



УДК 621.315
DOI: 10.25206/1813-8225-2021-180-26-32

Д. А. ПОЛЯКОВ
Н. А. ТЕРЕЩЕНКО
К. И. НИКИТИН

Омский государственный
технический университет,
г. Омск

ИССЛЕДОВАНИЕ ОТЛИЧИТЕЛЬНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ ХАРАКТЕРИСТИК ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ В ПРОХОДНЫХ ИЗОЛЯТОРАХ

Статья посвящена измерению и анализу частичных разрядов в вводах КРУ (комплектное распределительное устройство). Описан анализ конструкции вводов частичных разрядов для оценки возможных источников дефектов вводов. Опытный образец ввода 10 кВ с естественным дефектом получен от производителя вводов. Он был протестирован с использованием метода измерения частичных разрядов. Результаты испытаний показали значительную интенсивность частичных разрядов при напряжении от 12 кВ и выше. Авторы предположили, что часть зарегистрированных разрядов произошла в воздухе вблизи острых краев высоковольтного электрода. Чтобы проверить это предположение, авторы отшлифовали их и повторили тест. Второй тест не показал значительного изменения характеристик частичных разрядов. Таким образом, предполагаем, что образец проходного изолятора имел внутренний дефект, поскольку поверхность проходного изолятора не была загрязнена для образования поверхностных разрядов. Втулка исследована разрушающим методом на предмет локализации дефекта. Однако внутри проходного изолятора возможных дефектов обнаружено не было. Это могло быть связано с тем, что дефект не мог быть обнаружен визуально во время испытания или дефект находился в прокладке между высоковольтным электродом и корпусом изолятора. Кроме того, определены особенности фазоразрешенных диаграмм частичных разрядов в вводах КРУ.

Ключевые слова: частичные разряды, вводы, вводы КРУЭ, диагностика, мониторинг состояния.

Введение. Проходные изоляторы являются одним из важнейших и наиболее широко распространенных элементов энергосистем. Их диагностика и мониторинг состояния могут предотвратить преждевременный отказ, уменьшить количество прерываний тока короткого замыкания в энергосистемах и улучшить их статическую и динамическую стабильность. Вводы обычно ис-

пользуются в силовых трансформаторах и распределительных устройствах.

Вводы силовых трансформаторов являются одними из наименее надежных компонентов в системах высокого напряжения, поскольку они вызывают значительное количество отказов [1]. Согласно отчетам СИГРЭ, вводы вызывают отказы трансформаторов от 5 до 50 %. Они со-

провожаются повреждениями трансформатора, взрывами, пожарами, сопутствующими повреждениями и неожиданным отключением [2, 3]. Изолирующие вводы КРУ часто имеют дефекты, которые вызывают частые отказы [4] и должны быть обнаружены. Таким образом, исследуются дефекты вводов и методы диагностики.

Отказы большинства типов электрооборудования, в том числе вводов, происходят из-за естественного или искусственного разрушения изоляции. Это может вызвать пробой изоляции и повлечь большие финансовые потери энергосбытовых организаций. Таким образом, мониторинг состояния электрооборудования позволяет сократить финансовые затраты на устранение неисправностей. Кроме того, внедрение цифровых технологий в электроэнергетику делает доступным онлайн-мониторинг состояния изоляции [5–7].

Существуют различные методы диагностики и мониторинга вводов. Например, традиционными методами являются измерение емкости проходного изолятора и коэффициента рассеяния ($\tan \delta$), анализ частотной характеристики, измерение частичных разрядов.

Метод измерения коэффициента рассеяния ($\tan \delta$) относительно прост. Увеличение тангенса угла δ в вводе указывает на ухудшение изоляции, но этот метод широко не применяется [8, 9].

Анализ частотной характеристики (АЧХ) — это метод, который позволяет оценить механическую целостность источника питания трансформатора. Он используется для обнаружения деградации системы изоляции [10]. Метод АЧХ фокусируется на корреляции состояния изоляции с изменениями величины и фазы функции частотной характеристики. Существующая практика подтверждает использование метода АЧХ при оценке состояния изоляции трансформаторов [11].

Метод измерения частичных разрядов (ЧР) широко используется для оценки состояния и срока службы различного типа силового оборудования [12–16]. Этот метод позволяет обнаружить и распознать дефект на начальной стадии разрушения ввода. Следовательно, использование онлайн-мониторинга частичных разрядов может уменьшить количество отказов за счет обслуживания поврежденного оборудования до выхода из строя изоляции. Другим преимуществом метода частичного разряда является возможность локализации дефекта в процессе работы оборудования [17].

Характеристики частичных разрядов требуют классификации по типу дефекта для определения поврежденного элемента энергосистемы. Разряды в различных типах оборудования имеют различные модели частичных разрядов с фазовым разрешением (ФРЧР) и такие характеристики, как мощность частичных разрядов и средний кажущийся заряд. Таким образом, накопление типов дефектов ФРЧР по-прежнему является важной исследовательской задачей.

Вводы КРУ являются наиболее распространенными типами вводов. Наиболее эффективным методом их диагностики является измерение частичных разрядов. Таким образом, статья

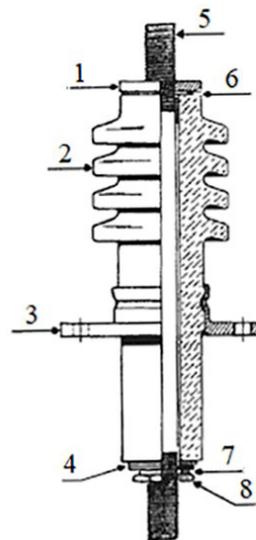


Рис. 1. Пример конструкции проходного изолятора (1 — крышка; 2 — изолятор; 3 — крепёжный фланец; 4 — смягчающая шайба; 5 — ходовой винт с обоих концов; 6 — уплотнительная прокладка; 7 — пружинная шайба; 8 — зажимная гайка)

направлена на исследование закономерностей и характеристик ФРЧР в вводах распределительных устройств.

Постановка задачи. В результате проведения исследований требуется определить отличительные особенности характеристик частичных разрядов в проходных изоляторах по сравнению с кабелями и опорными изоляторами. Для сравнения будут рассматриваться амплитудно-фазовые распределения частичных разрядов (АФРЧР), характеристики частичных разрядов (мощность, кажущийся заряд и пр.) и эффективность использования метода для определения наличия дефекта изоляции. Требуемые результаты предполагаются получить, решив следующие задачи:

- подготовка образца проходного изолятора с дефектом;
- измерение ЧР в образце проходного изолятора;
- анализ результатов измерений при сравнении характеристик ЧР в других элементах энергосистемы.

Теория. Надежность проходных изоляторов определяется их конструкцией (рис. 1). Расположение высоковольтных и заземляющих электродов таково, что может привести к возникновению ЧР как в изоляции, так и на поверхности. Таким образом, возможные дефекты аналогичны силовым кабелям и изоляторам.

Поверхностные разряды зависят от загрязнения изолятора. Следовательно, мы можем предположить, что характеристики частичных разрядов и диаграммы АФРЧР в этом случае ана-



Рис. 2. Экспериментальный образец проходного изолятора

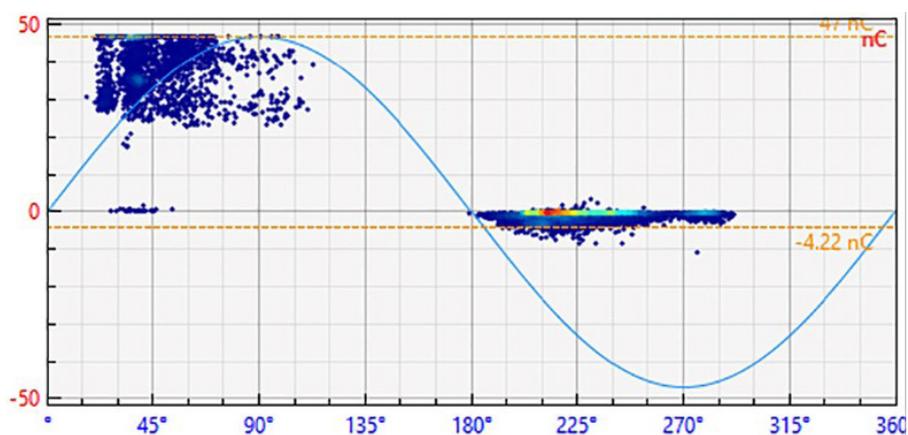


Рис. 3. Диаграмма ФРЧ ввода на 15 кВ

логичны загрязнению опорных изоляторов. Кроме того, загрязнение поверхности может вызвать перекрытие изоляции, в результате которого обычно срабатывает автоматическое отключение поврежденного элемента системы. Однако часто такие повреждения устраняются автоматическим повторным включением. Исследование внутренних дефектов проходных изоляторов более важно, поскольку их рост приводит к необратимым отказам, которые требуют аварийного обслуживания оборудования.

Дефекты внутри изоляционного слоя обычно возникают на этапе изготовления проходных изоляторов. Такие дефекты часто можно обнаружить путем их первоначального тестирования перед установкой на трансформатор. Однако материалы вводов со временем могут разрушаться. В результате в изоляционном слое могут появиться неоднородности электрического поля, что приведет к пробое изоляции. Вероятно, самая слабая часть ввода в данном случае — это прокладка между высоковольтным электродом и корпусом изолятора. Износ прокладки ведет к образованию контакта между высоковольтным электродом и корпусом изолятора, результатом которого может быть разрушение тела проход-

ного изолятора из-за возникновения частичных разрядов.

Экспериментальный образец. Первой задачей работы является подготовка экспериментального образца проходного изолятора с дефектом. Чаще всего в подобных исследованиях создается искусственный дефект, так как естественный не всегда удастся найти или получить. Однако искусственные и естественные дефекты имеют разную природу возникновения. Естественные трещины в изоляторах имеют значительно меньший зазор между составными частями, чем искусственные, ввиду особенностей методов обработки. Таким образом, искусственные и естественные дефекты могут иметь разные диагностические результаты. Поэтому создание искусственных дефектов следует использовать только в том случае, если тестируемые объекты с естественными дефектами недоступны или их тестирование невозможно.

Для данной работы удалось получить от производителя проходной изолятор с естественным дефектом. Дефект возник в процессе изготовления и был обнаружен при первоначальных испытаниях. Причем визуально дефект не проявлялся (рис. 2). В работе было принято допущение, что



Рис. 4. Испытательный образец проходного изолятора после шлифовки острых краев

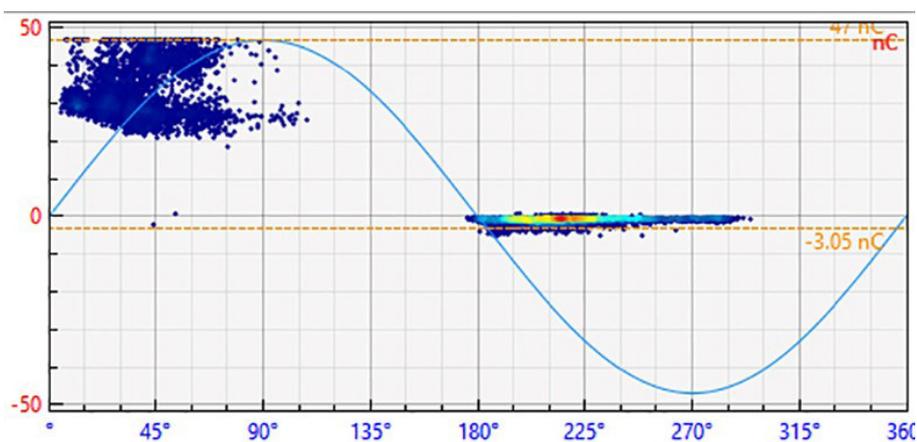


Рис. 5. Диаграмма АФРЧР ввода после шлифовки острых краев при 15 кВ

сколы на поверхности проходного изолятора могут влиять только на поверхностные разряды.

Измерение частичных разрядов. В экспериментальном образце проходного изолятора были измерены частичные разряды. Он был подвешен с использованием диэлектрической балки, чтобы свести к минимуму возможные разряды в воздухе, кроме внутренних и поверхностных разрядов в проходном изоляторе. Первоначальное испытание показало отсутствие разрядов на 10 кВ, что является рабочим напряжением ввода. Однако напряжение в 12 кВ привело к появлению частичных разрядов. Дальнейшее повышение напряжения показало, что при 15 кВ интенсивность частичных разрядов была высокой и более напряжение не увеличивалось. Результаты испытаний показали, что мощность ЧР составила 102 мВт, а средний кажущийся заряд — 47 нКл. Диаграмма АФРЧР соответствует дефекту высоковольтного электрода (рис. 3).

Причиной таких результатов измерений может быть то, что проходной изолятор имел острые края на высоковольтном электроде. Предположительно, зарегистрированные разряды частично или полностью могли являться разрядами в воздухе. Поэтому было решено сточить имеющиеся острые края ввода и повторить испытание. Образец для испытаний без острых краев показан на рис. 4.

Измерение ЧР во вводе без острых краев не показало значительного изменения характеристик ЧР по сравнению с первоначальным испытанием (рис. 5). Мощность ЧР составляла 136 мВт, средний кажущийся заряд составлял 47 нКл. Результаты измерения характеристик ЧР при напряжении до 15 кВ (рис. 6, 7).

После измерений образец ввода был исследован разрушающим методом на наличие и расположение дефекта. На рис. 8 видно, что внутри ввода не обнаружено визуальных дефектов.

Обсуждение результатов. В исследуемом образце ввода КРУ при рабочем напряжении 10 кВ ЧР не зарегистрировано. Они начали возникать при 12 кВ и их интенсивность значительно выросла с увеличением напряжения.

Шлифовка острых краёв проходного изолятора не оказала существенного влияния на характеристики ЧР. Кажущийся заряд ЧР до и после измерения имел близкие значения. Мощность ЧР в большинстве измерений увеличилась после шлифования острых краёв ввода, тогда как она должна была уменьшиться, если края влияли на возникновение разрядов.

Таким образом, можно считать, что результаты измерения ЧР показали наличие дефекта внутри проходного изолятора. Однако при его разрушающем исследовании не обнаружено видимого дефекта внутри изоляционного слоя.

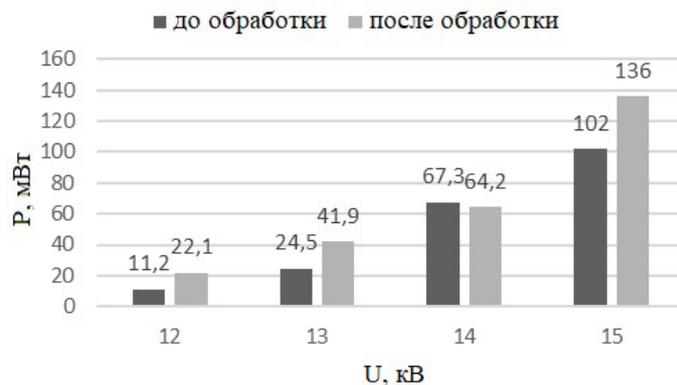


Рис. 6. Результаты измерения мощности частичных разрядов в проходном изоляторе до и после шлифования

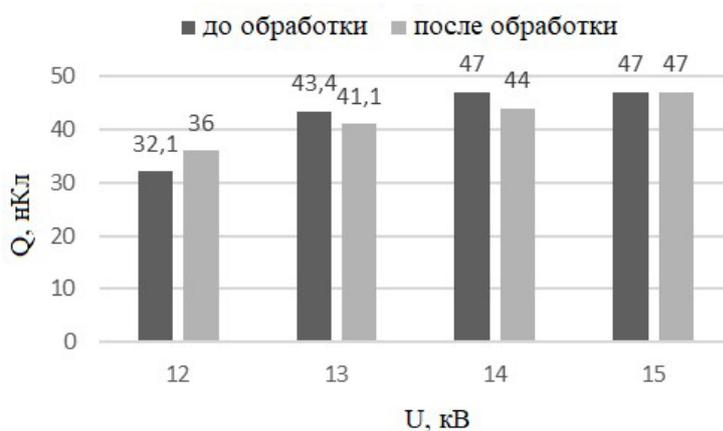


Рис. 7. Результаты измерения среднего кажущегося заряда частичных разрядов во вводе до и после шлифования



Рис. 8. Образец ввода после разрушения для локализации дефектов

Таким образом, предположительно, дефект был в области прокладки между высоковольтным электродом и корпусом изолятора. Однако расположение дефекта может отличаться, поскольку образец ввода не эксплуатировался в течение

длительного времени и видимые дефекты могли не появиться во время испытания.

Для сравнения характеристик частичных разрядов в проходном изоляторе логично рассмотреть аналогичные характеристики для опорных

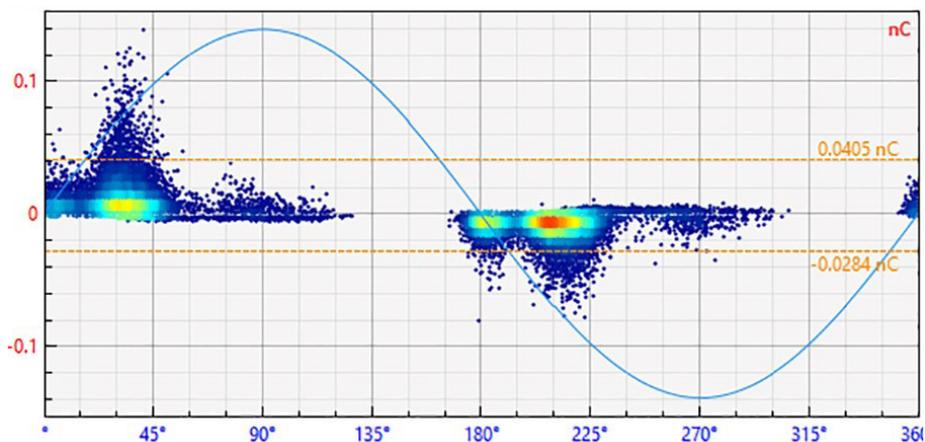


Рис. 9. Диаграмма АФРЧР для опорного изолятора

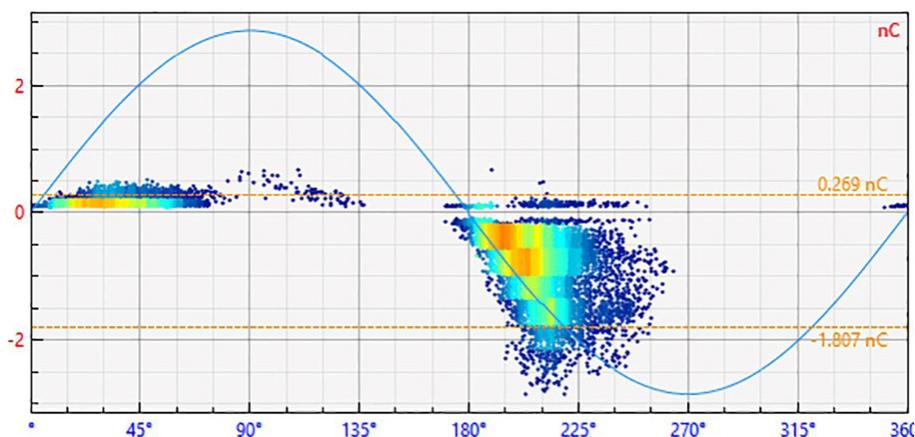


Рис. 10. Диаграмма АФРЧР для силового кабеля

изоляторов и силовых кабелей (рис. 9, 10). Основными отличительными особенностями характеристик ЧР в проходных изоляторах являются небольшие количества ЧР с незначительными кажущимися зарядами. В положительной полуволне питающего напряжения большинство зарегистрированных ЧР были выше 20 нКл. В то же время в отрицательной полуволне ЧР не превышали 10 нКл.

Заключение. Проведено экспериментальное исследование характеристик ЧР в вводах распределительных устройств. В экспериментах использовался образец ввода 10 кВ с производственным браком. Характеристики ЧР были измерены на образце проходного изолятора до и после шлифовки острых кромок высоковольтного электрода.

Результаты измерений показали незначительную разницу в характеристиках ЧР. Поэтому предполагается, что втулка имеет внутренний дефект. Однако после исследования по разрушению проходного изолятора визуально обнаружить его не удалось. Кроме того, полученная диаграмма АФРЧР дефекта проходного изолятора имеет небольшое количество разрядов малой интенсивности в положительной полуволне напряжения. Вероятно, дефекты могут быть обнаружены с помощью этой особенности диаграмм

АФРЧР. Таким образом, можно рекомендовать методы измерения ЧР и онлайн-мониторинга состояния проходных изоляторов.

Библиографический список

1. Setayeshmehr A., Azirani A. A., Borsi H. [et al.]. On-line monitoring and diagnoses of power transformer bushings // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2006. Vol 13 (3). P. 608–615. DOI: 10.1109/TDEI.2006.1657975.
2. Transformer bushing reliability // CIGRE Technical Brochure. 2019. 124 p. URL: <https://e-cigre.org/publication/755-transformer-bushing-reliability> (дата обращения: 10.11.2021).
3. Ning S., He Y., Farhan A. [et al.]. A method for the localization of partial discharge sources in transformers using TDOA and truncated singular value decomposition // IEEE Sensors Journal. 2020. Vol. 21 (5). P. 6741–6751. DOI: 10.1109/JSEN.2020.3037699.
4. Tan D., Li H., Xiao D. Analysis on Failure causes of bushing used in 40.5 kV metal enclosed air insulation switchgear // 2014 China International Conference on Electricity Distribution (CICED). 2014. P. 1225–1229. DOI: 10.1109/CICED.2014.6991902.
5. Christina A. J., Salamet M. A., Quazi R. Causes of transformer failures and diagnostic methods — A review // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2018. Vol. 82. P. 1442–1456. DOI: 10.1016/j.rser.2017.05.165.

6. Zhang L. [et al.]. Development of multi-parameter online monitoring equipment for EHV transformer bushing // IET Science, Measurement & Technology. 2019. Vol. 14 (1). C. 98–103. DOI: 10.1049/iet-smt.2019.0262.
7. Liu Y., Hu M., Dai Q. [et al.]. Online recognition method of partial discharge pattern for transformer bushings based on small sample ultra-micro-CNN network // AIP Advances. 2021. Vol. 11 (4). 045221. DOI: 10.1063/5.0047481.
8. Li Y., Cheng M., Xu H. [et al.]. Evaluation of insulation of HV Bushing—Online monitoring $\tan\delta$ of a 500kV bushing // Proceedings of 2014 International Symposium on Electrical Insulating Materials. 2014. P. 303–306. DOI: 10.1109/ISEIM.2014.6870779.
9. Purwadi A., Heryana N., Nurafiat D. [et al.]. Testing and diagnostics of power transformer in PT. Indonesia Power Kamojang Geothermal Power Plant unit 1 // Proceedings of the 2011 International Conference on Electrical Engineering and Informatics. 2011. P. 1–5. DOI: 10.1109/ICEEI.2011.6021739.
10. Al-Ameri S. M. A. N. [et al.]. Understanding the Influence of Power Transformer Faults on the Frequency Response Signature Using Simulation Analysis and Statistical Indicators // IEEE Access. 2021. Vol. 9. P. 70935–70947. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3076984.
11. Arumugam S. Nonconventional measurements on insulation materials high voltage bushings and power cables using frequency response analysis method // Engineering Reports. 2020. Vol. 2, no. 4. e12136. DOI: 10.1002/eng2.12136.
12. Jiang J., Chen J., Li J. [et al.]. Partial Discharge Detection and Diagnosis of Transformer Bushing Based on UHF Method // IEEE Sensors Journal. 2021. Vol. 21, no. 15. P. 16798–16806. DOI: 10.1109/JSEN.2021.3066809.
13. Hammarström T., Bengtsson T., Gubanski S. M. Partial discharge characteristics of electrical treeing in XLPE insulation exposed to voltages of different rise times // IEEE Transactions on Fundamentals and Materials. 2019. Vol. 139 (2). C. 85–91. DOI: 10.1541/ieejfms.139.85.
14. Sha Y. [et al.]. Measurement and simulation of partial discharge in oil-paper insulation under the combined AC–DC voltage // Journal of Electrostatics. 2013. Vol. 71, no. 3. P. 540–546. DOI: 10.1016/j.elstat.2012.11.013.
15. Deshpande A. S., Mangalvedekar H. A., Cheeran A. N. Partial discharge analysis using energy patterns // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2013. Vol. 53. P. 184–195. DOI: 10.1016/j.ijepes.2013.04.015.
16. Hayakawa N., Okusu T., Nishizawa K. [et al.]. Dependence of partial discharge characteristics at spacer surface on particle size in SF 6 gas insulated system // 2008 International Conference on condition monitoring and diagnosis. IEEE. 2008. P. 46–50. DOI: 10.1109/CMD.2008.4580227.
17. Nafar M., Niknam T., Gheisari A. Using correlation coefficients for locating partial discharge in power transformer // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2011. Vol. 33, no. 3. P. 493–499. DOI: 10.1016/j.ijepes.2010.11.003.

ПОЛЯКОВ Дмитрий Андреевич, старший преподаватель кафедры «Теоретическая и общая электротехника».

SPIN-код: 2004-2148,

AuthorID (РИНЦ): 733001

AuthorID (SCOPUS): 56825433300

Адрес для переписки: polyakowdmitry@yandex.ru

ТЕРЕЩЕНКО Надежда Андреевна, аспирант кафедры «Теоретическая и общая электротехника».

SPIN-код: 4017-2286

AuthorID (РИНЦ): 947723

AuthorID (SCOPUS): 57216615006

Адрес для переписки: nadezhda.tereshcenko@mail.ru

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

SPIN-код: 3733-8763

AuthorID (РИНЦ): 641865

AuthorID (SCOPUS): 56825489500

Адрес для переписки: nki@ngs.ru

Для цитирования

Поляков Д. А., Терещенко Н. А., Никитин К. И. Исследование отличительных особенностей характеристик частичных разрядов в проходных изоляторах // Омский научный вестник. 2021. № 6 (180). С. 26–32. DOI: 10.25206/1813-8225-2021-180-26-32.

Статья поступила в редакцию 22.10.2021 г.

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