



Yuqori kuchlanishli havo elektr uzatish liniyalarida tojlanish hodisasini monitoring ma'lumotlari asosida tahlil qilish

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: Yuqori kuchlanishli havo elektr uzatish liniyalarida yuzaga keladigan tojlanish hodisasi elektr energiyasining qo'shimcha aktiv yo'qotishlariga, elektromagnit va akustik shovqinlarning ortishiga hamda liniyaning umumiy ekspluatatsion samaradorligining pasayishiga olib keladi. Mazkur hodisaning intensivligi o'tkazgichning geometrik o'lchamlari, sirt holati, ishchi kuchlanish darajasi va atmosfera omillari bilan bevosita belgilanadi. Elektr uzatish tarmoqlarida yuklama darajasining ortishi, energiya samaradorligi va ishonchlikka qo'yilayotgan talablarning kuchayishi sharoitida tojlanish jarayonini monitoring ma'lumotlari asosida aniqlash va baholash muhim ilmiy-amaliy ahamiyat kasb etadi. Chunki bunday yondashuv tojlanish bilan bog'liq yo'qotishlarni aniqlashtirish, ta'sir etuvchi omillarni ishonchli baholash va elektr uzatish liniyalarining ish rejimlarini takomillashtirish imkonini beradi.

Maqsad: yuqori kuchlanishli havo elektr uzatish liniyalarida yuzaga keladigan tojlanish hodisasini monitoring tizimlaridan olingan ma'lumotlar asosida aniqlash, uning yuzaga kelish shartlari va intensivligini tahlil qilish hamda elektr energiyasi yo'qotishlariga ta'sirini baholashdan iborat.

Usullar: Tadqiqotda yuqori kuchlanishli havo elektr uzatish liniyalaridagi tojlanish yo'qotishlarini baholash uchun monitoring ma'lumotlarini yig'ish va tahlil qilish, matematik modellash, tajribaviy kuzatuv hamda statistik ishlov berish usullaridan foydalanildi. Mazkur usullar majmui tojlanish hodisasini yuqori kuchlanishli havo elektr uzatish liniyalarining real ish sharoitlari asosida kompleks baholash, uning elektr maydon kuchlanganligi, liniya parametrlari va tashqi muhit omillariga bog'liqligini ishonchli aniqlash imkonini beradi.

Natijalar: monitoring ma'lumotlari asosida yuqori kuchlanishli havo elektr uzatish liniyalarida tojlanish hodisasining yuzaga kelishi va intensivligi elektr maydon kuchlanganligi, o'tkazgich diametri hamda atmosfera sharoitlariga bog'liq holda o'zgarishi aniqlanib, uning elektr energiyasi yo'qotishlariga ta'siri ilmiy jihatdan baholandi.

Kalit so'zlar: Tojlanish hodisasi, yuqori kuchlanishli havo elektr uzatish liniyalari, elektr maydon kuchlanganligi, elektr energiyasi yo'qotishlari, monitoring tizimi, o'tkazgich diametri, atmosfera sharoitlari.

Анализ коронного разряда на высоковольтных воздушных линиях электропередачи на основе

данных мониторинга

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

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

² Старший преподаватель., Навоийский государственный горно-технологический университет, Навоий, 210100, Узбекистан; info@ndki.uz <https://orcid.org/0000-0002-4481-874X>

Актуальность: Коронный разряд в высоковольтных воздушных линиях электропередачи приводит к дополнительным потерям активной мощности и электроэнергии, росту электромагнитных и акустических помех, а также к снижению общей эксплуатационной эффективности линии. Интенсивность данного явления непосредственно определяется геометрическими параметрами проводника, состоянием его поверхности, уровнем рабочего напряжения и атмосферными условиями. В условиях роста нагрузок в электрических сетях и ужесточения требований к энергоэффективности и надёжности электроснабжения выявление и оценка коронного разряда на основе данных мониторинга приобретают важное научно-практическое значение. Такой подход позволяет более точно определять потери, связанные с короной, достоверно оценивать влияние внешних и технических факторов и совершенствовать режимы работы линий электропередачи.

Цель: заключается в определении коронного разряда, возникающего на высоковольтных воздушных линиях электропередачи, на основе данных, полученных из систем мониторинга, анализе условий его возникновения и интенсивности, а также оценке его влияния на потери электрической энергии.

Методы: В исследовании для оценки потерь мощности на коронный разряд в высоковольтных воздушных линиях электропередачи использованы методы сбора и анализа данных мониторинга, математического моделирования, экспериментальных наблюдений и статистической обработки данных. Такой комплекс методов позволяет рассматривать коронный разряд в высоковольтных воздушных линиях электропередачи не только с теоретической, но и с практической точки зрения, с учётом реальных эксплуатационных данных. Кроме того, методология ориентирована на выявление зависимости интенсивности коро-

For citation: A.N. Tovbayev, I.B. Tog'ayev. Analysis of corona discharge in high-voltage overhead power transmission lines based on monitoring data. Scientific and technical journal of Problems of Energy and Sources Saving, 2026, no. 3, pp. 147-156.

<https://doi.org/10.5281/zenodo.23219686>

Received: 17.02.2026

Revised: 25.03.2026

Accepted: 20.04.2026

Published: 25.09.2026

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/>).

ны от напряжённости электрического поля, параметров линии и факторов внешней среды, что подтверждает её научную обоснованность и прикладную значимость.

Результаты: На основе данных мониторинга установлено, что возникновение и интенсивность коронного разряда на высоковольтных воздушных линиях электропередачи изменяются в зависимости от напряжённости электрического поля, диаметра проводника и атмосферных условий, а его влияние на потери электрической энергии оценено с научной точки зрения.

Ключевые слова: Коронный разряд, высоковольтные воздушные линии электропередачи, напряжённость электрического поля, потери электрической энергии, система мониторинга, диаметр проводника, атмосферные условия.

Analysis of corona discharge in high-voltage overhead power transmission lines based on monitoring data

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>

² Sen. Teach., Navoi State University of Mining and Technology University, Navoi, 210100, Uzbekistan; info@ndki.uz
<https://orcid.org/0000-0002-4481-874X>

Relevance: Corona discharge in high-voltage overhead transmission lines causes additional active power and energy losses, increases electromagnetic and acoustic noise, and reduces the overall operational efficiency of the line. The intensity of this phenomenon is directly determined by conductor geometry, surface condition, operating voltage level, and atmospheric factors. Under conditions of increasing network loading and stricter requirements for energy efficiency and reliability, the detection and assessment of corona based on monitoring data has strong scientific and practical significance. This approach makes it possible to identify corona-related losses more accurately, evaluate the influence of external and technical factors more reliably, and improve the operating modes of transmission lines.

Aim: It consists in identifying the corona discharge occurring in high-voltage overhead power transmission lines based on data obtained from monitoring systems, analyzing the conditions of its occurrence and intensity, and evaluating its impact on electrical energy losses.

Methods: The study employed monitoring data collection and analysis, mathematical modeling, experimental observations, and statistical data processing to assess corona power losses in high-voltage overhead transmission lines. This combination of methods makes it possible to examine corona discharge in high-voltage overhead transmission lines from both theoretical and practical perspectives based on real operating data. In addition, the methodology is aimed at identifying the dependence of corona intensity on electric field strength, line parameters, and environmental factors, which confirms its scientific validity and practical relevance.

Results: Based on monitoring data, it was determined that the occurrence and intensity of corona discharge in high-voltage overhead power transmission lines vary depending on the electric field intensity, conductor diameter, and atmospheric conditions, and its impact on electrical energy losses was scientifically evaluated.

Key words: Corona discharge, high-voltage overhead power transmission lines, electric field intensity, electrical energy losses, monitoring system, conductor diameter, atmospheric conditions.

1. Kirish (Introduction)

Elektr energetika tizimlarida yuqori kuchlanishli havo elektr uzatish liniyalari elektr energiyasini uzoq masofalarga uzatishda muhim texnologik element hisoblanadi. Bunday liniyalar ekspluatatsiyasi jarayonida o'tkazgich sirtida elektr maydon kuchlanganligining ortishi natijasida gaz muhitida ionlanish jarayoni yuzaga kelib, tojlanish hodisasi paydo bo'ladi. Mazkur hodisa elektr energiyasining qo'shimcha aktiv yo'qotishlariga, elektromagnit va akustik shovqinlarning yuzaga kelishiga hamda elektr uzatish liniyalarining ekspluatatsiya samaradorligining pasayishiga olib keladi. Tojlanish jarayonining rivojlanish intensivligi o'tkazgichlarning konstruktiv-geometrik ko'rsatkichlari, elektr maydon taqsimoti, shuningdek tashqi muhitning meteorologik omillari bilan o'zaro bog'liq holda shakllanadi. Mazkur maqolada yuqori kuchlanishli havo elektr uzatish liniyalarida yuzaga keladigan tojlanish hodisasini monitoring tizimlaridan olingan ma'lumotlar asosida aniqlash va tahlil qilish masalasi ko'rib chiqilgan. Tadqiqot jarayonida monitoring ma'lumotlari (L-220 kV kuchlanishli Bessopan podstantsiyadan olingan ma'lumotlar) asosida elektr maydon kuchlanganligi, o'tkazgich diametri hamda atmosfera sharoitlarining tojlanish jarayoniga ta'siri tahlil qilinib, uning elektr energiyasi yo'qotishlariga ta'siri baholandi [1-3].

Shuningdek, yuqori kuchlanishli havo elektr uzatish liniyalarida yuzaga keladigan tojlanish hodisasining shakllanish xususiyatlari monitoring tizimlaridan olingan ma'lumotlar asosida kompleks tahlil qilindi. Tadqiqot jarayonida elektr maydon kuchlanganligining o'zgarishi, o'tkazgich parametrlarining ta'siri hamda atmosfera sharoitlarining tojlanish jarayoniga ta'siri o'rganildi. Olingan



monitoring ma'lumotlari asosida tojlanish intensivligining o'zgarish qonuniyatlari aniqlanib, uning elektr energiyasi yo'qotishlariga ta'siri ilmiy jihatdan tahlil qilindi [4-13].

2. Materiallar va usullar (Methods and materials)

Elektr energetika tizimida yuqori kuchlanishli havo elektr uzatish liniyalarining ekspluatatsiya jarayonida qayd etilgan monitoring ma'lumotlari, jumladan elektr maydon kuchlanganligi, liniya kuchlanishi, o'tkazgich parametrlari hamda atmosfera sharoitlariga oid ko'rsatkichlar qabul qilinadi. Ushbu ma'lumotlar asosida tojlanish jarayonining rivojlanish xususiyatlari hamda uning elektr energiyasi yo'qotishlariga ta'siri baholanadi. Monitoring ma'lumotlarini qayta ishlash jarayonida nazariy tahlil, matematik modellashirish hamda statistik baholash usullari qo'llaniladi. Mazkur tadqiqotda monitoring yondashuvi analitik hisoblash usulining o'rmini bosuvchi vosita sifatida emas, balki uning natijalarini haqiqiy ekspluatatsiya ma'lumotlari asosida aniqlashtiruvchi va tekshiruvchi usul sifatida qo'llanildi. Pik formulasi tojlanish yo'qotishlarining bazaviy hisobiy qiymatini beradi, monitoring tizimi orqali qayd etilgan liniya kuchlanishi, elektr maydon kuchlanganligi, harorat, atmosfera bosimi, nisbiy namlik, shamol tezligi va boshqa ko'rsatkichlar esa hisoblash natijalarini real sharoitga moslashtirish imkonini beradi. Monitoringning amaliy afzalligi tojlanish yo'qotishlarining vaqt va liniya uchastkalari bo'yicha o'zgarishini kuzatish, mahalliy tojlanish manbalarini aniqlash hamda tez o'zgaruvchi tashqi omillar ta'sirini hisobga olishdan iborat. Shuning uchun analitik hisoblash va monitoring ma'lumotlaridan birgalikda foydalanish tojlanish yo'qotishlarini baholash ishonchligini oshiradi.

Tojlanish hodisasining yuzaga kelish shartini aniqlash uchun o'tkazgich sirtidagi maksimal elektr maydon kuchlanganligi quyidagi 1-ifoda orqali aniqlanadi:

$$E_{\max} = \frac{2U}{r \ln\left(\frac{D}{r}\right)} \quad (1)$$

Bu yerda $E_{\max}$ —o'tkazgich sirtidagi maksimal elektr maydon kuchlanganligi kV/m, U—kuchlanish V, r—o'tkazgich radiusi sm yoki m, D—fazalar orasidagi o'rtacha masofa sm yoki m. (1)-ifoda Maksvell–Laplas elektrostatik maydon nazariyasi asosida olingan bo'lib, doiraviy kesimli, sirti silliq va o'zaro parallel joylashgan yakka o'tkazgichlar sirtidagi elektr maydon kuchlanganligini taqribiy aniqlash uchun qo'llaniladi. Formulaning asosiy qo'llanilish sharti fazalar orasidagi masofaning o'tkazgich radiusidan ancha katta bo'lishidir. Muhandislik hisoblarida fazalar orasidagi masofaning o'tkazgich radiusidan ancha katta bo'lganda taqribiy va aniq yechimlar o'rtasidagi farq 1 % dan oshmaydi. Shuningdek, o'tkazgich uzunligi D masofaga nisbatan juda katta, elektr maydoni kvazistatik, o'tkazgich sirti silliq va tojlanish natijasida hosil bo'ladigan fazoviy zaryadning maydonga ta'siri e'tiborga olmaslik darajasida kichik deb qabul qilinadi. Mazkur tadqiqotda formula 50 hz fazalar orasidagi masofaning o'tkazgich radiusidan ancha katta bo'lishi chastotali, 220–500 kV kuchlanishli havo elektr uzatish liniyalarining barqaror ish holatlarida qo'llanildi. Bog'lamli o'tkazgichlar, yomg'ir, muzlash, ifloslanish, tayanchlarning yaqinligi yoki kuchli tojlanish mavjud bo'lgan sharoitlarda ushbu ifoda o'zgarishsiz qo'llanilmaydi; bunday hollarda potensial koeffitsiyentlari, zaryadlarni modellashirish yoki chekli elementlar usulidan foydalanish talab etiladi.

Atmosfera sharoitlarining ta'sirini hisobga olish uchun havoning nisbiy zichligi quyidagi 2-ifoda orqali aniqlanadi:

$$\delta = \frac{3.92 p}{273 + t} \quad (2)$$

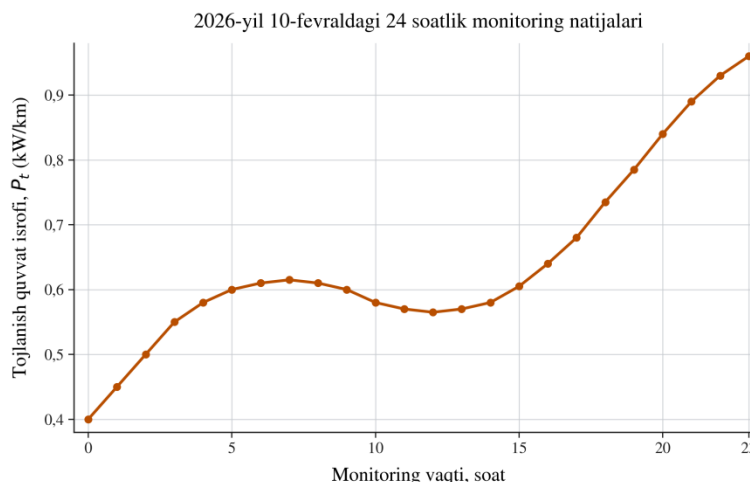
Bu yerda p—atmosfera bosimi Pa (mm.sim.ust.), t—havo harorati °C. Ushbu ifoda havoning nisbiy zichligini aniqlash uchun qo'llaniladi va tojlanish hodisasini baholashda muhim ahamiyatga ega. Chunki havo zichligi atmosfera bosimi va haroratga bog'liq holda o'zgaradi, bu esa o'tkazgich atrofidagi elektr mustahkamlikka bevosita ta'sir ko'rsatadi. Havo zichligi kamayganda ionlanish jarayoni yengillashadi va natijada tojlanish yuzaga kelish ehtimoli ortadi. Shu sababli mazkur koeffitsiyent yuqori kuchlanishli havo elektr uzatish liniyalarida tojlanishning boshlanish shartlarini hamda uning intensivligini aniqlashtirishda qo'llaniladi.

Monitoring ma'lumotlari asosida tojlanish natijasida yuzaga keladigan nisbiy quvvat yo'qotishlari quyidagi 3-ifoda yordamida baholandi:

$$\Delta P = k \cdot E_{\max} \cdot r \quad (3)$$

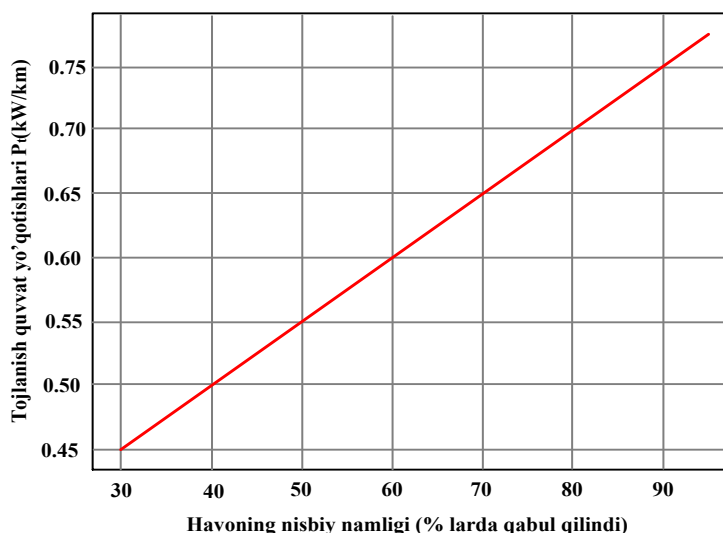
Bu yerda k—tojlanish jarayonining empirik xususiyatlarini hisobga oluvchi koeffitsient bo'lib, yuqori kuchlanishli havo elektr uzatish liniyalari uchun $k \approx 3 \cdot 10^{-12}$, ΔP —tojlanish natijasidagi quvvat yo'qotishlari W yoki kW, $E_{\max}$ —o'tkazgich sirtidagi maksimal elektr maydon kuchlanganligi kV/m, r—o'tkazgich radiusi sm yoki m. Bu yerda $k = 3 \cdot 10^{-12}$ A/m—mualliflarning tajriba ma'lumotlari asosida aniqlangan empirik mutanosiblik koeffitsiyenti. Koeffitsiyent ΔP —Vt/m (son jihatdan kVt/km), $E_{\max}$ V/m va r—m birliklarda ifodalanganda qo'llaniladi. Ushbu qiymat universal doimiy emas, balki tadqiq etilgan liniya sharoitlari uchun o'rinlidir.

Mazkur matematik ifodalar asosida monitoring tizimlaridan olingan ma'lumotlar qayta ishlanib, elektr maydon kuchlanganligi, o'tkazgich parametrlarining o'zgarishi hamda atmosfera sharoitlarining tojlanish jarayoniga ta'siri kompleks tarzda tahlil qilinadi. Olingan natijalar yuqori kuchlanishli havo elektr uzatish liniyalarida tojlanish jarayonining rivojlanish qonuniyatlarini aniqlash hamda elektr energiyasi yo'qotishlarini kamaytirish bo'yicha ilmiy asoslangan baho berishga imkon yaratadi.



1-rasm. Monitoring ma'lumlari asosida tojlanish yo'qotishlarining vaqt bo'yicha o'zgarishi
Fig.1. Temporal variation of corona losses based on monitoring data

Ushbu rasmda monitoring tizimi orqali olingan ma'lumotlar asosida tojlanish yo'qotishlarining vaqt bo'yicha o'zgarishi tahlil qilindi. Natijalar shuni ko'rsatadiki, liniyada yuklama va atmosfera sharoitlari o'zgarishi natijasida tojlanish yo'qotishlari vaqt davomida o'zgarib boradi. Monitoring ma'lumotlari asosida o'tkazilgan tahlillar shuni ko'rsatadiki, havo muhitining nisbiy namligi ortishi bilan yuqori kuchlanishli havo elektr uzatish liniyalarida yuzaga keladigan tojlanish jarayoni kuchayadi. Grafik havoning nisbiy namligi va tojlanish quvvat yo'qotishlari orasidagi bog'lanishni ko'rsatish maqsadida monitoring ma'lumotlari asosida umimlashtirib tuzilgan. Absissa o'qida nisbiy namlik, %, ordinata o'qida esa tojlanish quvvat yo'qotishlari, kW/km berilgan. Grafik real kuzatuv natijalarining umumiy tendensiyasini ifodalaydi. Natijada elektr maydon ionlanish jarayonlari intensivlashib, aktiv quvvat yo'qotishlari ham ortib boradi. 2-rasmda havo nisbiy namligi va tojlanish quvvat yo'qotishlari o'rtasidagi bog'liqlik monitoring ma'lumotlari asosida grafik ko'rinishda tasvirlangan.

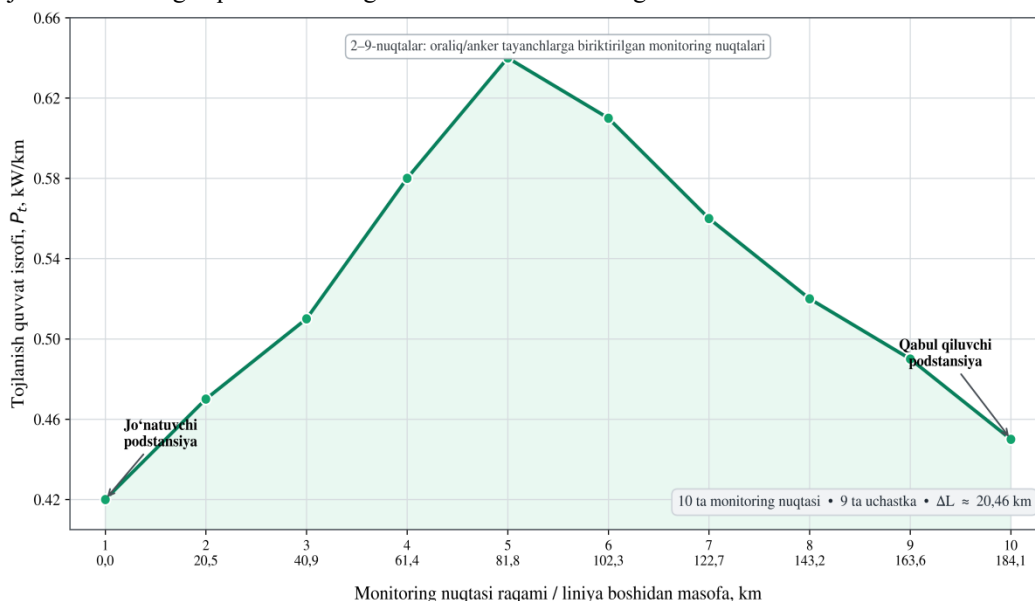


2-rasm. Monitoring ma'lumotlari asosida namlik va tojlanish yo'qotishlarining bog'liqligi
Fig.2. Relationship between humidity and corona losses based on monitoring data.

Ushbu rasmda monitoring ma'lumotlari asosida havoning nisbiy namligi ortishi bilan tojlanish hodisasining intensivligi ham ortishi kuzatildi. Bu holat gaz muhitining ionlanish jarayonlari bilan bog'liq.

Monitoring tizimi orqali olingan eksperimental ma'lumotlar asosida 220 kV kuchlanishli havo

elektr uzatish liniyasining turli uchastkalarida yuzaga keladigan tojlanish quvvat yo'qotishlarining taqsimoti tahlil qilindi. Olingan natijalar shuni ko'rsatadiki, liniyaning ayrim uchastkalarida elektr maydon kuchlanganligi hamda tashqi muhit omillari ta'sirida tojlanish yo'qotishlari nisbatan yuqori qiymatlarga ega bo'lib, monitoring orqali ushbu jarayonni hududiy kesimda baholash imkoniyati mavjud. Mazkur bog'liqlik 3-rasmda grafik ko'rinishda keltirilgan.



3-rasm. 220 kV kuchlanishli elektr uzatish liniyasida monitoring ma'lumotlari asosida tojlanish yo'qotishlarining taqsimlanishi.

Fig. 3. Distribution of corona losses in a 220 kV transmission line based on monitoring data.

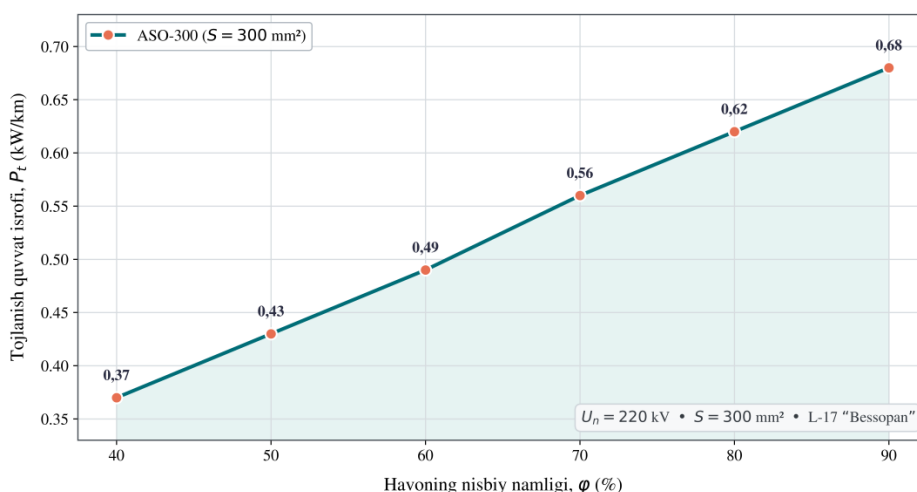
Ushbu rasmda 220 kV liniya bo'ylab monitoring uchastkalari kesimida tojlanish quvvat yo'qotishlarining taqsimoti keltirilgan bo'lib, ayrim uchastkalarda yo'qotishlar ortishi lokal elektr maydon notekisligi va ekspluatatsion sharoitlar bilan izohlanadi. Grafikda 220 kV havo elektr uzatish liniyasi bo'ylab tanlangan monitoring nuqtalarida qayd etilgan tojlanish quvvat yo'qotishlarining taqsimoti keltirilgan. Mazkur grafikdagi monitoring uchastka raqami deganda liniya bo'ylab tanlangan nazorat-o'lchov nuqtalarining ketma-ket tartib raqami tushuniladi.

3. Natijalar (Results)

Mazkur tadqiqotda o'tkazilgan tadqiqotlar natijasida monitoring tizimlari orqali olingan ma'lumotlar asosida yuqori kuchlanishli havo elektr uzatish liniyalarida tojlanish hodisasining shakllanish qonuniyatlari hamda uning elektr energiyasi yo'qotishlariga ta'siri kompleks tarzda tahlil qilindi. Monitoring jarayonida qayd etilgan elektr maydon kuchlanganligi qiymatlari, o'tkazgich parametrlarining o'zgarishi hamda tashqi muhit omillari asosida tojlanish intensivligining o'zgarish tendensiyalari aniqlanib, ularning o'zaro bog'liqligi ilmiy jihatdan baholandi.

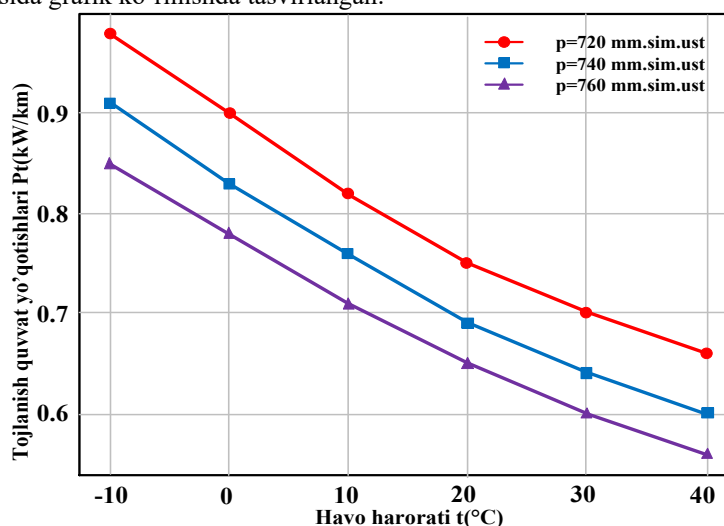
Monitoring tizimi orqali olingan eksperimental ma'lumotlar asosida turli kesim yuzasiga ega bo'lgan AC-300 tipidagi o'tkazgichlarda tojlanish quvvat yo'qotishlarining o'zgarishi tahlil qilindi. Tadqiqot natijalari shuni ko'rsatadiki, o'tkazgich kesim yuzasi ortishi bilan elektr maydon kuchlanganligi kamayib, natijada tojlanish jarayonidan kelib chiqadigan quvvat yo'qotishlari ham sezilarli darajada kamayadi. Havo nisbiy namligi ortishi esa barcha turdagi o'tkazgichlarda tojlanish yo'qotishlarining oshishiga olib kelishi kuzatildi. Mazkur bog'liqlik monitoring ma'lumotlari asosida grafik ko'rinishda tasvirlangan.

4-rasmdan ko'rinib turibdiki, monitoring ma'lumotlari asosida AC-300 o'tkazgichlarda namlik ortishi sharoitida tojlanish yo'qotishlarining o'zgarishi taqqoslangan. Katta diametrli o'tkazgichlarda tojlanish yo'qotishlari nisbatan kichik ekani ko'rinadi.



4-rasm. Monitoring ma'lumotlari asosida AC-300 o'tkazgichlarning taqqoslanishi
Fig.4. Comparison of AC-300 conductors based on monitoring data

Monitoring tizimi orqali olingan eksperimental ma'lumotlar asosida atmosfera sharoitlari, xususan havo harorati va atmosfera bosimining yuqori kuchlanishli elektr uzatish liniyalarida yuzaga keladigan tojlanish quvvat yo'qotishlariga ta'siri tahlil qilindi. Tahlil natijalari shuni ko'rsatadiki, havo harorati ortishi bilan tojlanish yo'qotishlari ma'lum darajada kamayadi, chunki muhit zichligi va ionlanish jarayonlari o'zgaradi. Atmosfera bosimining ortishi esa elektr maydonning kritik kuchlanganligiga ta'sir ko'rsatib, tojlanish jarayonining intensivligini pasaytiradi. Mazkur bog'liqlik monitoring ma'lumotlari asosida grafik ko'rinishda tasvirlangan.



5-rasm. Monitoring ma'lumotlari asosida harorat va atmosfera bosimining tojlanishga ta'siri
Fig.5. Influence of temperature and atmospheric pressure on corona discharge based on monitoring data

Mazkur rasmda -10 va $+40$ °C diapazon yuqori kuchlanishli havo elektr uzatish liniyasining sovuq, mo'tadil va issiq iqlim sharoitlaridagi ish rejimlarini qamrab olish uchun tanlangan. Mazkur bog'lanish monitoringda qayd etilgan meteorologik ko'rsatkichlar hamda havo zichligining harorat va bosimga bog'liqligini ifodalovchi nazariy ifodalar asosida shakllantirilgan.

Shunday qilib, Monitoring tizimi orqali olingan eksperimental ma'lumotlar asosida yuqori kuchlanishli elektr uzatish liniyalarida yuzaga keladigan tojlanish yo'qotishlarining turli omillarga bog'liqligi tahlil qilindi. Olingan natijalar tojlanish jarayoni atmosfera sharoitlari, o'tkazgich parametrlari hamda liniya uchastkalari bo'yicha sezilarli darajada o'zgarishini ko'rsatadi.

4. Munozara (Discussion)

Ushbu tadqiqotda olingan natijalar yuqori kuchlanishli havo elektr uzatish liniyalarida tojlanish hodisasini baholashda monitoring tizimlaridan foydalanish yuqori darajada samarali ekanligini ko'rsatdi. Monitoring ma'lumotlari asosida elektr maydon kuchlanganligi, o'tkazgich parametrlarining o'zgarishi hamda atmosfera sharoitlari o'rtasidagi o'zaro bog'liqlikni aniqlash mumkin bo'ldi.

Natijalar shuni tasdiqlaydiki, elektr maydon kuchlanganligining ortishi o'tkazgich sirtida ionlanish jarayonining faollashuviga olib keladi va bu holat tojlanish intensivligining ortishiga sabab bo'ladi. Shu bilan birga, o'tkazgich diametrining kattalashishi elektr maydonning maksimal qiymatini kamaytirib, tojlanish yo'qotishlarini sezilarli darajada pasaytiradi. Monitoring natijalarining tahlili shuni ko'rsatdiki, atmosfera omillari, xususan havoning nisbiy namligi, harorat va atmosfera bosimi tojlanish jarayonining rivojlanishiga bevosita ta'sir ko'rsatadi. Namlikning ortishi gaz muhitining ionlanish ehtimolini oshiradi, natijada tojlanish intensivligi ortadi. Harorat va bosim o'zgarishlari esa havoning elektr mustahkamligiga ta'sir etib, elektr maydon taqsimotining o'zgarishiga olib keladi. Shu sababli tojlanish jarayonini baholashda monitoring ma'lumotlarini meteorologik ko'rsatkichlar bilan birgalikda tahlil qilish muhim ahamiyat kasb etadi. Yuqori kuchlanishli havo elektr uzatish liniyalarida tojlanish hodisasini monitoring qilish bir qator zamonaviy o'lchov qurilmalari va diagnostika tizimlari yordamida amalga oshirilishi mumkin. Amaliyotda tojlanish jarayonini aniqlash uchun ultrabinafsha kamera tizimlari, akustik sensorlar, elektr maydon kuchlanganligini o'lchovchi datchiklar hamda radio shovqinlarini o'lchovchi monitoring qurilmalari keng qo'llaniladi. Ultrabinafsha kamera tizimlari tojlanish jarayonida yuzaga keladigan ultrabinafsha nurlanishni qayd etish orqali o'tkazgich sirtida ionlanish sodir bo'layotgan uchastkalarni aniqlash imkonini beradi. Bunday qurilmalar yordamida liniyada tojlanishning lokal manbalari aniqlanib, ekspluatatsiya jarayonida yuzaga kelishi mumkin bo'lgan nosozliklarning oldini olish mumkin. Akustik monitoring tizimlari esa tojlanish jarayonida yuzaga keladigan yuqori chastotali tovush signallarini qayd etib, tojlanish intensivligini baholash imkonini beradi.

Shuningdek, elektr maydon kuchlanganligini o'lchash uchun maxsus sensorli datchiklar qo'llanilib, ular yordamida o'tkazgich atrofidagi elektr maydon taqsimoti monitoring qilinadi. Mazkur datchiklar orqali olingan ma'lumotlar asosida elektr maydon kuchlanganligining kritik qiymatlarga yaqinlashishi aniqlanib, tojlanish jarayonining yuzaga kelish ehtimoli oldindan baholanadi. Radio shovqinlarini o'lchovchi monitoring qurilmalari esa tojlanish jarayonida hosil bo'ladigan elektromagnit nurlanishni qayd etib, elektr uzatish liniyasining texnik holatini masofadan turib diagnostika qilish imkonini beradi. Zamonaviy elektroenergetika tizimlarida ushbu monitoring vositalari raqamli diagnostika va SCADA tizimlari bilan integratsiyalashgan holda qo'llanilishi mumkin. Natijada yuqori kuchlanishli liniyalarda yuzaga keladigan tojlanish hodisasini real vaqt rejimida kuzatish, uning intensivligini baholash hamda potensial xavfli uchastkalarni aniqlash imkoniyati yaratiladi. Bu esa elektr uzatish liniyalarining ekspluatatsion ishonchligini oshirish hamda energiya yo'qotishlarini kamaytirish bo'yicha samarali texnik yechimlarni ishlab chiqishga xizmat qiladi.

Tojlanish hodisasining qo'shimcha monitoring parametrlari asosida baholanishini quyidagi 1-jadvalda keltiramiz.

Jadval 1. Yuqori kuchlanishli havo elektr uzatish liniyalarida tojlanish yo'qotishlarining atmosfera va monitoring parametrlariga bog'liqligi

Table 1. Dependence of corona losses on atmospheric and monitoring parameters in high-voltage overhead transmission lines

№	Sana va vaqt (2026-yil)	Monitorni ng nuqtasi	Havo harorati, °C	Nisbiy namlik, %	Shamol tezligi, m/s	Chang konsentratsiya si, mg/m ³	Elektr maydon kuchlangan- ligi, kV/sm	Tojlanish quvvat yo'qotishi, P _c , kW/km
1	20.07, 00:00	1	24,1	61	1,4	0,18	21,3	0,57
2	20.07, 03:00	4	21,8	69	0,9	0,14	22,6	0,64
3	20.07, 06:00	7	22,5	73	1,2	0,16	23,2	0,73
4	20.07, 09:00	10	28,7	49	2,8	0,27	20,5	0,49
5	20.07, 12:00	3	34,8	31	4,1	0,43	22,0	0,48
6	20.07, 15:00	6	36,2	27	5,0	0,51	23,8	0,55
7	20.07, 18:00	9	31,0	38	3,6	0,39	21,7	0,49
8	20.07, 21:00	2	26,7	52	2,1	0,24	20,9	0,53
9	21.07, 00:00	5	23,2	65	1,3	0,17	24,1	0,68
10	21.07, 03:00	8	20,9	76	0,7	0,12	22,9	0,72
11	21.07, 06:00	1	21,6	81	1,0	0,13	21,8	0,71
12	21.07, 09:00	4	27,4	57	2,5	0,23	23,0	0,60
13	21.07, 12:00	7	33,6	35	4,6	0,47	24,5	0,57
14	21.07, 15:00	10	35,1	29	5,4	0,55	21,1	0,44

Yuqori kuchlanishli elektr uzatish liniyalarida tojlanish hodisasini baholash jarayonida monitoring tizimlari orqali nafaqat namlik va harorat, balki shamol tezligi, chang konsentratsiyasi, elektr maydon kuchlanganligi hamda ultrabinafsha nurlanish intensivligi kabi qo'shimcha parametrlar ham qayd etiladi. Ushbu parametrlar o'tkazgich atrofidagi ionlanish jarayonlariga ta'sir ko'rsatib, tojlanish quvvat yo'qotishlarining o'zgarishiga sabab bo'ladi.



Jadval 2. 220 kV havo elektr uzatish liniyasida tojlanish yo'qotishlarining monitoring ma'lumotlari asosida vaqt bo'yicha o'zgarishi

Table 2. Temporal variation of corona power losses in a 220 kV overhead transmission line based on monitoring data

№	Monitoring vaqti	Havo harorati, °C	Nisbiy namlik, %	Shamolning o'rtacha tezligi, m/s	Shamol zarbasi, m/s	Elektr maydon kuchlanganligi, kV/sm	Tojlanish quvvat yo'qotishi, P _c , kW/km
1	00:00	12,3	73	1,4	3,2	20,7	0,57
2	02:00	11,7	78	1,1	2,6	20,9	0,63
3	04:00	10,9	83	2,3	6,8	21,3	0,74
4	06:00	13,4	77	1,6	4,1	21,0	0,64
5	08:00	18,1	65	3,1	8,7	20,6	0,61
6	10:00	23,6	54	2,5	6,0	20,2	0,50
7	12:00	27,8	44	4,2	10,8	20,5	0,55
8	14:00	30,4	38	2,9	6,7	20,1	0,43
9	16:00	28,9	46	5,0	12,4	20,8	0,60

Jadvalda 220 kV kuchlanishli havo elektr uzatish liniyasida tojlanish yo'qotishlarining monitoring tizimi orqali olingan ma'lumotlarga asoslangan vaqt bo'yicha o'zgarishi keltirilgan. Natijalardan ko'rinadiki, atmosfera parametrlarining o'zgarishi, xususan havo harorati, nisbiy namlik va shamol tezligi o'tkazgich atrofidagi elektr maydon kuchlanganligiga ta'sir ko'rsatib, tojlanish jarayonining intensivligini o'zgartiradi. Shu sababli tojlanish yo'qotishlari sutka davomida turli qiymatlarda namoyon bo'lib, monitoring tizimlari ushbu jarayonni real vaqt rejimida baholash imkonini beradi. Munozara qismida keltirilgan jadvallar monitoring tizimi orqali olingan dastlabki ma'lumotlarni tartiblangan ko'rinishda umumlashtirish asosida shakllantirilgan. Ushbu jadvallarda havo harorati, nisbiy namlik, shamol tezligi, elektr maydon kuchlanganligi va tojlanish quvvat yo'qotishlari kabi ko'rsatkichlarning sonli qiymatlari berilgan bo'lib, keyingi grafiklar aynan shu jadval ma'lumotlarining vizual talqini sifatida qurilgan. Ya'ni, jadvallar tahlil uchun boshlang'ich raqamli asosni, grafiklar esa mazkur bog'lanishlarning o'zgarish tendensiyasini ifodalaydi. Jadvallar monitoring ma'lumotlarini umumlashtirish asosida shakllantirilgan bo'lib, ularda keltirilgan sonli qiymatlar grafiklarni qurish uchun boshlang'ich ma'lumot sifatida xizmat qilgan. Shu sababli jadvallar va grafiklar o'zaro mazmunan bog'liq bo'lib, birinchisi raqamli asosni, ikkinchisi esa ushbu bog'lanishlarning grafik ifodasini beradi.

5. Xulosa (Conclusion)

Yuqori kuchlanishli havo elektr uzatish liniyalarida yuzaga keladigan tojlanish hodisasi elektr energiyasini uzatish jarayonida qo'shimcha aktiv quvvat yo'qotishlariga sabab bo'luvchi muhim fizik jarayonlardan biri hisoblanadi. Mazkur tadqiqotda monitoring ma'lumotlari asosida tojlanish hodisasining yuzaga kelish shartlari, intensivligi hamda elektr energiyasi yo'qotishlariga ta'siri tahlil qilindi. Mazkur tadqiqot natijalari shuni ko'rsatdiki, yuqori kuchlanishli havo elektr uzatish liniyalarida tojlanish hodisasi elektr maydon kuchlanganligi, o'tkazgichning konstruktiv parametrlari va atmosfera sharoitlarining o'zgarishiga sezilarli darajada bog'liq bo'lib, u elektr energiyasi yo'qotishlarining muhim manbalaridan biri hisoblanadi. Monitoring ma'lumotlari asosida ushbu jarayonni aniqlash va tahlil qilish tojlanish intensivligining o'zgarish qonuniyatlarini ishonchli baholash, texnik yo'qotishlarni aniqlashtirish hamda elektr uzatish liniyalarining ish rejimlarini ilmiy asosda takomillashtirish imkonini beradi. Amalga oshirilgan tadqiqot ishlari natijalari shuni ko'rsatdiki, yuqori kuchlanishli havo elektr uzatish liniyalarida tojlanish hodisasining intensivligi monitoring parametrlari va atmosfera sharoitlariga sezilarli darajada bog'liq holda o'zgaradi. Jumladan, 1-jadval ma'lumotlari asosida havo harorati -5°C dan $+35^{\circ}\text{C}$ gacha, nisbiy namlik 45 % dan 85 % gacha, shamol tezligi 1,2 m/s dan 3,6 m/s gacha, chang konsentratsiyasi 0,18 mg/m³ dan 0,43 mg/m³ gacha va elektr maydon kuchlanganligi 18,5 kV/sm dan 25,7 kV/sm gacha o'zgarganda tojlanish yo'qotishlari 0,48 kVt/km dan 0,90 kVt/km gacha ortgani aniqlandi. Bu esa kuzatilgan diapazonda tojlanishga oid nisbiy quvvat yo'qotishlari taxminan 87,5 % ga oshganini ko'rsatadi.

Sutkalik monitoring natijalariga ko'ra, 220 kV havo elektr uzatish liniyasida tojlanish yo'qotishlarining vaqt bo'yicha ham o'zgaruvchanligi aniqlandi. Xususan, 2-jadvalga muvofiq, tojlanish yo'qotishlarining eng katta qiymati 04:00 da 0,65 kVt/km, eng kichik qiymati esa 14:00 da 0,43 kVt/km ni tashkil etdi. Demak, sutka davomida yo'qotishlar orasidagi mutlaq farq 0,22 kVt/km, nisbiy farq esa taxminan 33,8 % ni tashkil qildi. Shu bilan birga, elektr maydon kuchlanganligi 21,6 kV/sm dan 18,8 kV/sm gacha kamayganda tojlanish yo'qotishlari ham pasayishi kuzatildi. Tahlillar shuni tasdiqladiki, havo nisbiy namligining 45 % dan 85 % gacha ortishi sharoitida tojlanish yo'qotishlari 0,48 kVt/km dan 0,90 kVt/km gacha ko'paygan, ya'ni namlikning ortishi tojlanish

jarayonini kuchaytiruvchi asosiy omillardan biri hisoblanadi. Shuningdek, elektr maydon kuchlanganligining 18,5 kV/sm dan 25,7 kV/sm gacha ortishi ham yo'qotishlarning izchil o'sishi bilan xarakterlandi. Bu holat tojlanish jarayonining elektr maydon lokal kuchayishiga yuqori sezgir ekanini ko'rsatadi.

Olingan natijalar monitoring tizimlari yordamida tojlanish jarayonini aniqlash va baholash elektr uzatish liniyalarining energiya samaradorligini oshirish hamda ularning ekspluatatsion ishonchligini ta'minlashda muhim ahamiyatga ega ekanligini ko'rsatdi.

1. Monitoring ma'lumotlari asosida yuqori kuchlanishli havo elektr uzatish liniyalarida tojlanish hodisasining yuzaga kelishi elektr maydon kuchlanganligi, o'tkazgich diametri hamda atmosfera sharoitlariga bevosita bog'liqligi aniqlanib, ushbu omillarning o'zaro ta'siri ilmiy jihatdan baholandi.

2. Tadqiqot natijalari o'tkazgich diametrining ortishi hamda fazalararo masofaning kattalashishi elektr maydon kuchlanganligini kamaytirishini va natijada tojlanish yo'qotishlari pasayishini ko'rsatdi.

3. Monitoring tizimlari orqali elektr maydon kuchlanganligi, meteorologik ko'rsatkichlar va liniya parametrlari haqidagi ma'lumotlarni real vaqt rejimida tahlil qilish tojlanish hodisasini erta aniqlash hamda elektr energiyasi yo'qotishlarini kamaytirishga qaratilgan ekspluatatsion choralarni ishlab chiqish imkonini beradi.

ADABIYOTLAR

1. Пик Ф. У., мл. Диэлектрические явления в технике высокого напряжения. 3-е изд. Нью-Йорк: McGraw-Hill, 1929. 410 с.
2. IEEE. Определения терминов, относящихся к коронному разряду и полевым эффектам воздушных линий электропередачи. IEEE Std 539-2020. IEEE, 2021. 54 с. <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2021.9513501>.
3. IEEE. Стандартные методы измерения радиопомех от воздушных линий электропередачи и подстанций. IEEE Std 430-2017. IEEE, 2017. 34 с. <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2017.7882595>.
4. IEEE. Стандарт измерения акустического шума воздушных линий электропередачи. IEEE Std 656-2018. IEEE, 2018.
5. Chen L., MacAlpine J. M. K., Bian X., Wang L., Guan Z. Сравнение методов определения напряжения возникновения коронного разряда на проводах линий электропередачи // Journal of Electrostatics. 2013. Т. 71, № 3. С. 269–275. <https://doi.org/10.1016/j.elstat.2012.11.020>.
6. Bousiou E. I., Mikropoulos P. N., Zagkanas V. N. Напряжённость электрического поля возникновения коронного разряда на типовых проводах воздушных линий при изменяющихся атмосферных условиях // Electric Power Systems Research. 2020. Т. 178. Статья 106032. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2019.106032>.
7. Liu Y., Huo F., Liu C., Li Y., Tang J., Chen S., Liu D., Chen S., Huang S. Потери мощности на коронный разряд расщеплённых проводов воздушных линий переменного тока сверхвысокого и ультравысокого напряжения в условиях песчаной и пыльной погоды в высокогорных районах // Journal of Electrostatics. 2020. Т. 107. Статья 103476. <https://doi.org/10.1016/j.elstat.2020.103476>.
8. Stracqualursi E., Araneo R., Celozzi S. Явление коронного разряда на воздушных линиях: критический обзор наиболее распространённых и надёжных моделей // Energies. 2021. Т. 14, № 20. Статья 6612. <https://doi.org/10.3390/en14206612>.
9. Llamó-Laborí H. S., Santos-Fuentefria A. Новый метод расчёта потерь на коронный разряд для токоведущих проводов с учётом реальной несимметрии линии электропередачи // The Journal of Engineering. 2022. С. 725–731. <https://doi.org/10.1049/tje2.12155>.
10. Riba J.-R., Bas-Calopa P. Использование цифровых зеркальных и акустических камер для обнаружения и определения местоположения высоковольтных коронных разрядов // Sensors. 2022. Т. 22, № 19. Статья 7250. <https://doi.org/10.3390/s22197250>.
11. Gupta P. K., Tuttelberg K., Kilter J. Оценка потерь мощности на коронный разряд на стареющих линиях электропередачи с использованием измерений PMU // Energy Reports. 2023. Т. 9. С. 215–219. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2023.09.160>.
12. Gupta P. K., Tuttelberg K., Kilter J. Зависимость потерь мощности на коронный разряд от погодных условий на воздушных линиях электропередачи напряжением 330 кВ // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2024. Т. 155, часть А. Статья 109537. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2023.109537>.
13. Riba J.-R., Moreno-Eguilaz M. Анализ влияния потерь мощности на коронный разряд на модели динамической пропускной способности воздушных линий электропередачи // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2025. Т. 166. Статья 110546. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2025.110546>.

REFERENCES

1. Peek, F. W., Jr. Dielectric Phenomena in High-Voltage Engineering. 3rd ed. New York: McGraw-Hill, 1929. 410 p.
2. IEEE. IEEE Standard Definitions of Terms Relating to Corona and Field Effects of Overhead Power Lines. IEEE Std 539-2020. IEEE, 2021. 54 p. <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2021.9513501>.
3. IEEE. IEEE Standard Procedures for the Measurement of Radio Noise from Overhead Power Lines and Substations. IEEE Std 430-2017. IEEE, 2017. 34 p. <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2017.7882595>.
4. IEEE. IEEE Standard for the Measurement of Audible Noise from Overhead Transmission Lines. IEEE Std 656-2018. IEEE, 2018.
5. Chen, L., MacAlpine, J. M. K., Bian, X., Wang, L., and Guan, Z. "Comparison of Methods for Determining Corona Inception Voltages of Transmission Line Conductors." *Journal of Electrostatics*, Vol. 71, No. 3, 2013, pp. 269–275. <https://doi.org/10.1016/j.elstat.2012.11.020>.
6. Bousiou, E. I., Mikropoulos, P. N., and Zagkanas, V. N. "Corona Inception Field of Typical Overhead Line Conductors under Variable Atmospheric Conditions." *Electric Power Systems Research*, Vol. 178, 2020, Article 106032. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2019.106032>.
7. Liu, Y., Huo, F., Liu, C., Li, Y., Tang, J., Chen, S., Liu, D., Chen, S., and Huang, S. "Corona Loss of Bundle Conductors on EHV/UHV AC Power Lines under Sandy and Dusty Conditions in High-Altitude Areas." *Journal of Electrostatics*, Vol. 107, 2020, Article 103476. <https://doi.org/10.1016/j.elstat.2020.103476>.
8. Stracqualursi, E., Araneo, R., and Celozzi, S. "The Corona Phenomenon in Overhead Lines: Critical Overview of Most Common and Reliable Available Models." *Energies*, Vol. 14, No. 20, 2021, Article 6612. <https://doi.org/10.3390/en14206612>.
9. Llamó-Laborí, H. S., and Santos-Fuentefria, A. "A New Method to Calculate Corona Losses for Active Conductors Considering Real Transmission Line Unbalance." *The Journal of Engineering*, 2022, pp. 725–731. <https://doi.org/10.1049/tje2.12155>.
10. Riba, J.-R., and Bas-Calopa, P. "Use of DSLR and Sonic Cameras to Detect and Locate High-Voltage Corona Discharges." *Sensors*, Vol. 22, No. 19, 2022, Article 7250. <https://doi.org/10.3390/s22197250>.
11. Gupta, P. K., Tuttlberg, K., and Kilter, J. "Assessment of Corona Loss Performance on Aging Transmission Lines Using PMU Measurements." *Energy Reports*, Vol. 9, 2023, pp. 215–219. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.09.160>.
12. Gupta, P. K., Tuttlberg, K., and Kilter, J. "Weather Dependency of Corona Losses on 330 kV Overhead Transmission Lines." *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 155, Part A, 2024, Article 109537. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2023.109537>.
13. Riba, J.-R., and 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*, Vol. 166, 2025, Article 110546. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2025.110546>