

МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ МАТЕРИАЛОВ, ИЗДЕЛИЙ, ВЕЩЕСТВ И ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ



УДК 621.315.624

DOI:10.30724/1998-9903-2024-26-6-5-19

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ЛАБОРАТОРНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ВЫЯВЛЕНИЯ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИЗОЛЯТОРОВ С ПОМОЩЬЮ ТЕПЛОВИЗОРА

Зарипов Д.К.¹, Закиров Д.Ф.¹, Тарасов Б.П.¹, Миронова Е.А.¹, Насибуллин Р.А.²

¹Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

²ПАО «Красногорский завод им. С.А. Зверева», г. Красногорск, Россия
dzaripov@list.ru

Резюме: *АКТУАЛЬНОСТЬ.* Наружная изоляция является одним из наиболее повреждаемых элементов высоковольтного оборудования. Изменения климата, экологии оказывают на ее состояние все большее воздействие. Доля отключений воздушных линий электропередачи (ВЛ) из-за загрязнений варьируется в зависимости от региона и конкретных условий эксплуатации, но в среднем она может составлять от 20% до 40% всех аварий на ВЛ. В регионах с высоким уровнем промышленного загрязнения или вблизи морских побережий эта цифра может достигать 50% и более. Основные причины отключений связаны с накоплением загрязнений на изоляторах, что приводит к перекрытию во влажных условиях. Наибольшее влияние атмосферные осадки, такие как моросящий дождь, туман или роса, оказывают именно в сочетании с различными твердыми проводящими частицами, оседающими на поверхности изолятора из воздуха, и образующими слой поверхностного загрязнения. Методы диагностирования изоляции различны, включая тепловизионный. **ЦЕЛЬ.** Изучение влияния увлажнения загрязненной поверхности стеклянных и полимерных изоляторов на их температуру в лабораторных условиях и оценка возможности диагностирования загрязнённого состояния. **МЕТОДЫ.** Для достижения поставленной цели было проведено тридцать лабораторных экспериментов с подвесными стеклянными и полимерными изоляторами в климатической камере (камере тумана) со снятием термограмм, контролем тока утечки и степени загрязнения. В ходе экспериментов менялись степень и способ загрязнения, условия увлажнения. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** В ходе лабораторных исследований было показано, что тепловизорами можно диагностировать даже легко загрязненную изоляцию в смоченном состоянии. Среднее и среднеквадратичное значения температурных контрастов в большей степени зависят от уровня загрязнения (засаленности), чем от степени равномерности нанесения загрязнения. Предложена методология построения системы контроля изоляции на ВЛ и алгоритм автоматизированной обработки данных.

Ключевые слова: воздушные линии электропередачи; подвесные изоляторы; термограммы; увлажнение изоляции; диагностика загрязнения тепловизором; температурные контрасты; лабораторные исследования.

Для цитирования: 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.

EXPERIMENTAL STUDY OF THE POSSIBILITY OF DETECTING CONTAMINATION OF HIGH-VOLTAGE INSULATORS WITH THE HELP OF A THERMAL IMAGER

Zaripov D.K.¹, Zakirov D.F.¹, Tarasov B.P.¹, Mironova E.A.¹, Nasibullin R.A.²

¹Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

²PJSC “Krasnogorsky Zavod named after SA. Zverev”, Krasnogorsk, Russia
dzaripov@list.ru

Abstract: ACTUALITY. External insulation is one of the most damaged elements of high-voltage equipment. Changes in climate, ecology have an increasing impact on it's condition. The proportion of overhead transmission line (OTL) outages due to pollution varies by region and specific operating conditions, but on average it can range from 20% to 40% of all OTL failures. In regions with high levels of industrial pollution or near sea coasts, this figure can reach 50% or more. The main causes of outages are related to the accumulation of contaminants on insulators, which leads to overtopping in wet conditions. It is precipitation such as drizzle, fog or dew that has the greatest impact, combined with various solid conductive particles deposited on the insulator surface from the air, and forming a layer of surface contamination. Methods for diagnosing insulation are various, including thermal imaging. OBJECT. To study the effect of wetted contaminated surface of glass and polymer insulators on their temperature under laboratory conditions and to evaluate the possibility of diagnosing the contaminated condition. METHODS. Three dozen laboratory experiments with suspended glass and polymer insulators in a fog chamber with thermograms, control of leakage current and degree of contamination were carried out to achieve the goal. During the experiments, the degree and method of contamination and humidification conditions were changed. RESULTS. In the course of laboratory studies it was shown that thermal imaging cameras can diagnose even lightly contaminated insulation in the wetted state. The mean and rms values of temperature contrasts depend more on the level of contamination (greasiness) than on the degree of uniformity of contamination application. The methodology of construction of the insulation control system on overhead power lines and the algorithm of automated data processing are proposed.

Keywords: overhead power lines; suspended insulators; thermograms; insulation wetting; thermal imaging fouling diagnostics; temperature contrasts; laboratory tests.

For citation: 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.

Введение (Introduction)

По мере совершенствования производства высоковольтных изолирующих конструкций на первый план выходят отказы оборудования, связанные с внешними факторами, влияющими на изоляцию, такими как загрязнения. Доля отключений воздушных линий из-за загрязнений может варьироваться в зависимости от региона, климатических условий и состояния инфраструктуры электросети [1-3]. По различным оценкам, доля отключений из-за загрязнений может составлять от 20% до 40% от общего числа отключений воздушных линий. Загрязнение изоляторов включает в себя накопление солей, пыли, промышленных загрязнений и биологических материалов, что снижает их диэлектрическую прочность и увеличивает риск перекрытия. Вероятность перекрытия загрязненной изоляции зависит от типа и степени загрязнения, а также климатических условий: влажность воздуха, температура и осадение влаги на поверхность изоляторов. Поскольку перечисленные факторы во многом носят непредсказуемый характер, то для снижения вероятности отказов необходимо обеспечить непрерывный контроль состояния изоляции.

Методы, применяемые в системах оперативного контроля за состоянием изоляции разнообразны [4]. Вот некоторые из них:

Акустический метод. Этот метод предполагает измерение акустической эмиссии, генерируемой частичными разрядами на изоляторах, и ее анализ для определения наличия загрязнений [5].

Емкостной метод. Этот метод включает в себя измерение изменения емкости изолятора при загрязнении.

Оптические методы. Визуальные камеры и оптические сенсоры используются для непрерывного наблюдения за состоянием изоляторов. Камеры высокого разрешения могут обнаруживать видимые признаки загрязнения. Ультрафиолетовые (УФ) камеры улавливают корону и частичные разряды, которые являются индикаторами загрязнения изолятора.

Непрерывное измерение поверхностного сопротивления и тока утечки. Использование сенсоров для измерения поверхностного сопротивления изоляции и утечек тока через загрязненные участки изоляции [6].

Диэлектрическая спектроскопия. Этот метод включает в себя измерение любых изменений в его диэлектрических свойствах из-за загрязнения.

Тепловизионные методы. Инфракрасные камеры (тепловизоры) используются для обнаружения аномальных температурных изменений, которые могут быть вызваны токами утечки, частичными искровыми или дугowymi разрядами из-за загрязнения [7].

Метод частичного разряда. Метод предполагает измерение частичных разрядов, возникающих в изоляторе, для обнаружения любых изменений в его диэлектрических свойствах из-за загрязнения [8].

Мониторинг пространственного распределения электрического поля. Метод контроля изменений электрического поля вокруг изолятора. Загрязнение изменяет распределение электрического поля, что может быть зафиксировано соответствующими датчиками.

В перечисленном выше ряду методов тепловизионный не является самым распространённым. Однако, по мере повышения надежности и снижения стоимости тепловизоров они все больше находят применение как еще одни камеры видеонаблюдения за состоянием высоковольтного оборудования [9, 10]. Преимущества тепловизионных камер очевидны. Достаточно провести визуальный анализ термограмм и отпадает необходимость в сложной системе обработки данных, которую требуют другие методы [11].

В последние годы также проводятся исследования по автоматическому анализу теплового состояния изоляции [12, 13]. Такая компьютеризированная система использует комбинацию искусственного интеллекта и методов цифровой обработки изображений [14]. Система может получать любое количество инфракрасных изображений в качестве входных данных перед выполнением автоматической обработки. Алгоритм анализа разделен на этапы [15]. На первом этапе обнаруживается элемент внутри теплового изображения. На втором этапе извлекаются статистические характеристики и другие данные о тепловом состоянии соответствующего элемента электрооборудования. На заключительном этапе вычисленные статистические характеристики анализируются для процесса принятия решения.

Обычно дефектные элементы обнаруживаются путем определения того, какие из этих областей на инфракрасных изображениях имеют более высокие температуры, чем нормальные предписанные уровни. Результаты проверок классифицируются на различные категории в зависимости от обнаруженных уровней температур, которые говорят энергетическим компаниям о серьезности каждой ситуации.

Автоматическая диагностика инфракрасных изображений с помощью интеллектуальной системы все еще находится на ранних стадиях. Проблем нет, когда необходимо выделить яркий объект, легко идентифицируемый на термограмме, например, контактное соединение проводов. Гораздо сложнее автоматически выделить объект и найти на нем дефект, когда тепловой контраст его сливается с фоном и тонет в шумах. Эта ситуация характерна при диагностировании изолирующих конструкций. Для них характерны температурные перепады в десятые доли градуса, из-за малых токов, протекающих в изоляторах. Если слабая локальная горячая точка на изоляторе не будет обнаружена вовремя, ненормальное состояние будет постоянно ухудшаться и в итоге приведет к пробоем.

В любом случае, для работы компьютерных алгоритмов необходимы исходные данные о зависимостях тепловых контрастов при различных уровнях и особенностях загрязнения изоляторов. В данной работе описываются результаты лабораторных экспериментов по тепловизионному диагностированию загрязнения подвесных стеклянных и полимерных изоляторов с имитацией различных внешних условий функционирования. Цель исследования заключается в изучении влияния увлажнения загрязненной поверхности стеклянных и полимерных изоляторов на их температуру и оценке возможности применения тепловизионного метода для диагностирования загрязненного состояния изоляторов. Научная значимость данного исследования заключается в определении

зависимости средних и среднеквадратичных значений температурных контрастов от уровня и равномерности загрязнения на изоляторе. Практическая значимость заключается в том, что предложенные в данной работе методология построения системы тепловизионного контроля и алгоритм автоматизированной обработки полученных данных могут помочь в создании автоматизированной системы контроля состояния изоляции, что в свою очередь позволит улучшить эффективность диагностирования высоковольтной изоляции и повысить надежность работы электрооборудования.

Материалы и методы (Materials and methods)

В начале рассмотрим физическую основу проблематики. В процессе работы под переменным напряжением изолирующая конструкция, состоящая из гирлянды изоляторов или цельного полимерного изолятора, нагревается в следствие диэлектрических потерь, величина которых определяется не только активным сопротивлением, но и емкостью. В общем случае каждый i -ый элемент изолирующей конструкции, например, изолятор в гирлянде или часть протяженного изолятора, можно представить, как параллельное соединение активного сопротивления R_i и емкости C_i . Выражение для активной мощности P_i , выделяемой на элементе при протекании через него переменного тока I с частотой ω [16], приведено ниже в формуле (1):

$$P_i = I^2 \frac{R_i}{1 + \omega^2 C_i^2 R_i^2} \quad (1)$$

В данной формуле P_i имеет экстремум при R_i равном $1/\omega C_i$. Для подвесного изолятора ПС-70 с емкостью около 50 пФ, максимум тепловыделения достигается при значении R_i около 63 МОм. Обычно при анализе загрязненных изоляторов емкостной составляющей тока утечки пренебрегают. В ходе проведенных экспериментов с легко загрязненной гирляндой из трех изоляторов при приложении переменного напряжения 30 кВ (действующее значение) средний ток утечки был в районе 1 мА, что соответствует активному сопротивлению R_i около 20 МОм. Таким образом C_i пренебрегать нельзя. Для полимерного изолятора влияние емкостной составляющей еще более выражено, поскольку токи утечки в разы меньше. Ситуация аналогична поведению гирлянды подвесных фарфоровых изоляторов при наличии внутренних дефектов [15]. Она характеризуется непредсказуемым разбросом мощностей тепловыделения на отдельных изоляторах. Только в нашем случае он определяется неравномерностью поверхностного загрязнения и увлажнения.

Поскольку загрязнение и увлажнение заведомо неравномерно, то предлагается загрязненное состояние отличить по изменению пространственного распределения интенсивности теплового излучения по всей конструкции [17]. Величинами, характеризующими распределение, являются среднее и среднеквадратическое отклонение. Для определения состояния загрязнения необходимо одновременно использовать обе эти характеристики распределения. Снижение активного сопротивления одного из элементов изолирующей конструкции однозначно приводит к некоторому увеличению средней интенсивности излучения конструкции. Однако, ее заметное увеличение происходит при снижении активного сопротивления на нескольких элементах конструкции. В то же время величина среднеквадратического отклонения, характеризующая разброс интенсивностей теплового излучения элементов относительно среднего отклонения, может быть зафиксирована и при малых значениях среднего, когда интенсивность излучения изменяется только на одном элементе, но при снижении активного сопротивления на нескольких элементах возможна ситуация, когда среднеквадратическое отклонение будет близко к нулю.

Описанный принцип изначально был разработан для диагностирования подвесных и опорных фарфоровых изоляторов. Однако, может быть экстраполирован на выявление поверхностных загрязнений стеклянных и полимерных изоляторов. Фактически загрязнение – это тот же дефект. Для полимерных изоляторов в процессе эксплуатации также характерно нарушение герметичности и проникновение влаги под оболочку ближе к оконцевателю, что приводит к перераспределению напряжения вдоль изолятора и появлению локальных частичных разрядов с соответствующим повышением среднего и среднеквадратичного отклонения значений температуры.

В сухих условиях доминирующие виды загрязнения (пылевое, сельскохозяйственное, морское, биологическое, выбросы автомобилей), осаждаемые на поверхности изолятора, не снижает его сопротивления изоляции и не влияет на распределение напряжения вдоль всей конструкции. Однако, когда осаждаемое загрязнение увлажняется (туман, роса, моросящий дождь), сопротивление изоляции на поверхности изолятора будет снижаться, тем самым изменяя распределение напряжения на изоляторах. В этот момент загрязнение на

поверхности изолятора увеличит ток утечки и температуру поверхности каждого изолятора. Термограмма представляет собой картину, где яркость каждой точки определяется его температурой. В свою очередь температура того или иного элемента в изолирующей конструкции однозначно связана с выделяемой на нем электрической мощностью. Мощность нагрева P_i и повышение температуры поверхности над окружающей средой ΔT_i i -го элемента можно рассчитать соответственно по формулам (2) и (3):

$$P_i = U_i I, \quad (2)$$

$$\Delta T_i = U_i I / R_t \quad (3)$$

В формулах (2) и (3): I – ток утечки через всю изолирующую конструкцию; R_t – термическое сопротивление, одинаковое для всех элементов. Из-за неравномерности загрязнения изоляторов U_i и ΔT_i также будут различаться вдоль изолирующей конструкции.

При реализации алгоритма в автоматизированной системе на практике наиболее сложным является выбор порога для среднего и среднеквадратичного значений яркостей изоляторов на термограммах. Возможны два способа. В первом случае оптимальные пороговые значения можно устанавливать по тепловому изображению эталонной (исправной, не загрязненной) изолирующей конструкции, идентичной диагностируемым и полученной в аналогичных метеоусловиях. Для эталонной изоляции среднее и среднеквадратичное значения будут минимальными. Другой вариант возможен при диагностировании в одних метеоусловиях большого числа изолирующих конструкций. В этом случае пороговые значения можно устанавливать при последующем компьютерном анализе, взяв минимальное среднее и среднеквадратичное значения по всем термограммам.

Изложенные выше критерии и методика диагностирования загрязнения могут быть заложены в алгоритмы программы обработки данных и обучения «искусственного интеллекта».

Моделирование работы гирлянды стеклянных изоляторов и полимерного изолятора в атмосфере чистого тумана проводилось с применением экспериментальной установки [18, 19], схема которой и вид климатической камеры представлены на рисунках 1 и 2.

В ходе лабораторных экспериментов исследовалась ситуация с легким загрязнением в соответствии с международной классификацией по ГОСТ Р 56735-2015 (IEC/TS 60815-1:2008). При выборе подаваемого напряжения исходили из соотношения примерно 10 кВ на изолятор ВЛ. Так на ВЛ 110 кВ (фазное напряжение 65 кВ) каждый провод монтируют на гирлянде с 6-8 изоляторами, а на ВЛ 220 кВ (фазное напряжение 127 кВ) – 10-14 изоляторами. Общая длина изолирующей конструкции ограничена размерами климатической камеры.

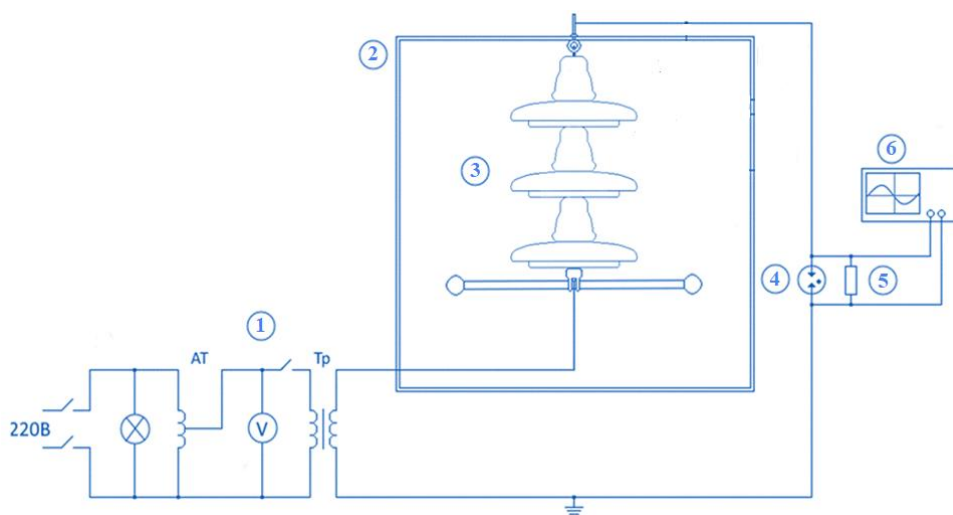


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

- 1 – испытательная установка 110 кВ;
- 2 – климатическая испытательная камера;
- 3 – изолятор; 4 – разрядник;
- 5 – резистор 1 кОм; 6 – осциллограф

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

Fig. 1. Scheme of the experimental installation:

- 1 – 110 kV test setup;
- 2 – climatic test chamber;
- 3 – insulator; 4 – arrester;
- 5 – 1 kOhm resistor; 6 – oscilloscope



Рис. 2. Фотографии климатической камеры с двумя видами изоляторов Fig. 2. Photos of the climatic chamber with two types of insulators

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

Климатическая испытательная камера (2, рис. 1) представляла собой куб со стенками, изготовленными из изоляционного материала с внутренним объемом 1 м^3 . В центре камеры устанавливалась изолирующая конструкция, представляющая собой гирлянду из трех стеклянных изоляторов ПС-70Е (3, рис. 1) или полимерный изолятор ЛК-70/35, которая подключалась к испытательной установке (1, рис. 1).

Туман, генерируемый пьезоэлектрическими элементами 2-х ультразвуковых увлажнителей, подавался внутрь камеры через два отверстия, находящиеся сверху и/или внизу задней стенки камеры. Скорость подачи пара для всех испытаний была около 300 мл/ч. Температура и относительная влажность воздуха внутри камеры контролировались датчиками.

Токи утечки по поверхности гирлянды изоляторов регистрировались при помощи цифрового осциллографа TDS2022C (6, рис. 1), связанного с персональным компьютером. Для защиты оборудования от перенапряжений применялся разрядник (4, рис. 1).

Загрязнение изоляторов проводилось в соответствии с методом предварительного загрязнения (ПЗ). В качестве загрязняющего вещества применялся раствор, содержащий 40 граммов каолинового порошка и от 0 до 40 грамм (в разных экспериментах) поваренной соли (NaCl) на 1 литр водопроводной воды. Удельная электропроводность воды составляла около 200 мкСм/см. Полученная суспензия распылялась на поверхность изоляторов пульверизатором. Загрязнённый изолятор оставался подсыхать на срок более 24 часов до начала экспериментов.

Измеренная эквивалентная плотность солевого отложения изоляторов (ESDD) составляла от 0,0034 (только водопроводная вода) до 0,04 мг/см² (водопроводная вода и 20 грамм соли). Данные уровни характеризуют легкое загрязнение.

В отдельных экспериментах перед помещением в камеру изоляторы дополнительно охлаждались. Цель подготовительной операции заключалась в имитации наиболее сильного смачивания, которому могут подвергаться изоляторы в процессе эксплуатации. Кроме того, отдельно имитировалась ситуация с неравномерным смачиванием росой изолирующей конструкции при подогреве ее несущим проводом по которому протекает большой ток нагрузки. Известно, что температура провода может достигать 50 °C и более [24]. Для этого на оконцеватель, примыкающий к удерживающей провод арматуре, прикреплялись пакетики с химическими нагревателями. И, наконец, для имитации значительной неравномерности загрязняющего слоя, поверхность изолятора под нижней юбкой ближней к высоковольтному проводу оставляли чистой.

В двух экспериментах (базовых) стеклянные и полимерный изоляторы оставались чистыми.

Исследования проводились длительным приложением к изолятору переменного напряжения 30 кВ с непрерывным увлажнением в камере в течение одного часа. Напряжение на изолирующую конструкцию подавалось за несколько минут до подачи пара в камеру. Выключение напряжения также осуществлялось через некоторое время после окончания увлажнения, когда разрядная деятельность значительно снижалась.

Температура окружающего воздуха в помещении при исследованиях была в пределах от 16 °C до 20 °C, относительная влажность воздуха составляла от 47 % до 64 %.

Всего было проведено 30 экспериментов со стеклянными и полимерными изоляторами. В ходе экспериментов непрерывно измерялись значения амплитуд синусоидальной составляющей и импульсов тока утечки, протекающего по поверхности загрязненной изоляции. После завершения измерений в камере и выключения напряжения, тепловизором снимались термограммы изолирующих конструкций.

Результаты (Results)

Результаты экспериментов отображены в таблице, где в соответствующих колонках представлены следующие данные:

1. Тип изолирующей конструкции. Гирлянда из трех стеклянных изоляторов или цельный полимерный.

2. Способ предварительного загрязнения. В основном загрязнение старались наносить равномерно по всей поверхности изолирующей конструкции, но в отдельных случаях юбка или часть ее, примыкающая к высоковольтному проводу, оставалась чистой.

3. Состав раствора для загрязнения изоляторов из распылителя. Способ приготовления раствора был описан выше. В двух случаях эксперимент проводился с чистыми изоляторами. Кроме того, были эксперименты со стеклянными изоляторами, когда соль в раствор не добавлялась и поверхность покрывалась только слоем каолина.

4. Способ увлажнения. Применялись два увлажнителя, пар из которых мог подаваться в камеру тумана сверху или снизу.

5. Дополнительные условия. Для улучшения условий для конденсации влаги на поверхности отдельные изоляторы предварительно охлаждались ниже точки росы. Кроме того, в отдельных экспериментах применялся нагрев нижнего оконцевателя, для имитации большого тока, протекающего по проводу в естественных условиях, и возникающей при этом неравномерности конденсации влаги при выпадении росы [20].

6. Термограмма соответствующей изолирующей конструкции.

7. Средняя разность температур с окружающей средой изолирующей конструкции в целом ΔT_{cp} , определяемая из значений ΔT_i – средних величин перепада температур с окружающей средой трех соседних участков изолирующей конструкции на термограмме.

8. Среднеквадратичное отклонение перепада температур участков $D(\Delta T_i)$ относительно среднего.

9. ESDD измеренная до начала эксперимента

10. ESDD измеренная после окончания эксперимента.

11. $I_{ут.ср}$ – средний ток утечки в ходе увлажнения по уровню амплитуды периодической составляющей.

12. $I_{ут.имп.ср}$ – средняя амплитуда импульсов тока утечки в ходе увлажнения, вызванная поверхностными разрядами.

Значения среднего ΔT_{cp} и среднеквадратического отклонения $D(\Delta T_i)$ в распределении температур изоляторов на термограммах вычисляются по формулам (4) и (5):

$$\Delta T_{cp} = \sum_{i=1}^n \Delta T_i \frac{1}{n}, \quad (4)$$

$$D(\Delta T_i) = \left(\sum_{i=1}^n \Delta T_i^2 \frac{1}{n} - ((\Delta T_{cp})^2) \right)^{0.5}, \quad (5)$$

где ΔT_i – разность температуры i -й области изолирующей конструкции с температурой окружающей среды, $n=1 \dots 3$ – общее число всех областей на изолирующей конструкции.

На рисунке 3 приведены примеры осциллограмм с видами тока утечки для гирлянды стеклянных изоляторов и полимерного изолятора.

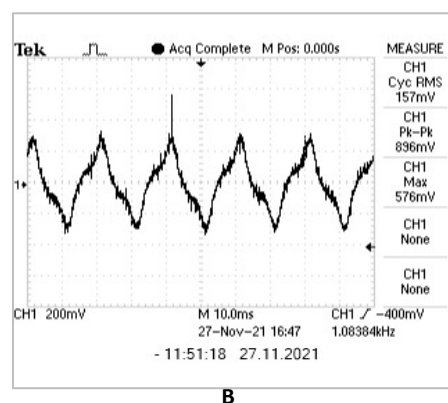
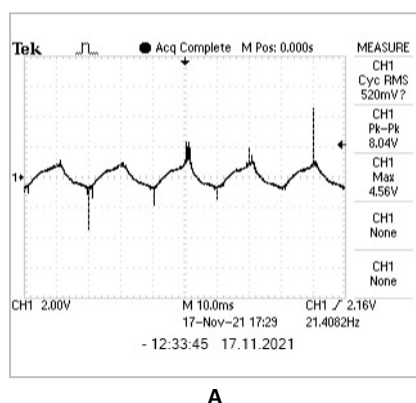
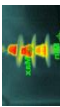
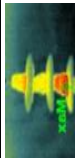
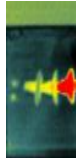
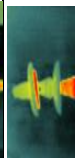
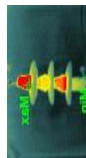
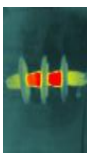
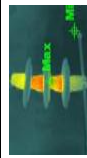
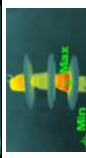


Рис. 3. Примеры осциллограмм, характерных для неравномерного загрязнения раствором, содержащим 20 г. соли: А – для гирлянды стеклянных изоляторов (1 строка таб.); В – для полимерного изолятора (23 строка таб.)

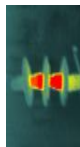
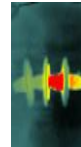
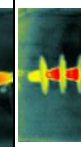
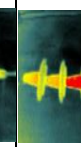
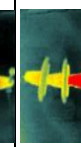
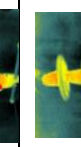
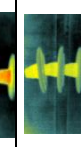
Fig. 3. Examples of oscillograms characteristic of non-uniform contamination with a solution containing 20 g. of salt: A – for a garland of glass insulators (1 row tab.); B – for a polymer insulator (23 row tab.)

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

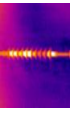
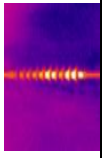
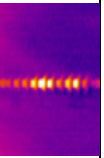
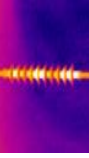
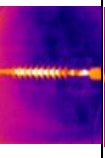
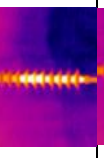
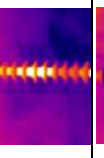
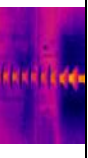
Таблица

Результаты экспериментов											
Объект	Способ загрязнения	Раствор	Способ подачи пара	Доп. условия	Термограмма	$\Delta T_{ср}, ^\circ C$	$D(\Delta T), ^\circ C$	ESDD до	ESDD после	$I_{уг.ср.}, mA$	$I_{уг.мин.}, mA$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Гирлянда стеклянных изоляторов типа ПС-70Е	Неравномерное (нижняя часть нижней тарелки чистая)	20 г. соли, 40 г. каолина на 1 л. воды	Сверху и снизу	Нет		5,00	0,54	-	-	6,29	2,606
			Сверху	Нет		2,87	0,52	-	-	0,848	0,987
				Все изоляторы охлаждены		4,57	2,23	-	-	1,199	3,976
						4,27	1,52	-	-	0,987	1,679
			Сверху	Нет		4,90	0,54	0,417	0,161	1,03	1,513
	Равномерное	40 г. соли, 40 г. каолина на 1 л. воды	Сверху	Нет		5,27	1,32	-	-	0,776	1,653
						7,13	2,96	-	-	1,033	4,166
						10,97	1,79	-	-	0,994	3,902
						11,37	2,59	-	-	1,397	9,534
						4,40	1,31	-	-	1,662	5,779
				Все изоляторы охлаждены		4,30	1,24	-	-	0,90	4,576

Продолжение таблицы

Объект	Способ загрязнения	Раствор	Способ подачи нагревателя	Доп. условия	Термограмма	$\Delta T_{\text{ср}}$, °C	$D(\Delta T)$, °C	ESDD до	ESDD после	$I_{\text{ут. ср.}}$, мА	$I_{\text{ут. вып.}}$, мА
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Гирлянда стеклянных изоляторов типа ПС-70Е	Равномерное	20 г. соли, 40 г. каолина на 1 л. воды	Сверху	Все изоляторы охлаждены		9,77	0,69	0,0207	0,0106	1,1	3,894
		5 г. соли, 40 г. каолина на 1 л. воды	Сверху	2 верхних изолятора охлаждены, подогрев снизу		8,97	4,53	0,0454	0,0179	1,248	17,931
		3 г. соли, 40 г. каолина на 1 л. воды	Сверху	2 верхних изолятора охлаждены, подогрев снизу		6,03	5,35	0,037	0,0327	1,428	13,108
			Сверху	2 верхних изолятора охлаждены, подогрев снизу		9,07	1,82	0,0217	0,0093	-	5,492
			Сверху	Все изоляторы охлаждены		6,40	3,01	-	-	1,089	6,018
			Сверху	Все изоляторы охлаждены		3,93	1,09	-	-	0,547	0,804
		40 г. каолина на 1 л. воды	Сверху	2 верхних изолятора охлаждены, подогрев снизу		4,50	1,06	0,0279	0,0149	0,844	1,615
			Сверху	2 верхних изолятора охлаждены, подогрев снизу		3,37	1,02	0,0031	0,0035	0,618	0,876
				Нет		3,03	0,05	-	-	-	-
		-	Сверху	Нет		2,80	0,14	-	-	0,445	0,835
	Чистый										

Продолжение таблицы

Объект	Способ запыления	Раствор	Способ подачи пара	Доп. условия	Термограмма	$\Delta T_{\text{ср}}, ^\circ\text{C}$	$D(\Delta T), ^\circ\text{C}$	ESDD по	ESDD после	$I_{\text{ут. ср.}}, \text{мА}$	$I_{\text{ут. ламп}}, \text{мА}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Полимерный изолятор типа ЛК-70 III	Неравномерное	20 г. соли, 40 г. каолина на 1 л. воды	Сверху и снизу	Нет		3,06	0,97	-	-	0,342	0,413
						2,55	0,72	-	-	0,266	0,847
						2,12	1,03	-	-	0,236	1,366
						3,70	0,96	-	-	0,435	0,814
	Равномерное	20 г. соли, 40 г. каолина на 1 л. воды	Сверху и снизу	Подогрев окопцевателя изолятора		2,32	1,13	-	-	0,267	0,414
						3,90	0,89	-	-	0,234	0,989
						3,90	0,93	-	-	0,378	0,764
						3,66	1,34	-	-	0,350	0,431
	Чистый	-	Сверху	Нет		1,19	0,52	-	-	0,150	0,150

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

На рисунках 4-7 значения среднего $\Delta T_{\text{ср}}$ и среднеквадратического отклонения $D(\Delta T_i)$ в распределении температур изоляторов на термограммах представлены в виде зависимостей от степени солёности загрязняющего раствора.

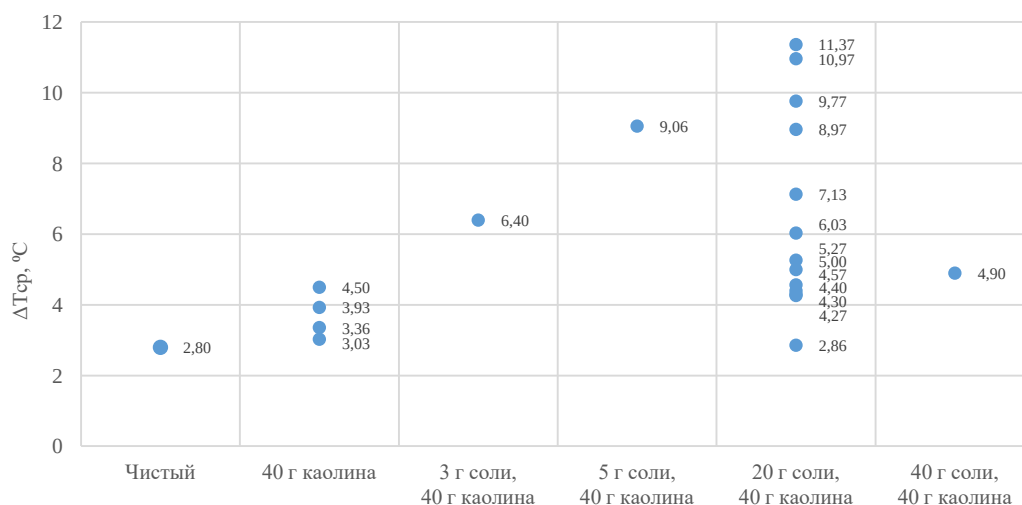


Рис. 4. График зависимости $\Delta T_{\text{ср}}, ^\circ\text{C}$ гирлянды стеклянных изоляторов от засолённости раствора

Fig. 4. Graph of dependence of $\Delta T_{\text{ave}}, ^\circ\text{C}$ of glass insulator garland on solution salinity

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

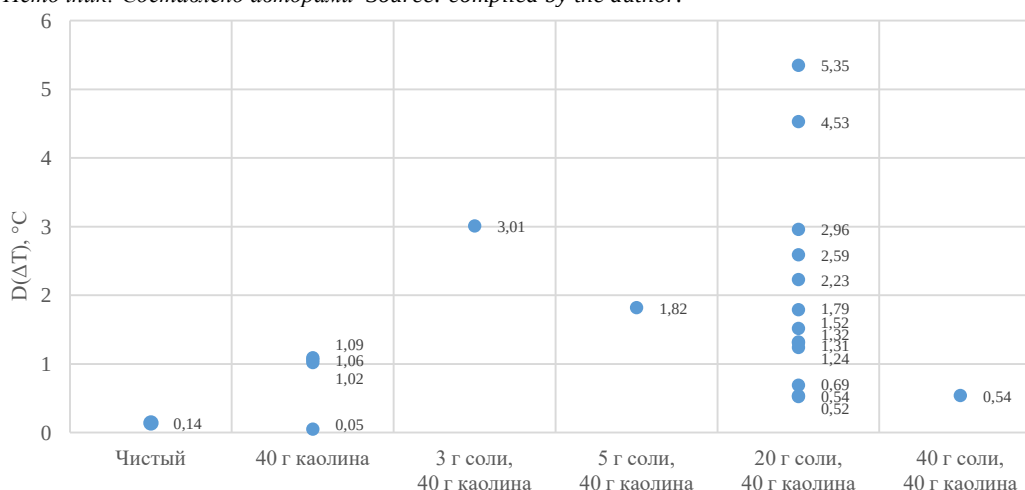


Рис. 5. График зависимости $D(\Delta T), ^\circ\text{C}$ гирлянды стеклянных изоляторов от засолённости раствора

Fig. 5. Graph of dependence of $D(\Delta T), ^\circ\text{C}$ of glass insulator garland on solution salinity

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

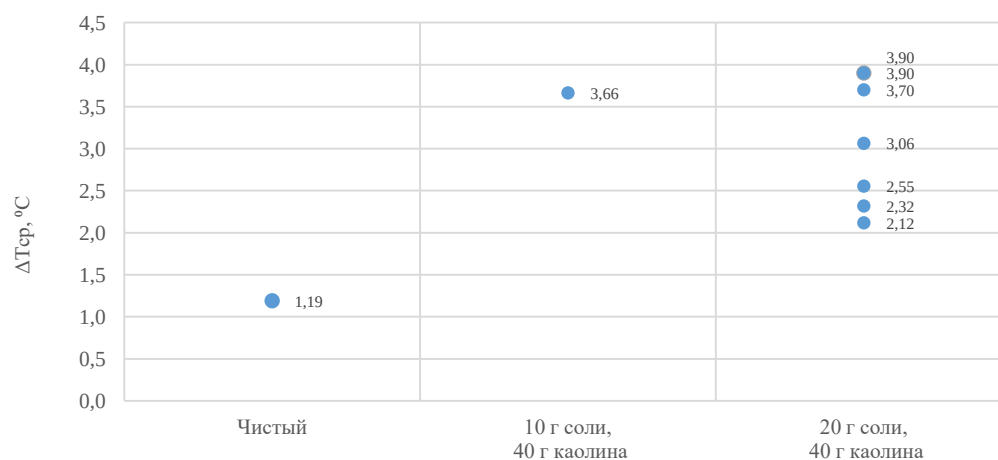


Рис. 6. График зависимости $\Delta T_{\text{ср}}, ^\circ\text{C}$ полимерного изолятора от засолённости раствора

Fig. 6. Graph of dependence of $\Delta T_{\text{ave}}, ^\circ\text{C}$ of polymer insulator on solution salinity of the polymer insulator

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

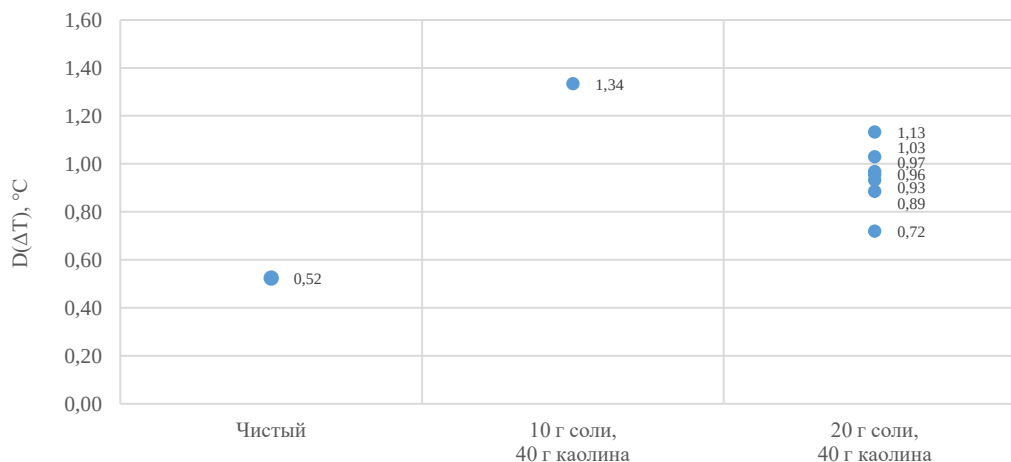


Рис. 7. График зависимости $D(\Delta T), ^\circ\text{C}$ полимерного изолятора от засоленности раствора
 Fig. 7. Graph of dependence of $D(\Delta T), ^\circ\text{C}$ of polymer insulator on solution salinity

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

Обсуждение (Discussions)

Из анализа термограмм, измерений и расчетов можно сделать следующие выводы:

1. Анализ тепловизионных изображений показывает, что распределение температур вдоль изолирующей конструкции хаотично. Добиться равномерности загрязнения и смачиваний изоляторов сложно, что характерно и для внешних условий. Таким образом при анализе загрязнения по термограммам следует опираться на статистические характеристики (ΔT_{cp} , $D(\Delta T_i)$).

2. Для гирлянды изоляторов диапазон изменения ΔT_{cp} от $2,87 ^\circ\text{C}$ до $11,37 ^\circ\text{C}$, а $D(\Delta T_i)$ от $0,54 ^\circ\text{C}$ до $5,35 ^\circ\text{C}$. Характерна тенденция к росту ΔT_{cp} при увеличении засоленности раствора (с солью в растворе средняя по экспериментам $\Delta T_{cp} = 6,58 ^\circ\text{C}$, а без нее (только каолин) $\Delta T_{cp} = 3,71 ^\circ\text{C}$). $D(\Delta T_i)$ средняя по экспериментам также изменяется примерно в той же пропорции (с $2,0 ^\circ\text{C}$ до $0,8 ^\circ\text{C}$ соответственно).

3. Для полимерного изолятора тепловые контрасты ниже (меньше общий ток). Так диапазон изменения ΔT_{cp} от $2,12 ^\circ\text{C}$ до $3,9 ^\circ\text{C}$, а $D(\Delta T_i)$ от $0,72 ^\circ\text{C}$ до $1,34 ^\circ\text{C}$. Также характерна тенденция к росту ΔT_{cp} при увеличении засоленности раствора (с солью в растворе средняя по экспериментам $\Delta T_{cp} = 3,15 ^\circ\text{C}$, а чистого $\Delta T_{cp} = 1,19 ^\circ\text{C}$). $D(\Delta T_i)$ средняя по экспериментам также изменяется примерно в той же пропорции (с $1,0 ^\circ\text{C}$ до $0,52 ^\circ\text{C}$ соответственно).

4. В ходе экспериментов не было выявлено существенной разницы в результатах при равномерном и неравномерном предварительном загрязнении, а также манипуляциях с охлаждением изоляторов и нагревом оконцевателя. Вероятной причиной этого является то, что данные воздействия оказывают лишь временный эффект. В ходе часового эксперимента за счет увлажнения происходит выравнивание химических и тепловых неоднородностей. Это подтверждается наблюдениями за разрядной деятельностью и электрическими измерениями, проводившимися в ходе тех же экспериментов и описанными в статье ранее [18].

В целом легко загрязненную гирлянду и полимерный изолятор ($\text{ESDD} < 0,046 \text{ мг/см}^2$) можно отличить от незагрязненной как по термограмме, так и по вычисленным значениям ΔT_{cp} и $D(\Delta T_i)$.

Выводы (Conclusions)

Эксперименты показали, что с помощью тепловизора можно диагностировать загрязнение изолирующих конструкций ВЛ и подстанций. Необходимое условие - хорошее смачивание поверхности изоляторов при высокой относительной влажности, в тумане или росой. Данные условия возникают во внешней среде, где работают изоляторы периодически в весенне-летне-осенний период. Однако, поскольку предугадать время выпадения конденсата на поверхность практически сложно, необходимы системы непрерывного контроля. Десяток непрерывно работающих тепловизоров, установленных на опоры ВЛ в определенном районе, могут дать достаточную информацию для обслуживающего персонала сетей о состоянии загрязнения изоляции отдельной линии и района.

Методика оценки загрязнения изоляции может быть следующий:

1. Выделение на термограмме всех изоляторов в гирлянде или отдельных стержневых и опорных изоляторов;

2. Вычисление среднего и среднеквадратического отклонения в распределении температур точек в выделенных зонах.

3. Определение загрязненной изоляции по превышению полученных значение среднего или среднеквадратического отклонений температур над значениями для чистой изоляции, снятой в тех же условиях.

Более точные результаты будут получены при статистической обработке совокупности термограмм изолирующих конструкций от разных тепловизоров, полученных в одно время.

Процесс по данному алгоритму может быть автоматизирован и использоваться при разработке онлайн систем тепловизионного контроля оборудования ВЛ и подстанций, которые находят все более широкое применение.

Литература

1. Research Provided Insight into Unexplained Line Outages [Электронный ресурс] // INMR [Сайт]. [2023]. URL: <https://www.inmr.com/analyzing-unexplained-reclosures/> (дата обращения: 22.08.2024).
2. Investigating Unexplained Reclosures on Power Grid [Электронный ресурс] // INMR [Сайт]. [2023]. URL: <https://www.inmr.com/analyzing-unexplained-reclosures/> (дата обращения: 22.08.2024).
3. Bapin Y. et al. Outage data analysis of the overhead transmission lines in kazakhstan power system // 2020 International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems (PMAPS). – IEEE, 2020. – С. 1-6
4. Maraaba L. et al. Contamination level monitoring techniques for high-voltage insulators: a review //Energies. – 2022. – Т. 15. – №. 20. – С. 7656.
5. Базанов В. П., Спирин М. В., Тураев В. А. Ультразвуковой метод контроля фарфоровой изоляции воздушных линий электропередачи 35-220 кВ // Энергетик. – 2000. – №. 4. – С. 16-17.
6. Титов Д. Е. и др. К вопросу диагностики линейной изоляции // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2017. – №. 6. – С. 114-120.
7. Yuan H. et al. State detection of electrical equipment based on infrared thermal imaging technology //Pattern Recognition and Computer Vision: Second Chinese Conference, PRCV 2019, Xi'an, China, November 8–11, 2019, Proceedings, Part I 2. – Springer International Publishing, 2019. – С. 251-260.
8. 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;24(4):165-177. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2022-24-4-165-177>
9. Wang Y., Yin Y., Ren J. Research on thermal state diagnosis of substation equipment based on infrared image // Advances in Mechanical engineering. – 2019. – Т. 11. – №. 4. – С. 1687814019828551.
10. Астапова М. А., Лебедев И. В. Обзор подходов к детектированию дефектов элементов ЛЭП на изображениях в инфракрасном, ультрафиолетовом и видимом спектрах // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2020. – Т. 8. – №. 4. – С. 38-39.
11. Ullah I. et al. Deep learning image-based defect detection in high voltage electrical equipment // Energies. – 2020. – Т. 13. – №. 2. – С. 392.
12. Chou Y. C., Yao L. Automatic diagnostic system of electrical equipment using infrared thermography // 2009 international conference of soft computing and pattern recognition. – IEEE, 2009. – С. 155-160.
13. Zhao H. Q. Infrared weak and small target extraction algorithm based on regional feature segmentation // Laser Infrared. – 2016. – Т. 46. – С. 308-312.
14. Lu X. G. An efficient infrared target extraction algorithm combined with radiation features // Laser Infrared. – 2016. – Т. 46. – С. 634-638.
15. Zaripova A., Zaripov D., Usachev A. Investigation of the algorithm to find defects in high-voltage insulators for an automated thermal imaging control system // E3S Web of Conferences. – EDP Sciences, 2021. – Т. 288. – С. 01070.
16. Зарипова А.Д., Зарипов Д.К., Усачев А.Е. Критерии выявления дефектов оборудования для тепловизионной системы контроля электрической подстанции. Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2017;19(5-6):51-57. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2017-19-5-6-51-57>
17. Зарипов Д.К. Лопухова Т.В. Метод дистанционной диагностики высоковольтной изолирующей конструкции. Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2006;3-4:56-60.
18. Zaripov D. K., Zakirov D. F., Zakharov A. V. Dynamics of development of discharges on the

contaminated surface of insulators in the process of wetting as a diagnostic sign // Third International Scientific and Practical Symposium on Materials Science and Technology (MST-III 2023). – SPIE, 2024. – Т. 12986. – С. 149-155.

19. 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>

20. Insulator L. Minimum test requirements for non-ceramic insulators //IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. – 1981. – №. 2. – С. 882-890.

Авторы публикации

Зарипов Дамир Камилевич – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электрические станции им. В.К. Шибанова» (ЭС), Казанский государственный энергетический университет (КГЭУ). dzaripov@list.ru

Закиров Динар Файзелханович – аспирант Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). qwerty2014dinar@gmail.com

Тарасов Богдан Павлович – аспирант Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). tarasovbogdanpav@mail.ru

Миронова Елена Анатольевна – канд. пед. наук, доцент кафедры «Электрические станции им. В.К. Шибанова» (ЭС), Казанский государственный энергетический университет (КГЭУ). miroнова.energo@yandex.ru

Насибуллин Рустем Анасович – канд. техн. наук, главный специалист ПАО «Красногорский завод им. С.А. Зверева». nasrus@yandex.ru

References

1. Research Provided Insight into Unexplained Line Outages. In: INMR; 2023. Available at: <https://www.inmr.com/analyzing-unexplained-reclosures>. Accessed: 22.08.2024.

2. Investigating Unexplained Reclosures on Power Grid. In: INMR; 2023. Available at: <https://www.inmr.com/analyzing-unexplained-reclosures>. Accessed: 22.08.2024.

3. Bapin Y. et al. Outage data analysis of the overhead transmission lines in kazakhstan power system. 2020 International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems (PMAPS). IEEE, 2020, pp. 1-6

4. Maraaba L. et al.; Contamination Level Monitoring Techniques for High-Voltage Insulators: A Review. Energies 2022.15(20):7656.

5. Bazanov V. P., Spirin M. V., Turaev V. A.; Ul'trazvukovoj metod kontrolya farforovoj izolyacii vozdušny'x linij e'lektroperedachi 35-220 kV. Energetik. 2000. 4:16-17 (In Russ.).

6. Titov D. E. et al. K voprosu diagnostiki linejnoj izolyacii. E'lektroe'nergiya. Peredacha i raspredelenie. 2017;6:114-120 (In Russ.).

7. Yuan H. et al. State detection of electrical equipment based on infrared thermal imaging technology. Pattern Recognition and Computer Vision: Second Chinese Conference, PRCV 2019, Xi'an, China, November 8–11, 2019, Proceedings, Part I 2. – Springer International Publishing, 2019. pp. 251-260.

8. 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. (In Russ.) <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2022-24-4-165-177>

9. Wang Y., Yin Y., Ren J. Research on thermal state diagnosis of substation equipment based on infrared image. Advances in Mechanical engineering. 2019.11(4):1-14.

10. Astapova M. A., Lebedev I. V. Obzor podxodov k detektirovaniyu defektov e'lementov LE'P na izobrazheniyax v infrakrasnom, ul'trafiolotovom i vidimom spektrax. Modelirovanie, optimizaciya i informacionny'e tehnologii. 2020. 8(4):38-39 (In Russ.).

11. Ullah I. et al. Deep learning image-based defect detection in high voltage electrical equipment. Energies. 2020.13(2): 392.

12. Chou Y. C., Yao L. Automatic diagnostic system of electrical equipment using infrared thermography. 2009 international conference of soft computing and pattern recognition. IEEE; 2009. pp. 155-160.

13. Zhao H. Q. Infrared weak and small target extraction algorithm based on regional feature segmentation. *Laser Infrared*. 2016.46:308-312.
14. Lu X. G. An efficient infrared target extraction algorithm combined with radiation features. *Laser Infrared*. 2016.46:634-638.
15. Zaripova A., Zaripov D., Usachev A. Investigation of the algorithm to find defects in high-voltage insulators for an automated thermal imaging control system. *E3S Web of Conferences*. – EDP Sciences. 2021. 288:01070.
16. Zaripova A.D., Zaripov D.K., Usachev A.E. Criteria for equipment defects for thermal power substation control system. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2017;19(5-6):51-57. (In Russ.) <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2017-19-5-6-51-57>
17. Zaripov D.K., Lopuxova T.V. Method of remote diagnostics of high-voltage insulating construction. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2006; 3-4:56-60. (In Russ.)
18. Zaripov D.K., Zakirov D.F., Zakharov A.V. Dynamics of development of discharges on the contaminated surface of insulators in the process of wetting as a diagnostic sign. *Third International Scientific and Practical Symposium on Materials Science and Technology (MST-III 2023)*. SPIE, 2024; 12986:149-155.
19. 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>
20. Insulator L. Minimum test requirements for non-ceramic insulators. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*. 1981. 2:882-890.

Authors of the publication

Damir K. Zaripov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. dzaripov@list.ru

Dinar F. Zakirov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. qwerty2014dinar@gmail.com

Bogdan P. Tarasov – Kazan State Power Engineering University. Kazan, Russia. tarasovbogdanpav@mail.ru

Elena A. Mironova – Kazan State Power Engineering University. Kazan, Russia. mironova.energo@yandex.ru

Rustem A. Nasibullin – Public Joint Stock Company Krasnogorskiy Zavod named after S.A. Zverev, Krasnogorsk, Russia. nasrus@yandex.ru

Шифр научной специальности: 2.2.8. Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды

Получено **03.10.2024 г.**

Отредактировано **11.11.2024 г.**

Принято **18.11.2024 г.**