlansin. O'tkazgich radiusi, fazadagi tarkibiy o'tkazgichlar soni va ularning o'zaro joylashuvi shu sababli mustaqil emas, yagona geometrik tizimning bog'langan parametrlari sifatida ko'rib chiqilishi lozim. Sirt holatini yaxshilash choralarini baholashda esa faqat geometrik silliqlik bilan cheklanmasdan, uning namlanish xususiyatini ham hisobga olish zarur. Demak, konstruktiv yechimning maqbulligi bitta parametrlarning ortishi yoki kamayishi bilan emas, tegishli sharoitlarda hosil bo'ladigan maydon taqsimoti va razryad xususiyatlari bilan belgilanadi. Energetik baholash nuqtayi nazaridan to'jlanishning qisqa muddatli faollashuvini qayd etish bilan uning ekspluatatsion davrdagi energiya yo'qotishini aniqlash o'rtasida qat'iy metodologik farq saqlanishi kerak. Energiya yo'qotishi vaqt bo'yicha o'zgaruvchi aktiv quvvatning integral natijasi bo'lganligi sababli, kamaytirish choralarining samaradorligini faqat ayrim vaqt kesimlaridagi quvvat kamayishi bilan asoslash yetarli emas. Baholashga rejimlarning davomiyligi, ularning takrorlanishi va meteorologik sharoitlar bilan birgalikda yuzaga kelishi kiritilishi lozim. Shundan kelib chiqib, monitoringning yakuniy vazifasi razryad alomatlarini ko'paytirib qayd etish emas, balki ularni tekshiriladigan energetik ko'rsatkichlar bilan bog'lash, noaniqliklarni hisobga olish va texnik qarorlarning haqiqiy natijadorligini aniqlashdan iborat bo'lishi kerak. Umuman olganda, to'jlanish yo'qotishlarini kamaytirish masalasi alohida razryad intensivligini minimallashtirishdan kengroq bo'lib, elektr uzatish tizimining umumiy energiya samaradorligini ta'minlovchi cheklovli, ko'p mezonli optimallashtirish masalasi sifatida qo'yilishi lozim. Masalan, doimiy uzatiladigan aktiv quvvat va quvvat koeffitsiyenti sharoitida kuchlanishni pasaytirish tokning ortishini talab qiladi; shu sababli to'jlanish bo'yicha erishiladigan yutuq boshqa aktiv yo'qotishlarning o'zgarishidan ajratilgan holda baholanmasligi kerak. Binobarin, asosiy umumlashtiruvchi xulosa shundan iboratki, samarali kamaytirish strategiyasi elektr maydonini konstruktiv muvofiqlashtirish, o'tkazgich sirtining ekspluatatsion holatini boshqarish va rejim parametrlarini monitoring ma'lumotlari asosida maqbullashtirishning o'zaro uyg'unligiga ta'yanishi zarur.



ADABIYOTLAR

1. Maruvada P. S. Характеристики коронного разряда на высоковольтных линиях электропередачи.–Болдок, Великобритания: Research Studies Press, 2000.–310 с.–ISBN: 0-86380-254-0.
2. Stracqualursi E., Araneo R., Celozzi S. Явление коронного разряда в воздушных линиях электропередачи: критический обзор наиболее распространённых и надёжных существующих моделей // *Energies*– 2021.– Т. 14, № 20.– Ст. 6612– Ссылка на публикацию.
3. Bousiou E. I., Mikropoulos P. N., Zagkanas V. N. Напряжённость электрического поля начала коронирования типовых проводов воздушных линий электропередачи при изменяющихся атмосферных условиях // *Electric Power Systems Research*.– 2020– Т. 178– Ст. 106032– Ссылка на публикацию.
4. Riba J.-R., Moreno-Eguilaz M. Анализ влияния потерь на корону на модели динамической оценки допустимой токовой нагрузки воздушных линий электропередачи // *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. –2025.–Т. 166. –Ст. 110546– Ссылка на публикацию.
5. Hu Q., Wang H., Wu W., Shu L., Wu Y., Jiang X. Влияние дождя на характеристики коронного разряда на одиночном проводе линии электропередачи переменного тока напряжением 110 кВ // *Electric Power Systems Research*.–2024.–Т.234.–Ст. 110530.– DOI: 10.1016/j.epsr.2024.110530.
6. Pfeiffer M., Schultz T., Hedtke S., Franck C. M. Объяснение влияния типа поверхности провода на характеристики коронного разряда в высоковольтных линиях постоянного тока в условиях влажной погоды // *Journal of Electrostatics*.–2016.–Т.79.–С.45–55–DOI: 10.1016/j.elstat.2015.12.003.
7. Llamó-Labori H. Новый метод расчёта потерь на корону для токоведущих проводов с учётом реальной несимметрии линии электропередачи // *The Journal of Engineering* –2022.–DOI: 10.1049/tje2.12155.

REFERENCES

1. Maruvada P.S. Corona Performance of High-Voltage Transmission Lines. Research Studies Press, Baldock, UK, 2000. 310 p. ISBN: 0-86380-254-0.
2. Stracqualursi E., Araneo R., Celozzi S. The Corona Phenomenon in Overhead Lines: Critical Overview of Most Common and Reliable Available Models. *Energies*. 2021;14(20):6612. <https://www.mdpi.com/1996-1073/14/20/6612>
3. Bousiou E.I., Mikropoulos P.N., Zagkanas V.N. Corona inception field of typical overhead line conductors under variable atmospheric conditions. *Electric Power Systems Research*. 2020;178:106032. https://www.researchgate.net/publication/336184217_Corona_inception_field_of_typical_overhead_line_conductors_under_variable_atmospheric_conditions
4. Riba J.-R., Moreno-Eguilaz M. Analyzing the effect of corona losses on dynamic line rating models for overhead transmission lines. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2025;166:110546. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142061525000973>
5. Hu Q., Wang H., Wu W., Shu L., Wu Y., Jiang X. Effects of rainfall on the corona characteristics of AC single conductor of 110 kV transmission lines. *Electric Power Systems Research*. 2024;234:110530. DOI: 10.1016/j.epsr.2024.110530.
6. Pfeiffer M., Schultz T., Hedtke S., Franck C.M. Explaining the impact of conductor surface type on wet weather HVDC corona characteristics. *Journal of Electrostatics*. 2016;79:45–55. DOI: 10.1016/j.elstat.2015.12.003.
7. Llamó-Labori H. A new method to calculate corona losses for active conductors considering real transmission line unbalance. *The Journal of Engineering*. 2022. DOI: 10.1049/tje2.12155.