

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ В ОПОРНЫХ ИЗОЛЯТОРАХ

Диагностика воздушных линий электропередачи является важной проблемой современной электроэнергетики. Иногда опорные изоляторы разрушаются под воздействием внешних факторов. Трещины в изоляторах могут вызвать разрушение изолятора, что увеличивает электрический травматизм персонала. Следовательно, в статье исследуется диагностика изоляторов методом частичных разрядов как инструмента защиты персонала. Было смоделировано электрическое поле нормальных и дефектных изоляторов. Были проведены эксперименты по измерению частичных разрядов (ЧР) в тех же изоляторах. Результаты моделирования электрического поля показали высокую напряженность электрического поля в фарфоровом изоляторе с разрезом и в эпоксидном изоляторе с трещиной. В этих случаях напряженность электрического поля в воздушном зазоре оказалась выше электрической прочности воздуха. В остальных случаях напряженность электрического поля не превышала электрической прочности материала. Экспериментальные исследования показали наибольшую интенсивность частичных разрядов в случаях высокой напряженности электрического поля, полученной при моделировании. Однако остальные изоляторы с дефектом также показали наличие частичных разрядов. Единственным случаем отсутствия частичных разрядов является фарфоровый изолятор без дефекта. Анализ экспериментальных данных показал, что диагностика частичных разрядов может быть эффективной для изоляторов только в случае использования напряжения выше рабочего. В экспериментах только напряжения 16 кВ и выше позволили надежно обнаружить наличие дефекта. Следовательно, этот метод не может быть рекомендован для диагностики опорных изоляторов до использования разъединителя персоналом, что могло снизить электротравматизм персонала. Кроме того, мониторинг частичных разрядов также не будет эффективен для исследуемых типов дефектов.

**Ключевые слова:** частичные разряды, опорные изоляторы, воздушные линии электропередач, диагностика, испытания изоляторов.

**Введение.** Системы электроснабжения в России содержат большое количество воздушных линий электропередачи, которые используются в качестве основного инструмента передачи электроэнергии. Следовательно, надежность их работы напрямую влияет на статическую и динамическую устойчивость энергосистемы. Кроме того, персонал часто подключает и отключает объекты электропитания от воздушных линий из-за потребностей технологического процесса. Для людей может быть опасно, если опорный изолятор установлен в разъединителе или рядом с ним. Если изолятор поврежден (например, у него есть трещина), он может быть разрушен вибрацией, вызванной движением ножей разъединителя. Известны случаи получения пер-

соналом электротравм, вызванных разрушением опорных изоляторов. Однако трещину в изоляторе часто невозможно обнаружить визуально из-за большого расстояния между изолятором и точкой наблюдения персонала. Поэтому опорные изоляторы необходимо испытывать непосредственно перед проведением переключений разъединителя.

Обычно изоляторы проверяются на ток утечки. Однако этот параметр зависит от его геометрических размеров и загрязнения поверхности. Значительное загрязнение изоляторов может существенно снизить поверхностное сопротивление и увеличить ток утечки и напряженность тангенциальной составляющей напряженности электрического поля, что часто вызывает их пробой. Методы контроля

их напряжений основаны на методах коронного кольца, комбинированной сборки изоляторов, оптимизированной конструкции концевых фитингов или материалах для полевых испытаний [1]. Пробой обычно происходит в загрязненном изоляторе. Таким образом, условия пробоя изоляторов исследуются [2, 3] для улучшения конструкции изоляторов и прогнозирования пробоя на основе формы и величины тока утечки. Высоковольтные линии электропередачи постоянного тока также становятся все более распрощенными. Поэтому изучаются характеристики перекрытия и частичных разрядов в изоляторах при постоянных напряжениях [4].

Измерение и анализ частичных разрядов (ЧР) является перспективным методом диагностики электроизоляции для любого вида электрооборудования [5–7]. Однако его эффективность для диагностики воздушных линий электропередачи и изоляторов разьединителей все еще требует исследований. Частичные разряды обычно происходят в неоднородностях электрического поля. Внутри изоляторов они могут появиться в трещинах или в явлении электрического триинга и внутреннем структурном повреждении. Изоляторы разных типов были исследованы в [8] для оценки характеристик частичных разрядов в воздухе, жидких и твердых изоляционных материалах.

Поверхностные частичные разряды также могут существенно влиять на характеристики пробоя изоляторов. Исследования, описанные в [9], показали наличие триинговых процессов на поверхности композитного изолятора, которые зависят от давления воздуха. Электрические дендриты на поверхности изолятора могут значительно снизить его электрическую прочность и вызвать пробой. Другое исследование [10] показало, что колеблющиеся капли воды значительно влияют на напряжение возникновения частичных разрядов. Тем не менее авторы исследования не показали данные о напряжении возникновения ЧР в случае отсутствия капель, что помогло бы лучше понять физику возникновения ЧР на поверхности изолятора. Другие исследования были посвящены проблемам поверхностных ЧР и их влиянию на изоляторы [11, 12]. Кроме того, исследуются бесконтактные способы измерения частичных разрядов [13–15].

**Постановка задачи.** Учитывая необходимость диагностики опорных изоляторов, необходимо скорректировать методику испытаний. Многие авторские коллективы проводят исследования в об-

ласти диагностики изоляторов методом частичных разрядов. Однако известные результаты исследований пока не позволяют сделать вывод о применимости этого метода. Таким образом, целью данной статьи является исследование характеристик частичных разрядов в опорных изоляторах воздушных линий. Этого можно достичь путем решения следующих задач:

— моделирование электрического поля в корпусе изолятора с дефектом и без дефекта для оценки напряженности электрического поля;

— создание искусственных дефектов в изоляторах различных типов (фарфор, полимер, эпоксидный компаунд);

— экспериментальное исследование характеристик частичных разрядов в различных типах изоляторов (с дефектами и без них) на различных уровнях напряжения.

**Моделирование электрического поля.** Возникновение частичных разрядов в изоляции обычно вызвано неоднородностями электрического поля, которые могут возникать при различных типах дефектов. Кроме того, частичные разряды происходят на поверхности изолятора, если он загрязнен. Учитывая проблему электротравматизма персонала, перекрытие изолятора, вызванное его загрязнением, не рассматривалось. В данной работе были исследованы естественные и искусственно созданные дефекты изоляторов для анализа особенностей их электрического поля и характеристик частичных разрядов. Естественные дефекты представляют собой трещины сложной формы, которые являются сложными для моделирования электрического поля. Предполагая, что сложные трещины изоляторов можно заменить простой формой (круглая трещина, диаметральный разрез) без существенных изменений в электрическом поле, были созданы искусственные круглые дефекты и смоделировано их электрическое поле. Кроме того, один из протестированных изоляторов имеет конструкцию, в которой возможно повреждение в виде острого электрода из-за дефекта формы болта или его перетяжки.

Рабочее напряжение образцов изолятора составляет 10 кВ. Диапазон напряжений исследования составлял от 6 до 20 кВ для лучшего понимания характеристик ЧР в диапазоне рабочих напряжений. Электрическое поле было исследовано на фарфоровых, эпоксидных и полимерных изоляторах с дефектами и без них. Исследование проводилось при нескольких напряжениях указанного диапазона.

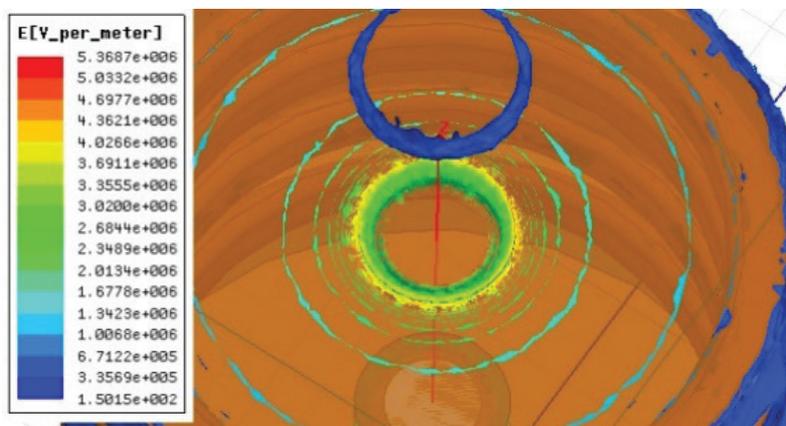


Рис. 1. Результаты моделирования поля эпоксидного составного изолятора внутри трещины

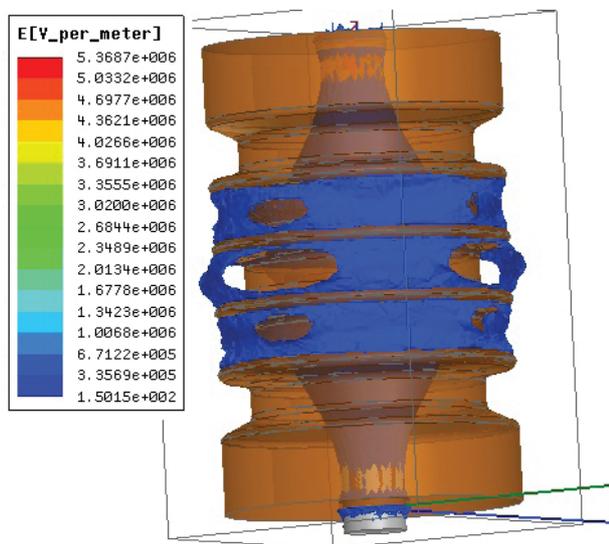


Рис. 2. Результаты моделирования  
эпоксидных составных полей

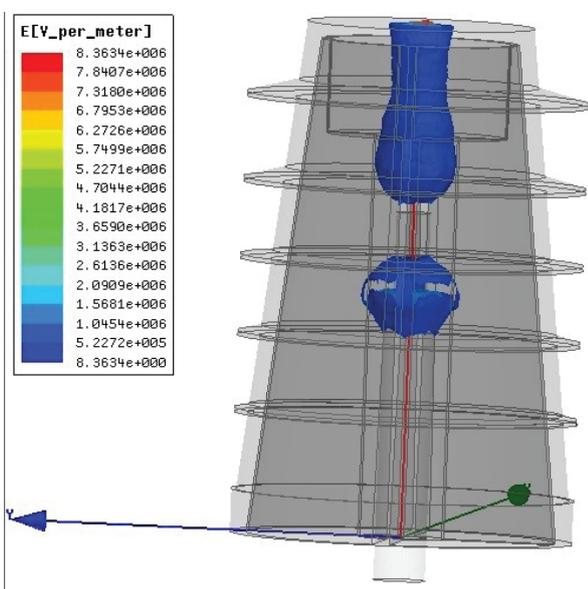


Рис. 3. Результаты моделирования поля  
полимерного изолятора

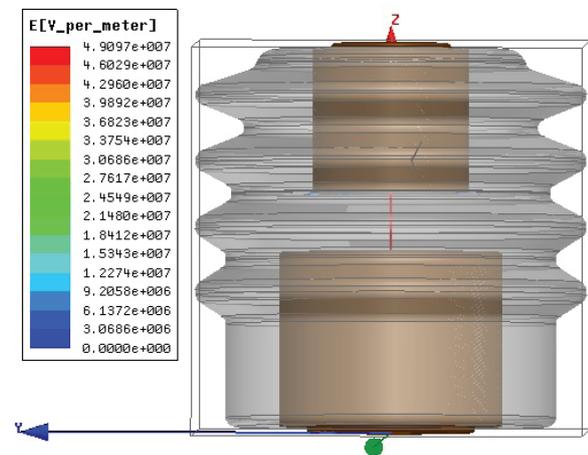


Рис. 4. Результаты моделирования  
поля фарфорового изолятора

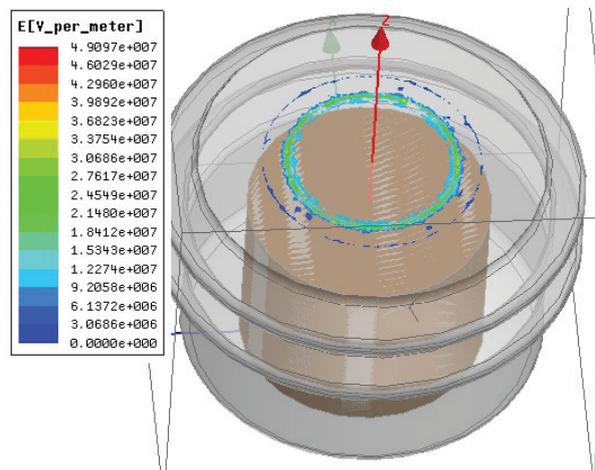


Рис. 5. Результаты моделирования поля  
фарфорового изолятора внутри трещины



Рис. 6. Испытанный эпоксидный составной изолятор

Однако не все результаты моделирования электрического поля могут быть и должны быть представлены в этой статье. Наиболее информативные результаты получены при 28 кВ (максимальная амплитуда напряжения питания). Результаты моделирования электрического поля показаны на рис. 1 – 5.

#### Экспериментальные данные и их анализ.

**Предварительная обработка.** Перед экспериментальными исследованиями были подготовлены образцы изолятора:

- фарфоровый изолятор без дефектов;
- фарфоровый изолятор с искусственным диаметральной распилем для имитации трещины;
- полимерный изолятор без дефектов;
- полимерный изолятор с диаметральной распилем, перпендикулярным боковой поверхности изоляторов;
- полимерный изолятор с диаметральной распилем с углом  $45^\circ$  к боковой поверхности изоляторов (диагональный разрез);
- полимерный изолятор с имитацией острого высоковольтного электрода;
- эпоксидный композитный изолятор с трещиной, возникшей в реальных условиях эксплуатации (рис. 6).

В качестве источника напряжения использовался прибор для испытания диэлектриков, способный генерировать переменные напряжения до 50 кВ. Диапазон экспериментальных напряжений от 6 до 20 кВ. Перед экспериментом установка была испытана без изолятора для наблюдения за наличием разрядов в воздухе. Они не наблюдались в экспериментальном диапазоне напряжений. Следует отметить, что повышение напряжения выше 20 кВ вы-

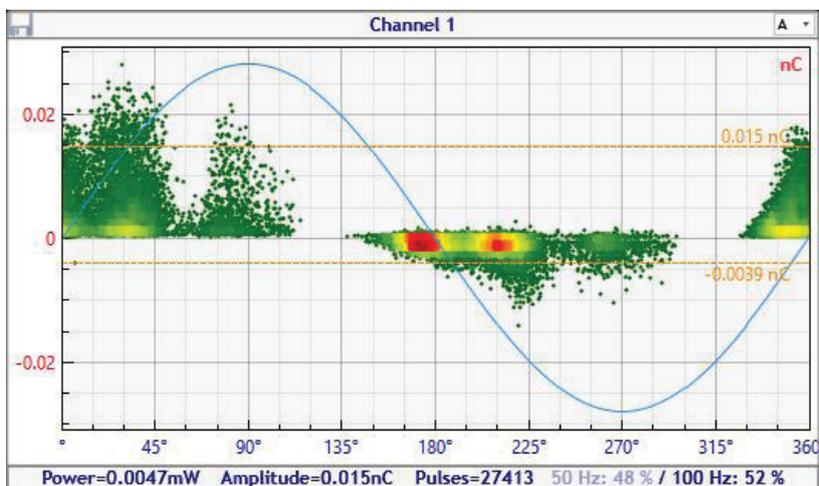


Рис. 7. Результаты испытаний полимерного изолятора с дефектом игольчатого высоковольтного электрода при 20 кВ

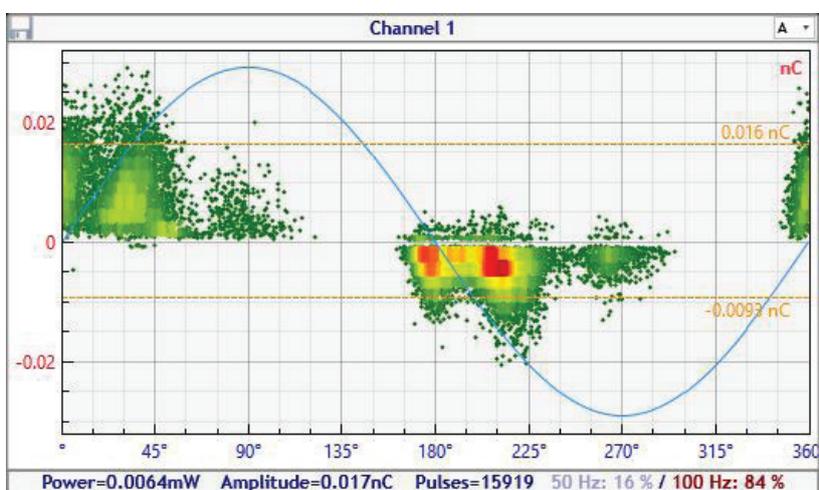


Рис. 8. Результаты испытаний эпоксидного изолятора с трещиной при 20 кВ

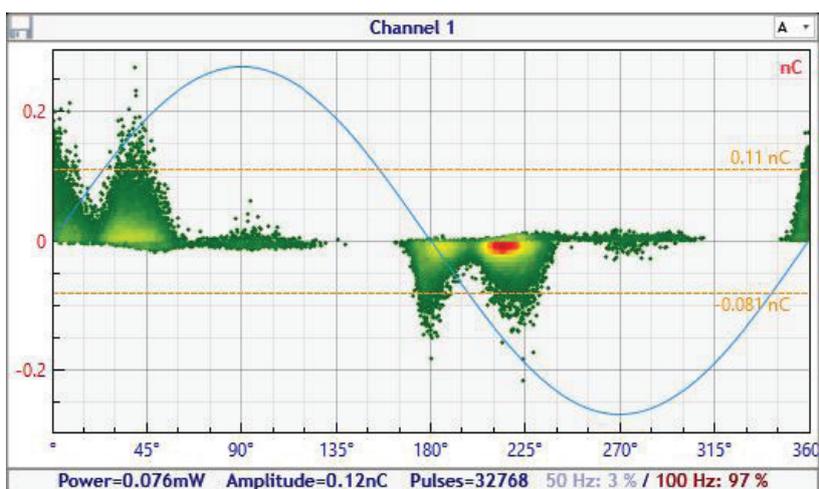


Рис. 9. Результаты испытаний фарфорового изолятора с искусственной трещиной при 20 кВ

звало возникновение высокоинтенсивных разрядов в воздухе, что может повлиять на точность и достоверность измерений.

В экспериментах установка изоляторов позволила избежать возможности возникновения воздушных разрядов между высоковольтным электродом

и окружающими объектами. Электроды высокого напряжения и заземления были подключены в тех же точках, что и во время работы изоляторов.

Регистрация частичных разрядов проводилась с использованием устройства Dim-Loc производства DIMRUS (Россия). Dim-Loc имеет несколько датчи-

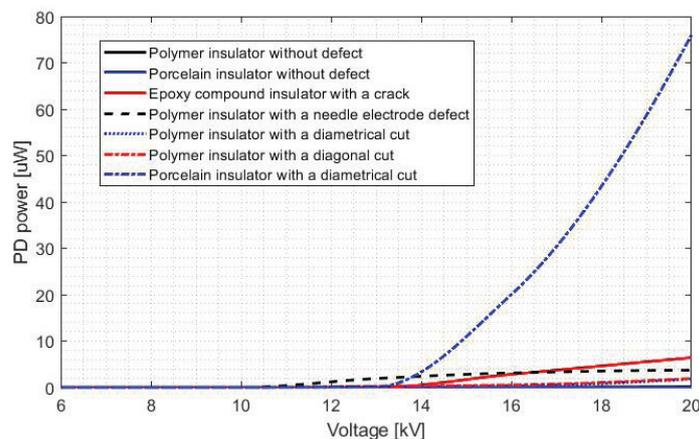


Рис. 10. Экспериментальная зависимость мощности ЧР от напряжения

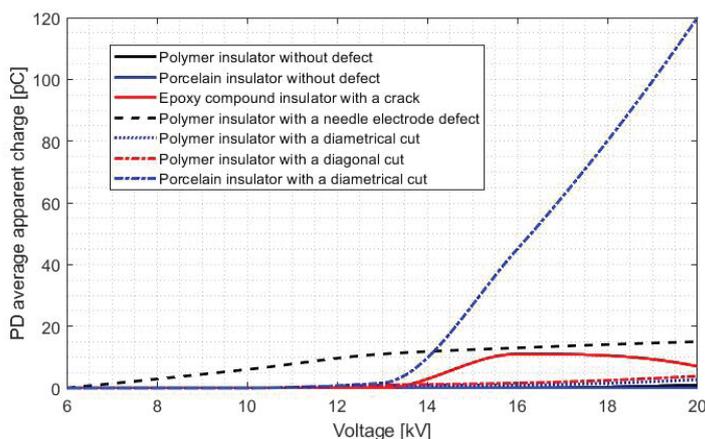


Рис. 11. Экспериментальная зависимость среднего видимого ЧР от напряжения

ков для обнаружения и локализации частичных разрядов. В этом эксперименте используется датчик ЧР трансформаторного типа HFCT — высокочастотный трансформатор тока.

**Экспериментальные исследования.** В ходе экспериментальных исследований был выполнен ряд измерений. Однако нет необходимости и возможности показать все результаты в этой статье. Наиболее характерные амплитудно-фазовые распределения частичных разрядов, полученных при 20 кВ, показаны на рис. 7–9.

После измерений все результаты были обработаны для анализа. Полученные зависимости мощности и среднего кажущегося заряда ЧР представлены на рис. 10–11.

**Обсуждение результатов.** В большинстве случаев результаты моделирования электрического поля изоляторов не показали превышения напряженности электрического поля выше электрической прочности материала. Максимальная напряженность электрического поля внутри изолятора находилась в области дефекта заостренного высоковольтного электрода полимерного изолятора. Это ожидаемый результат, поскольку заостренный электрод вызывает высокую напряженность электрического поля, а полимерный изолятор имеет наименьшую диэлектрическую проницаемость из всех испытанных образцов изолятора. Однако полученная напряженность электрического поля все еще недостаточно высока для пробоя диэлектрика. С учетом электрической прочности полимеров (45–60 кВ/мм) все об-

разцы изоляторов имеют большой запас электрической прочности.

Диаметральный разрез фарфорового изолятора был выполнен в области края высоковольтного электрода. Следовательно, острый край этого электрода находился в разрезе. Это существенно повлияло на напряженность электрического поля в воздушном зазоре между двумя частями изолятора. Согласно результатам моделирования электрического поля в воздухе составляла 49 кВ/мм, что намного выше электрической прочности воздуха (3 кВ/мм). Вероятно, частичные разряды возникали именно в этой области. Следует отметить, что эпоксидный компаундный изолятор имел аналогичную форму дефекта. Однако его высоковольтный электрод не имел острых краев. Как следствие, напряженность электрического поля составляла 5 кВ/мм, но она все же выше электрической прочности воздуха.

Характеристики частичных разрядов, полученные в экспериментах, показали сходную картину амплитудно-фазового распределения частичных разрядов. Более значительная интенсивность ЧР в области  $0^\circ$ – $90^\circ$  синусоиды питающего напряжения обычно означает наличие дефекта в области высоковольтного электрода. Однако в области  $180^\circ$ – $270^\circ$  содержится множество разрядов низкой интенсивности. Эпоксидный компаундный изолятор имел трещину в области высоковольтного электрода (рис. 6), но полученная диаграмма не показывает

такой большой разницы между интенсивностью частичных разрядов в положительной и отрицательной полуволнах напряжения питания. Фарфоровый изолятор имел искусственный диаметральный разрез, который также находился в области высоковольтного электрода. Картина ЧР с амплитудно-фазовым распределением ЧР для этого изолятора (рис. 9) показала незначительное превышение интенсивности ЧР в первой положительной четверти волны, что неожиданно для такого типа дефекта.

Результаты зависимости мощности ЧР и среднего кажущегося заряда от напряжения показывают, что в области рабочего напряжения частичные разряды часто не регистрировались. Более того, фарфоровый изолятор без дефекта не показал каких-либо частичных разрядов при 20 кВ. Частичные разряды в полимерном изоляторе без дефекта также не были значительными до 20 кВ. Остальные образцы изолятора содержали дефекты, и во всех этих образцах были зарегистрированы частичные разряды при 13 кВ и выше. Однако дефект диаметрального разреза полимерного изолятора вызвал частичные разряды небольшой интенсивности, и их невозможно надежно зарегистрировать при 13 кВ. Уровень напряжения 16 кВ вызвал достаточно высокую интенсивность частичных разрядов во всех типах дефектов для их обнаружения. Наиболее значительная интенсивность частичных разрядов зарегистрирована в фарфоровом изоляторе с диаметральной срезом в области высоковольтного электрода.

**Заключение.** В данной работе были проведены теоретические и экспериментальные исследования характеристик частичных разрядов в фарфоровых, полимерных и эпоксидных компаундных опорных изоляторах. Результаты моделирования электрического поля показали его высокую напряженность в области дефекта заостренного высоковольтного электрода полимерного изолятора, в области диаметрального среза фарфорового изолятора и в области трещины эпоксидного компаундного изолятора. Последние два случая показали напряженность электрического поля выше электрической напряженности воздуха в области высоковольтного электрода. Другие типы дефектов не вызывали высоких значений напряженности электрического поля в воздушных зазорах дефектов. Вероятно, это вызвано низкой напряженностью электрического поля внутри корпуса изолятора, недостаточно большой разницей между диэлектрическими постоянными материала изолятора и воздуха и достаточно большой толщиной изоляции между высоковольтными и заземляющими электродами.

Экспериментальные исследования показали наличие частичных разрядов во всех изоляторах с дефектом. Следует отметить, что частичные разряды регистрировались в условиях, которые были смоделированы в теоретических исследованиях и не показали достаточно высокую напряженность электрического поля. Однако интенсивность ЧР в этих случаях была не такой высокой, как в случаях возникновения высокой напряженности электрического поля. Амплитудно-фазовые распределения частичных разрядов имели схожую форму во всех типах изоляторов и существенно не зависели от их дефектов. Интенсивность ЧР положительной и отрицательной полуволны напряжения питания обычно зависит от расположения дефекта внутри изолятора. Однако некоторые результаты измерений ЧР проверяют это.

Принимая во внимание все полученные результаты, необходимо сказать, что явление возникновения частичных разрядов зависит не только от напряженности электрического поля в статике. Кроме того, методика диагностики частичных разрядов, без сомнения, может быть использована для диагностики опорных изоляторов. Однако диагностика методом частичных разрядов должна выполняться с использованием напряжения выше номинального. Это означает, что этот метод диагностики неэффективен для проверки изоляторов персоналом перед использованием разъединителя, что может снизить электрический травматизм. Кроме того, мониторинг частичных разрядов, вероятно, также не будет эффективен. Поэтому его применение не рекомендуется в этом случае.

Однако при более высоких напряжениях диагностический инструмент по диагностике методом частичных разрядов показал свою эффективность для определения наличия дефектов. Следовательно, этот метод может применяться для периодической диагностики воздушной линии с использованием напряжения выше рабочего.

#### Библиографический список

1. Al-Gheilani A., Rowe A., Li W. [et al.]. Stress control methods on a high voltage insulator: A review // *Energy Procedia*. 2017. Vol. 110. P. 95–100. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.03.112.
2. Tsarabaris P. T., Karagiannopoulos C. G., Theodorou N. J. A model for high voltage polluted insulators suffering arcs and partial discharges // *Simulation Modelling Practice and Theory*. 2005. Vol. 13, no. 2. P. 157–167. DOI: 10.1016/j.simpat.2004.11.002.
3. Palangar M. F., Mirzaie M., Mahmoudi A. Improved flashover mathematical model of polluted insulators: A dynamic analysis of the electric arc parameters // *Electric Power Systems Research*. 2020. Vol. 179. 106083. DOI: 10.1016/j.epsr.2019.106083.
4. Takabayashi K., Nakane K., Okubo R. [et al.]. High voltage DC partial discharge and flashover characteristics with surface charging on solid insulators in air // *IEEE Electrical Insulation Magazine*. 2018. Vol. 34, no. 5. P. 18–26. DOI: 10.1109/MEI.2018.8445431.
5. Guo J. Online diagnosis of power systems insulation condition in wind farms // 2017 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC). 2017. P. 433–436. DOI: 10.1109/eic.2017.8004658.
6. Lopez-Roldan J., Tang T., Gaskin M. Design and testing of UHF sensors for partial discharge detection in transformers // 2008 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis. 2008. P. 1052–1055. DOI: 10.1109/CMD.2008.4580463.
7. Álvarez F., Garnacho F., Ortego J. [et al.]. Application of HFCT and UHF sensors in on-line partial discharge measurements for insulation diagnosis of high voltage equipment // *Sensors*. 2015. Vol. 15, no. 4. P. 7360–7387. DOI: 10.3390/s150407360.
8. Plueksawan W., Apiratikul P., Bhummikittipich K. N. [et al.]. Partial discharge pattern analysis in cylindrical insulators model of transformer // 2008 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis. 2008. P. 978–982. DOI: 10.1109/CMD.2008.4580446.
9. Bastidas P. D., Rowland S. M. Interfacial aging in composite insulators as a result of partial discharge activity // 2017 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC). 2017. P. 13–16. DOI: 10.1109/EIC.2017.8004690.
10. Nazemi M. H., Hinrichsen V. Partial discharge investigation and electric field analysis of different oscillation modes of water droplets on the surface of polymeric insulator under tangential ac electric field stress // 2013 IEEE International Conference on Solid Dielectrics (ICSD). 2013. P. 194–197. DOI: 10.1109/ICSD.2013.6619788.

11. Hu Q., Wang S., Yang H. [et al.]. Effects of icing degree on ice growth characteristics and flashover performance of 220 kV composite insulators // *Cold Regions Science and Technology*. 2016. Vol. 128. P. 47–56. DOI: 10.1016/j.coldregions.2016.04.010.
12. Mahmoodi J., Mirzaie M., Shayegani-Akmal A. A. Surface charge distribution analysis of polymeric insulator under AC and DC voltage based on numerical and experimental tests // *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2019. Vol. 105. P. 283–296. DOI: 10.1016/j.ijepes.2018.08.006.
13. Ilkhechi H. D., Samimi M. H., Yousefvand R. Generation of acoustic phase-resolved partial discharge patterns by utilizing UHF signals // *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2019. Vol. 113. P. 906–915.
14. Ren M., Zhuang T., Song B. [et. al.]. Optical partial discharge diagnostic in SF6 gas insulated system via multi-spectral detection // *ISA Transactions*. 2018. Vol. 75. P. 247–257. DOI: 10.1016/j.isatra.2018.02.008.
15. Lee R., Thompson J. E., Rhinehart H. Predischarge current measurements and optical surface field measurements associated with insulator surface flashover // *Gaseous Dielectrics III*. Pergamon, 2013. P. 349–355. DOI: 10.1016/B978-0-08-029381-3.50049-6.

---

**ПОЛЯКОВ Дмитрий Андреевич**, старший преподаватель кафедры «Теоретическая и общая электротехника» Омского государственного технического университета (ОмГТУ), г. Омск.

SPIN-код: 2004-2148

AuthorID (РИНЦ): 733001

ORCID: 0000-0001-8813-2291

ResearcherID: B-7950-2016

Адрес для переписки: polyakowdmitry@yandex.ru

**НИКИТИН Константин Иванович**, доктор технических наук, доцент (Россия), заведующий кафедрой «Теоретическая и общая электротехника» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 3733-8763

AuthorID (РИНЦ): 641865

Адрес для переписки: nki@ngs.ru

**ТЕРЕЩЕНКО Надежда Андреевна**, инженер кафедры «Теоретическая и общая электротехника» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 4017-2286

AuthorID (РИНЦ): 947723

Адрес для переписки: nadezhda.tereshchenko@mail.ru

**НОВОСЁЛОВ Антон Сергеевич**, старший мастер участка передвижных электростанций, ООО «НОВАТЭК-Энерго», г. Тарко-Сале.

**БИЛЕВИЧ Ян Павлович**, магистрант гр. ЭЭМ-193 факультета элитного образования и магистратуры ОмГТУ, г. Омск.

#### Для цитирования

Поляков Д. А., Никитин К. И., Терещенко Н. А., Новосёлов А. С., Билевич Я. П. Исследование частичных разрядов в опорных изоляторах // *Омский научный вестник*. 2020. № 1 (169). С. 32–38. DOI: 10.25206/1813-8225-2020-169-32-38.

Статья поступила в редакцию 09.01.2020 г.

© Д. А. Поляков, К. И. Никитин, Н. А. Терещенко,

А. С. Новосёлов, Я. П. Билевич