

УДК 621.3.048

КОМПЛЕКСНОЕ ДИСТАНЦИОННОЕ ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ДЕФЕКТОВ В ИЗОЛЯЦИИ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

© 2024 г. В. А. Голенищев-Кутузов¹, А. В. Голенищев-Кутузов¹, А. В. Семенников^{1,*},
Р. И. Калимуллин¹, Д. А. Иванов¹

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Казанский государственный энергетический университет», Казань, Россия

*E-mail: catorsebe@gmail.com

Поступила в редакцию 15.07.2024

После доработки 19.08.2024

Принята к публикации 30.08.2024

Разработана методика и система комплексной дистанционной диагностики элементов изоляции высоковольтного оборудования подстанций и линий электропередачи, в том числе опорных, подвесных и проходных изоляторов. В основу системы положен принцип одновременного измерения и последующего анализа набора характеристик частичных разрядов высокочастотным (400–800 МГц) и акустическим (30 кГц) датчиками. Выполнено обследование более 50 экземпляров полимерных (ЛК 70/35) и фарфоровых (ИОС 110/400) изоляторов на двух подстанциях ОАО «Сетевая компания» в процессе их функционирования в рабочем режиме. Получены наборы амплитудно-фазовых диаграмм параметров частичных разрядов, по которым можно определять вид и степень влияния дефекта на объект изоляции. Установлены особенности дефектов для электрических сетей 35 и 110 кВ.

DOI: 10.31857/S0367676524120246, EDN: EUTMCQ

ВВЕДЕНИЕ

Устойчивость функционирования высоковольтного электроэнергетического оборудования во многом определяется работоспособностью его изоляционных элементов [1]. Их старение, перенапряжение в электрической сети, природные воздействия и другие причины сопровождаются возникновением внутренних (полости, трещины, неплотные контакты «металл-диэлектрик») или поверхностных частичных разрядов (ЧР). Они происходят в местах локального увеличения напряженности электрического поля.

Уже несколько десятилетий сами ЧР являются основой одного из главных методов дистанционной диагностики таких элементов, как высоковольтные трансформаторы, кабели, вводы, вращающиеся электрические машины. Регистрация характеристик ЧР основана на таких видах разрядных излучений, как короткие (10^{-6} – 10^{-11} с) электромагнитные импульсы в оптическом и радиодиапазонах и упругие (акустические) импульсы (10^4 – 10^8 Гц) [2–5]. Ранее применение этих методов для проведения диагностики было рекомендовано рядом международных и отечественных стандартов, в т. ч. ГОСТ [6–10]. Однако, на наш взгляд, в этих документах практически не рассматривается проблема диагностики одних из наиболее важных и сложных элементов

высоковольтной изоляции — высоковольтных изоляторов (ВИ), которые являются составной частью линий электропередачи (ЛЭП), подстанций и других элементов высоковольтных сетей [11].

Если в конце XX века внимание исследователей и практиков в диагностировании было разделено между разработкой новых методов дистанционного диагностирования реальных высоковольтных элементов и разработкой теорий электрофизических процессов в них [12], то к настоящему времени интерес сместился в сферу более глубокого изучения электрофизики в модельных дефектах, сформированных в полимерных образцах. Однако сложность процессов старения полимерных диэлектрических элементов и малые размеры дефектов в них не позволили значительно продвинуться в создании универсальной физической модели развития ЧР и, в особенности, поверхностных ЧР. Таким образом, к началу XX века на практике оказалось, что (по крайней мере в России) отсутствует как аппаратура, так и методики надежного дистанционного диагностирования ВИ [13]. Более того, для дистанционной диагностики до сих пор не разработаны предельно допустимые параметры ЧР в ВИ в сетях до 110 кВ и выше, хотя выявленные в них дефекты [14] составляют более 30 % от общего количества дефектов на ЛЭП и подстанциях.

ВЛИЯНИЕ ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ НА ОБРАЗОВАНИЕ И РАЗВИТИЕ ДЕФЕКТОВ В ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИЗОЛЯТОРАХ

В конце 1990-х годов перед коллективом кафедры промышленной электроники Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ) была поставлена задача улучшения метрологических, технико-экономических и функциональных возможностей дистанционной диагностики ВИ на ЛЭП и подстанциях на основе использования набора характеристик ЧР. В основу выполненной разработки было положено совместное использование уже известных электронных приборов и узлов, а также самостоятельно изготовленной аппаратуры и программы цифровой записи, обработки и представления параметров характеристик ЧР, измеряемых различными методами [15].

Дистанционную регистрацию импульсов ЧР осуществляли электромагнитным методом (перестраиваемый приемник (10–650 МГц) AOR5000A с антенной H111; акустический приемник SDT270 (20–60 кГц) с антенной Paradish2; электронно-оптический дефектоскоп СороСАМ; тепловизор TESTO 890-2; оригинальный лазерно-электрический измеритель напряженности поля). На основе этих приборов был разработан комплексный метод измерения набора характеристик ЧР одновременно электромагнитным, акустическим и оптическим датчиками с предварительным измерением ряда характеристик ЧР контактными электрическим и лазерно-электрическим методами на эталонных образцах ВИ. Разработанная методика позволила установить наиболее эффективные диагностические признаки для выявления дефектов и неисправностей, а также впоследствии более глубоко изучить электрофизические процессы на дефектах в ВИ [16, 17].

Затем был разработан аппаратно-программный комплекс дистанционного диагностирования ВИ на основе анализа параметров ЧР в стендовом и полевом режимах [18]. В его основу были положены такие параметры ЧР, как интенсивность (q , Кл), количество ЧР за временной интервал, обеспечивающий условие стохастичности процесса ЧР (N_c), напряженность электрического поля на дефекте (E_g , В/м), фазовое распределение интенсивности ЧР и их количества, а также сопоставление относительных значений этих параметров, измеренных электромагнитным и акустическим датчиками на одном и том же ВИ. Основная сложность в этом процессе заключалась в сопоставлении значений этих параметров, измеренных традиционным (согласно ГОСТ) контактным электрическим методом с отключением оборудования от сети и бесконтактными методами, и последующем выстраивании диагностических параметров по достоверности и информативности. Выполнение работы усложнялось не только многозначностью и изменчивостью процессов развития ЧР, но, более того,— сложностью процесса развития

самых дефектов изоляции и их связью с диагностическими параметрами ЧР. Поэтому, на наш взгляд, использование отдельных сформированных дефектов в этом случае мало полезно и только при анализе результатов изучения характеристик ЧР большого количества ВИ каждого вида можно эффективно развивать комплексную систему диагностики.

При обследовании мы изучили два наиболее распространенных в энергосистемах типа ВИ — фарфоровые изоляторы ИОС 110/400 и полимерные ВИ ЛК 70/35. Всего было обследовано более 60 экземпляров, из которых более 40 находились в эксплуатации на подстанциях и ЛЭП. Остальные уже были выведены из работы вследствие дефектности. Однако подробный анализ полученных наборов характеристик ЧР от всех 60 ВИ показал ряд расхождений в их значениях, полученных с помощью различных физических датчиков. Причем наиболее информативными оказались характеристики, полученные с помощью электромагнитных и акустических датчиков [19]. Позднее наш вывод нашел подтверждение в международном стандарте 2016 года [8].

Также нами было установлено влияние осевших на диэлектрических стенках дефектов зарядов предыдущих ЧР в процессе эксплуатации ВИ. Этот эффект ранее был обнаружен только в модельных экспериментах и послужил основой для разработки плазменной модели ЧР [20]. Для объяснения особенностей и противоречий в полученных данных по параметрам ЧР нами также были привлечены основы теории плазмы в твердых телах и теории поверхностных газовых разрядов [21].

ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ДЕФЕКТАХ

В современном представлении для ВИ любых видов наиболее опасны дефекты в газовых полостях и неплотных контактах между диэлектриком и электродами. ЧР в них можно условно, в этом случае, отнести к двухсвязному плазменному процессу. Первоначально ЧР в ВИ возникают вследствие ионизации достаточно большого количества свободных электронов на катоде ВИ и последующего их распространения в канале разряда вдоль газового промежутка в стримерном режиме, причем наиболее важной их характеристикой является высокая скорость распространения ($V \sim 10^6$ м/с), на два порядка превышающая скорость дрейфа свободных электронов. Поэтому стример можно отнести к случаю распространения газовой плазмы. Процесс распространения для малых дефектов заканчивается на электрической границе дефекта с поглощением свободных электронов, положительных и отрицательных индуцированных ионов.

С увеличением интенсивности и количества ЧР возникает процесс накопления заряженных индуцированных частиц на диэлектрических поверхностях

(или одной) дефекта, что приводит к изменению суммарной напряженности поля E_g в области дефекта:

$$E_g = (E_i \pm E_a),$$

где E_i — поле индуцированных зарядов, противоположное по знаку приложенному полю E_a .

Вследствие малой электропроводности диэлектрика поле E_i частично сохраняется в интервале между последующими ЧР. После смены фазы приложенного напряжения при 180° поля E_i и E_a становятся одного знака, и интенсивность ЧР значительно возрастает. Их суммы могут достигать значений выше 5–7 нКл в интервале фазы 180° — 240° E_a . Для дефекта с одной диэлектрической поверхностью (контакт «стержень-оконцеватель») процесс излучения «сверхбольших» ЧР на этом фазовом интервале заканчивается, а для дефекта с двумя поверхностями при дальнейшем увеличении фазы E_a вблизи 360° возникает накопление зарядов ЧР и образование поля E_i противоположного знака (рис. 1).

Нами было установлено, что для обследованных образцов с относительно малыми дефектами ($1.5 \leq q \leq 2.5$ нКл) значения интенсивностей и количества ЧР, измеренные электромагнитным и акустическим датчиками, качественно соответствуют друг другу. Это обстоятельство вполне соответствует положению, что приведенные выше диагностические параметры, в данном случае, определяются физическими свойствами газового канала, в котором распространяются в стримерном режиме импульсы ЧР.

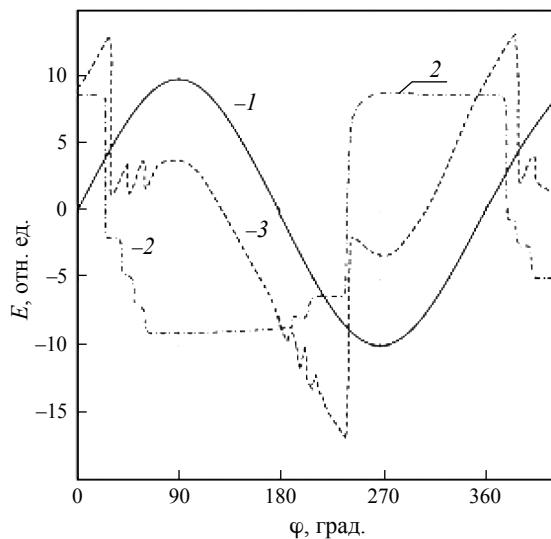


Рис. 1. Диаграмма распределения электрического поля в полости дефекта в зависимости от фазы приложенного поля E_a : 1 — приложение поля E_a в полости дефекта, 2 — поле индуцированных зарядов E_i на диэлектрических поверхностях полости, 3 — суммарное поле в полости $E_g = E_i \pm E_a$.

Также нами было установлено нелинейное возрастание интенсивности сигналов ЧР, детектируемых акустическим датчиком, с ростом дефектов по сравнению с электромагнитным датчиком. На нелинейный характер повышения интенсивности ранее указывалось в монографии В. А. Ушакова [1].

На основе собранных данных по амплитудно-фазовым характеристикам ЧР, полученным лазерно-акустическим методом [22], впервые была построена схема электрофизических процессов в реальных высоковольтных изоляторах для одного периода фазы высокого напряжения. Таким образом, можно полагать, что под действием осевших на диэлектрических поверхностях дефекта индуцированных зарядов возникает согласованное увеличение и соответствующее уменьшение различных ветвей в интенсивности ЧР от различных фаз приложенного напряжения, которые проявляются одинаково при измерениях электромагнитным и акустическим методами соответственно.

ПОВЕРХНОСТНЫЕ ЧАСТИЧНЫЕ РАЗРЯДЫ

При накоплении определенного количества индуцированных электронов на части диэлектрической поверхности, соприкасающейся со стримерным пучком в газовой полости дефекта, вследствие диффузии начинается их распространение вдоль диэлектрической поверхности в виде отдельных узких пучков [23]. Пучки взаимодействуют друг с другом посредством кулоновских сил, представляющих собой процесс плазмы твердого тела. В отличие от газовой плазмы в последней все зарядовые компоненты (ионы и дырки) совершают лишь малые колебания относительно положения равновесия, а в качестве подвижных носителей выступает лишь часть индуцированных электронов. Последние движутся в самосогласованном поле в условиях сильного взаимодействия с ионами кристаллической решетки, формирующими их энергетический спектр. Вследствие более высокой температуры, на поверхности полости возрастает и электропроводность, что в целом может приводить к повышенной скорости распространения электронного пучка, сопровождающегося поверхностными частичными разрядами. Такие разряды относятся к разновидности импульсного искрового разряда, который впервые наблюдался еще в 1777 году Лихтенбергом в виде фигур, запечатленных непосредственно на поверхности диэлектрика при сильных разрядах, получивших название «фигуры Лихтенберга». Научное объяснение они получили только в XX веке на основе теории плазмы твердого тела — совокупности заряженных частиц, участвующих в электронном переносе заряда.

Вследствие временных флюктуаций заряда возникают плазменные колебания, электронная частота которых определяется параметрами поверхностных ЧР, а не стримерным процессом, как для обычных

ЧР. Как уже отмечалось в работе [24], поверхностные ЧР представляют собой более сложные и более быстрые процессы (10^{12} В/с — скорость нарастания ЧР), отличающиеся от стримерных и таундсеновских процессов. Времена этих процессов практически совпадают с временами элементарных процессов в плазме [25]. Однако, невзирая на столь большую скорость, процесс образования поверхностных ЧР сохраняет диффузный характер, не переходя в дуговой разряд.

Следует отметить, что в использованном нами физическом плазменном процессе, ранее разработанном для искусственно созданных дефектов [26], уже использовалось понятие «плазменный процесс», а с другой стороны — еще с 1980-х годов для определения параметров ЧР применяли оптическое излучение в ультрафиолетовом (УФ) диапазоне с помощью УФ камер различного типа [27]. В современном представлении в этих приборах, по существу, регистрируется последний завершающий этап процесса разряда на дефекте в ВИ, начинающийся с ионизации подвижных носителей заряда на дефекте, продолжающийся через стримерное перемещение их в газовой полости дефекта, накопление на диэлектрической поверхности дефекта и диффузное распространение вдоль поверхности. На последнем этапе в процессе развития поверхностных ЧР их излучение становится многокомпонентным и многочастотным [28]: от относительно низкочастотных ленгмюровских и ионно-звуковых излучений до ультрафиолетовых и рентгеновских. Поскольку, в целом, излучение имеет нормальную и тангенциальную компоненты относительно поверхности диэлектрика, то это обстоятельство позволяет создавать высокие электрические поля, способствующие как генерации более многочисленных поверхностных ЧР, так и, наоборот, — растеканию зарядов после поверхностных ЧР.

ОСНОВНЫЕ ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ МОДЕЛИ ОБРАЗОВАНИЯ ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ

На основе анализа характеристик ЧР, измеренных стендовым и дистанционным методами одновременно электромагнитным и акустическим датчиками в диапазонах рабочих напряжений (30—40 и 110 кВ) полимерных и фарфоровых изоляторов, были уточнены схемы электрофизических процессов, отображающих текущее состояние ВИ. Согласно предложенной схеме, техническое состояние каждого ВИ, соответственно набору его параметров ЧР, можно отнести к одной из четырех групп. К первой и самой простой группе относятся ВИ как полимерные (ПВИ), так и фарфоровые (ФВИ), в которых электрофизические процессы ЧР ограничиваются распространением подвижных носителей заряда: положительных и отрицательных ионов и электронов,

распространяющихся в стримерном режиме в пределах плоскости дефекта [29].

В соответствии с международными и отечественными стандартами [6—10] к основным характеристикам ЧР относятся: кажущийся заряд (q_k); количество ЧР за определенный временной интервал (N), учитывающий стохастичность разрядных процессов; распределенные количества и интенсивность ЧР по фазам генерации ЧР, согласованным с фазой приложенного напряжения ($q(\phi)$, $N(\phi)$).

Главной особенностью изоляторов первой группы (ПВИ) является их идентичное изменение или сопоставление указанных выше параметров, измеренных электромагнитным и акустическим датчиками. Примеры измеренных для одного из представителей ПВИ и ФВИ этой группы диагностических параметров приведены на рис. 2 и 3 соответственно. Диапазон значений интенсивности на рис. 2 ограничен для всех ПВИ и ФВИ значениями $q \leq 1.5\text{--}1.8$ нКл. В этих пределах образцы ПВИ и ФВИ считаются полностью работоспособными, вплоть до следующего планового освидетельствования. На рис. 3 показаны характеристики для дефектного фарфорового изолятора.

Разработанный комплексный метод и устройство вначале были освидетельствованы в стендовом варианте на кафедре промышленной электроники КГЭУ на серии снятых с эксплуатации работоспособных, а также имевших различную степень дефектности полимерных изоляторов типа ЛК 70/35. Ряд ПВИ содержал различные макроразмерные дефекты: сквозные пробои защитной оболочки, разрядные треки вдоль стержней, между стержнем и оконцевателем, что свидетельствовало о наличии серьезных дефектов и невозможности их дальнейшей эксплуатации.

Набор характеристик ЧР, измеренных электромагнитным и акустическим датчиками, показал полное совпадение для измерений обоими методами максимальных фазовых интервалов генерации ЧР и хорошую сопоставимость в значениях интенсивности и количества ЧР, что позволило одинаково оценивать рабочее состояние при освидетельствовании всех ПВИ и отнести их к первой группе.

Ко второй группе отнесены более дефектные ФВИ — образцы с интенсивностью ЧР, не превышающей 3.0 нКл. В этой группе уже более явно начинают проявляться различия в параметрах интенсивности и количества ЧР, измеренных электромагнитным и акустическим датчиками, а также увеличение параметров интенсивности и количества для отрицательных полупериодов приложенного напряжения. При увеличении размеров и интенсивности дефектов возрастает влияние индуцированных полей E_i , наведенных предыдущими ЧР, на диэлектрические поверхности. Причем для определенного предела дефектности структуры характеристик ЧР для обоих видов измерений (акустических и электромагнитных) в целом близки по своим параметрам (рис. 4).

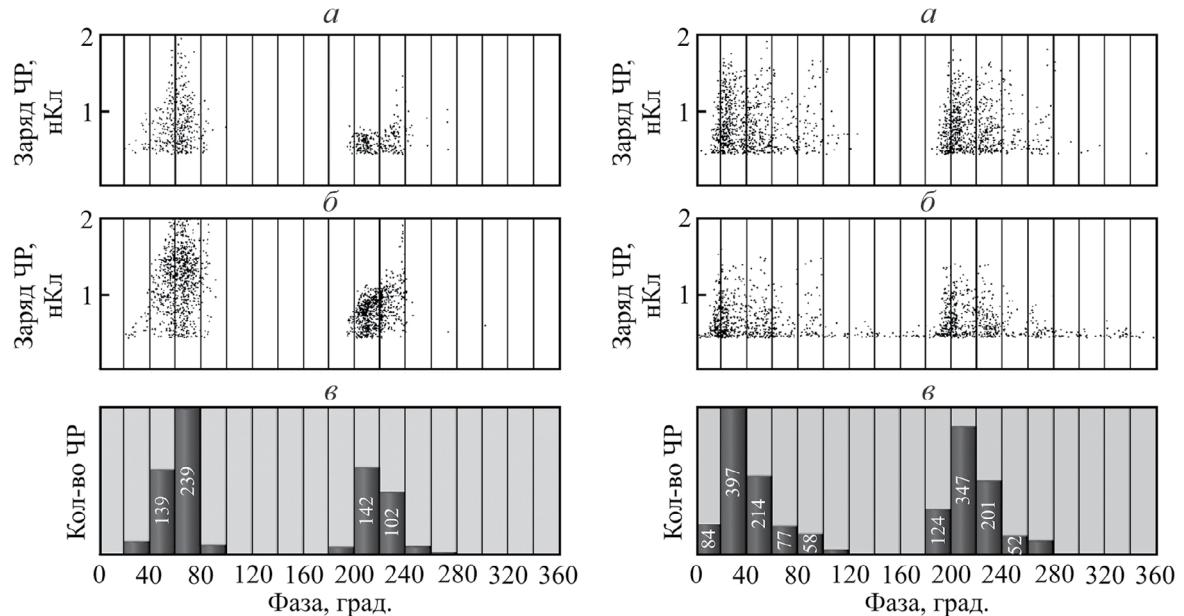


Рис. 2. Амплитудно-фазовые характеристики ЧР, детектированные электромагнитным (а) и акустическим (б) датчиками, и фазовое распределение количества ЧР (б), детектированных электромагнитным датчиком, для бездефектного работоспособного полимерного изолятора (слева), а также для бездефектного фарфорового изолятора (справа).

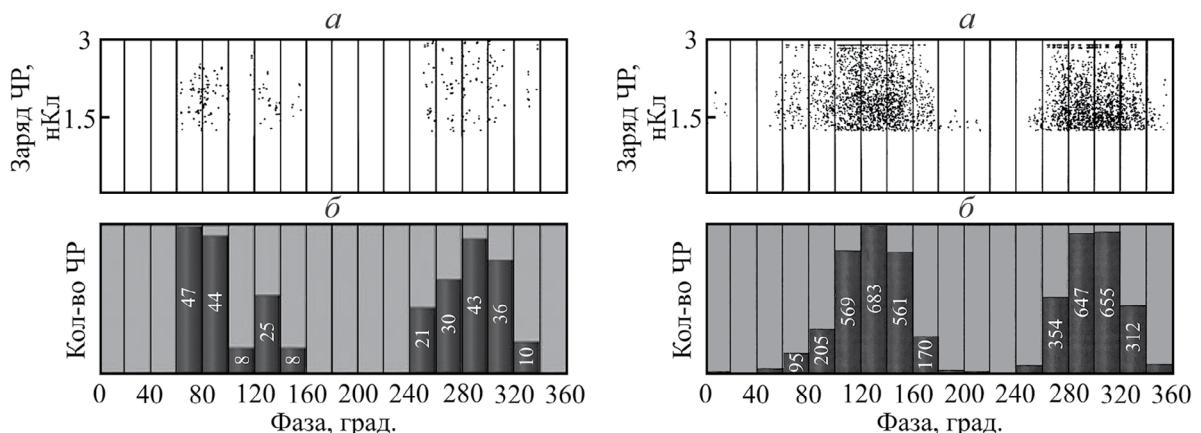


Рис. 3. Амплитудно-фазовые характеристики ЧР (а) и фазовое распределение количества ЧР (б), детектированные электромагнитным (слева) и акустическим (справа) датчиками для дефектного фарфорового изолятора.

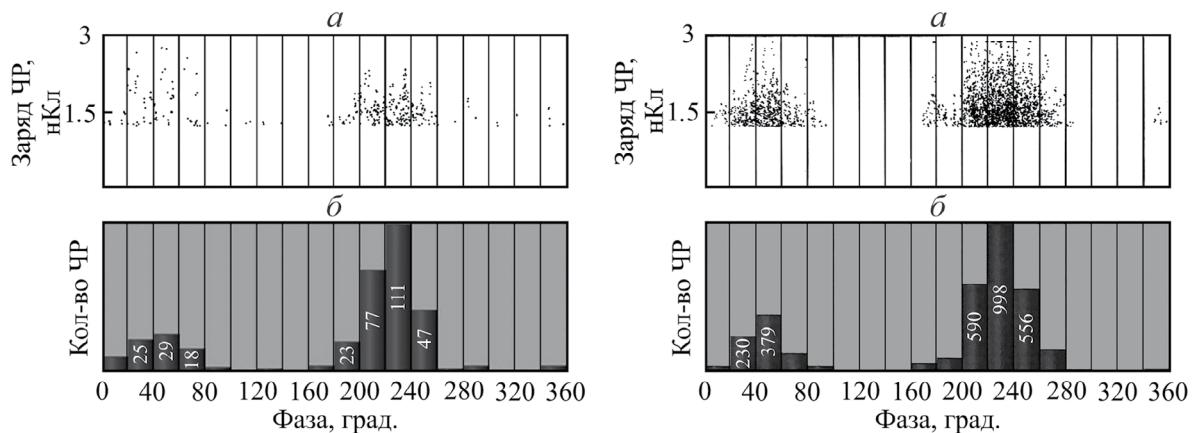


Рис. 4. Амплитудно-фазовые характеристики ЧР (а) и фазовое распределение количества ЧР (б), детектированные электромагнитным (слева) и акустическим (справа) датчиками, для полимерного изолятора, близкого по состоянию к дефектному.

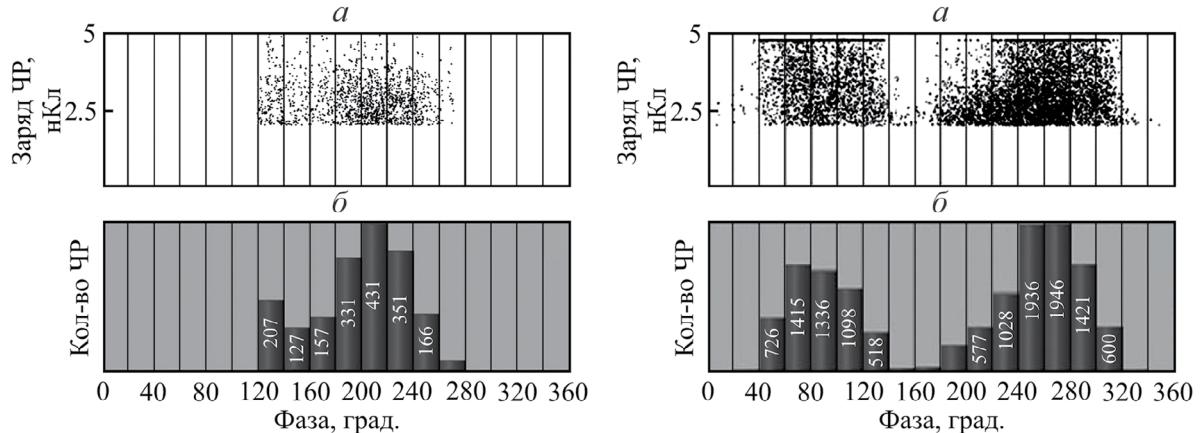


Рис. 5. Амплитудно-фазовые характеристики ЧР (a) и фазовое распределение количества ЧР (б), детектированные электромагнитным (слева) и акустическим (справа) датчиками для дефектного фарфорового изолятора.

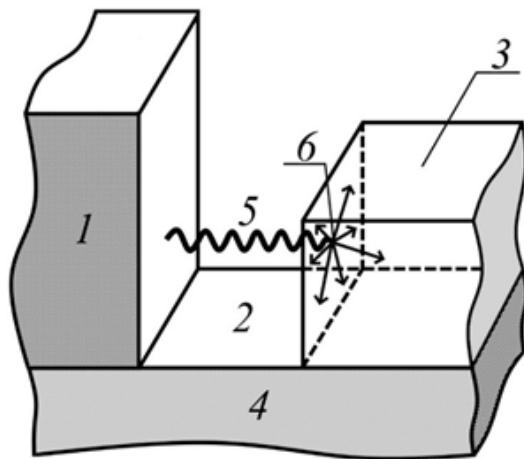


Рис. 6. Конфигурация дефекта между фланцем и оболочкой ВИ: 1 — металлический фланец, 2 — полость дефекта, 3 — защитная диэлектрическая оболочка, 4 — стеклопластиковый стержень, 5 — стример, 6 — распространение ЧР по диэлектрической поверхности дефекта.

Третья группа образцов ФВИ начинается с еще более дефектных экземпляров, реальные параметры характеристик ЧР которых, можно оценивать только при одновременном освидетельствовании их обоими методами. При таком подходе значительное уменьшение количества и интенсивности ЧР, измеренное электромагнитным датчиком (рис. 5), вызвано влиянием поля осевших зарядов от предыдущих ЧР на диэлектрических поверхностях (или одной) дефекта, а резкое увеличение тех же параметров, измеренное акустическим датчиком, — началом распространения потока индуцированных электронов вдоль диэлектрической поверхности (рис. 6). Как отмечалось выше [28], в таком процессе вдоль поверхности дефекта возникает распространение весьма интенсивных акустических импульсов. Их интенсивность и концентрация определяются скоростью распространения вдоль поверхности и прерываются, как указывается в работе [14], возникновением генерации последующего процесса разряда в виде УФ компоненты. Такие образцы мы отнесли к четвертой группе (рис. 7).

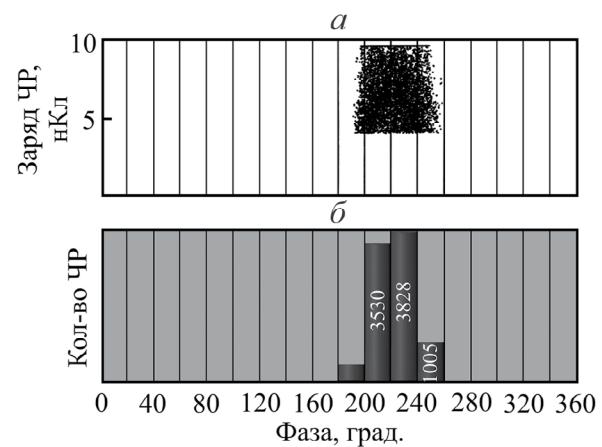
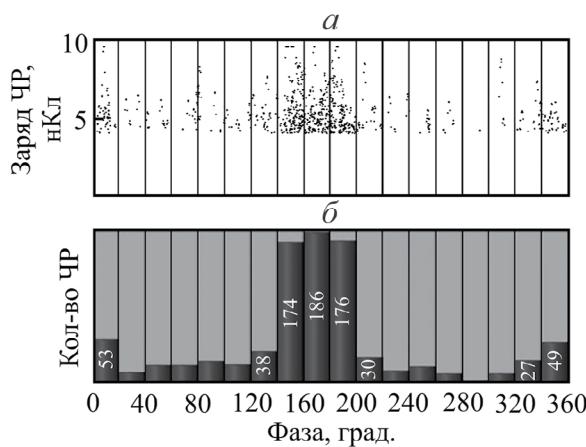


Рис. 7. Амплитудно-фазовые характеристики ЧР (а) и фазовое распределение количества ЧР (б), детектированные электромагнитным (слева) и акустическим (справа) датчиками для дефектного фарфорового изолятора.

Представленные в ней измерения характеристик ЧР, выполненные обоими методами, указывают на наличие дефекта с одной диэлектрической поверхностью и дополнительным снижением интенсивности и количества ЧР, измеренных электромагнитным датчиком. Одновременно измерения, выполненные акустическим методом, наоборот указывают на сужение фазового интервала генерации ультразвуковых импульсов и повышение их интенсивности и количества.

Итак, на основе обсужденных наборов характеристик ЧР образцов ПВИ и ФВИ, распределенных нами в четыре группы по степеням дефектности, было установлено, что все образцы можно отнести к разряду условно работоспособных в условиях приложения нормального рабочего напряжения.

В электрических сетях с рабочим напряжением до 35 кВ, как показывают полученные характеристики ЧР, вполне достаточно для диагностики применения одного из трех наиболее распространенных методов (электромагнитного, оптического (ультрафиолетовая инспекция) или акустического).

Однако для высоковольтных сетей с напряжением 110 кВ и выше, то есть для ФВИ, расположенных в группах три и четыре, имеющих интенсивности ЧР больше 3.4 нКл и, особенно, получивших в процессе эксплуатации поверхностные ЧР со значениями кажущихся зарядов порядка 10 нКл и выше с различным фазовым распределением, необходимо, на наш взгляд, проведение освидетельствования ФВИ одновременно электромагнитным и акустическим датчиками. Использование именно этих двух методов обосновано двумя обстоятельствами. Во-первых, при разработке начального варианта комплексного дистанционного диагностического метода (2008–2010 годы) нами было установлено, что эти методы (электромагнитный и акустический) обладают наибольшей чувствительностью по обнаружению и измерению набора диагностических параметров. Во-вторых, позднее (уже в 2016 году) был издан новый международный стандарт [8], также рекомендующий одновременное использование при обследовании разнообразных высоковольтных изоляционных элементов электромагнитного и акустического датчиков. Однако, на наш взгляд, наиболее важным результатом наших экспериментов по разработке комплексного метода дистанционной диагностики высоковольтных изоляторов в процессе эксплуатации стало обнаружение развития поверхностных ЧР при накоплении осевших зарядов на диэлектрических поверхностях дефекта и их влияния на процессы ускоренного старения изоляторов. При предположении [29] можно сказать, что завершающей стадией поверхностного ЧР является процесс генерации поверхностных плазмонов в широком частотном спектре вплоть до ультрафиолета и мягкого рентгена, но с меньшей энергией. Это обстоятельство подтверждает полученные нами результаты [30], что режим незавершенного поверхностного

ЧР позволяет генерировать наибольшую плотность акустических колебаний даже по сравнению с ультрафиолетовой инспекцией.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, были рассмотрены характеристики высоковольтных полимерных и фарфоровых изоляторов, измеренные в процессе их эксплуатации комплексным методом с одновременным использованием электромагнитных и акустических методов. На основе выполненных обследований на ряде подстанций ОАО «Сетевая компания» установлено, что в сетях до 35 кВ в обоих видах изоляторов (полимерных ЛК 70/35 и фарфоровых ИОС 110/400) оба датчика показали сходные по диагностическим параметрам наборы характеристик ЧР. Причем в этом наборе при рабочих напряжениях электромагнитный датчик обладает значительно большей чувствительностью, что позволило определить пороговую интенсивность ЧР. Однако при увеличении напряжения до 110 кВ и обследовании фарфоровых изоляторов параметры ЧР резко изменяются, что на наш взгляд связано с возникновением поверхностных ЧР при таких напряжениях на боковых диэлектрических поверхностях дефекта. Для этого случая интенсивность ЧР и их количество могут более точно изменяться только акустическим датчиком. Показано, что наиболее опасные дефекты можно более точно определять при одновременном измерении параметров ЧР двумя методами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ушаков В.Я. Изоляция установок высокого напряжения. М.: Энергоатомиздат, 1994. 496 с.
2. Кучинский Г.С. Частичные разряды в высоковольтных конструкциях. М.-Л.: Энергия, 1979. 270 с.
3. Kreuger F.H. Partial discharge detection in high voltage equipment. London, Boston: Butterworths, 1989. 193 p.
4. Вдовико В.П. Частичные разряды в диагностировании высоковольтного оборудования. Новосибирск: Наука, 2008. 156 с.
5. Русов В.А. Измерение частичных разрядов в изоляции высоковольтного оборудования. Екатеринбург: Изд-во УрГУПС, 2011. 368 с.
6. ГОСТ 27.002-2015. Надежность в технике (ССНТ). Термины и определения (с поправкой). Официальное издание. М.: Стандартинформ, 2016.
7. ГОСТ 20074-83 (СТ СЭВ 20074-83). Электрооборудование и электроустановки. Метод измерения характеристик и частичных разрядов. М.: Издательство стандартов, 1983.
8. IEC TS62478:2016 High voltage test techniques — Measurement of partial discharges by electromagnetic and acoustic methods. Technical Specification. 2016.

9. Knowledge rules for partial discharge diagnosis in service: CIGRE TF 15.11/33.03.02. Technical Brochure CIGRE; 226. Paris, 2003.
10. Түржин А.В. // Электроэнергия. Передача и распределение. 2017. № 3(42). С. 120.
11. СТО 34.01-1.3-018-2020 Изоляторы полимерные подвесные и опорные на напряжение 6—750 кВ. Стандарт организации ПАО “Россети”, 2020. 77 с.
12. Heitz Ch. // J. Phys. D. Appl. Phys. 1999. V. 32. P. 1012.
13. Захаров А.А., Голенищев-Кутузов А.В., Федоров Г.С. // Изв. вузов. Пробл. энергетики. 2005. № 11—12. С. 93.
14. Овсянников А.Г. Частичные разряды и диагностирование оборудования высокого напряжения. Новосибирск: Изд. НГТУ, 2023. 256 с.
15. Аввакумов М.В., Голенищев-Кутузов А.В. // Изв. вузов. Пробл. энергетики. 2003. № 5—6. С. 130.
16. Голенищев-Кутузов А.В., Иванов Д.А., Калимуллин Р.И., Семенников А.В. // Изв. РАН. Сер. физ. 2020. Т. 84. № 12. С. 1763; Golenishchev-Kutuzov A.V., Ivanov D.A., Kalimullin R.I., Semennikov A.V. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2020. V. 84. No. 12. P. 1502.
17. Голенищев-Кутузов В.А., Голенищев-Кутузов А.В., Семенников А.В. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2022. Т. 86. № 11. С. 1660; Golenishchev-Kutuzov V.A., Golenishchev-Kutuzov A.V., Semennikov A.V. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2022. V. 86. No. 11. P. 1376.
18. Иванов Д.А., Садыков М.Ф., Ярославский Д.А. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2021. Т. 85. № 11. С. 1596; Ivanov D.A., Sadykov M.F., Yaroslavsky D.A. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2021. V. 85. No. 11. P. 1258.
19. Голенищев-Кутузов А.В., Голенищев-Кутузов В.А., Иванов Д.А. и др. // Изв. вузов. Пробл. энергетики. 2016. № 5—6. С. 87.
20. Callender G., Golosnoy I., Rapisarda P., Lewin P. // J. Phys. D. Appl. Phys. 2018. V. 51. No. 12. Art. No. 125601.
21. Месяц Г.А. // УФН. 2006. Т. 176. № 10. С. 1069; Mesiac G.A. // Phys. Usp. 2006. V. 49. No. 10. P. 1045.
22. Голенищев-Кутузов А.В., Голенищев-Кутузов В.А., Иванов Д.А., Марданов Г.Д. // Изв. вузов. Пробл. энергетики. 2018. Т. 20. № 3—4. С. 99.
23. Коробейников С.М., Овсянников А.Г. Физические механизмы частичных разрядов. Новосибирск: Изд. НГТУ, 2022. 266 с.
24. Rodríguez-Serna J.M., Albarracín-Sánchez R. // Polymers. 2021. V. 13. Art. No. 324.
25. Borghei M., Ghassemi M., Rodríguez-Serna J.M., Albarracín-Sánchez R. // IEEE Trans. Power Deliv. 2021. V. 36. No. 4. P. 2570.
26. Sekii Y. // IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. 2010. V. 17. No. 1. P. 116.
27. Ильина Е.В., Растегняев Д.Ю. // Энергоэксперт. 2014. № 4. С. 70.
28. Pan C., Wu K., Chen G. et al. // IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. 2020. V. 27. No. 6. P. 1951.
29. Голенищев-Кутузов В.А., Абдуллаязнов Э.Ю., Голенищев-Кутузов А.В. и др. // В кн.: Новые технологии, материалы и оборудование в энергетике. Т. III. Качество энергоснабжения, энергоэффективность и экология. Казань: КГЭУ, 2018. С. 44.
30. Голенищев-Кутузов В.А., Голенищев-Кутузов А.В., Семенников А.В. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2023. Т. 87. № 12. С. 1823; Golenishchev-Kutuzov V.A., Golenishchev-Kutuzov A.V., Semennikov A.V. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2023. V. 87. No. 12. P. 1894.

Complex remote diagnostics of defects in the insulation of high-voltage equipment

V. A. Golenishchev-Kutuzov¹, A. V. Golenishchev-Kutuzov¹, A. V. Semennikov^{1,*},
R. I. Kalimullin¹, D. A. Ivanov¹

¹Kazan State Power Engineering University, Kazan, 420066 Russia
*e-mail: campoce6e@gmail.com

A methodology and a system for complex remote diagnostics of insulation elements of high-voltage equipment of substations and power transmission lines, including support, suspended and through-pass insulators, have been developed. The developed system is based on the principle of simultaneous measurement and subsequent analysis of a set of characteristics of partial discharges by high-frequency (400—800 MHz) and acoustic (30 kHz) sensors. Using this system, more than 50 specimens of polymer (LC70/35) and porcelain (IOS110/400) insulators were examined during their operating mode. As a result, the amplitude-phase diagrams of partial discharge parameters were obtained, which can be used to determine the type and degree of influence of the defect on the insulation object. The features of defects for 35 and 110 kV electrical networks have been studied.