



ОЦЕНКА СТЕПЕНИ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ИЗОЛЯЦИИ ПО СПЕКТРУ ИЗЛУЧЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ

Овсянников ¹А.Г., Жарич ²Д.С., Швец ¹Н.А.

¹Новосибирский Государственный Технический Университет, г. Новосибирск, Россия

² ООО «Сибэнергодиагностика», г. Новосибирск, Россия

shvepsnik@yandex.ru

Резюме: АКТУАЛЬНОСТЬ. Неплановые отключения воздушных линий электропередачи (ВЛ) обычно происходят из-за перекрытия линейной изоляции вследствие загрязнения и увлажнения. Предвестниками перекрытия могут служить мощные частичные разряды на поверхности изоляции (ПЧР). Их можно обнаружить различными, в том числе дистанционными методами: органолептическими (обнаружение разрядов визуальным осмотром и по звуку), акустическими (регистраторами ультразвуковых сигналов), электромагнитными (регистрация излучений в СВЧ и УВЧ диапазонах). Нарастает популярность внедрения оптических методов профилактического контроля оборудования, основанных на двух принципиально разных физических принципах. Тепловизионный контроль излучений оборудования в инфракрасной (ИК) области спектра выявляет локальные перегревы конструктивных элементов оборудования и наиболее эффективен для контроля дефектов токоведущих частей и контактных соединений, систем охлаждения и др. УФ-контроль (УФК) основан на обнаружении электрических разрядных процессов и наиболее эффективен в обнаружении различного рода дефектов арматуры и внешних изоляционных конструкций высоковольтного оборудования. Для реализации УФК перспективными считаются солнечно-слепые УФ-дефектоскопы. Однако применительно к оценке загрязнения внешней изоляции использование УФ-контроля пока ограничено из-за сложной интерпретации результатов контроля и недостаточного учета влияний внешних факторов и настроек аппаратуры. ЦЕЛЬ. Провести исследования изменений спектра излучения ПЧР с изменением проводимости слоя загрязнения при неизменном значении испытательного напряжения. По результатам исследований сформулировать принципы дистанционной качественной оценки степени загрязнения внешней изоляции линий электропередачи и подстанционного оборудования на основе количественной зависимости. МЕТОДЫ. Для решения поставленных задач проводились высоковольтные испытания изоляторов с различной степенью с регистрацией ПЧР УФ-дефектоскопом «Филин б» со специальным спектродиспергирующим фильтром на входном объективе. РЕЗУЛЬТАТЫ. Предложены конструкции спектродиспергирующих фильтров для линзового и зеркально-линзового объективов. Определены спектральные чувствительности системы регистрации при совместной работе спектродиспергирующего светофильтра и мультищелочного фотокатода электронно-оптического преобразователя. Предложены возможные изменения окон пропускания для случаев со специфическими загрязняющими веществами. После обработки картин излучения разрядов на полимерном опорном изоляторе получена эмпирическая зависимость между изменениями в спектре излучения ПЧР и проводимостью слоя загрязнения поверхности. Разработанная методика позволяет дистанционно не инвазивно проводить качественную оценку степени загрязнения высоковольтной внешней изоляции.

Ключевые слова: воздушные линии электропередачи; загрязнение и увлажнение изоляции; поверхностные частичные разряды; спектры излучения; спектродиспергирующий светофильтр, влияние настроек аппаратуры и внешних факторов.

Для цитирования: Овсянников А.Г., Жарич Д.С., Швец Н.А. Оценка степени загрязнения изоляции по спектру излучения поверхностных частичных разрядов // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2026. Т. 28. № 3. С. 128-140. doi: 10.30724/1998-9903-2026-28-3-128-140.

ASSESSMENT OF THE DEGREE OF CONTAMINATION OF INSULATION BY THE RADIATION SPECTRUM OF SURFACE PARTIAL DISCHARGES

Ovsyannikov A.G.¹, Zharich D.S.², Shvets N.A.¹

¹Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

² LLC "Sibenergodiagnostika"

shvepsnik@yandex.ru

Abstract: RELEVANCE. *Unplanned overhead power line outages are typically associated with flashover of line insulation due to contamination and moisture. Powerful partial discharges on the insulation surface (SPD) can serve as a precursor to flashover. They can be detected by various remote methods: organoleptic (detection of discharges by visual and sound inspections), acoustic (ultrasonic signal recorders), electromagnetic (registration of emissions in the microwave and UHF ranges). The popularity of the introduction of optical methods of preventive control of equipment based on two fundamentally different physical principles is raising. Thermal imaging inspection of equipment radiation in the infrared (IR) region of the spectrum reveals local overheating of structural elements of equipment and is most effective for detecting defects in current-carrying parts and contact connections, cooling systems, etc. UV-inspection (UVI) is based on the detection of electrical discharge processes and it is most effective in detecting various kinds of defects in fittings and external insulating structures of high-voltage equipment. Solar-blind UV cameras are considered promising for the realization of UVI. However, the use of UV inspection for the assessment of external insulation contamination is still limited due to complex interpretation of inspection results and insufficient consideration of the influence of external factors and device settings. PURPOSE.* *To investigate the changes in the emission spectrum of the SPD with the change in the conductivity of the contamination layer at a constant value of the test voltage. Based on the research results, formulate principles for remote qualitative assessment of the contamination degree of external insulation of power lines and substation equipment based on a quantitative relationship. METHODS.* *High-voltage tests of insulators with different degrees of contamination in a fog chamber with registration of SPD by UV camera "Filin 6" with a special spectro-dispersing filter on the input lens were carried out to solve the set tasks. RESULTS.* *Designs of spectro-dispersing filters for lenticular and mirror-lens lenses are proposed. The spectral sensitivities of registration at joint operation of a spectro-dispersing light filter and a multi-alkaline photocathode of an electron-optical converter were determined. Possible changes in transmittance windows for specific pollutants are suggested. The empirical dependence between the changes in the SPD emission spectrum and the conductivity of the surface contamination layer was obtained after processing the discharge emission patterns on the polymer post insulator. The developed methodology enables remote non-invasive qualitative assessment of contamination levels on high-voltage external insulation.*

Keywords: *overhead transmission lines; contamination and moisture on the insulation; emission spectrum; surface partial discharges; spectro-dispersing light filter; influence of equipment settings and external factors.*

For citation: Ovsyannikov A.G., Zharich D.S., Shvets N.A. Assessment of the degree of contamination of insulation by the radiation spectrum of surface partial discharges. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2026; 28 (3): 128-140. doi: 10.30724/1998-9903-2026-28-3-128-140.

Введение (Introduction)

Одной из причин внеплановых отключений ВЛ в нормальном режиме является перекрытие внешней изоляции. Слой загрязнения, накапливающийся со временем на поверхности изолятора, обычно содержит солевые компоненты и нерастворимые материалы. Слой загрязнения становится токопроводящим при увлажнении в виде росы, тумана или осадков. Перекрытие изоляции под действием рабочего напряжения воздушных линий или внешней изоляции оборудования подстанций на воздушных распределительных устройствах происходит при максимальной проводимости слоя загрязнения, которая, в свою очередь, возникает при насыщении влагой всего объема слоя загрязнения.

Важным предвестником перекрытия являются поверхностные частичные разряды (ПЧР), возникающие и развивающиеся на поверхности изоляторов по увлажненному слою

загрязнения. Их обнаружение позволяет прогнозировать риск аварии и планировать профилактическую очистку. Современная диагностика активно развивается в сторону дистанционных, неинвазивных методов, которые не требуют отключения оборудования. Среди них выделяются оптические методы, такие как инфракрасная термография и ультрафиолетовый контроль (УФК).

Цель исследования заключается в установлении корреляционной связи между спектром излучения ПЧР и проводимостью слоя загрязнения. Установление этой связи позволит создать основу для дистанционной качественной оценки уровня загрязнения изоляции по данным УФК, что повысит точность оценки состояния высоковольтной внешней изоляции без вывода оборудования из работы.

Литературный обзор (Literature Review)

Описанные выше механизмы перекрытия в результате загрязнения и увлажнения поверхности высоковольтной внешней изоляции изучались авторами [1]. Авторы [2] предложили математическую модель физических процессов, происходящих на поверхности загрязненной и увлажненной изоляции при воздействии рабочего напряжения. Результаты исследований по этой теме периодически обобщались рабочими группами CIGRE и IEEE по загрязнению изоляции, что отражено в [3] и [4] соответственно. Некоторые рекомендации даны в стандартах МЭК¹. Автор [5] предлагает подходы к выбору изоляции на основе натуральных исследований в зонах почвенных, морских и промышленных загрязнений, с целью повышения надежности энергоснабжения.

Исследования продолжаются и сегодня. Они направлены на выяснение причины отключений ВЛ в районах со слабым и умеренным загрязнением внешней изоляции на основе моделирования [6], а также сравнения полученного опыта разными странами [7]. Важным направлением исследований в этой области является углубленное компьютерное моделирование процесса перекрытия на основе динамических расчетов напряженности электрического поля и теории случайных блужданий с учетом геометрии поверхности изолятора и случайного расположения взвешенных частиц воды [8]. Основным требованием при выборе изоляции в загрязненных районах стала удельная длина пути утечки (УДП) (мм/кВ_{фазн.}) [9].

Эксплуатация электроустановок в районах с загрязненной атмосферой предполагает контроль состояния внешней изоляции для оценки вероятности ее перекрытия под рабочим напряжением. В соответствии с требованиями СТО 56947007- 29.240.133-2012 (Изоляция электроустановок в районах с загрязненной атмосферой. Эксплуатация и техническое обслуживание) состояние изоляции оценивают по удельной поверхностной проводимости изоляторов $\chi_{\text{пов}}$ и удельной объемной проводимости атмосферных осадков $\chi_{\text{об}}$. Значения $\chi_{\text{пов}}$ определяются при искусственном или естественном увлажнении демонтированных изоляторов или изоляторов на месте установки при снятом напряжении. Затем на основании известных зависимостей напряжения перекрытия от проводимости слоя загрязнения прогнозируется напряжение перекрытия изоляторов [9].

Принимая во внимание большую трудоемкость перечисленных методов контроля, разработки дистанционных оценок степени загрязнения изоляции являются актуальными. Одними из первых дистанционных методов профилактического контроля линейной изоляции стали акустический и электромагнитный методы обнаружения электрических разрядов, генерируемых дефектами [10]. Надежность и эффективность обнаружения дефектов резко возрастают при синхронизированном применении обоих методов с «привязкой» измеряемых сигналов к мгновенным значениям напряжения [11] и формированием амплитудно-фазовых диаграмм (АФД). Такая форма представления результатов контроля позволяет использовать накопленные образы дефектов, называемые «отпечатками пальцев», в виде АФД электрических сигналов частичных разрядов и, тем самым, облегчить интерпретацию результатов контроля [12]. Дальнейший поиск маркеров загрязнения внешней изоляции в указанных методах можно связать со сменой механизма формирования ПЧР от лавинно-стримерного к дуговому за счет преобладания термоионизации.

Среди дистанционных методов профилактики ведущие позиции занимают оптические методы, прежде всего, инфракрасная термография [13], в том числе, дополненная регистрацией электромагнитного излучения [14]. Развивается и метод ультрафиолетового контроля оборудования высокого напряжения, основанный на

¹ IEC Publications 815 (1986); IEC 60507 (1991). Guide for Selection of Insulators Under Polluted Conditions, Artificial Pollution Test on HV Insulators. IEC Standards, 1991.

регистрации разрядных процессов, генерируемых различными дефектами, в том числе и загрязнением изоляции [15]. В частности, частичные разряды на поверхности (ПЧР) изоляции при повышенной влажности воздуха, тумане, росе или осадках являются достаточно надежными индикаторами загрязнения и предвестниками перекрытия под нормальным рабочим напряжением.

Приблизительную оценку степени загрязнения можно провести по интенсивности и цвету поверхностных частичных разрядов на изоляторах при увлажнении слоя загрязнения. В уже упомянутом выше стандарте организации предложены критерии оценки степени опасности загрязнения изоляции по количеству ребер изолятора, охватываемых дугвыми разрядами и изменению цвета разрядов от сине-фиолетового до светло-желтого при напряжениях, близких к перекрытию изоляции. На чистой изоляции ПЧР имеют сине-фиолетовые оттенки, а на загрязненной изоляции даже самые начальные разряды проявляются в виде желто-оранжево-красных дуг [16]. Это хорошо видно при испытаниях изоляторов на трекинго-эрозионную стойкость в камерах соленого тумана (рис. 1).

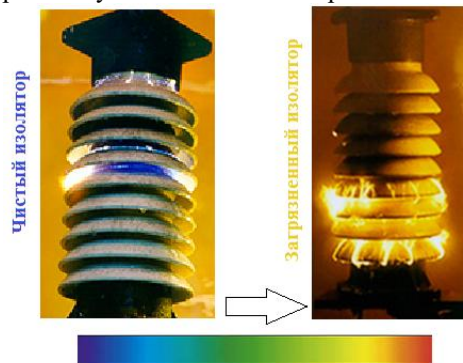


Рис. 1. Внешний вид разрядов на поверхности полимерного изолятора при проводимости слоя загрязнения 1 мкСм (слева) и более 8 мкСм (справа)

Fig. 1. External view of surface discharges on polymer insulator with a contamination layer conductivity of $1 \text{ }\mu\text{S}$ (left) and more than $8 \text{ }\mu\text{S}$ (right)

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

В сырую погоду можно наблюдать опасный уровень загрязнения изоляции по желто-красному цвету излучения ПЧР и на реальном оборудовании. В качестве примера на рисунке 2 показаны мощные дуги ПЧР преимущественно желто-красного цвета на внешней изоляции высоковольтного оборудования. Дело в том, что вблизи подстанции проходит довольно крупная автодорога. Ранней весной дорога была обработана наиболее эффективными противогололедными средствами. Унос этих веществ создал на внешних изоляционных поверхностях аппаратов слой загрязнений с критической удельной поверхностной проводимостью.



Рис. 2. Оборудование на открытом распределительном устройстве с опасным загрязнением внешней изоляции

Fig. 2. Equipment on an open switchgear with hazardous contamination of external insulation

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Обстоятельная проверка связи уровня загрязнения с токами утечки, разрядной активностью, спектром излучения разрядов и температурой их каналов была проведена авторами [17]. Эксперименты проводились в камере искусственного климата при температуре $21\text{--}25 \text{ }^\circ\text{C}$. Образцами служили опорные керамические изоляторы ZSW-10/4 высотой 210 мм. Слой загрязнения формировался диатомовой землей (NSDD) с эквивалентной плотностью соли (ESDD). Для имитации естественного загрязнения отношение $\text{ESDD} / \text{NSDD}$ составляло 1:6. Для уровней загрязнения 2 и 3 ESDD составлял

0,1 и 0,2 мг/см², а NSDD – 0,6 и 1,2 мг/см². Загрязненные изоляторы увлажнялись до насыщения и испытывались напряжением около 8 кВ в течение 2–3 минут. Каждый образец повторно испытывался 3 раза. Температура разрядов определялась по интенсивностям линий излучения атомов Na (589 нм) в соли, а также Fe (~766 нм) и Ca (~336 нм) в нейтральном компоненте загрязнения.

В испытаниях наблюдались четыре типа разрядов при соответствующих диапазонах тока утечки. На изоляторах с уровнем загрязнения 1 ESDD ≈ 0,01 мг/см² наблюдались только коронные разряды. В первых двух уровнях загрязнения токи утечки были меньше 10 мА, а температура каналов разрядов была ниже 1400 К. В последних двух уровнях загрязнения токи утечки увеличились до 20 – 25 мА, и температура дуговых ПЧР увеличилась до 2000-2800 К. В итоге экспериментов было получено регрессионное уравнение, связывающее температуру с током утечки, четырьмя типами разрядной активности и с уровнем загрязнения изоляции. Основным признаком роста уровня загрязнения оказалось снижение интенсивности УФ-излучения при усилении интенсивности видимого света. Во время ПЧР PD1 на поверхности изоляторов появляется слабый фиолетовый коронный разряд. Разряды PD2, PD3 и PD4 являются дуговыми разрядами с желтым и оранжевым излучением, возникающим от компонентов NaCl и Fe₂O₃. Этот вывод подтверждает наши оценки изменения оттенков цвета излучения количественными оценками температуры. Заслуживает внимания и наблюдения повторяемости разрядов при неизменных условиях испытаний. Когда частота повторения PD3 и PD4 на месте составляет менее 0,04, то это оценивается как легкие загрязнения. Когда частота неисправностей PD3 и PD4 превышает 0,04, это идентифицируется как серьезная неисправность и требуется реализовать быструю очистку изолятора. По нашему мнению, зависимость типа разряда от времени отражает влияние процесса подсыхания и колебаний проводимости слоя загрязнения.

По обсуждаемой работе возникло несколько вопросов. Настораживает отсутствие в спектре излучения мощных линий УФ-спектра при сбросе возбуждения молекул азота. Измерения температуры по спектру излучения основаны на предположении о локальном термодинамическом равновесии в разрядах. Это допущение не вызывает сомнений для дуговых ПЧР типов PD3 и PD4 с температурой выше 2000 К. В коронных разрядах типа 1 с температурой до 1400 К есть только локальное термодинамическое равновесие энергий электронов. Температура молекул остается ниже 1000 К.

Материалы и методы (Materials and methods)

В исходном этапе исследований был использован первый отечественный электронно-оптический дефектоскоп «Филин-3» с серийным линзовым телеобъективом «Ю-21». Для него был разработан спектро-диспергирующий светофильтр (рис. 3), формировавший двойное изображение контролируемого изолятора и картины ПЧР в спектральных диапазонах $\Delta\lambda_{\text{син}}$ («синий») ≈ 400...600 нм и $\Delta\lambda_{\text{ж-к}}$ («красный») ≈ 600...800 нм. Электронно-оптический преобразователь усиливал эти картины и преобразовывал их в монохромные с яркостью, зависящей от спектра излучения ПЧР, который зависел от уровня загрязнения изоляции (рис. 4).



Рис. 3. Ход световых лучей на входе дефектоскопа Fig. 3. The path of light rays at the entrance of the flaw detector

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

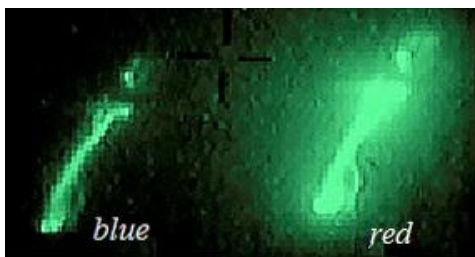


Рис. 4. Двойное изображение одиночной дуги на загрязненной и увлажненной поверхности изолятора ($\chi \approx 15 \text{ мкСм}$)

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Для исследований зависимости спектра излучения ПЧР от удельной поверхностной проводимости на экран электронно-оптического преобразователя (рис. 5) в местах раздвоенного изображения ПЧР наклеивались два фотодиода ФД –256, которые с помощью электронного преобразовательного устройства обеспечивали электрические сигналы, пропорциональные излучению в обеих выбранных областях спектра. В результате электрические сигналы на выходе фотодиодов были пропорциональны излучению ПЧР в двух спектральных диапазонах. Экспериментальные результаты были получены в виде осциллограмм тока i , напряжения u , интенсивности синего J и красного J цвета.

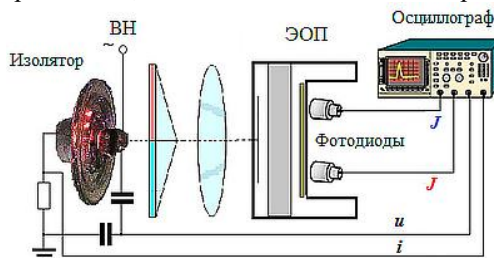


Рис. 5. Схема испытаний и измерений

Fig. 5. Scheme of the testing and measuring

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Испытания проводились в камере тумана нормируемой плотности. В испытаниях использовались три партии по пять линейных изоляторов ПС-300К. В контрольной партии изоляторы оставались чистыми, в двух других партиях изоляторы были загрязнены цементом марки 400 по стандартной методике с плотностью загрязнения 1,5 и 7 мг/см². Поверхность изоляторов смачивалась водой с удельной объемной проводимостью 160...180 мкСм/см до полного насыщения слоя загрязнения. Удельные поверхностные проводимости составили: $\chi \leq 1 \text{ мкСм}$ для чистых изоляторов, $\chi = 5...6 \text{ мкСм}$ для изоляторов с плотностью загрязнения 1,5 мг/см² и $\chi = 15...16 \text{ мкСм}$ для изоляторов с плотностью загрязнения 7 мг/см². Испытания проводились в камере тумана. На рисунке 6 в качестве примера приведены типичные осциллограммы регистрируемых сигналов.

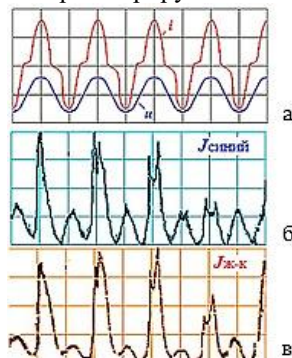


Рис. 6. Спектры излучения поверхностных разрядов при проводимости загрязненного слоя $\chi = 15 \text{ мкСм}$: а – ток утечки и напряжение на изоляторе (20 мА/дел. 60 кВ/дел.); б – интенсивность излучения ЧР в «синем» спектре (0,1 В/дел.); в – интенсивность свечения ЧР в красном спектре (1 В/дел.)

Fig. 6. Spectra of surface discharge irradiation at conductivity of contaminated layer $\chi = 15 \text{ }\mu\text{S}$: а – leakage current and voltage applied to insulator (20 mA/div. 60 kV/div.); б – light intensity of surface PD in blue spectra (0,1 V/div.); в – light intensity of surface PD in red spectra (1 V/div.)

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Обработка данных была направлена на выявление статистической связи между интенсивностью излучения ПЧР в двух участках спектра, амплитудой тока утечки и проводимостью слоя загрязнения поверхности. В качестве основной характеристики изменения спектра была выбран безразмерный коэффициент равный относительной доле красного цвета в сумме обеих интенсивностей излучения:

$$k_r = \frac{J_r}{J_{bl} + J_r} \quad (1)$$

Обработка данных показала очень низкое значение коэффициента корреляции R между k_r и током утечки: $R(k_r \leftrightarrow I_{ут}) = 0,43$. Напротив, коэффициент корреляции со степенью загрязнения указывал на почти детерминированную связь: $R(k_r \leftrightarrow \chi) = 0,92$. Минимальную дисперсию имела линейная регрессия:

$$\chi \approx 21(2k_r - 1), \quad (2)$$

где k_r выражен в процентах, а χ в микросименсах.

Перед началом следующего этапа исследований для дефектоскопа «Филин 6» был разработан спектро-диспергирующий светофильтр, который совместно с зеркально-линзовым объективом формирует двойные изображения контролируемого изолятора и излучения ПЧР в синей и желтой частях спектра. Ход лучей в светофильтре и объективе приведен на рис. 7. Деление спектра в фильтре производится двумя цветными стеклами, вставленными в круглые отверстия непрозрачного корпуса светофильтра. Чтобы разнести цветные изображения на фотокатоде электронно-оптического преобразователя (ЭОП) на некоторое расстояние друг от друга, цветные стекла сошлифованы под определенным углом так, что сечение стекол имеет форму усеченной призмы. Марка одного из стекол – СС8 (синее стекло номер 8), марка второго стекла в базовом комплекте дефектоскопа – ОС12 (оранжевое стекло номер 12). По желанию покупателя второе стекло может иметь марку ЖЗС1 (желто-зеленое стекло номер 1). На рис. 8 приведены спектральные характеристики дефектоскопа, в которых спектральная чувствительность фотокатода скорректирована на спектральные коэффициенты пропускания цветных стекол, приведенные в ГОСТ 9411-91. Стекло оптическое цветное. Технические условия. Видно, что применение стекла ЖЗС1 снижает чувствительность в желто-красном диапазоне. Его применение более предпочтительно в условиях проведения УФК при повышенных фоновых засветках (свыше 0,2 Лк), как правило, имеющих спектр в данном диапазоне и снижающих контраст двух изображений ПЧР.

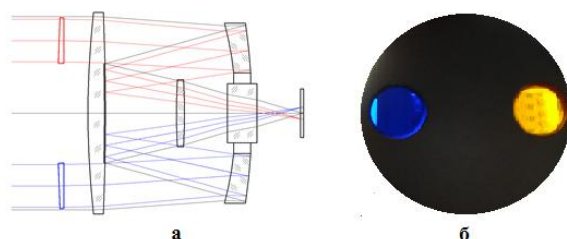


Рис. 7. Ход световых лучей в фильтре-диспергаторе и объективе дефектоскопа «Филин-6» (а) и внешний вид фильтра (б)

Fig. 7. The path of light rays in the filter-disperser and the lens of the flaw detector "Filin-6" (a) and the external appearance of the filter (b)

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

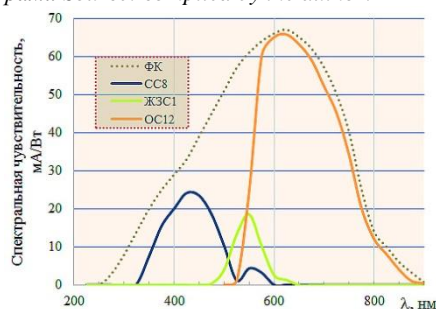


Рис. 8. Спектральные чувствительности УФ-дефектоскопа «Филин 6» в полосах пропускания цветных стекол разных марок в спектро-делителе

Fig. 8. Spectral sensitivities of the Filin 6 UV flaw detector in the pass bands of different colored glasses in the spectrum splitter

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

В основной части исследований были проведены испытания опорного полимерного изолятора ОСК-8-35-2 УХЛ1 с коэффициентом формы $K_f = 5,617$ (рис. 9). Предварительно изолятор был загрязнен водной суспензией каолина и соли, (концентрация каолина 250 г/л, соли – 2 г/л). В соответствии с ГОСТ 10390-2015: удельная поверхностная электрическая проводимость слоя загрязнения χ , мкСм₂ определяется как:

$$\chi = k_f / R, \quad (3)$$

где k_f - коэффициент формы, а R - измеренное значение сопротивления загрязненного изолятора.

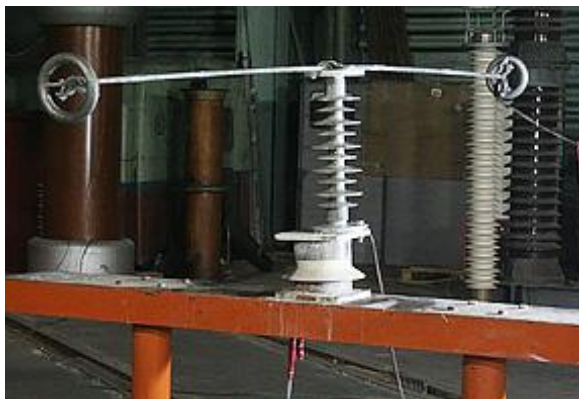


Рис. 9. Фото испытуемого изолятора с макетом провода

Fig. 9. Photo of the tested insulator with a wire model

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Увеличение удельной проводимости проводилось нанесением дополнительных слоев загрязнения напылением приготовленного раствора пульверизатором. В ходе испытаний к образцу толчком прикладывалось испытательное напряжение 35 кВ. По осциллограммам тока утечки рассчитывалось сопротивление слоя загрязнения и по (3) вычислялась поверхностная проводимость. Атмосферные условия при проведении испытаний: $t=14^{\circ}\text{C}$, $\gamma=16\%$, $P=750\text{мм рт. ст.}$

На рисунке 10 приведены несколько типичных изображений ПЧР, полученных в испытаниях изолятора при изменении уровня загрязнения его поверхности.

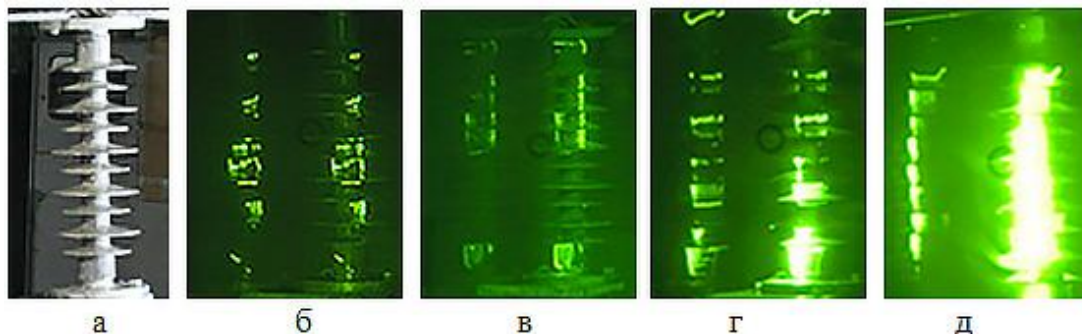


Рис. 10. Фрагменты испытаний изолятора ОСК-8-35-2 (а) с проводимостью слоя загрязнения 6,9 (б), 12 (в); 20 (г) и 28,6 (д) мкСм. Испытательное напряжение 35 кВ_{эфф}.

Fig. 10. Fragments of HV tests of the OSK-8-35-2 insulator (a) with a contamination layer conductivity of 6.9 (b), 12 (c); 20 (d) and 28.6 (d) μS . Test voltage – 35 kV_{ms}

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

В каждом изображении с экрана ЭОП (эопограмме) слева расположено изображение ПЧР в «синем» участке спектра (стекло СС8), а в правой части – изображение ПЧР в «оранжевом» участке спектра (стекло ОС12). Исходные эопограммы были подвергнуты обработке, включающей перевод в черно-белый вид и бинаризацию правого и левого изображения ПЧР в программе Photoshop (преобразование в оттенки серого производилось методом взвешенного суммирования каналов, затем полученные полутоновые изображения были бинаризованы с использованием порога, определенного на основе взвешенного усреднения). В заключение с помощью оригинальной программы проводился подсчет количества белых пикселей раздельно в обоих изображениях. Пример обработки приведен на рисунке 11.

Далее по каждому опыту по бинарным изображениям ПЧР рассчитывались отношения количества белых пикселей на «оранжевом» изображении (N_{orange}^{pixel}) к таковому на «синем» изображении (N_{blue}^{pixel}). Полученное таким образом отношение можно назвать «коэффициентом цветности»

$$K_{color} = N_{orange}^{pixel} / N_{blue}^{pixel} \quad (4)$$

Результаты всех испытаний приведены на рис. 12 в виде точек частных значений. Для наглядности на графике выделены цветами светофора участки, в которых удельная проводимость слоя загрязнения соответствует зонам загрязнения атмосферы 2 СЗ – $\chi = 10 \pm 2$ мкСм; 3 СЗ $\chi = 20 \pm 3$ мкСм и 4 СЗ – 30 ± 5 мкСм. По частным значениям K_{color} построена линейная линия тренда и выведено уравнение регрессии, которое и является итогом исследований

$$K_{color} = 0,0652\chi + 0,0714 \text{ или } \chi \approx \frac{K_{color} - 1,1}{0,065} \quad (5)$$

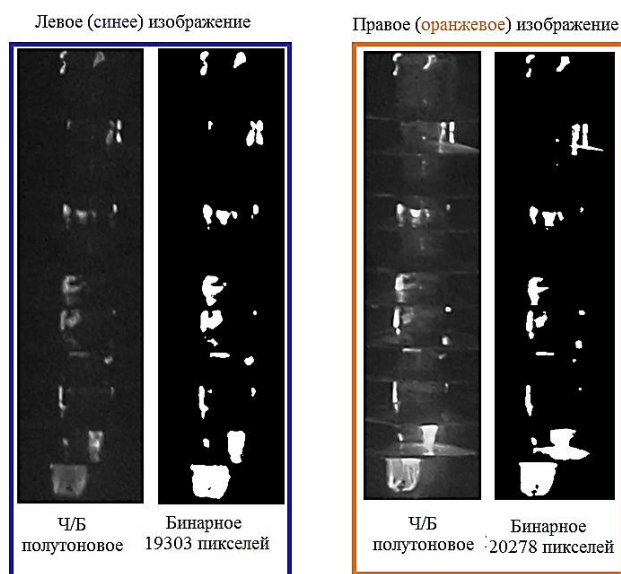


Рис. 11. Пример обработки изображений поверхностных разрядов, полученных при испытаниях изолятора с $\chi \approx 17$ мкСм

Fig. 11. Example of processing images of surface discharges obtained during testing of an insulator with $\chi \approx 17 \mu S$

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

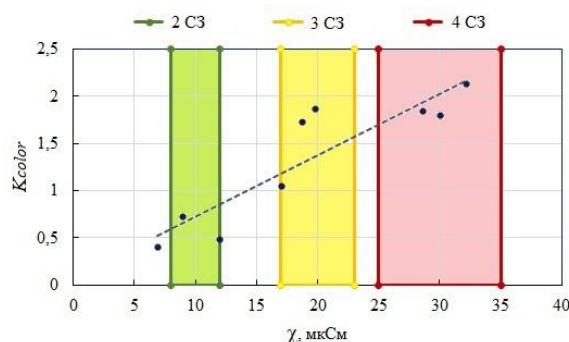


Рис. 12. Зависимость коэффициента цветности поверхностных частичных разрядов от удельной поверхностной проводимости слоя загрязнения полимерного опорного изолятора

Fig. 12. The color coefficient of surface partial discharges vs the specific surface conductivity of the contamination layer on the polymer support insulator

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Результаты и обсуждение (Results and Discussions)

Прежде всего повторимся, что целью исследований была приближенная, но дистанционная, неинвазивная и малозатратная оценка уровня загрязнения внешней изоляции. Конечным результатом применения метода в полевых инспекциях электроустановок, мы считаем вывод о необходимости действий в соответствии с

требованиями стандартов: измерений удельной поверхностной проводимости слоя загрязнения, чистка или обмыв, усиление, нанесение гидрофобных покрытий, замена изоляции. В такой формулировке цель можно считать достигнутой, по крайней мере, для данного вида загрязнения и типа изоляции и при учете влияющих факторов в УФК реальных объектов.

Самыми значимыми и не подлежащими управлению факторами влияния надо признать динамические изменения проводимости слоя загрязнения от увлажнения. Имеются ввиду и поступления влаги из воздуха в слой загрязнения [18] и ее потери при испарении от нагрева токами проводимости и дуговыми разрядами. Кроме того, на спектр излучения ПЧР может влиять состав загрязняющих веществ. Например, в испытаниях полимерных изоляторов на трекинго-эрозионную стойкость, загрязнение создается гидрохлоридом кальция (ГОСТ Р 52082-2003 Изоляторы полимерные опорные наружной установки на напряжение 6-220 кВ. Общие технические условия). Линии излучения при сбросе возбуждения атомов кальция лежат в фиолетовой области спектра, что потребует определенной корректировки найденной корреляционной связи коэффициента цветности с уровнем загрязнения. Погрешность определения коэффициента цветности может возникать при насыщении люминофорного экрана в одном изображении, что можно контролировать уже в процессе УФК.

Разрабатываемая методика оценки уровня загрязнения по спектру излучения, по-видимому, должна включать следующие действия:

- выбор оптимальных метеоусловий и допустимой фоновой освещенности;
- регистрация видеозаписи излучения ПЧР на изоляции оборудования с помощью УФД «Филин - 6» с фильтром спектро-делителем в течение не менее 2 минут (из-за нестабильности ПЧР);
- камеральный анализ видеозаписи и выборка кадров с максимальными интенсивностями ПЧР;
- обработка выбранных видеок кадров, определение коэффициента цветности и уровня загрязнения.

Критерий опасности загрязнения можно в первом приближении сформулировать так: если кадров с критическими уровнями загрязнения больше 5% (статистика отказов электрооборудования по вине загрязненной изоляции приведена в [19]) от общего числа кадров, то требуются мероприятия по СТО 56947007- 29.240.133-2012. Изоляция электроустановок в районах с загрязненной атмосферой. Эксплуатация и техническое обслуживание.

Заключение (Conclusions)

Главным достоинством метода является сравнение изображений, пропущенных через практически один и тот же оптический тракт, причем оба изображения относятся к одной и той же вспышке разряда. Необходимо отметить, что полное увлажнение слоя загрязнения на изоляторах достигается только при воздействии тумана или сильной мороси, что, конечно же, ограничивает применение метода при проведении УФК. Тем не менее, в зонах с сильно загрязнённой атмосферой, например, вблизи алюминиевых, медеплавильных и цементных заводов, химических комбинатов и на железных дорогах применение описанной методики поможет выявить проблемные изоляционные конструкции.

Перспективным направлением для дальнейшей работы является выявление зависимостей проводимости слоя загрязнения от спектра ПЧР для других типов изоляторов и видов загрязнений для расширения базы данных зависимостей.

Применение данной методики при обследовании высоковольтной внешней изоляции на ВЛ и подстанциях посредством ультрафиолетового контроля позволит качественно определить уровень загрязнения изоляции и принять предупредительные меры для избегания аварийных режимов.

Как показывает практика, многие профильные организации уже имеют в своем хозяйстве ультрафиолетовые камеры, тепловизоры и акустические приборы различных производителей. При использовании предложенного в статье метода совместно с другими повысит точность определения степени загрязнения. Например, комбинированное применение тепловизионного контроля и ультрафиолетовой ночной камеры удобно, поскольку оба метода, при определении уровня загрязнения изоляции, требуют одинаковых погодных условий и времени суток.

Признательность (Gratitude)

Авторы выражают глубокую признательность конструкторской группе

разработчиков оптических систем во главе с А.С. Кандауровым.

Литература

1. Hampton, B. F. (1964). Flashover mechanism of polluted insulation. 111(5), 985–990. <https://doi.org/10.1049/PIEE.1964.0155>
2. Rizk, F.A.M. (1981) Mathematical Models for Pollution Flashover. *Electra*, 78, 71-103.
3. CIGRE Task Force 33.04.01 (2000). Polluted Insulators: A Review of Current Knowledge. CIGRE Publication, No. 158.
4. IEEE Working Group on Insulator Contamination, Lightning and Insulator Subcommittee (1979). Application of Insulators in Contaminated Environment. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 98(5), 1676--1695.
5. Владимирский, Л. Л. Основы выбора внешней изоляции воздушных линий электропередачи по результатам натурных исследований в районах с почвенными, морскими и промышленными загрязнениями / Л. Л. Владимирский // Известия НТЦ Единой энергетической системы. – 2025. – № 1(92). – С. 121-140. – EDN KMDOER.
6. Salem A. A. *et al.*, "Pollution Flashover Under Different Contamination Profiles on High Voltage Insulator: Numerical and Experiment Investigation," in *IEEE Access*, vol. 9, pp. 37800-37812, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3063201.
7. Maraaba, L.; Al-Soufi, K.; Ssenoga, T.; Memon, A.M.; Worku, M.Y.; Alhems, L.M. Contamination Level Monitoring Techniques for High-Voltage Insulators: A Review. *Energies* 2022, 15, 7656. <https://doi.org/10.3390/en15207656>.
8. He and R. S. Gorur, "Flashover of insulators in a wet environment," in *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 24, no. 2, pp. 1038-1044, April 2017, doi: 10.1109/TDEI.2017.005795
9. Владимирский, Л.Л., Соломоник, Е.А. Развитие методов выбора внешней изоляции электроустановок высокого напряжения // Электрические станции. 2015. 12. С. 23 – 36.
10. Голенищев-Кутузов В.А., Голенищев-Кутузов А.В., Семенников А.В., Марданов Г.Д., Калимуллин Р.И., Иванов Д.А. Генерация критических акустических импульсов в высоковольтных изоляторах посредством индуцированных полей частичных разрядов // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2023. Т.25. № 1. С. 154-165. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-1-154-165.
11. Голенищев-Кутузов А.В., Ахметвалеева Л.В., Еникеева Г.Р., Иванов Д.А., Семенников А.В., Марданов Г.Д. Дистанционная диагностика дефектов в высоковольтных изоляторах. Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2020;22(2):117-127. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2020-22-1-117-127>
12. Ivanov, D.A.; Sadykov, M.F.; Yaroslavsky, D.A.; Golenishchev-Kutuzov, A.V.; Galieva, T.G. Non-Contact Methods for High-Voltage Insulation Equipment Diagnosis during Operation. *Energies* 2021, 14, 5670. <https://doi.org/10.3390/en14185670>
13. Зарипов Д.К., Закиров Д.Ф., Тарасов Б.П., Миронова Е.А., Насибуллин Р.А. Экспериментальное лабораторное исследование возможности выявления загрязнения высоковольтных изоляторов с помощью тепловизора // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2024. Т. 26. № 6. С. 5-19. doi: 10.30724/1998-9903-2024-26-6-5-19
14. Зарипов Д.К., Насибуллин Р.А., Закиров Д.Ф., Захаров А.В. Исследование работы полимерного изолятора при увлажнении искусственным туманом. Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2023;25(5):20-29. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2023-25-5-20-29>
15. Овсянников А.Г., Жарич Д.С., Швец Н.А. Сравнительный анализ метода контроля состояния изоляции по ультрафиолетовому излучению поверхностных частичных разрядов // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2025. Т. 27. № 4. С. 82-93. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-4-82-93.
16. P. Blackmore and D. Birtwhistle, "Surface discharges on polymeric insulator shed surfaces," in *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 4, no. 2, pp. 210-217, April 1997, doi: 10.1109/94.595248.
17. L. Jin, D. Ma, Z. Yuan, G. Zhou and S. Han, "Evaluation of Surface Discharge of Polluted Insulator Based on Optical Emission Spectroscopy Measurements," in *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 31, no. 1, pp. 350-357, Feb. 2024, doi: 10.1109/TDEI.2023.3300258.
18. A. Ovsyannikov, V. Borovitsky. Possible reasons of transmission line unexplained

outages. Proceedings of the 18th International Symposium on High Voltages, Seoul, Korea. Paper PG-08, 2295--2298.

19. Ефимов Е.Н., Тимашова Л.В., Ясинская Н.В. Причины и характер повреждаемости компонентов ЛЭП напряжением 110-750 кВ в 1997-2007 гг. // Энергия единой сети. — 2012. — № 5(5). — [С. 32-41].

Авторы публикации

Овсянников Александр Георгиевич - д.т.н., профессор кафедры «Техника и электрофизика высоких напряжений» ФГБОУ Новосибирский государственный технический университет, Email: oag@nspb.ru.

Жарич Дмитрий Сергеевич - заместитель начальника ЭТЛ, ООО «Сибэнергодиагностика», Email: jds@sibenedia.ru.

Швец Николай Андреевич - ведущий инженер филиала АО «Россети Научно-технический центр» - СибНИИЭ, аспирант Новосибирского государственного технического университета, Email: shvepsnik@yandex.ru.

References

1. Hampton, B. F. (1964). Flashover mechanism of polluted insulation. 111(5), 985–990. <https://doi.org/10.1049/PIEE.1964.0155>
2. Rizk, F.A.M. (1981) Mathematical Models for Pollution Flashover. Electra, 78, 71-103.
3. CIGRE Task Force 33.04.01 (2000). Polluted Insulators: A Review of Current Knowledge. CIGRE Publication, No. 158.
4. IEEE Working Group on Insulator Contamination, Lightning and Insulator Subcommittee (1979). Application of Insulators in Contaminated Environment. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 98(5), 1676--1695.
5. Vladimirkii L.L. Fundamentals of the choice of external insulation of overhead power transmission lines based on the results of field studies in areas with soil, marine and industrial pollution // Izvestiya NTC Edinoj energeticheskoy sistemy. – 2025. – № 1(92). – С. 121-140. – EDN KMDOER.
6. Salem A. A. *et al.*, "Pollution Flashover Under Different Contamination Profiles on High Voltage Insulator: Numerical and Experiment Investigation," in *IEEE Access*, vol. 9, pp. 37800-37812, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3063201.
7. Maraaba, L.; Al-Soufi, K.; Sennoga, T.; Memon, A.M.; Worku, M.Y.; Alhems, L.M. Contamination Level Monitoring Techniques for High-Voltage Insulators: A Review. *Energies* 2022, 15, 7656. <https://doi.org/10.3390/en15207656J>.
8. J. He and R. S. Gorur, "Flashover of insulators in a wet environment," in *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 24, no. 2, pp. 1038-1044, April 2017, doi: 10.1109/TDEI.2017.005795
9. Vladimirkii, L. L., & Solomonic, E. A. (2015). Development of Methods for Selecting External Insulation for High-Voltage Installations. *Electric Stations*, 12, 23--36.
10. Golenishchev-Kutuzov VA, Golenishchev-Kutuzov AV., Semenikov AV, Mardanov GD., Kalimullin RI., Ivanov DA. Generation of critical acoustic pulses in high-voltage insulators due to induced fields of partial discharges. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2023; 25 (1): 154-165. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-1-154-165.
11. Golenishchev-Kutuzov A.V., Akhmetvaleeva L.V., Enikeeva G.R., Ivanov D.A., Semennikov A.V., Mardanov G.D. Remote testing for defects in service high-voltage insulators. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2020;22(2):117-127. (In Russ.) <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2020-22-1-117-127>
12. Ivanov, D.A.; Sadykov, M.F.; Yaroslavsky, D.A.; Golenishchev-Kutuzov, A.V.; Galieva, T.G. Non-Contact Methods for High-Voltage Insulation Equipment Diagnosis during Operation. *Energies* 2021, 14, 5670. <https://doi.org/10.3390/en14185670>
13. Zaripov D.K., Zakirov D.F., Tarasov B.P., Mironova E.A., Nasibullin R.A. Experimental study of the possibility of detecting contamination of high-voltage insulators with the help of a thermal imager. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2024; 26 (6): 5-19. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-6-5-19
14. Zaripov D.K., Nasibullin R.A., Zakirov D.F., Zakharov A.V. Study of operation of a polymer insulator under uniform and non-uniform contamination. *Power engineering: research,*

equipment, technology. 2023;25(5):20-29. (In Russ.) <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2023-25-5-20-29>

15. Ovsyannikov A.G., Zharich D.S., Shvets N.A. Comparative analysis of the method of insulation condition monitoring by ultraviolet radiation of surface partial discharges. Power engineering: research, equipment, technology. 2025; 27 (4): 82-93. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-4-82-93.

16. P. Blackmore and D. Birtwhistle, "Surface discharges on polymeric insulator shed surfaces," in IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 4, no. 2, pp. 210-217, April 1997, doi:10.1109/94.595248.

17. L. Jin, D. Ma, Z. Yuan, G. Zhou and S. Han, "Evaluation of Surface Discharge of Polluted Insulator Based on Optical Emission Spectroscopy Measurements," in IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 31, no. 1, pp. 350-357, Feb. 2024, doi: 10.1109/TDEI.2023.3300258.

18. A. Ovsyannikov, V. Borovitsky. Possible reasons of transmission line unexplained outages. Proceedings of the 18th International Symposium on High Voltages, Seoul, Korea. Paper PG-08, 2295--2298.

19. Efimov E.N., Timashova L.V., Yasinskaya N.V. Causes and Nature of Damage to Components of 110-750 kV Overhead Transmission Lines in 1997-2007 // Energy of the Unified Grid. — 2012. — № 5(5). — P. 32-41.

Authors of the publication

Alexander G. Ovsyannikov - Novosibirsk State Technical University, *Email: oag@nsps.ru* .

Dmitry S. Zharich - LLC "Sibenergodagnostika", *Email: jds@sibenedia.ru*.

Nikolay A. Shvets - Novosibirsk State Technical University. *Email: shvepsnik@yandex.ru*.

Шифр научной специальности: 2.4.3. Электроэнергетика

Получено **11.01.2026 г.**

Отредактировано **26.05.2026 г.**

Принято **10.06.2026 г.**