

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ПОЛИМЕРНОГО ИЗОЛЯТОРА ПРИ УВЛАЖНЕНИИ ИСКУССТВЕННЫМ ТУМАНОМ

Зарипов¹ Д.К., Насибуллин² Р.А., Закиров¹ Д.Ф., Захаров¹ А.В.

¹Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

²ПАО «Красногорский завод им. С.А. Зверева»

dzaripov@list.ru, nasrus@yandex.ru, qwerty2014dinar@gmail.com, koktel42@mail.ru

Резюме: АКТУАЛЬНОСТЬ. Подвесные изоляторы, техническое состояние которых в значительной мере определяет надёжность электроснабжения потребителей различных категорий, являются одним из наиболее повреждаемых элементов воздушных линий электропередачи (ВЛЭП) [1-2]. Это связано в первую очередь с тем, что в процессе своей эксплуатации, изоляторы подвергаются воздействию различных климатических условий, оказывающих прямое влияние на их изоляционные свойства. Причем, наибольшее влияние атмосферные осадки, такие как дождь, туман или роса оказывают именно в сочетании с различными твердыми, жидкими и газообразными частицами, оседающими на поверхности изолятора из воздуха, и образующими слой поверхностного загрязнения. Увлажнение этого слоя повышает электропроводимость всей изоляционной конструкции ВЛЭП и уменьшает ее изоляционную способность. Изучение влияния увлажнения загрязненной поверхности подвесной изоляции на их разрядные характеристики является актуальной научной задачей и по сей день. Решение данной задачи позволит развить существующие представления о механизмах формирования и развития разрядов на загрязненной и увлажненной поверхности изоляции и сформулировать соответствующие диагностические признаки, применимые для осуществления контроля состояния подвесных изоляторов ВЛЭП. ЦЕЛЬ. Провести лабораторные исследования, направленные на изучение поведения подвесных высоковольтных полимерных изоляторов воздушных линий электропередачи при их увлажнении. Сформулировать соответствующие диагностические признаки, применимые для осуществления контроля состояния подвесных изоляционных конструкций воздушных линий электропередачи в процессе их эксплуатации. МЕТОДЫ. При решении поставленной задачи применялись экспериментальные методы исследования, заключающиеся в моделировании работы загрязнённого полимерного изолятора в атмосфере чистого тумана с применением специальной экспериментальной установки, разработанной авторами данной статьи. РЕЗУЛЬТАТЫ. В результате проведенных лабораторных исследований, путем непрерывной регистрации значений токов утечки, а также сигналов, поступающих с дистанционного датчика, были выявлены характерные при увлажнении загрязненной изоляции особенности, которые можно использовать в качестве диагностических признаков в процессе их эксплуатации.

Ключевые слова: воздушные линии электропередачи; подвесные полимерные изоляторы; разрядные характеристики; увлажнение изоляции; диагностические признаки.

Для цитирования: 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.

STUDY OF OPERATION OF A POLYMER INSULATOR UNDER UNIFORM AND NON-UNIFORM CONTAMINATION

Zaripov¹ D.K., Nasibullin² R.A., Zakirov¹ D.F., Zakharov¹ A.V.

¹Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

²PJS Company «Krasnogorskiy zavod im. S.A. Zvereva», Krasnogorsk, Russia

dzaripov@list.ru, nasrus@yandex.ru, qwerty2014dinar@gmail.com, koktel42@mail.ru

Abstract: *RELEVANCE. Suspended insulators, the technical condition of which largely determines the reliability of power supply to consumers of different categories, are one of the most damaged elements of overhead power transmission lines [1-2]. This is primarily due to the fact that during their operation, insulators are exposed to various climatic conditions that have a direct impact on their insulating properties. Moreover, precipitation, such as rain, fog or dew, has the greatest impact precisely in combination with various solid, liquid and gaseous particles deposited on the insulator surface from the air, and forming a layer of surface contamination. Wetting this layer increases the electrical conductivity of the entire overhead line insulation structure and reduces its insulating capacity. Study of influence of dampening of contaminated surface of suspended insulation on their discharge characteristics is an urgent scientific task. The solution of this task enables to develop the existing understanding of the mechanisms of formation and development of discharges on the contaminated and wetted surface of insulation and to formulate the appropriate diagnostic attributes applicable to control the condition of the overhead power line insulators. OBJECTIVE. To carry out laboratory research aimed at studying the behavior of suspended high-voltage polymer insulators of overhead power lines when they are moistened. To formulate appropriate diagnostic attributes applicable for control of condition of suspended insulators of overhead power lines during their operation. METHODS. At the solution of the posed problem experimental methods of research, consisting in simulation of work of the contaminated polymeric insulator in the atmosphere of a pure fog with application of the special experimental installation developed by the authors of this article were applied. RESULTS. As a result of laboratory research, by continuous registration of leakage current values, as well as signals coming from the remote sensor, characteristic features of contaminated insulator humidification were revealed, which can be used as diagnostic signs in the process of their operation.*

Keywords: *overhead transmission lines; suspended polymer insulators; discharge characteristics; insulation wetting; diagnostic signs.*

For citation: 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. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-5-20-29.

Введение (Introduction)

Надежность электроснабжения потребителей различных категорий зависит от состояния воздушных линий электропередачи (ВЛЭП), а также от состояния, установленного на них оборудования, такого как изоляторы, линейная арматура, разрядники и прочее. Согласно информационной бюллетени, выпущенной Исполнительным комитетом Электроэнергетического Совета СНГ [1], за 2020 год в ЕЭС России было зафиксировано 16 215 технологических нарушений, 57,4% из которых были вызваны аварийными отключениями ЛЭП напряжением 110 кВ и выше. В период с января по сентябрь 2021 года количество аварийных отключений ЛЭП увеличилось на 4% по сравнению с прошлым годом и составило 61,4% [2]. При этом одним из наиболее повреждаемых элементов ВЛЭП оказались высоковольтные изоляторы. Их повреждение или перекрытие стали причиной 17,3% аварийных отключений в 2020 году.

Сегодня многие энергетические предприятия предпочитают использовать некерамические (полимерные) изоляторы вместо традиционных керамических (фарфоровых, стеклянных). Причины расширения использования некерамических изоляторов заключаются в сочетании усовершенствованных конструкций изделий, все более благоприятного опыта эксплуатации и ценовых преимуществ по сравнению с традиционными керамическими аналогами. Полимерные изоляторы, демонстрируя длительное сохранение гидрофобности, показывают значительно лучшие результаты в электрической прочности чем гидрофильные керамические. Для гидрофобного изолятора процесс смачивания намного сложнее, так как поверхностная вода имеет тенденцию коагулировать в отдельные изолированные области, что препятствует формированию непрерывного пути тока утечки. Кроме того, если материал представляет собой силиконовый каучук, низкомолекулярные цепи полимерного материала достаточно подвижны чтобы диффундировать с поверхности материала в слой загрязнения, а сам поверхностный слой оставаться гидрофобным. Сопротивление слоя зависит от воды, которая мигрирует в нижележащий загрязняющий слой, и растворимости солей. Совместное воздействие омического нагрева в слое и приложенного электрического поля на

капли воды приводит к образованию нитей высокого сопротивления на поверхности изолятора. Точечные разряды, исходящие из нитей, вызывают локальную потерю гидрофобности, увеличение длины нитей и, если результирующая напряженность электрического поля нитей превышает напряженность дуги, может произойти перекрытие электрической дугой всего изолятора [3].

Особенность полимерных подвесных изоляторов также заключается в том, что меньшее расстояние между навесами (юбками) по сравнению с керамическими линейными изоляторами облегчает перекрытие промежутка дугой. Расстояние между юбками керамических линейных изоляторов обычно составляет 15 см. Для некерамических линейных изоляторов оно меньше, обычно в диапазоне от 5 до 10 см. Более короткое расстояние между юбками некерамических изоляторов должно сделать их более благоприятными для перекрытия. Таким образом, может существовать по крайней мере еще один механизм, который может вызвать перекрытие в дополнение к обычному процессу.

Испытания на чистый туман вносят значительный вклад в представление о механизме перекрытия изоляторов в процессе эксплуатации. В частности, было доказано существование механизма, заключающегося в стримерном разряде, который пересекает несколько юбок изолятора и приводит к перекрытию [4]. Наличие сухой зоны (области высокого сопротивления) создает крайне неоднородное распределение напряжения вдоль поверхности, инициировав тем самым стримеры. Было показано, что накопленная емкостная энергия играет существенную роль в возникновении такого рода разряда. Важное практическое значение перекрытия, инициированного стримерным разрядом, заключается в том, что характеристики перекрытия нелинейно связаны с длиной пути утечки.

Неравномерное смачивание, приводящее к появлению областей с сильно различающимся поверхностным сопротивлением по длине изолятора, может возникать в процессе эксплуатации различными способами. Например, на длинном изоляторе разряды могут начаться в относительно сухих областях под навесами. Локализованные разряды могут также возникать на концах изолятора из-за высокого напряжения в этих областях. Известно, что концевая арматура изолятора может достигать температуры более 50°C из-за тока в несущем проводе [5]. Это вызывает повышение температуры поверхности части изолятора вблизи провода. Для предотвращения конденсации влаги при выпадении росы достаточно лишь небольшого изменения (1-2°C) температуры поверхности по сравнению с окружающей средой [6]. Известный механизм отключений в ранние утренние часы заключается в неравномерном смачивании гирлянды изоляторов туманом или росой. При нагреве нижних частей изоляционной конструкции они могут оставаться сухими и потенциал земли передается вниз по смоченной части и становится приложенным в основном к части, контактирующей с проводником тока. Эта часть перекрывается стримерами и может инициировать мокрое включение оставшейся части изоляции и привести к перекрытию всей изоляционной конструкции [4]. Другим фактором, который может привести к неравномерному смачиванию некерамических изоляторов, является сам материал полимера, на смачиваемость которого, как известно, в разной степени влияют выветривание и другие факторы (электрическое напряжение, разряды). Естественное смачивание изолятора в условиях ветрового напора или тумана может быть неравномерным из-за формы и наклона поверхностей.

В нормальных условиях эксплуатации изоляторы постоянно находятся под напряжением, и ожидается, что при значительных токах в проводах, возникновение любого внезапного смачивания может запустить механизм дугового перекрытия изоляционной конструкции такого типа.

Исследование работы полимерного изолятора при его увлажнении искусственным туманом вносит вклад в развитие существующих представлений о механизмах формирования и развития разрядов на загрязненной и увлажненной поверхности изоляции, что имеет важное научное значение. Практическая значимость данного исследования заключается в определении диагностических признаков, применимых в дальнейшем для контроля состояния изоляционных конструкций и разработке соответствующих им методов и средств диагностики, позволяющих определять текущее техническое состояние изоляторов, а также прогнозировать возможность возникновения разрядов, что является важным фактором в обеспечении надежной и эффективной эксплуатации высоковольтного оборудования.

Материалы и методы (Materials and methods)

В настоящее время основным методом диагностирования полимерных изоляторов на ВЛЭП является визуальный осмотр. Ограниченно применяются тепловизионные и

ультрафиолетовые камеры [7]. Общий недостаток перечисленных методов – периодичность контроля. Диагностирование выполняется днем, в сухую погоду, когда эффекты от загрязнения не проявляются. Здесь необходим постоянный контроль с помощью установленных на ВЛЭП датчиков.

Исследованию в лабораторных условиях поведения загрязненного полимерного изолятора при увлажнении путем непрерывной регистрации тока утечки и сигналов, установленного на удалении, емкостного датчика посвящена данная работа.

Моделирование работы загрязнённого полимерного изолятора в атмосфере чистого тумана проводилось с применением экспериментальной установки, схема которой представлена на рисунке 1.

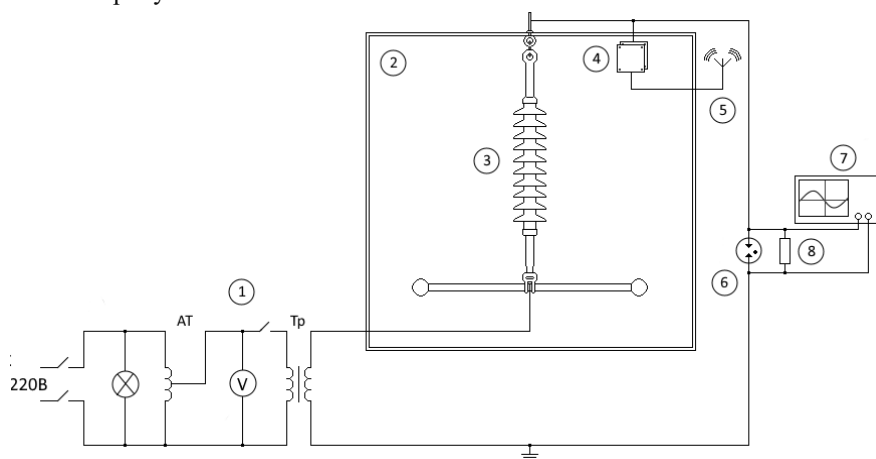


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

1 – испытательная установка 110 кВ; 2 – климатическая испытательная камера (камера тумана); 3 – полимерный изолятор 4 – электрод емкостного датчика беспроводной системы контроля (СКИВЛ) [2]; 5 – передатчик СКИВЛ; 6 – разрядник; 7 – осциллограф; 8 – резистор (1000 Ом)

Fig. 1. Schematic diagram of the experimental setup:

1 - 110 kV test setup; 2 - climatic test chamber (fog chamber); 3 - polymer insulator 4 - capacitive sensor electrode of wireless control system [2]; 5 - transmitter; 6 - discharge generator; 7 - oscilloscope; 8 - resistor (1000 Ohm)

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

Климатическая испытательная камера (рис. 1, 2) представляла собой куб со стенками, изготовленными из изоляционного материала с внутренним объемом 1 м³. В центре камеры устанавливался изолятор ЛК70/35 (рис. 1, 3), который подключался к испытательной установке (рис. 1, 1).

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

Токи утечки по поверхности изолятора регистрировались при помощи цифрового осциллографа TDS2022C, связанного с персональным компьютером (рис. 1, 7). Для защиты оборудования от перенапряжений применялся разрядник (рис. 1, 6) с импульсным током разряда 5 кА. Над объектом испытаний был закреплен электрод (рис. 1, 4) емкостного датчика беспроводной системы контроля изоляции воздушных линий (СКИВЛ) [8-12], предназначенного для непрерывной регистрации разрядной деятельности на изоляции.

Сигналы, регистрируемые датчиком, передавались через установленный снаружи камеры передатчик (рис. 1, 5) на приемный блок, подключенный к персональному компьютеру. Полученные данные отображались на экране в виде графиков высокочастотных и низкочастотных сигналов (ВЧС и НЧС).

Загрязнение изоляторов проводилось в соответствии с методом предварительного загрязнения (ПЗ), описанным в ГОСТ 10390–2015. В отличие от предварительного загрязнения керамических изоляторов, на чистый и сухой полимерный изолятор предварительно кистью наносился слой каолинового порошка.

Загрязнение изолятора производилось путем распыления водной суспензии загрязняющего вещества на его поверхность. В качестве загрязняющего вещества применялся водный раствор, содержащий 40 граммов каолинового порошка и 5–10 граммов

поваренной соли (NaCl) на 1 литр водопроводной воды. Удельная электропроводность воды составляла не более 200 мкСм/см. Полученная суспензия распылялась на поверхность изоляторов пульверизатором с расстояния не менее 30 см. Загрязнённый изолятор оставался подсыхать на срок от 24 до 36 часов. В результате, после высыхания, на поверхности изоляции образовывается достаточно прочный слой загрязнения.

Измеренная эквивалентная поверхностная плотность естественного солевого загрязнения изоляторов (ESDD) составляла 0,03–0,06 мг/см². Данный уровень характеризует слабое загрязнение.

Изолятор, подготовленный вышеописанным способом, помещался в климатическую испытательную камеру на время чуть более одного часа, включая несколько минут до и после часового увлажнения. Цель использования тумана в лаборатории заключается в имитации наиболее сильного смачивания, которому могут подвергаться загрязнённые изоляторы в процессе эксплуатации.

Исследования проводились длительным приложением к изолятору переменного напряжения 30 кВ с непрерывным увлажнением в камере до насыщения влагой слоя загрязнения. Температура окружающего воздуха в помещении при испытаниях была в пределах от 18°C до 24°C, относительная влажность воздуха составляла от 47 % до 64 %.

Для имитации неравномерности загрязняющего слоя участок изолятора под нижней юбкой оставался чистым. Подогрев нижней арматуры изолятора имитировался с помощью двух самонагревающихся грелок *Hand Warmer*, прикрепленных к нижнему оконцевателю изолятора.

Было проведено несколько экспериментов. Продолжительность увлажнения при каждом эксперименте составляла около 1 часа.

После завершения измерений тепловизором снимались термограммы изолятора.

Результаты и обсуждение (Results and Discussions)

Непрерывно в ходе экспериментов измерялись значения амплитуд синусоидальной составляющей и импульсов тока утечки, протекающего по поверхности равномерно и неравномерно загрязненной изоляции в ходе её увлажнения. Одновременно регистрировались сигналы, поступающие с датчика СКИВЛ.

Результаты измерений представлены в виде графиков, представленных на рисунках 2, 3 и 4.

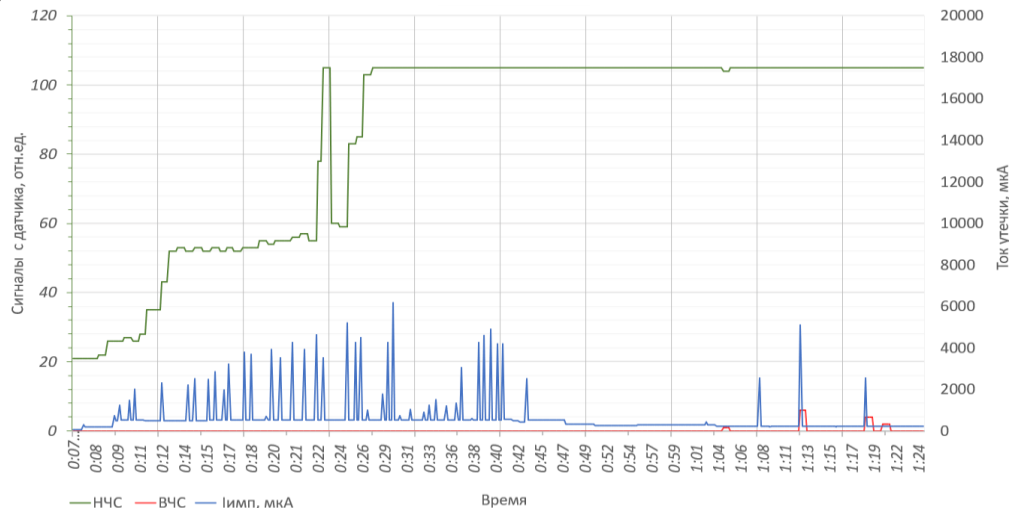


Рис. 2. Результаты измерений при равномерном загрязнении

Fig. 2. Measurement results with uniform contamination

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

При равномерном загрязнении (рис. 2) резкий рост амплитудных значений импульсов тока утечки (Имп) наблюдался на начальном этапе увлажнения изолятора. Максимальное амплитудное значение тока утечки при этом было около 6 мА. Высокочастотные сигналы (ВЧС) с датчика СКИВЛ не наблюдались, что говорит о малой частоте следования этих импульсов.

Появление импульсных токов утечки в начальный момент времени при равномерном загрязнении обусловлено неравномерностью увлажнения изолятора [13–15]. Слой загрязнения на изоляторе в этот момент времени ещё не достиг состояния насыщения, о чём может свидетельствовать график низкочастотных сигналов (НЧС). Полное насыщение слоя

загрязнения влагой происходит при уровне НЧС =105 (отн.ед.). Насыщение слоя загрязнения приводит к выравниванию распределения напряжения гирлянды и, как следствие, к снижению импульсного тока утечки на изоляторе. Позднее начинают работать редкие при слабом загрязнении периодические образования частичных дуг на поверхности, вызванные циклами подсыхания и увлажнения отдельных участков изолятора. Кроме того, как показали наблюдения, на краях юбок изолятора образуются водяные капли, вероятно, способствующие образованию стримеров с высокой частотой следования импульсов.

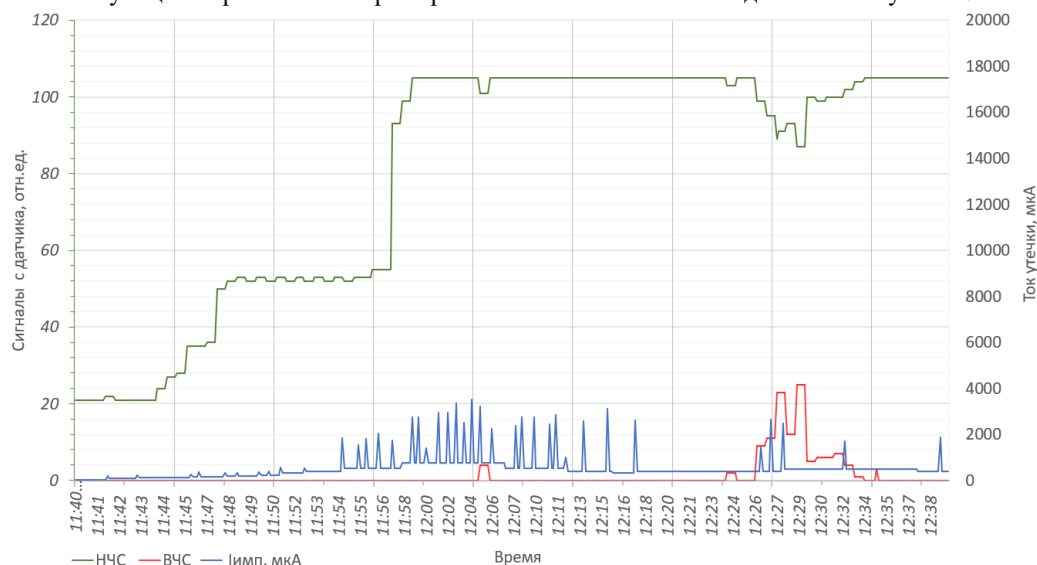


Рис. 3 – Результаты измерений при неравномерном загрязнении

Fig. 3 - Measurement results with non-uniform contamination

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

При неравномерном загрязнении (рис. 3) разрядная активность в начальный момент после подачи тумана не наблюдается и появляется по мере насыщения влагой загрязнения. В начале насыщения, из-за сохраняющейся неравномерности распределения напряжения над незагрязнённым участком изолятора с большим сопротивлением, на короткое время, вероятно, возникают часто следующие стримерные разряды. Они быстро пропадают и появляются большие по амплитуде с малой частотой следования импульсы от частичных дуг, вызванных циклами увлажнения и подсыхания под воздействием тока утечки отдельных участков изолятора. Позднее, из-за появления капель на краях юбок, появляются стримеры со значительно большей интенсивностью и частотой, чем при равномерном загрязнении (рис. 2).

В целом токи утечки при равномерном загрязнении выше, что косвенно подтверждается снимками с тепловизора, полученными примерно через 2 мин по завершении эксперимента (рис. 4). Температурные неоднородности на термограммах вызваны неодинаковым сопротивлением различных участков поверхности изолятора из-за неоднородности загрязнения и увлажнения. Температура на равномерно загрязненном изоляторе немного выше из-за большего тока утечки, как и ожидалось (рис. 5).

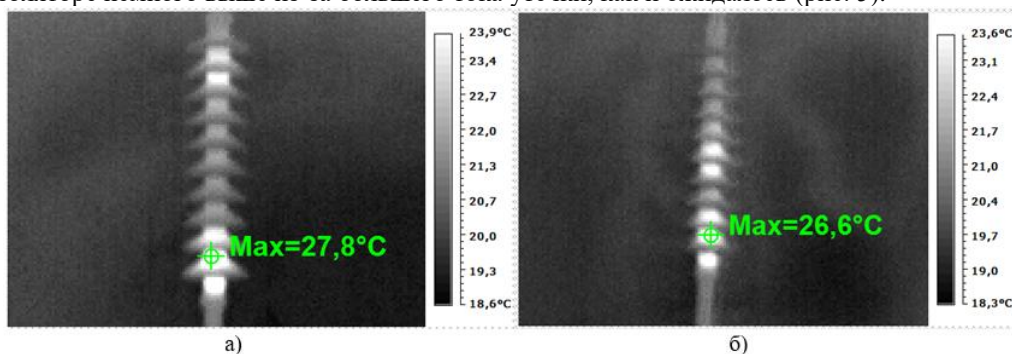


Рис. 4. Термограммы изолятора при равномерном (а) и неравномерном (б) загрязнении после окончания экспериментов

Fig. 4. Thermograms of the insulator at uniform (a) and non-uniform (b) contamination after the experiments

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

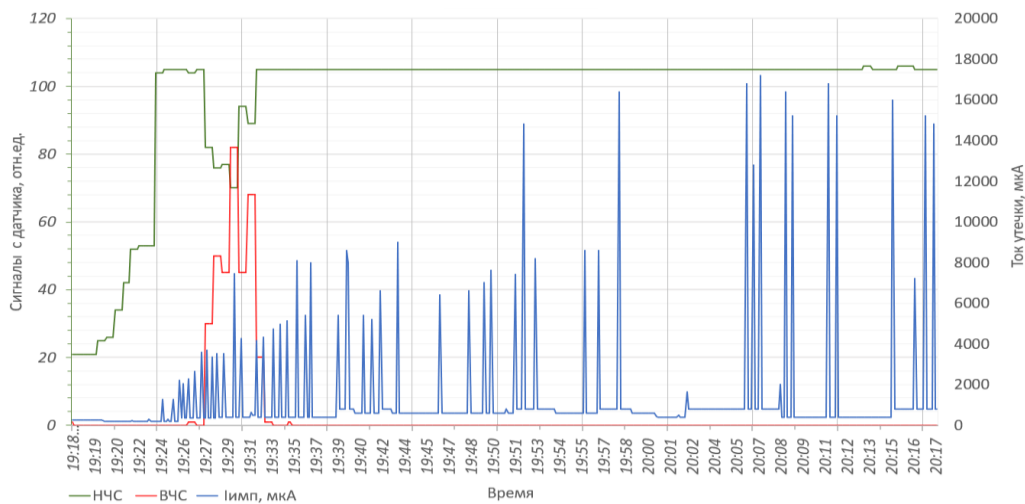


Рис. 5 – Результаты измерений при равномерном загрязнении с подогревом нижнего оконцевателя изолятора

Fig. 5 - Results of measurements with uniform contamination with heating of the bottom insulator terminal

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

Важным отличием графиков на рисунках 1 и 5 является появление высокочастотных сигналов, регистрируемых емкостным датчиком (ВЧС) через несколько минут после подачи пара и насыщения слоя загрязнения на изоляторе с подогревом. Это вызвано, вероятно, тем, что из-за подогрева (рис. 6 а) к тому моменту нижняя часть изолятора еще не смочилась и образовался большой градиент напряжения над сухим участком, что обусловило появление стримеров. Частота следования стримеров на порядки выше частоты следования импульсов тока утечки, вызванных загрязнением [16]. Далее, по мере смачивания сухого участка, напряжение вдоль изолятора выравнивалось и ВЧ разряды пропали. Характер разрядов в обоих случаях стал схожим и соответствующим частичным разрядам на загрязненной и увлажненной поверхности. Можно отметить также, что интенсивность импульсов, регистрируемых осциллографом в эксперименте с подогревом, была выше. Нагрев поверхности протекающими токами утечки тоже был выше, чем в ситуации без подогрева, что связано с большей неравномерностью распределения напряжения, сохраняющегося в ходе второго эксперимента (рис. 6).

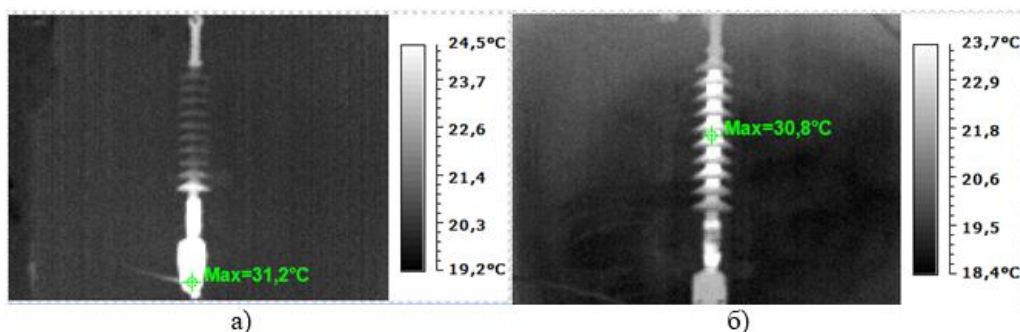


Рис. 6 – Термограммы с установленными нагревателями до начала (а) и после окончания (б) эксперимента

Fig. 6 - Thermograms with heaters installed before (a) and after (b) the experiment

Заключение (Conclusions)

1. Впервые проведено комплексное исследование, с использованием различных устройств контроля, поведения загрязненного полимерного изолятора в процессе увлажнения.

2. Впервые проведенные исследования поведения неравномерно увлажняемого туманом полимерного изолятора дополняет представление о механизмах перекрытия изоляции в процессе эксплуатации. Сохранение в процессе увлажнения некоторое время сухой области (области высокого сопротивления) на поверхности изолятора создает крайне неоднородное распределение напряжения вдоль нее, инициировав тем самым стримерные

разряды существенно более высокой частоты, чем частичные дуги над сухими полосами в результате подсыхания участков токами утечки.

Важное практическое значение исследований перекрытия, инициированного стримерным разрядом, заключается в том, что характеристики перекрытия нелинейно связаны с длиной пути утечки в отличие от стандартного механизма перекрытия при образовании сухой полосы, служащего основой сегодня для выбора изоляции ВЛЭП. Перекрытие изоляции может происходить при меньших напряжениях. Проведенные исследования могут способствовать уточнению существующих стандартов.

3. Исследован новый механизм возникновения разрядной деятельности на изоляторе при увлажнении, вызванный токами, протекающими по несущему проводу. Значительные токи в проводе вызывают неравномерный нагрев изоляторов и, как следствие, образование сухой зоны в начальный момент при опускании тумана и выпадения росы, что может являться одной из причин внезапных коротких замыканий из-за перекрытия изоляционных конструкций на ВЛЭП. Таким образом, для предотвращения перекрытий необходимо своевременно выявлять данные факторы и принимать соответствующие меры в процессе эксплуатации изоляции.

4. Проведенные исследования показали, что характер разрядной деятельности на поверхности полимерного изолятора при загрязнении схож с таковым для гирлянды подвесных стеклянных изоляторов. Это связано с тем, что загрязнение поверхности полимерного изолятора приводит к частичной и вероятно временной потере гидрофобности. Однако, при таких же уровнях воздействующего напряжения и загрязнения у полимерного изолятора наблюдаются меньшие значения токов утечки и интенсивности разрядов по сравнению с гирляндой стеклянных изоляторов.

5. Представленная в статье методология и результаты могут быть использованы при разработке новых систем диагностики состояния изоляционных конструкций, а также новых методов обеспечения надёжности и эффективности эксплуатации высоковольтного оборудования.

Литература

1. Обзор аварийности и травматизма в электроэнергетических системах государств-участников СНГ за 2020 год: инф. бюллетень № 21. Исполнительный комитет Электроэнергетического совета СНГ, 2021. 141 с.
2. В России участились аварии на энергообъектах [Электронный ресурс] // Известия Iz: [сайт]. [2021]. URL: <https://iz.ru/1248071/2021-11-11/v-rossii-uchastilis-avarii-na-energoobektakh> (дата обращения: 25.11.2021).
3. A. C. Baker et al., "Insulator Selection for AC Overhead Lines With Respect to Contamination," in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 24, no. 3, pp. 1633-1641, July 2009, doi: 10.1109/TPWRD.2009.2024666.
4. F. A. M. Rizk and S. I. Kamel, "Modelling of HVDC wall bushing flashover in nonuniform rain," in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 6, no. 4, pp. 1650-1662, Oct. 1991, doi: 10.1109/61.97704.
5. L. a. Insulator, "Minimum Test Requirements for Non-Ceramic Insulators," in IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-100, no. 2, pp. 882-890, Feb. 1981, doi: 10.1109/TPAS.1981.316947.
6. R. S. Gorur et al., "Sudden flashover of nonceramic insulators in artificial contamination tests," in IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 4, no. 1, pp. 79-87, Feb. 1997, doi: 10.1109/94.590870.
7. Learning from Service Experience with Composite Line Insulators [Электронный ресурс] // INMR Enriching Technical Knowledge of T&D Professionals: [сайт]. [2023]. URL: <https://www.inmr.com/learning-from-service-experience-with-composite-line-insulators-2/>
8. Патент № 2517776 РФ, МПК G01R 31/08. Способ оптической дистанционной диагностики изолирующей конструкции / Зарипов Д.К.; заяв. и патентообл. Зарипов Д.К. № 2012151785/28; заявл. 03.12.2012; опубл. 27.05.2014, 6 с.5. Массомер CORIMASS 10G+ MFM 4085 K/F [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://cdn.krohne.com/dlc/MA_CORIMASS_G_ru_72.pdf.
9. Патент №2660754 РФ, МПК G01R 31/08. Световой индикатор состояния изолирующей конструкции /Зарипов Д.К. Насибуллин Р.А., Маргулис С.М., Ибрагимов Р.Р., Игтисамов М.Ч.; заявитель и патентообладатель ОАО «Сетевая компания» № 2017125424; заявл. 14.07.2017; опубл. 09.07.2018 Бюл. № 19, 10 с.
10. Патент № 2731169 С1 РФ, МПК G01R 31/08. Датчик для системы непрерывного контроля состояния изолирующих конструкций: № 2019145586: заявл. 30.12.2019; опубл. 31.08.2020 / Д. К. Зарипов, Р. А. Насибуллин, Р. Р. Ибрагимов, М. Ч. Игтисамов.

11. Зарипов, Д. К. Метод дистанционной диагностики высоковольтной изолирующей конструкции / Д. К. Зарипов, Т. В. Лопухова // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2006. – № 3-4. – С. 56-60. – EDN KFQJUT.
12. Зарипов, Д. К. Распределенная система контроля изоляции воздушных линий и подстанций на основе беспроводных датчиков емкостного типа / Д. К. Зарипов, Р. А. Насибуллин, Д. Ф. Закиров // . – 2022. – № 1. – С. 8-17. – DOI 10.25791/pribor.1.2022.1314. – EDN ABQNHUI.
13. Зарипов Д. К. Исследование возможности диагностирования изоляторов воздушных линий электропередачи в условиях увлажнения при равномерном загрязнении / Д. К. Зарипов, Д. Ф. Закиров, А. В. Петров // Актуальные проблемы транспорта и энергетики: пути их инновационного решения : Материалы X Международной научно-практической конференции, Нур-Султан, 17 марта 2022 года.
14. Зарипов Д. К. Исследование возможности диагностирования изоляторов воздушных линий электропередачи для предупреждения немотивированных отключений / Д. К. Зарипов, Д. Ф. Закиров, А. В. Петров // Актуальные проблемы транспорта и энергетики: пути их инновационного решения : Материалы X Международной научно-практической конференции, Нур-Султан, 17 марта 2022 года.
15. Зарипов, Д. К. Исследование возможности диагностирования гирлянды равномерно загрязнённых изоляторов в условиях увлажнения / Д. К. Зарипов, Д. Ф. Закиров, А. В. Петров // Актуальные проблемы транспорта и энергетики: пути их инновационного решения : Материалы X Международной научно-практической конференции, Нур-Султан, 17 марта 2022 года.
16. В. Ф. Тарасенко, В. С. Кузнецов, В. А. Панарин, В. С. Скакун, Э. А. Соснин, Е. Х. Бакшт, "Роль стримеров в формировании коронного разряда при резко неоднородном электрическом поле", Письма в ЖЭТФ, 110:1 (2019), 72–77; JETP Letters, 110:1 (2019), 85–89

Авторы публикации:

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

Насибуллин Рустем Анасович - канд. техн. наук, ведущий инженер-электроник ПАО «Красногорский завод им. С.А. Зверева».

Закиров Динар Файзелханович – аспирант, Казанский государственный энергетический университет (КГЭУ).

Захаров Артем Владимирович – аспирант, Казанский государственный энергетический университет (КГЭУ).

References

1. Obzor avarijnosti i travmatizma v elektroenergeticheskikh sistemah gosudarstv-uchastnikov SNG za 2020 god: inf. byulleten' № 21. Ispolnitel'nyj komitet Elektroenergeticheskogo soveta SNG, 2021. 141 s.
2. V Rossii uchastilis' avarii na energoob'ektakh [Elektronnyj resurs] // Izvestiya Iz: [cajt]. [2021]. URL: <https://iz.ru/1248071/2021-11-11/v-rossii-uchastilis-avarii-na-energoobektakh> (data obrashcheniya: 25.11.2021).
3. A. C. Baker et al., "Insulator Selection for AC Overhead Lines With Respect to Contamination," in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 24, no. 3, pp. 1633-1641, July 2009, doi: 10.1109/TPWRD.2009.2024666.
4. F. A. M. Rizk and S. I. Kamel, "Modelling of HVDC wall bushing flashover in nonuniform rain," in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 6, no. 4, pp. 1650-1662, Oct. 1991, doi: 10.1109/61.97704.
5. L. a. Insulator, "Minimum Test Requirements for Non-Ceramic Insulators," in IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-100, no. 2, pp. 882-890, Feb. 1981, doi: 10.1109/TPAS.1981.316947.
6. R. S. Gorur et al., "Sudden flashover of nonceramic insulators in artificial contamination tests," in IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 4, no. 1, pp. 79-87, Feb. 1997, doi: 10.1109/94.590870.
7. Patent № 2517776 RF, MPK G01R 31/08. Sposob opticheskoy distancionnoj diagnostiki izoliruyushchej konstrukcii / Zaripov D.K.; zayav. i patentoobl. Zaripov D.K. № 2012151785/28; zayavl. 03.12.2012; opubl. 27.05.2014, 6 s.5. Massomer CORIMASS 10G+ MFM 4085 K/F [Elektronnyj resurs]. Rezhim dostupa: http://cdn.krohne.com/dlc/MA_CORIMASS_G_ru_72.pdf.
8. Patent №2660754 RF, MPK G01R 31/08. Svetovoj indikator sostoyaniya izoliruyushchej konstrukcii /Zaripov D.K. Nasibullin R.A., Margulis S.M., Ibragimov R.R., Igtisamov M.CH.; zayavitel' i

patentobladatel' OAO «Setevaya kompaniya» № 2017125424; zayavl. 14.07.2017; opubl. 09.07.2018 Byul. № 19, 10 s.

9. Patent № 2731169 C1 RF, MPK G01R 31/08. Datchik dlya sistemy nepreryvnogo kontrolya sostoyaniya izoliruyushchih konstrukcij: № 2019145586; zayavl. 30.12.2019; opubl. 31.08.2020 / D. K. Zaripov, R. A. Nasibullin, R. R. Ibragimov, M. CH. Igtisamov.

10. Zaripov, D. K. Metod distancionnoj diagnostiki vysokovol'noj izoliruyushchej konstrukcii / D. K. Zaripov, T. V. Lopuhova // Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Problemy energetiki. – 2006. – № 3-4. – S. 56-60. – EDN KFQJUT.

11. Zaripov, D. K. Raspredeennaya sistema kontrolya izolyacii vozdushnyh linij i podstancij na osnove besprovodnyh datchikov emkostnogo tipa / D. K. Zaripov, R. A. Nasibullin, D. F. Zakirov // . – 2022. – № 1. – S. 8-17. – DOI 10.25791/pribor.1.2022.1314. – EDN ABQHUI.

12. Zaripov, D. K. «Issledovanie vozmozhnosti diagnostirovaniya izolyatorov vozdushnyh linij elektropredachi v usloviyah uvlazhneniya pri ravnomernom zagryaznenii» / D. K. Zaripov, D. F. Zakirov, A. V. Petrov // Aktual'nye problemy transporta i energetiki: puti ih innovacionnogo resheniya : Materialy X Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii, Nur-Sultan, 17 marta 2022 goda

13. Zaripov, D. K. Issledovanie vozmozhnosti diagnostirovaniya izolyatorov vozdushnyh linij elektropredachi dlya preduprezhdeniya nemotivirovannyh otklyuchenij / D. K. Zaripov, D. F. Zakirov, A. V. Petrov // Aktual'nye problemy transporta i energetiki: puti ih innovacionnogo resheniya : Materialy X Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii, Nur-Sultan, 17 marta 2022 goda.

14. Zaripov, D. K. Issledovanie vozmozhnosti diagnostirovaniya girlyandy ravnomerno zagryaznyonnyh izolyatorov v usloviyah uvlazhneniya / D. K. Zaripov, D. F. Zakirov, A. V. Petrov // Aktual'nye problemy transporta i energetiki: puti ih innovacionnogo resheniya : Materialy X Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii, Nur-Sultan, 17 marta 2022 goda.

15. V. F. Tarasenko, V. S. Kuznecov, V. A. Panarin, V. S. Skakun, E. A. Sosnin, E. H. Baksht, "Rol' strimerov v formirovanii koronnogo razryada pri rezko neodnorodnom elektricheskom pole", Pis'ma v ZHETF, 110:1 (2019), 72–77; JETP Letters, 110:1 (2019), 85–89

Authors of the publication

Damir K. Zaripov - Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

Rustem A. Nasibullin - Public Joint Stock Company «Krasnogorskiy zavod im. S.A. Zvereva», Krasnogorsk, Russia

Dinar F. Zakirov - Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

Artem V. Zakharov - Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

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

Получено

09.06.2023 г.

Отредактировано

14.07.2023 г.

Принято

08.09.2023 г.