



СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДА КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ ИЗОЛЯЦИИ ПО УЛЬТРАФИОЛЕТОВОМУ ИЗЛУЧЕНИЮ ПОВЕРХНОСТНЫХ ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ

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

¹Новосибирский Государственный Технический Университет, г. Новосибирск, Россия

²ООО «Сибэнергодиагностика», г. Новосибирск, Россия

shvepsnik@yandex.ru

Резюме: АКТУАЛЬНОСТЬ. Немотивированные отключения воздушных линий электропередачи (ВЛ) обычно связаны с перекрытиями линейной изоляции вследствие загрязнения и увлажнения. Достаточно надежными индикаторами опасных уровней загрязнения являются частичные разряды на поверхности изоляции (ПЧР), которые можно обнаружить различными способами. Для профилактического контроля характеристик ПЧР более привлекательны дистанционные неинвазивные методы, основанные на регистрации акустических и электромагнитных сигналов различных частотных диапазонов, а также оптических излучений в инфракрасной (ИК) и ультрафиолетовой (УФ) частях спектра. Для реализации УФ-контроля перспективными считаются дневные УФ-дефектоскопы, известные также под другими названиями: УФ-камеры, УФ-визуализаторы, УФ-пеленгаторы и др. Они регистрируют излучение короны и ПЧР в диапазоне 240-280 нм и могут использоваться в дневное время суток, благодаря светофильтрам, отсекающим солнечное излучение. Однако четких зависимостей характеристик регистрируемых разрядных процессов с степенью загрязнения изоляции и ее влагоразрядными характеристиками до сих пор не получено даже в лабораторных исследованиях. Безусловно определяющую роль в этом играет сложность процессов, но свой вклад вносит и недостаточное знание свойств применяемой аппаратуры и влияния внешних факторов на результаты УФК. ЦЕЛЬ. Провести исследования передаточных характеристик УФ-дефектоскопов нескольких типов, а также оценить влияние среды распространения на результаты УФК. По результатам исследований сформулировать соответствующие ограничения на диапазон настроек аппаратуры и на условия проведения УФК в полевых условиях. МЕТОДЫ. Для решения поставленных задач применялись экспериментальные методы исследования как в лабораторных условиях, так и в процессе УФК реальных объектов. РЕЗУЛЬТАТЫ. Экспериментально установлены зависимости между показаниями счетчика фотонов и площади УФ-излучения от вводимого коэффициента усиления УФ-дефектоскопов. Выявлен двоякий характер влияния паров воды и частиц пыли на результат регистрации интенсивности разрядов. Практическое применение полученных результатов при ультрафиолетовом контроле изоляции дает возможность усовершенствовать процесс диагностики, тем самым увеличивая безотказность работы электротехнических устройств.

Ключевые слова: воздушные линии электропередачи; загрязнение и увлажнение изоляции; поверхностные частичные разряды; ультрафиолетовый контроль; влияние настроек аппаратуры и внешних факторов.

Для цитирования: 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.

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE METHOD OF INSULATION CONDITION MONITORING BY ULTRAVIOLET RADIATION OF SURFACE PARTIAL DISCHARGES

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

¹Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

²LLC "Sibenergodiagnostics", Novosibirsk, Russia

shvepsnik@yandex.ru

Abstract: *RELEVANCE.* Unreasonable overhead power line outages are typically associated with flashover of line insulation due to contamination and moisture. Partial discharges on the insulation surface are fairly reliable indicators of dangerous levels of contamination and can be detected in a variety of ways. Remote non-invasive methods have become more popular for preventive control of the characteristics of surface partial discharges (SPD), they are based on the registration of acoustic and electromagnetic signals of various partial frequency ranges, as well as optical radiation in the infrared (IR) and ultraviolet (UV) parts of the spectrum. Daytime UV flaw detectors are considered promising for the realization of UV-inspection, they are also known by other names: UV cameras, UV visualizers, UV scanners, etc. These devices register corona radiation and surface partial discharges in the range of 240-280 nm and can be used in the daytime due to light filters cutting off solar radiation. Currently clear relationships between the characteristics of discharge processes and the degree of contamination of the insulation and its moisture-discharge characteristics have not been obtained even in laboratory studies. Of course, the complexity of the processes plays a determining role in that, but insufficient knowledge of the properties of the equipment and the influence of external factors contribute on the UV-inspection results. *PURPOSE.* To investigate the transmission characteristics of several types of UV flaw detectors and to evaluate the influence of the propagation ambience on UV-inspection results. Restrictions on the range of equipment settings and on the conditions for conducting UV-inspection in the field should be formulated based on the research results. *METHODS.* Experimental research methods were used both in laboratory conditions and in the process of UV-inspection of real objects to solve the tasks. *RESULTS.* Relationships between the readings of the photon counter and the area of UV-radiation from the input gain of UV flaw detectors have been experimentally established. Double impact of the effect of water vapors and dust particles on the result of recording the intensity of discharges was revealed. The practical application of the obtained results in ultraviolet inspection makes it possible to improve the diagnostic process, thereby increasing the reliability of electrical devices.

Keywords: overhead transmission lines; contamination and moisture on the insulation; surface partial discharges; ultraviolet inspection; influence of equipment settings and external factors.

For citation: 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.

Введение (Introduction)

Надежность воздушных линий электропередачи (ВЛ) напрямую зависит от состояния их изоляции, при этом перекрытие загрязненной изоляции остается одной из основных причин аварийных отключений в современных энергосистемах. Несмотря на значительный прогресс в методах диагностики, существующие подходы к оценке состояния изоляции по характеристикам поверхностных частичных разрядов (ПЧР) сталкиваются с рядом ограничений, снижающих достоверность и практическую ценность получаемых результатов.

Ключевая проблема заключается в отсутствии четких корреляционных зависимостей между параметрами регистрируемых ПЧР и фактическим состоянием изоляции. В частности, недостаточно изучены взаимосвязи интенсивности и спектральных характеристик разрядов со степенью поверхностного загрязнения, уровнем увлажнения и стадией деградации изоляционных материалов. Кроме того, существенное влияние на результаты измерений оказывают вариации атмосферных условий и метрологические особенности используемого диагностического оборудования.

Особую актуальность приобретает разработка методов количественной оценки степени загрязнения изоляции, позволяющих перейти от качественных визуальных наблюдений к точным измерительным процедурам. Такой подход требует комплексного исследования как физических процессов формирования ПЧР на загрязненных поверхностях, так и метрологических характеристик современных средств диагностики, в частности УФ-дефектоскопов нового поколения.

Целью исследования является изучить влияние среды распространения на результаты УФ-контроля, а также определить достоверные передаточные характеристики некоторых распространенных УФ-дефектоскопов.

В ходе исследования были получены передаточные характеристики УФ-камер «DayCor Super B», «UVolle – VX», «CoroCam 6», выявлено влияние техногенных факторов и окружающей среды на результаты ультрафиолетового контроля, на основе полученных результатов разработаны рекомендации по улучшению качества УФ-контроля.

Практическая значимость данной работы определяется возможностью повышения точности и достоверности диагностики состояния изоляции без необходимости ее отключения. Разработанные рекомендации позволяют оптимизировать процессы технического обслуживания ВЛ и снизить риски аварийных отключений, что имеет важное значение для обеспечения надежности энергосистем в целом.

Литературный обзор (Literature Review)

Измерения степени загрязнения поверхности изоляции проводят для оценки вероятности перекрытия внешней изоляции оборудования в нормальном эксплуатационном режиме работы высоковольтного оборудования. На выборочных участках линий (ВЛ) демонтируют гирлянды изоляторов, а на распределительных устройствах подстанций – опорные изоляторы, и определяют удельную поверхностную проводимость слоя загрязнения, χ , мксм при увлажнении слоя загрязнения до насыщения. Затем либо проводят испытания разрядных характеристик по стандартным методикам, либо прогнозируют изолирующую способность изоляторов по выполненным оценкам проводимости слоя загрязнения [1]. Учитывая затраты времени и средств на существующие методы контроля, можно понять интерес к разработке дистанционных оценок степени загрязнения.

В группе дистанционных выделяются акустический и электромагнитный методы регистрации обнаружения электрических разрядов. Эффективность контроля оборудования резко увеличилась при сочетанном применении обоих методов с «привязкой» измеряемых сигналов к мгновенным значениям или фазовым углам напряжения на изоляторах [2]. Вместе с тем, в развитии указанных методов просматривается необходимость повышения чувствительности, помехоустойчивости и пространственной разрешающей способности для более точной локализации места возникновения дефекта [3]. На основе этих методов разрабатываются системы мониторинга для непрерывного контроля состояния высоковольтных изоляторов [4].

Заметный вклад в профилактический контроль оборудования изоляции внесли оптические методы, прежде всего инфракрасная термография [5]. При тепловизионном контроле (ТБК) оборудования выявляются «джоулевы» нагревы изоляционных конструкций, вызванные токами утечки по поверхности загрязненных и увлажненных изоляторов. К сожалению, характеристики регистрирующей аппаратуры и объектов наблюдения, а также требования к внешним условиям проведения ТБК ограничивают достоинства метода в части оценки степени загрязнения изоляции. В 21-м веке стал развиваться и метод ультрафиолетового контроля (УФК) оборудования высокого напряжения, основанный на регистрации разрядных процессов, генерируемых различными дефектами, в том числе и загрязнением изоляции. Интенсивность излучения разрядов на поверхности изоляции (ПЧР) при повышенной влажности воздуха, тумане, росе или осадках являются достаточно надежными индикаторами загрязнения и предвестниками перекрытия внешней изоляции.

С появлением УФ-дефектоскопов (УФ-камер, УФ-сканеров, УФ-визуализаторов и т.п.), позволяющих видеть разряды в дневное время возможность дистанционного контроля состояния изоляции по интенсивности разрядов приблизилась к реальному воплощению. В процессе УФ-контроля (УФК) достаточно просто обнаруживаются дефекты, инициирующие коронные разряды на проводах (шинах) и арматуре [6]. Более сложные задачи УФК (оценка степени загрязнения и опасности повреждения разрядами изоляции) потребовали поиска связи между электрическими (амплитуды импульсов тока, заряды и энергия ПЧР) и оптическими (площадь светящихся пятен, показания счетчика фотонов, динамика изменения картины разрядов) характеристиками разрядов. Исследовалось также влияние различных факторов на результаты регистрации УФ-излучения ПЧР.

К достоинствам работы В. Pinnangudi и его коллег [7] можно отнести методику количественной оценки интенсивности УФ-излучения с учетом влияния фоновой освещенности, угла наблюдения, расстояния, рассеяния и поглощения УФ-излучения туманом. Зависимости регистрируемого излучения от расстояния оказались близки к хорошо известному закону снижения освещенности обратно пропорционально квадрату расстояния между приемником и точечным источником излучения. При высоковольтных испытаниях полимерных изоляторов авторы [7] обнаружили тесную корреляцию между зарядом короны на металлических оконцевателях изоляторов и площадью пятна (количеством пикселей) изображения короны на дисплее УФ-камеры. Данное наблюдение

согласуется с выводом Г. Ретера [8] о прямой пропорциональности между числом фотонов и количеством актов ионизации в электронных лавинах. Следует заметить, что указанная закономерность справедлива только для «холодных» разрядов: электронных лавин и стримеров, а на загрязненной и увлажненной изоляции разряды развиваются по нескольким физическим механизмам в последовательности «электронная лавина – стример – лидер – дуга». Поэтому следует ожидать более сложной связи между электрическими характеристиками и свойствами УФ-излучения разрядов. Для их установления разрабатываются модели разрядных процессов на загрязненной и увлажненной изоляции, в том числе с применением нейронных сетей и нечетких множеств для прогнозирования напряжения перекрытия [9]. В [10] установлено, что площадь УФ-излучения в камере SogoCAM504 увеличивается с увеличением интенсивности разрядов на полимерном изоляторе 110 кВ, но имеет нелинейную характеристику в диапазоне усиления от 50 до 80 %. На основе исследования была создана модель адаптивной нейро-нечеткой системы вывода (ANFIS) и с ее помощью реализована достаточно точная оценка заряда короны при различных усилениях камеры и расстояниях до очага разрядов. В других исследованиях установлено, что при низкой степени загрязнения максимальная площадь факела излучения разряда и заряд зависят линейно от проводимости слоя загрязнения и косинуса угла наблюдения, но при больших загрязнениях площадь факела разряда растет быстрее, чем проводимость.

Счетчики фотонов разных производителей при прочих равных условиях дают разные показания, а ряд моделей демонстрируют нелинейные зависимости количества фотонов от вводимого усиления [11]. Для первого дневного в линейке дефектоскопов «Филин» [12] разрабатывается методика оценки интенсивности излучения по числу и яркости пикселей в изображении факела ПЧР. В [13] предложена технология гиперспектральной визуализации для определения уровня загрязнения полимерных изоляторов. На основе гиперспектральных данных, собранных в испытательных лабораториях, создана методика оценки степени загрязнения полимерного изолятора, устраняющая влияние фонового освещения в полевых условиях.

Авторы [14] пытались найти связь между характеристиками УФ-излучения и стадией развития разрядов на гирлянде загрязненных и увлажненных туманом фарфоровых изоляторов класса напряжения 750 кВ. При неизменной степени загрязнения стадии развития разрядов изменялись с уровнем приложенного напряжения и делились на три степени: коронные разряды (напряжение 200-300 кВ), перемежающиеся дужки (200-400 кВ) и непрерывно развивающиеся дуги (500 кВ). Было установлено, что число УФ-пятен и области их формирования могут только говорить об опасности разрядов, но не могут использоваться для количественной оценки. С другой стороны, было замечено, что по среднему числу пятен УФ-излучения стабильно повторяющихся в каждом кадре видеозаписи и снижению разброса этого числа со 100 до 20 % можно говорить о переходе к стадии непрерывно удлиняющейся дуги, т.е. к стадии близкой к напряжению перекрытия.

Авторы [15] (базовой для разработки отраслевого стандарта EPRI публикации) с помощью камеры DAYCOR провели две серии испытаний партии изоляторов с различной степенью загрязнения поверхности. На открытом стенде изучалась динамика развития ПЧР в различных условиях увлажнения, а затем в испытаниях по стандартным методикам определялись влагоразрядные характеристики гирлянд. Стадии разрядной активности вплоть до перекрытия были разделены на шесть типов (рис. 1) в зависимости от уровней бросков тока утечки, которые, в свою очередь, зависят как от уровня загрязнения, так и от степени увлажнения слоя загрязнения.

1. Разряды почти отсутствуют: камера DAYCOR фиксирует очень низкий уровень разрядной активности. Ток утечки через изолятор составляет менее 1 мА.

2. Корона: изображения на дисплее камеры, связанные с короной на загрязненных изоляторах, выглядят как стабильные пятна, расположенные вокруг стержня изолятора. Ток утечки через изолятор не превышает 1 мА.

3. Импульсные вспышки представляют собой яркие вспышки, возникающие редко и одновременно на нескольких изоляторах гирлянды. Амплитуды бросков тока утечки, связанных с вспышками, изменяются в пределах 10-50 мА.

4. Непрерывное мерцание проявляется в виде частых ярких вспышек, беспорядочно возникающих в различных местах гирлянды. Как и в случае с коронными разрядами, эти вспышки возникают в областях с наибольшей плотностью тока, т.е. вокруг стержней изоляторов. Броски тока утечки, в моменты разрядной активности, составляют 40-70 мА.

5. Импульсные дуги на сухих полосах поверхностного загрязнения очень похожи на импульсные вспышки, но более интенсивны и могут охватывать почти всю длину гирлянды

изоляторов. Они по-прежнему очень кратковременны и в большинстве случаев замечаются только в одном видеокadre. Броски тока утечки, связанные с этой активностью, составляют 60-100 мА.

6. Интенсивная дуга в сухой зоне проявляется в виде очень интенсивных и пульсирующих дуговых разрядов, которые могут охватывать почти всю длину изолятора и вспыхивать в нескольких периодах напряжения вплоть до полного перекрытия. Сопровождающие броски тока утечки обычно превышают 100 мА.

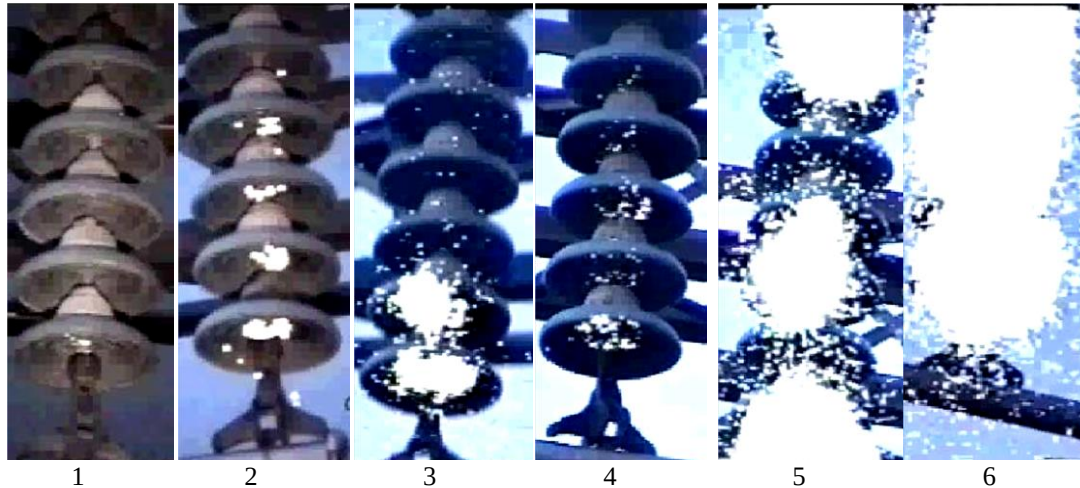


Рис. 1. Шесть стадий разрядной активности в испытаниях влагоразрядных характеристик гирлянд тарельчатых изоляторов

Fig. 1. Six stages of discharge activity in testing moisture-discharge characteristics of insulator string

*Источник: Составлено авторами [15] Source: compiled by the author [15].

Наблюдаемые закономерности разрядов коррелируют с общепринятыми представлениями о стадиях развития разряда при загрязнении изолятора.

Методика оценки загрязнения, обоснованная в [15], адаптирована в практические рекомендации «Инструкции по эксплуатации камеры CoroCam 7» [16]. В ней особо выделена роль оптимального режима увлажнения слоя загрязнения. Отмечается, что разряды могут отсутствовать на сильно загрязнённых изоляторах, если слой загрязнений высох или слишком переувлажнен. Указаны факторы, влияющие на степень увлажнения поверхности изолятора: относительная влажность воздуха на высоте подвески изоляции; предшествующие (дождь накануне, ясная холодная ночь) и текущие (скорость ветра, температура) природные явления. Влияет также и толщина слоя загрязнения: чем толще слой загрязнения, тем больше влаги поглощается в нем. Несмотря на применение солнечно-слепых дефектоскопов рекомендуется регистрацию разрядов проводить «в ночное время суток или ранним утром, поскольку в указанное время суток велика вероятность проявления разрядной активности, связанной с загрязнением поверхности изоляторов».

Решение о необходимости и сроках проведения обмыва изоляторов зависит от наличия и типа разрядов и их повторяемости в кадрах видеозаписи. При слабых уровнях загрязнения, когда ток утечки меньше 1 мА, разряды на изоляторах либо отсутствуют, либо возникают только коронные разряды. В условиях умеренного загрязнения с бросками тока утечки в диапазоне 10-50 мА (при чрезмерном увлажнении – в диапазоне 40-70 мА) возникают диффузные разряды различной периодичности. В таких случаях чистка и обмыв изоляторов могут потребоваться, но не в скором времени.

Признаками опасного загрязнения изоляторов являются периодически повторяющиеся контрагированные дуговые разряды в сухих зонах слоя загрязнения с бросками тока утечки от 60 до 100 мА. В этих случаях обмыв изоляторов следует сделать в ближайшее время. Признаком близости к перекрытию гирлянды служит периодическое возникновение интенсивных, удлиняющихся почти на всю гирлянду дуговых разрядов с бросками тока более 100 мА. В таких случаях обмыв изоляции нужно выполнить немедленно.

Сделаем ряд пояснений и замечаний по кратко изложенной методике [15].

– Обнаружены ошибки, касающиеся идентификации типа разрядов (возможно, были неточности в переводе). Так, судя по изображениям на видеокadre, под коронными разрядами понимаются и корона на металлических частях, и ПЧР на тарелках изоляторов. То, что называется «тлеющими разрядами», противоречит физике газового разряда, т.к.

тлеющие разряды формируются при пониженных давлениях и имеют четкую структуру светящихся областей каналов. То, что отражено на видеокдрах, мы бы назвали диффузным свечением, вызванным, скорее всего, отражениями УФ-излучения разрядов (дужек ПЧР) от микрокапелек пара, возникающего при подсушке слоя загрязнения током утечки. Под термином «сухой дуговой разряд» по-видимому надо понимать дуговой разряд, перекрывающий сухую зону слоя загрязнения на поверхности изолятора.

– Заметная доля рассмотренных в «Инструкции...» [16] случаев заканчивается ссылкой на неопределённость интерпретации из-за недостоверности полученных данных. По-видимому, это связано с преобразованием реальной картины разрядов в поле пятен на дисплее УФД, возникающих, в том числе и от рассеяния на частицах пара в среде распространения.

Материалы и методы (Materials and methods)

В первой серии испытаний исследовалось рассеяние УФ-излучения в среде распространения. В лабораторном опыте луч УФ-светодиода направлялся перпендикулярно оптической оси камеры «DayCam Super B» с усилением Gain = 120. В контрольной части опыта на дисплее камеры наблюдались отражения УФ-излучения на редких пылинках в воздухе (рис. 2а). Значительно больше отражений возникало на капельках пара разогревающегося чайника, расположенного ниже области наблюдения (рис. 2б). Время нагрева легко вычислить по разнице между моментами съемки двух кадров: 20:05 – 20:04 ≈ 1 мин.

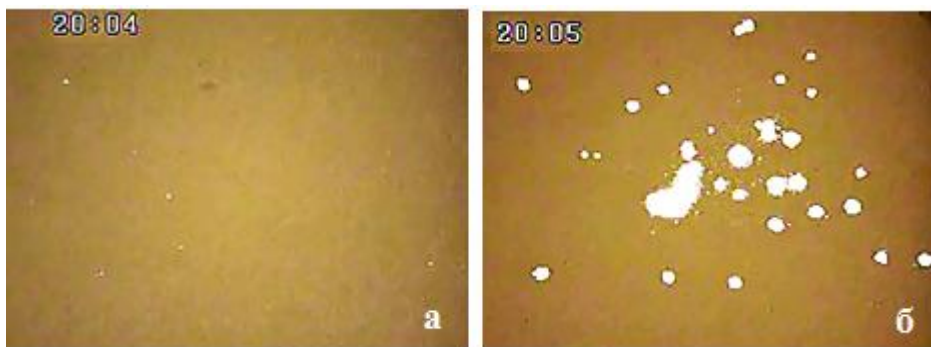


Рис. 2. Рассеяние УФ-излучения на пылинках (а) и на частицах пара (б) Fig. 2. Scattering of UV radiation by dust particles (a) and by vapor particles (b)

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

На рисунке 3 приведена картина с дисплея УФ-камеры «CogoCam 7» при обследовании ВЛ 110 кВ во время легкой утренней дымки (тумана). Вокруг натяжных гирлянд изоляторов концентрировалась группа пятен рассеянного каплями тумана УФ-излучения от разрядов короны на арматуре и ПЧР на изоляторах гирлянды (попавшие в рамку счета фотонов).

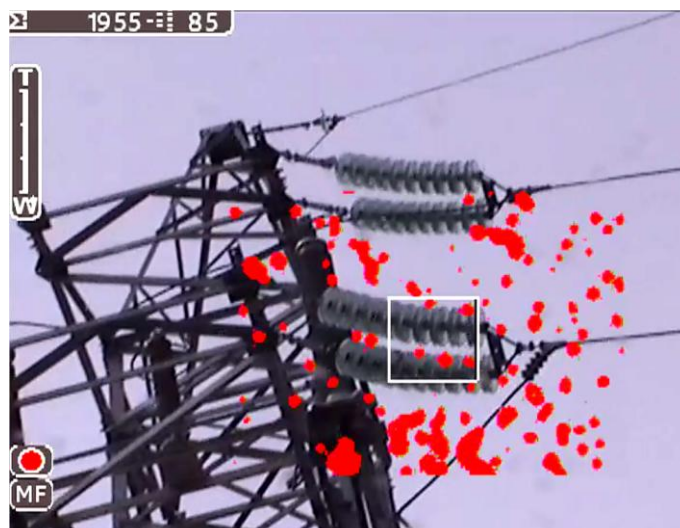


Рис. 3. Рассеяние частицами тумана УФ-излучения разрядов на ВЛ 110 кВ Fig. 3. Scattering of UV radiation from discharges on 110 kV overhead power lines by fog particles

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

На рисунке 4 приведены картины с дисплея УФ-дефектоскопа «Филин 7», полученные при обследовании электрооборудования металлургического комбината.

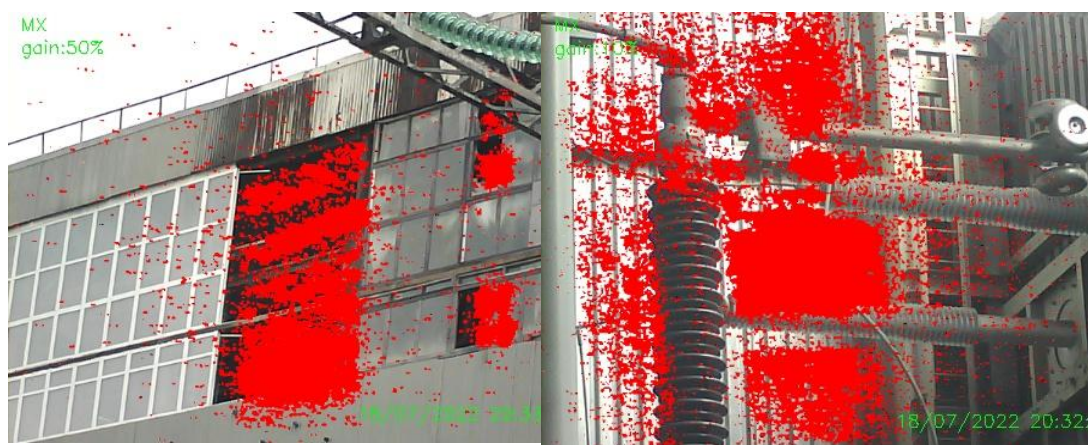


Рис. 4. Отражение сторонних УФ-излучений на частицах производственной пыли, вылетающей из открытых окон цеха (слева) и падающей на изоляторы ОРУ 220 кВ (справа)

Fig. 4. Reflection of external UV radiation on particles of industrial dust flying out from open windows of the workshop (left) and falling on insulators of 220 kV outdoor switchgear (right)

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

На левом снимке видны пятна отраженных УФ-излучения внешних источников (предположительно от электросварки), а на правом они же и рассеянные УФ-излучения разрядов на оборудовании ОРУ 220 кВ. Понятно, что отделить полезные сигналы от разрядов на оборудовании и помехи от внешних источников излучения невозможно.

Во второй серии опытов исследовалась зависимость показаний счетчика «УФ-событий» (Counting) от значения установленного коэффициента усиления (Gain). Испытаниям подвергались УФ-камеры «DayCor Super B» и UVolle – VX. В качестве источника УФ-излучения использовался прибор «Дарсонваль» с насадкой «Капля». Интенсивность УФ-излучения регулировалась. Расстояние между источником УФ-излучения и УФ-камерами составляло 235 см и не менялось.

Результаты (Results)

В опыте с УФ-камерой «DayCor Super B» мощность УФ-излучения устанавливалась максимальной. Зависимость показаний счетчика от усиления имеет максимум при усилении 130-140 (рис. 5), а области УФ-излучения равномерно увеличивались с ростом усиления (рис. 6).

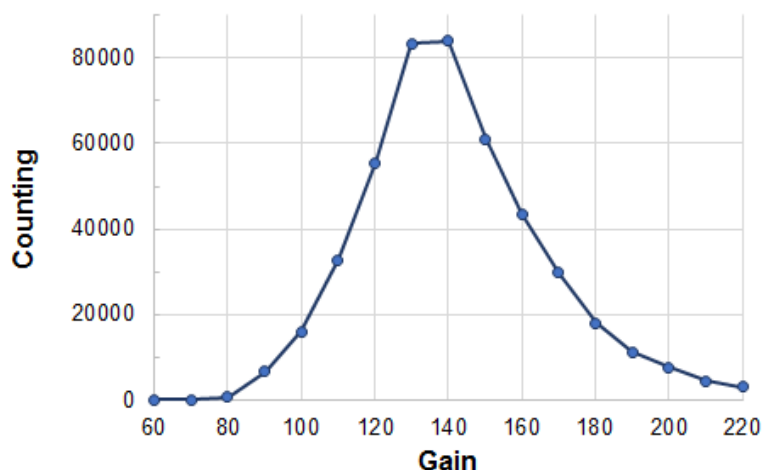


Рис. 5. Показания счетчика фотонов камеры «DayCor Super B» от усиления

Fig. 5. Readings of the photon counter in the camera "DayCor Super B" vs the Gain

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

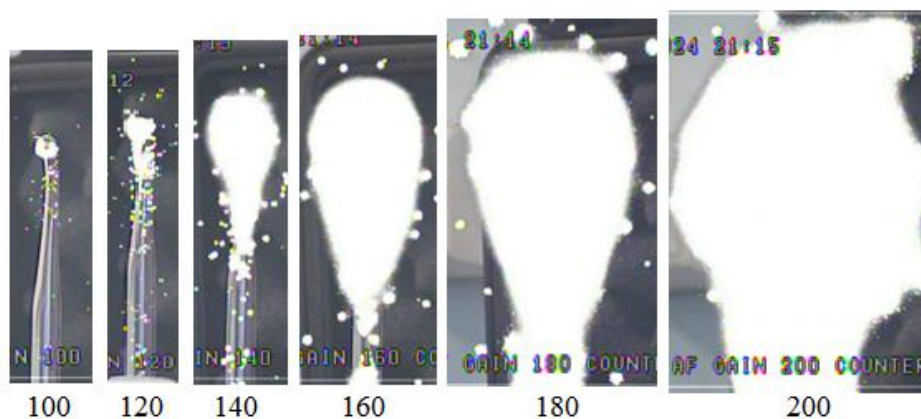


Рис. 6. Изменение картины УФ-излучения при росте усиления от 100 до 200%

Fig. 6. Changes in the UV radiation pattern with an increase of Gain from 100 up to 200%

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

В опытах с УФ-камерой UVolle – VX мощность излучения устанавливалась минимальной. Показания счетчика монотонно росли с увеличением усилением до 50% и потом оставались практически неизменными (рис. 7), как и размеры области УФ-излучения.

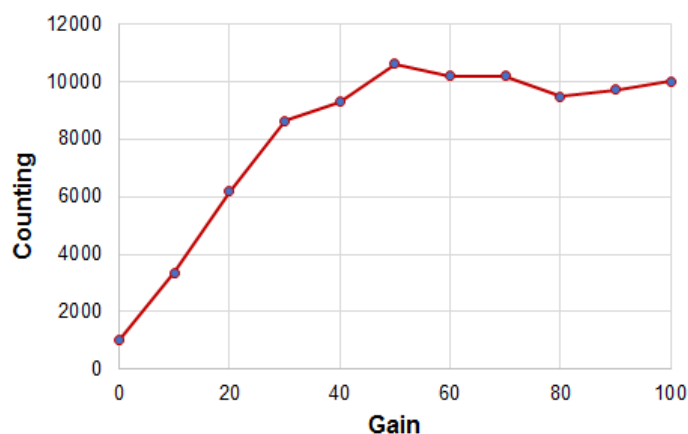


Рис. 7. Зависимость показаний счетчика фотонов от усиления камеры «UVolle – VX»

Fig. 7. Photon counter readings of the UVolle – VX camera vs Gain

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

На рисунке 8 приведены скриншоты дисплея УФ-камеры «CoroCam 6» с картинками разрядов, полученными при двукратном изменении усиления камеры и почти такими же изменениями показаний счетчика фотонов. Этот факт говорит о линейности счетчика фотонов относительно коэффициента усиления в рабочем диапазоне его изменения. Вместе с тем, заметно, что площадь пятна разряда растет с опережающим темпом по сравнению с «количеством фотонов».

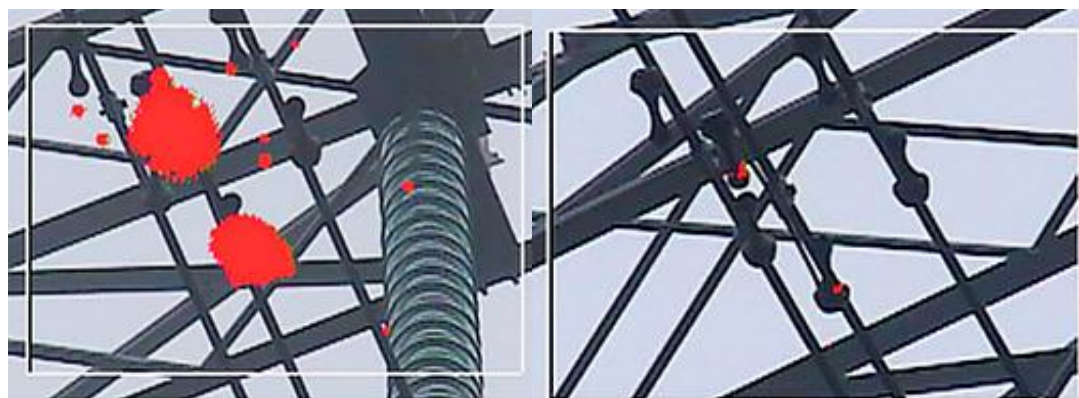


Рис. 8. Показания счетчика фотонов при изменении усиления «CoroCam 6»

Fig. 8. Photon counter readings vs the Gain of the «CoroCam 6» camera

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

Обсуждение (Discussions)

Во-первых, хотелось обратить внимание на несколько следствий, связанных с отражениями УФ-излучения на частицах в среде распространения на пути от места возникновения разрядов до приемника (рис. 2). По-видимому, частицы не столько поглощают излучение, сколько за счет отражения способствуют увеличению числа фотонов, регистрируемых встроенным счетчиком, и увеличению площади факела УФ-излучения. Дело в том, что подсушка слоя загрязнения при нагреве токами утечки сопровождается образованием пара, а отражение УФ-излучений разрядных процессов от капелек пара приводит к ложному приросту интенсивности и диффузному виду излучения разрядов особенно в заключительных стадиях перед перекрытием изоляции (стадии 5 и 6 на рисунке 1). Косвенным доказательством могут служить и литературные данные о снижении регистрируемой интенсивности излучения разрядов с увеличением расстояния. В полученных результатах этих исследований показатель степени ослабления был близок, но оставался меньше 2, и наоборот больше 2 не было ни одном случае. Этот факт говорит о том, что влияние отражения на частицах преобладает над поглощением излучения. В полевых регистрациях к указанному эффекту ложного усиления интенсивности разрядов за счет отражений УФ-излучения от собственных разрядов могут добавляться и помехи в виде отражений внешних УФ-излучений (рис. 3 и 4), что практически исключает проведение УФК.

Во-вторых, коснемся еще раз неопределенностей в показаниях счетчиков фотонов, известных как из литературных источников, так и из результатов данных исследований, приведенных на рисунках 5 и 7. Эти недостатки становятся особенно заметными при оценке степени загрязнения изоляции. В уже упомянутой «Инструкции...» [16] признается, что «... параметр подсчета УФ-событий не имеет никакого отношения к методике интерпретации изображений». Кроме того, критерии браковки по «числу фотонов» становятся абсолютно неприемлемыми при неблагоприятных метеорологических условиях, т.к. корона с капель дождя на проводах и шинах появляется или усиливается в десятки раз, приводя к росту показаний счетчика фотонов никак не связанным с загрязнением изоляции. Влияние на показания «счетчика фотонов» настроек усиления и свойств вспышек УФ-излучения отмечалось нами в [11]. Настоящими исследованиями определены области приближенной линейной связи между усилением и показаниями счетчика фотонов для камер "DayCor Super B" – 90 ... 130 % и «UVolle – VX – 0 ... 50 %. В камере «CoroCam 6» усиление 0,85 (85%) устанавливается при включении камеры «по умолчанию», и совершенно точно линейность показаний счетчика сохраняется до этого значения. Тем не менее надо помнить, что число фотонов» даёт лишь приблизительное представление об интегральной силе УФ-излучения и недостаточно для заключения о степени загрязнения изоляции.

В целом методика оценки степени загрязнения с помощью дневных УФ-дефектоскопов, по нашему мнению, далека от требуемого обеспечения данными о физической картине явлений и их связи с условиями во время УФК регистрации, а также о метрологической надежности характеристик, измеряемых дневными УФ-дефектоскопами. К настоящему времени можно говорить только о качественной связи между интенсивностью УФ-излучения ПЧР и степенью загрязнения и увлажнения или напряжением перекрытия изоляции. Одно из главных препятствий для успеха в разработке имеет объективный характер возможность проведения УФК в дневное время в большинстве случаев не способствует условиям образования мощных ПЧР, которые предшествуют перекрытиям изоляции, о чем уже говорилось.

Заключение (Conclusions)

1. При обследовании оборудования УФ-камерами «DayCor Super B» предпочтительно работать в диапазоне усиления $\text{Gain} = 90 \dots 130$, «UVolle – VX» – в диапазоне $\text{Gain} \leq 50$ и «CoroCam 6» – $\text{Gain} \leq 50$. При этом обнаружение разрядов можно проводить и при больших значениях усиления во избежание пропусков дефектов. Сравнивать показания счетчиков камер некорректно.

2. При оценке степени загрязнения изоляции можно пользоваться рекомендациями [16] с учетом возможного завышения регистрируемой интенсивности разрядов вследствие отражений УФ-излучений от разрядов на контролируемом объекте и от внешних источников техногенного характера на капельках испарений влаги из слоя загрязнения, а также тумана и др.

Перспективным направлением для дальнейшей работы является исследование зависимости уровня загрязнения высоковольтной внешней изоляции от спектра излучения поверхностных частичных разрядов.

Применение вышеперечисленных рекомендаций при обследовании высоковольтной изоляции посредством УФ-дефектоскопов позволит повысить качество диагностики и, как следствие, надежность электрооборудования.

Литература

1. Владимирский, Л.Л., Соломоник, Е.А. Развитие методов выбора внешней изоляции электроустановок высокого напряжения // *Электрические станции*. 2015. № 12. С. 23-36.
2. 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. Т. 22. № 2. С.117-127. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-1-117-127.
3. Иванов Д.А. Исследование электрофизических процессов и старения материала высоковольтных изоляторов для определения их рабочего ресурса // *Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ*. 2022. Т. 24. № 2. С. 132-146. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-2-132-146.
4. Галиева Т.Г., Иванов Д.А., Садыков М.Ф., Андреев Н.К., Хамидуллин И.Н. Метод и устройство диагностики состояния высоковольтных изоляторов на основе непрерывной регистрации пространственного уровня электромагнитного излучения частичных разрядов // *Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ*. 2022. Т. 24. № 4. С. 165-177. doi: 10.30724/1998-9903-2022-24-4-165-177.
5. 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. Т.25. № 5. С. 20-29. doi: 10.30724/1998-9903-2023-25-5-20-29.
6. Мараев А.М. Диагностика изоляторов и жил токопроводов с помощью УФ-дефектоскопа и тепловизора // *Энергоэксперт*. 2020. № 1. С. 68-71.
7. Pinnangudi, B.; Gorur, R. S.; Kroese, A. J. Quantification of Corona Discharges on Nonceramic Insulators // *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2005. vol. 12, no. 3. pp. 513-523. doi: 10.1109/TDEI.2005.1453456.
8. Петер Г. Электронные лавины и пробой в газах, пер. с англ. под ред. В. С. Комелькова. - М.: Мир, 1968. 390 с.
9. Cai, W.; Deng, H.; Zhou, G.; Wang, J.; Yang, F. Online Measurement of Equivalent Salt Deposit Density by Using Optical Technology // *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2013. vol. 20, no. 2. pp. 409-413. doi:10.1109/TDEI.2013.6508741.
10. Wang, S.; Lv, F.; Liu, Y. Estimation of Discharge Magnitude of Composite Insulator Surface Corona Discharge based on Ultraviolet Imaging Method // *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2014. vol. 21, no. 4. pp. 1697-1704. doi:10.1109/TDEI.2014.004358
11. Овсянников А. Г., Арбузов Р. С., Жарич Д. С., Швец Н. А. Ультрафиолетовый контроль высоковольтного оборудования. - М: НТФ «Энергопрогресс», [Библиотечка электротехника, приложение к журналу «Энергетик». 2025. вып. 4 (316)]. 106 с.
12. Арбузов Р.С., Жарич Д.С., Кандауров А.С., Масленников А.Л., Овсянников А.Г. Повышение эффективности контроля высоковольтного оборудования с помощью УФ-дефектоскопов // *Энергия Единой Сети*. 2023. Т. 69. № 2. С. 32-39.
13. Liu, Y.-P.; Kong, Y.; Huang, Z.; Geng, J.; Liu, J. Super Pixel-Level Contamination State Detection Model of Composite Insulator Specimens Under Different Lighting Conditions Based on Hyperspectral Technology and Model Transfer // *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2024. vol. 31, no. 3. pp. 1611-1619. doi: 10.1109/TDEI.2023.3346853.
14. Cai-Jing *et al.* The Quantitative Indicators of 750 kV Porcelain Insulator in UV detection based on Artificial Contamination Test / *IEEE International Conference on Dielectrics (ICD)*. 2016. Montpellier, France. pp. 501-505. doi: 10.1109/ICD.2016.7547652.
15. Phillips, A.J.; Engelbrecht C.S. The Feasibility of Using Daytime Corona Inspection to Identify Contaminated Insulators that Needs to be Washed // *CIGRE Session, Paris, 2008. Paper B2 – 213*. URL: <https://www.e-cigre.org/publications/detail/b2-213-2008-the-feasibility-of-using-daytime-corona-inspection-to-identify-contaminated-insulators-that-needs-to-be-washed.html>
16. Field Guide: Daytime Discharge Inspection of Transmission and Distribution Overhead Lines and Substations: Guide with Video. EPRI, Palo Alto, Ca: 2012, 3002002028. Методические указания по УФ-контролю подвесной и опорно-стержневой изоляции с помощью камеры CoroCam. 2013. Вып. 1, Перевод на русский. – М.: ООО «Панатест». 2014. 116 с.

Авторы публикации

Овсянников Александр Георгиевич – д-р техн. наук, профессор кафедры «Техника и электрофизика высоких напряжений» ФГБОУ Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия. *E-mail: oag@nspsb.ru*

Жарич Дмитрий Сергеевич – заместитель начальника ЭТЛ, ООО «Сибэнергодиагностика», г. Новосибирск, Россия. *E-mail: jds@sibenedia.ru*

Швец Николай Андреевич – ведущий инженер филиала АО «Россети Научно-технический центр» – СибНИИЭ, аспирант кафедры «Техника и электрофизика высоких напряжений» ФГБОУ Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия. *E-mail: shvepsnik@yandex.ru*

References

1. Vladimirskiy L.L.,; Solomonik, E.A. Development of methods for choosing external insulation of high -voltage electrical installations // *Electric stations*. 2015. # 12. pp. 23 – 36. (In Russ).
2. 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. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2020-22-1-117-127> (In Russ).
3. Ivanov D.A. Study of electrophysical processes and aging of the material of high-voltage insulators to determine their working life. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2022;24(2):132-146 <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2022-24-2-132-146>. (In Russ.)
4. Galieva T.G., Ivanov D.A., Sadykov M.F., Andreev N.K., Khamidullin I.N. Methodology and device for diagnostics of high-voltage insulators based on continuous recording of the spatial level of electromagnetic radiation of partial discharges. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2022; 24(4): 165-177. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2022-24-4-165-177> (In Russ.)
5. 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. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2023-25-5-20-29>. (In Russ.)
6. Maraev A.M. Diagnostics of insulators and cores of busbars using a UV flaw detector and a thermal imager. *Energoexpert*, No. 1, pp. 68-71, 2020. (In Russ.)
7. Pinnangudi, B.; Gorur, R. S.; Kroese A. J. Quantification of Corona Discharges on Nonceramic insulators. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2005. vol. 12, no. 3. pp. 513-523. doi: 10.1109/TDEI.2005.1453456.
8. Raether, H. Electron avalanches and breakdown in gases. 1964.
9. Cai, W.; Deng, H.; Zhou, G.; Wang, J.; Yang, F. Online Measurement of Equivalent Salt Deposit Density by Using Optical Technology. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2013. vol. 20, no. 2. pp. 409-413. doi:10.1109/TDEI.2013.6508741.
10. Wang, S.; Lv, F.; Liu, Y. Estimation of Discharge Magnitude of Composite Insulator Surface Corona Discharge Based on Ultraviolet Imaging Method. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2014. vol. 21, no. 4, pp. 1697-1704. doi:10.1109/TDEI.2014.004358.
11. Ovsyannikov A.G., Arbuzov R.S., Zharich D.S., Shvets N.A. Ultraviolet testing of high-voltage equipment. - M: NTF "Energoprogress". [Library of electrical engineering, supplement to the journal "Energetik". 2025. issue. 4 (316)]. 106 p. (In Russ.)
12. Arbuzov R.S., Zharich D.S., Kandaurov A.S., Maslennikov A.L., Ovsyannikov A.G. Improving the efficiency of high-voltage equipment testing using UV flaw detectors // *Energy of the Unified Network*. 2023. No. 2 (69). pp. 32-39. (In Russ.)
13. Liu, Y.-P.; Kong, Y.; Huang, Z.; Geng, J.; Liu, J. Super Pixel-Level Contamination State Detection Model of Composite Insulator Specimens Under Different Lighting Conditions Based on Hyperspectral Technology and Model Transfer. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2024. vol. 31, no. 3. pp. 1611-1619. doi: 10.1109/TDEI.2023.3346853.
14. Cai-Jing *et al.* The quantitative indicators of 750 kV Porcelain Insulator in UV detection based on Artificial Contamination Test / *IEEE International Conference on Dielectrics (ICD)*. 2016. Montpellier, France. pp. 501-505. doi:10.1109/ICD.2016.7547652
15. Phillips, A.J.; Engelbrecht C.S. The feasibility of using daytime corona inspection to identify contaminated insulators that needs to be washed / *CIGRE Session, Paris*. 2008. Paper B2 – 213. URL: <https://www.e-cigre.org/publications/detail/b2-213-2008-the-feasibility-of-using-daytime-corona-inspection-to-identify-contaminated-insulators-that-needs-to-be-washed.html>.

16. Field Guide: Daytime Discharge Inspection of Transmission and Distribution Overhead Lines and Substations: Guide with Video. EPRI, Palo Alto, Ca: 2012, 3002002028.

Authors of the publication

Alexander G. Ovsyannikov – Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia. *E-mail: oag@nspsb.ru*

Dmitry S. Zharich – LLC "Sibenergodiagnostics", Novosibirsk, Russia. *E-mail: jds@sibenedia.ru*

Nikolay A. Shvets – Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia. *E-mail: shvepsnik@yandex.ru*

Шифр научной специальности: 2.4.3 Электроэнергетика

Получено **01.02.2025 г.**

Отредактировано **03.08.2025 г.**

Принято **12.08.2025 г.**