

Ключевую роль в надежности электроснабжения потребителей играет безотказная работа электрической изоляции воздушных линий электропередачи и подстанций. Безусловным приоритетом в организации контроля технического состояния изоляции является ее мониторинг под рабочим напряжением [1]. Разработаны различные варианты изолирующих конструкций, состоящих из цельных или составных изоляторов, с дополнительными или встроенными элементами оценки их состояния [2-5]. Эти элементы называют индикаторами дефекта или пробоя. Срабатывание или разрушение индикаторов происходит под действием сильных электрических полей, вызванных перераспределением напряжения вдоль изолирующей конструкции или ее пробоем. При нормальном состоянии изоляции величина напряженности электрического поля на индикаторе будет недостаточной для его срабатывания и разрушения. В случае локального ухудшения изолирующих свойств напряженность электрического поля на индикаторе будет увеличиваться. При достижении длины поврежденного участка изоляции определенного значения и/или пробоя индикатор срабатывает, сигнализируя о выходе из строя изолирующей конструкции. Общим недостатком данных устройств является срабатывание только при значительном снижении изолирующих свойств конструкции, что повышает вероятность аварий с полным отключением оборудования. Кроме того, установка подобных индикаторов на уже эксплуатируемых изолирующих конструкциях весьма затруднительна. В тоже время, контроль состояния изоляции с помощью приборов дистанционной диагностики, основанных на приеме теплового, ультразвукового, светового излучений, позволяет во многих случаях обнаруживать дефекты изоляции на ранних стадиях их развития [6-8]. Снижение электрической прочности элементов или участков изоляции приводит к аномалиям в распределении напряжения вдоль изолирующей конструкции, что вызывает появление на отдельных участках температурных градиентов и/или электрических разрядов. Существующая техника регистрации данных проявлений дефектов изоляции позволяет обнаруживать их со значительных расстояний при перемещении аппаратуры контроля на большой скорости. Однако, подобная диагностика обладает невысокой эффективностью в силу значительного пропуска дефектов из-за их маскировки конструкцией или отсутствия надлежащих погодных условий во время диагностики и требует опытного оператора для интерпретации полученных результатов. Приведенный анализ показывает, что необходимо устройство обнаружения ухудшения диэлектрических свойств изолирующей конструкции, срабатывание которого должно четко указывать на начавшиеся деструктивные процессы в изоляции. Индикация устройства должна быть легко обнаруживаема без дополнительных приборов визуально с земли. Идентификация начала деградации изоляции должна быть как можно более ранней. Индикатор должен быть прост, дешев, не требовать дополнительного технического обслуживания и по надежности не

уступать изолирующей конструкции, для которой предназначен. Приведенным требованиям отвечают полупроводниковые, газоразрядные и жидкокристаллические оптические индикаторы, возможности применения которых рассмотрены в данной статье. Установка оптических индикаторов, сигнализирующих о наличии дефекта, на изолирующие конструкции в заранее определенных и доступных для наблюдения местах позволит повысить эффективность дистанционной диагностики в условиях перемещения регистрирующего устройства. Кроме того, поскольку положение излучателя на изолирующей конструкции известно, то упрощаются алгоритмы автоматического выявления дефектов. Принцип работы оптического индикатора поясняется следующим. Распределение электрического поля и потенциала вдоль изолирующей конструкции изменяется при нарушении целостности отдельных ее частей. Разность потенциалов на поврежденном участке уменьшается, что вызывает увеличение напряжения вблизи неповрежденной части конструкции. Дефектное состояние изолирующей конструкции может быть обнаружено по интенсивности свечения индикатора, установленного на участке изолирующей части конструкции или опоре, яркость свечения которого зависит от падения напряжения на его контактах и протекающего тока. Рассмотрим работу светового индикатора, внесенного в область действия переменного электрического поля вблизи изолятора подвешенного на металлической опоре (рис.1, а). На рисунке пунктиром схематично указаны электрические связи индикатора (И) с изолятором и металлическими элементами конструкции. С1 и С2, С3 и С4 - емкости контактов индикатора относительно высоковольтной и заземленной частей конструкции. а) б) Рис. 1 - Индикатор (И) в электрическом поле вблизи изолятора, а - электрические связи индикатора с элементами конструкции; б - схема замещения. Для проведения расчетов сам индикатор и его связи удобно представить комплексными сопротивлениями (рис. 1, б). В этом случае падение напряжения на индикаторе может быть выражено формулой (1) где U_f - фазное напряжение, В; X_{in} - комплексное сопротивление индикатора, Ом; X_1, X_2, X_3, X_4 - комплексные сопротивления контактов индикатора относительно высоковольтного провода и опоры, Ом. Как видно из рис. 1 а) и формулы (1) конструкция излучателя и его установка представляет оптимизационную задачу. Так, при определенном расположении индикатора (падение напряжения на нем будет отсутствовать и свечения не будет. Из общих соображений надежности представляется целесообразным расположить индикатор вблизи заземленной части конструкции. Как показали эксперименты, надежного свечения индикатора можно добиться если один из контактов его заземлить через заземленную часть изолирующей конструкции или опоры, а второй контакт излучателя закрепить на изолирующей части конструкции, например, на ближней к опоре юбке. При этом нет необходимости в соединении второго контакта индикатора с металлическими частями изолирующей

конструкции. На любом участке изолирующей части конструкции имеется потенциал отличный от нулевого. При выборе места закрепления второго контакта необходимо исходить от типа индикатора и минимизации его шунтирующего действия на изолирующую конструкцию. Для случая с заземленным контактом индикатора (формула (1) запишется в виде , (2) Как показали измерения активного сопротивления и емкости использованных нами индикаторов, значения их таковы, что Формула (2) может быть и дальше упрощена к виду , (3) Таким образом, при выбранном положении индикатора падение напряжения на нем будет зависеть от величины комплексного сопротивления между высоковольтной частью изолятора с проводом и одним из контактов индикатора. Значение будет зависеть от состояния изоляции конструкции. При наличии локального дефекта изолирующий промежуток между высоковольтным проводом и контактом индикатора может быть разбит на две части (доли) - дефектную и бездефектную (рис.2) [9]. Суммарно сопротивления обеих частей , где m - доля вклада дефектной части изоляции ; i - мнимая единица; активное сопротивление дефектной части. На рис. 2 C_{in} и R_{in} представляют емкость и сопротивление индикатора. Рис. 2 - Схема замещения индикатора в электрическом поле изолятора с локальным дефектом Формула (3) после подстановок и преобразований в соответствии со схемой на рис.2 примет следующий вид ,(4) где $\tan \delta$ - тангенс угла потерь. Представляет интерес зависимость , которая характеризует относительное изменение падения напряжения на индикаторе в зависимости от доли поврежденной части изолирующей конструкции. Рис. 3. Графики относительного изменения падения напряжения на индикаторе $K(m)$ в зависимости от доли поврежденного участка изоляции при различных значениях : 1 - 2 - 3 - 4 - Как видно из графиков на рис. 3 и формулы (4) при изменении падения напряжения на индикаторе будет определяться практически только долей поврежденной части изолирующей конструкции m . По оценке для полимерных изоляторов, например, собственная емкость которых составляет порядка 1 пФ данная ситуация будет выполняться уже при активном сопротивлении поврежденного участка менее 1 ГОм. Целью экспериментальной части работы являлось показать практическую возможность обнаружения дефекта изоляции с помощью различных индикаторов. Эксперименты проводились в высоковольтной лаборатории Казанского энергетического университета. Первым примером, показывающим возможность осуществления предложенного способа индикации дефекта, является результат лабораторного эксперимента, изображенный на рис. 4. На снимке (рис. 4), полученном высокочувствительной видеокамерой, изображены два полимерных изолятора ЛК 70/35 подключенные к напряжению переменного тока 35 кВ, один из которых (правый) имеет дефект в виде продольного проводящего канала, шунтирующего часть (30%) конструкции. На верхних юбках обеих изоляторов, ближних к заземленному концу, установлены светодиоды в схеме с параллельно

подключенным к ним шунтирующим диодам [10]. Один из контактов излучателей соединен с металлической заземленной частью конструкции, а второй закреплен на юбке, ближней к заземляющей опоре. Наличие на изолирующей конструкции дефектного участка изменило напряжение между контактами излучателя, что привело к изменению яркости его свечения. Как видно на снимке, чувствительность видеокамеры позволяет обнаружить свечение только светодиода, установленного на дефектном изоляторе (в области верхнего оконцевателя). Отметим, что на дефектном изоляторе в центре сбоку наблюдается также свечение частичных разрядов под юбками, которое трудно обнаружить при съемке под другим ракурсом. [11] Подобный эксперимент был проведен также с использованием газоразрядных (неоновой) ламп. Недостатком использования светодиодного и газоразрядного индикаторов является их слабое свечение даже при значительной степени повреждения изоляции. Это объясняется малой величиной тока, протекающего через индикатор (~1- 100 мкА). Данные индикаторы могут быть полезны при выявлении сильных загрязнений изоляторов, где токи утечки могут достигать 100 мА и более [10]. Рис. 4 - Изображение дефектного и исправного полимерных изоляторов с установленными на них светодиодами при низкой освещенности помещения. Несколько другая картина наблюдается при использовании жидкокристаллических индикаторов (ЖКИ). Важной особенностью ЖКИ является низкий ток потребления - 1-100 мкА. Кроме того, возбуждение жидкокристаллического слоя в индикаторах осуществляется переменным напряжением, что упрощает схемные решения. Аналогичные результаты были получены и на опорных керамических изоляторах. Было установлено, что конструкция и место расположения индикатора должны быть соответствующим образом адаптированы к типу изолирующей конструкции. Таким образом, предлагаемым способом может решаться задача диагностики состояния изоляции различных изоляционных конструкций, установленных на высоковольтных линиях и подстанциях. Индикация проблемной изоляции возможна без специальных приспособлений и устройств и может сохраняться длительное время до момента верхового или другого планового обследования оборудования. Техническим результатом при реализации способа будет повышение надежности и эффективности дистанционного контроля состояния изолирующих конструкций при осуществлении мониторинга с движущихся транспортных средств, а также упрощение алгоритмов автоматизации их контроля. Рассмотренные индикаторы являются простыми и достаточно дешевыми устройствами для диагностики состояния изоляции на ранних стадиях ухудшения ее диэлектрических свойств. При разработке промышленных образцов индикаторов должны быть решены проблемы устойчивости к загрязнениям и неблагоприятным погодным условиям, грозovým и коммутационным перенапряжениям.