

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ В ИСКУССТВЕННЫХ ДЕФЕКТАХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

В статье описывается исследование характеристик частичных разрядов (ЧР) в различных видах искусственных дефектов воздушных и кабельных линий. Всего было рассмотрено 13 типов дефектов изоляции. Измерения ЧР проводились с помощью источника высокого переменного напряжения и коммерческого устройства регистрации ЧР. Для каждого типа дефекта были получены диаграммы амплитудно-фазового распределения ЧР (АФРЧР), среднее значение кажущегося разряда и интенсивность ЧР. Результаты исследования показали, что большинство дефектов изоляторов ВЛЭП имеют относительно высокую интенсивность частичных разрядов при небольшом среднем кажущемся заряде. В образцах кабельных линий были зарегистрированы относительно высокие значения интенсивности и среднего кажущегося разряда при наличии дефекта концевой заделки и дефекта заземляющего электрода в виде иглы. Полученные результаты могут быть использованы при разработке приборов для выявления дефектов, а также для расширения базы диаграмм (АФРЧР).

Ключевые слова: частичный разряд, кажущийся заряд, искусственный дефект, пробой изоляции, изолятор, распознавание дефектов изоляции.

Введение. Безопасная работа электроэнергетических систем является одной из важнейших задач современной электроэнергетики. Несмотря на то, что исследовано значительное количество методов диагностики электрооборудования, существующие диагностические мероприятия оказываются недостаточно эффективными. Одним из способов уменьшения расходов на эксплуатацию оборудования является повышение надежности его работы путем уменьшения количества технологических нарушений. Поэтому актуальной задачей является создание новых и повышение эффективности существующих методов и средств диагностики высоковольтной изоляции.

Одним из перспективных методов является диагностика частичных разрядов (ЧР) в изоляции электрооборудования. При возникновении ЧР происходит несколько физических процессов, регистрируя которые можно судить о характеристиках ЧР [1]:

— импульсы тока частичных разрядов. Регистрация электрических сигналов ЧР осуществляется с помощью датчиков, обеспечивающих индуктивную или емкостную связь с объектом исследования [2, 3];

— акустические сигналы [4, 5];
— возмещения электромагнитного поля [6];
— изменения химического состава изоляционного материала (например, трансформаторного масла) [7].

Неоспоримым достоинством метода диагностики частичных разрядов является его широкая применимость. Он используется для диагностики трансформаторов [8, 9], кабельных линий [10, 11], изоляторов воздушных линий электропередачи [12], вращающихся электрических машин [13], выключателей [14], автоматических выключателей [15] и т.д. Диагностика перечисленного оборудования может производиться с использованием систем и устройств для периодического измерения и онлайн мониторинга характеристик частичных разрядов в процессе эксплуатации оборудования. Основным преимуществом такого подхода является возможность прогнозирования пробоев изоляции на основе анализа характеристик частичных разрядов в динамике. Следует отметить, что данный метод значительно повышает надежность эксплуатации оборудования за счет своевременного обнаружения опасного дефекта до наступления аварии.

Установлено, что в процессе роста дефекта интенсивность частичных разрядов снижается незадолго до наступления пробоя [16]. При проведении диагностики портативными устройствами в этот период существует вероятность ошибочного вывода об отсутствии дефектов.

Важным направлением исследований в этой области является выявление частичных разрядов среди помех. В ходе измерений должно производиться отделение сигналов частичных разрядов от шумов и их классификация по уровню опасности. Фильтрация шумов может быть осуществлена аппаратными или программными методами. В примере аппаратного метода используется мостовая схема регистрации частичных разрядов [1]. Программными методами является использование нейронных сетей [17, 18] и вейвлет-преобразования [19]. Кроме того, исследуются случаи наличия множественных дефектов [20, 21]. Однако, несмотря на широкое распространение метода, исследования в области повышения эффективности регистрации и анализа характеристик ЧР продолжаются.

Постановка задачи. Данная работа посвящена изучению характеристик ЧР в различных типах дефектов изоляции в воздушных и кабельных линиях классом напряжения 10 кВ. Результаты исследования могут быть использованы в дальнейшей работе по выявлению типов дефектов, основанному на совокупном анализе амплитудно-фазовых распределений частичных разрядов с другими их характеристиками. Для достижения цели были поставлены и решены следующие задачи:

- подготовка образцов изоляции кабельных и воздушных линий электропередачи с различными типами искусственных дефектов;
- запись характеристик частичных разрядов каждого образца изоляции;
- анализ результатов экспериментальных исследований.

Теория. В данной статье рассматриваются воздушные (ВЛЭП) и кабельные (КЛЭП) линии электропередач, поэтому необходимо создать дефекты в обоих типах изоляции. Материалом изоляции ВЛЭП служит воздушное пространство между проводами, а также изоляторы из различных материалов (керамические, стеклянные, фарфоровые, полимерные, и т.д.). Разряды в воздухе в большинстве случаев не наносят вреда изоляции. Ввиду естественной циркуляции воздуха дефект редко развивается до устойчивого пробоя. Даже в случае достаточной ионизации воздуха и возникновения дуги между фазными проводами прочность изоляции достаточно быстро восстанавливается. Этот факт подтверждается частыми успешными автоматическими повторными включениями на ВЛЭП.

Из этого следует, что наиболее важными изолирующими элементами воздушных линий являются изоляторы. К их дефектам можно отнести повреждение корпуса и загрязнение (с возможным увлажнением). Загрязнение изолятора может привести к появлению значительного количества поверхностных разрядов с последующим возникновением полного перекрытия.

Разрушения в корпусе изолятора могут иметь различный характер. Например, трещины могут быть вызваны высокими механическими напряжениями.

Внутри изоляторов могут возникнуть электрические триинги, которые также приводят к разрушению изоляционного материала.

В кабельных линиях наиболее распространенными дефектами изоляции являются некачественный монтаж концевых и соединительных муфт. Кроме того, к дефектам относятся неоднородности изоляционного слоя в области высоковольтного или заземляющего электродов. В лабораторных условиях могут быть рассмотрены только дефекты концевой заделки кабеля или изоляционного слоя в области заземляющего электрода. Дефекты в области высоковольтного электрода или внутри изоляционного слоя могут быть исследованы только случаи их создания в процессе изготовления кабеля.

Таким образом, в статье были исследованы следующие типы дефектов изоляции линий электропередач:

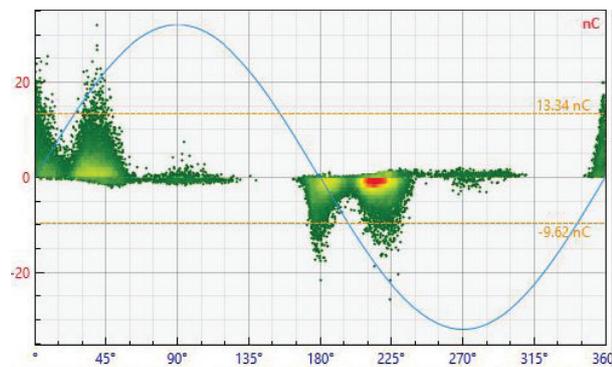
- искусственная поперечная трещина (разрез) фарфорового изолятора в области высоковольтного электрода;
- искусственная диагональная трещина (разрез) фарфорового изолятора;
- искусственная поперечная трещина (разрез) полимерного изолятора в области высоковольтного электрода;
- искусственная диагональная трещина (разрез) полимерного изолятора;
- имитация заостренного высоковольтного электрода в полимерном изоляторе;
- загрязнение фарфоровых изоляторов алюминиевой пудрой (сухих и с увлажнением);
- загрязнение фарфоровых изоляторов сажей (сухих и с увлажнением);
- загрязнение фарфоровых изоляторов пылью (сухих и с увлажнением);
- дефект заделки одножильного экранированного кабеля 10 кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена;
- заостренный заземляющий электрод, внедренный в слой изоляции одножильного экранированного кабеля 10 кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена.

Следует отметить, то картины амплитудно-фазовых распределений частичных разрядов и их характеристики могут существенно различаться в различных типах дефектов. Это можно объяснить разным распределением напряженности электрического поля и формой дефектов в электрооборудовании. Кроме того, характеристики частичных разрядов существенно зависят от приложенного напряжения [22].

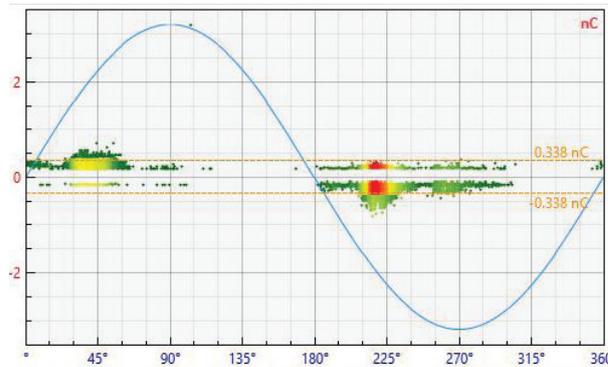
Экспериментальные исследования. Все перечисленные образцы изоляции ЛЭП испытывались переменным напряжением, превышающим номинальное. В качестве источника напряжения использовалась испытательная установка с максимальным напряжением 50 кВ. Образцы изоляции были подключены с большим воздушным промежутком между электродами для минимизации разрядов в воздухе.

В ходе экспериментов измерения характеристик частичных разрядов проводились в широком диапазоне напряжений с использованием прибора для измерения ЧР. В качестве индуктивного датчика использовался высокочастотный трансформатор тока (ВЧТТ), установленный на заземляющем проводнике.

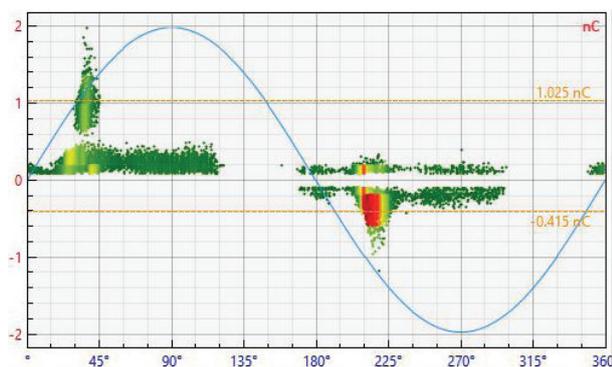
В результате было определено, что значительный уровень частичных разрядов наблюдается при напряжении 20 кВ для изоляторов воздушных линий и 15 кВ для кабельных линий. Более высокое значение испытательного напряжения для изоляторов



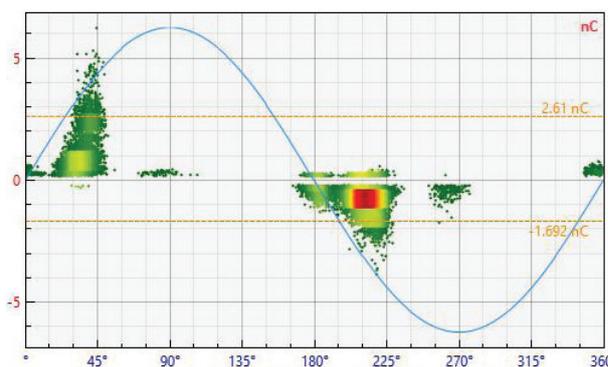
а) фарфоровый изолятор с поперечным надрезом



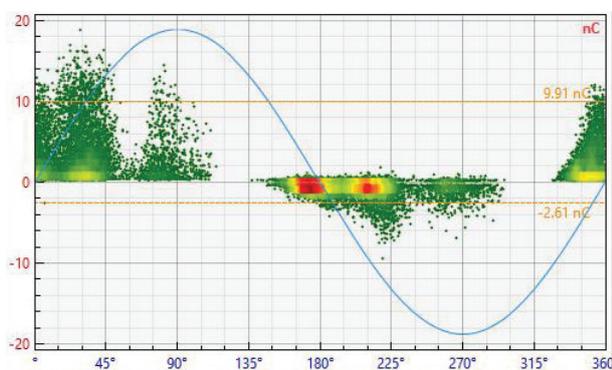
б) фарфоровый изолятор с диагональным надрезом



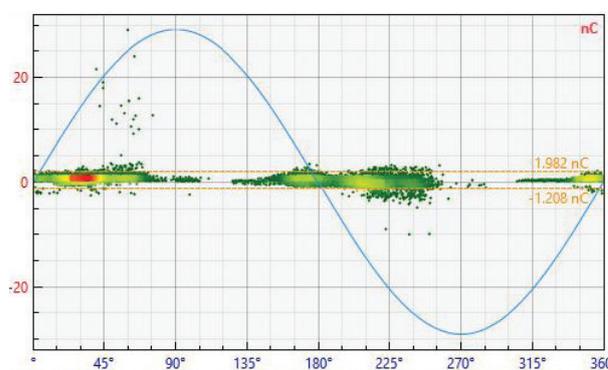
в) полимерный изолятор с поперечным надрезом



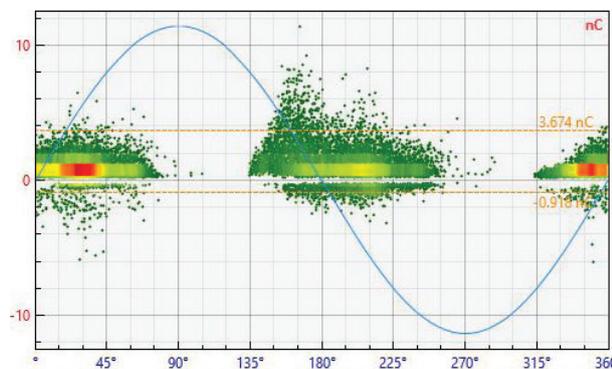
г) полимерный изолятор с диагональным надрезом



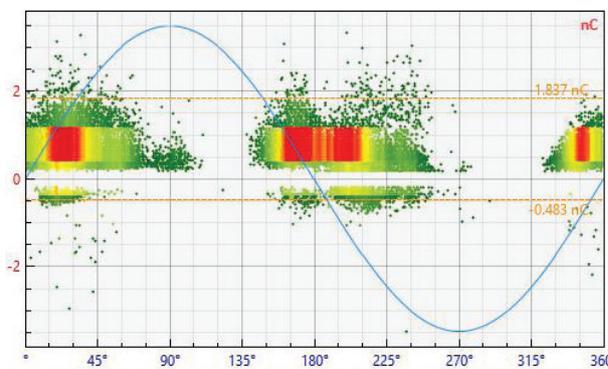
д) полимерный изолятор с электродом в виде иглы



е) изолятор, загрязненный алюминиевым порошком

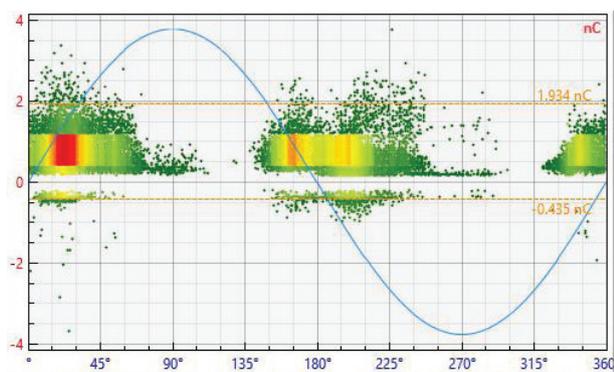


ж) изолятор, загрязненный алюминиевым порошком и влагой

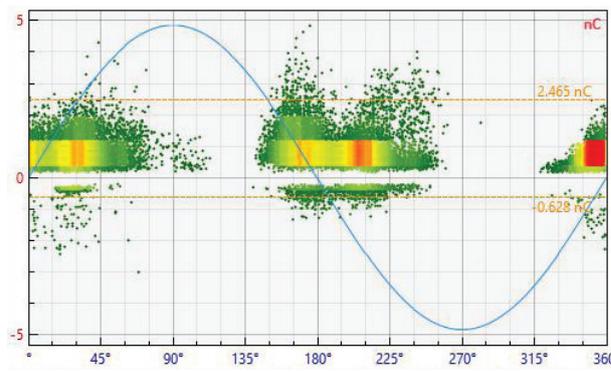


з) изолятор, загрязненный сажей

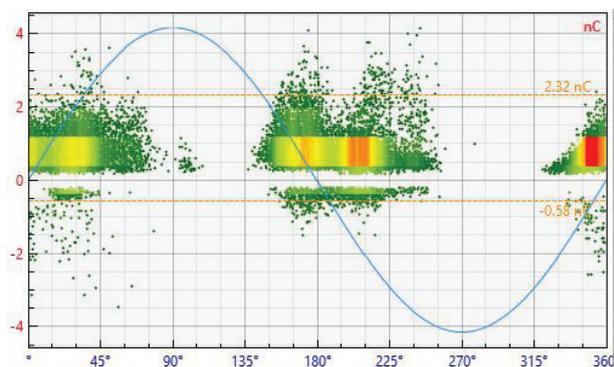
Рис. 1. Диаграммы АФЧР для образцов изоляции



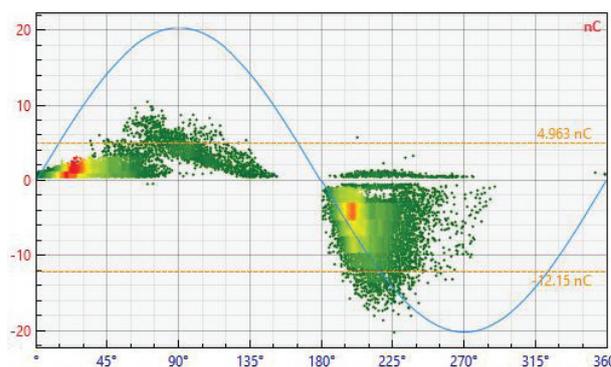
и) изолятор, загрязненный сажей и влагой



к) изолятор, загрязненный пылью



л) изолятор, загрязненный пылью и влагой



м) дефект заделки кабеля

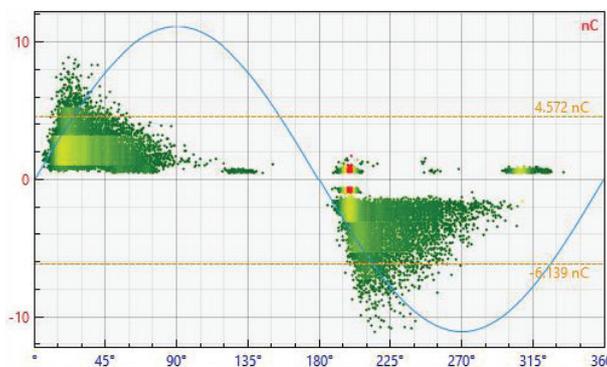
н) дефект кабеля в области
заземляющего электрода в виде иглы

Рис. 1. Диаграммы АФРЧР для образцов изоляции

объясняется большим запасом их электрической прочности по сравнению с изоляцией кабелей: толщина изоляционного слоя внутри корпуса изолятора в 2–3 раза больше, чем в кабеле.

Кроме того, фарфор имеет намного более высокую диэлектрическую проницаемость в сравнении с полимерами, что повышает надежность электрооборудования при использовании изоляторов этого типа.

Полученные результаты измерения частичных разрядов в образцах изоляции с искусственными дефектами представлены на рис. 1.

Кроме того, для каждого образца изоляции были получены значения интенсивности частичных раз-

рядов и среднего кажущегося заряда. Результаты их измерений показаны на рис. 2.

Обсуждение результатов. Результаты экспериментов показали существенно различающиеся картины амплитудно-фазовых распределений частичных разрядов, а также значения среднего кажущегося заряда и интенсивности. Поперечный разрез фарфорового изолятора (рис. 1а) был выполнен в области высоковольтного электрода, поэтому этот образец имеет схожие амплитуды частичных разрядов на диаграммах амплитудно-фазовых распределений ЧР с полимерным изолятором (рис. 1д), имеющим дефект высоковольтного электрода. Однако образец изоляции (рис. 1а) имеет более высо-

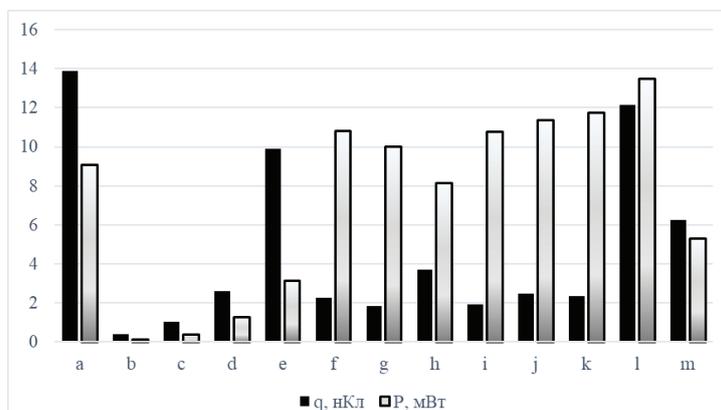


Рис. 2. Средний кажущийся заряд и интенсивность частичных разрядов

кие значения интенсивности ЧР и среднего кажущегося заряда, чем образец (рис. 1а). Возможно, это различие связано с типом изоляционного материала в области дефекта. Дефект образца (рис. 1а) контактирует с воздухом, а образца (рис. 1д) — преимущественно с материалом изолятора. Полимерные изоляторы с поперечным (рис. 1в) и диагональным (рис. 1г) разрезами имеют схожие диаграммы амплитудно-фазовых распределений частичных разрядов с образцом (рис. 1а). Однако в области положительной полуволны напряжения они имеют более концентрированные и выраженные пиковые значения ЧР. Фарфоровый изолятор с диагональным разрезом (рис. 1б) показал наименьшие значения интенсивности ЧР и среднего кажущегося заряда. Вероятно, это связано с материалом и конструкцией изолятора, так как фарфоровый изолятор имеет наибольшую диэлектрическую проницаемость и толщину изоляционного слоя.

У загрязненных изоляторов наблюдаются схожие диаграммы амплитудно-фазовых распределений частичных разрядов. Частичные разряды преимущественно положительны как при положительных, так и при отрицательных полу волнах. Все образцы загрязненных изоляторов показали относительно низкое значение среднего кажущегося заряда и высокое значение интенсивности частичных разрядов. Следует отметить, что увлажнение образцов вызвало уменьшение значений среднего кажущегося заряда в каждом случае. В изоляторе, загрязненном сажой, наблюдалось увеличение мощности частичных разрядов на 25 % после увлажнения. Однако увлажнение остальных загрязненных изоляторов не привело к существенному изменению этого параметра.

При дефекте в области заделки кабеля (рис. 1м) были получены значительные интенсивность ЧР и средний кажущийся заряд, сопоставимые с образцом (рис. 1а). На картине амплитудно-фазовых распределений частичных разрядов видны четко выраженные разряды при отрицательной полу волне. Разряды при положительной полу волне распределены в области от 0 до 150°. При дефекте в области заземляющего электрода кабеля (рис. 1н) распределение разрядов имеет треугольную форму как в положительной, так и в отрицательной полу волне со смещением к максимуму начала полу волны.

Заключение. В работе исследовано 13 видов дефектов изоляции линий электропередачи. Измерения частичных разрядов осуществлялись с помощью устройства с датчиком ВЧТТ и источника переменного высокого напряжения 50 Гц. Важно

отметить, что программное обеспечение прибора способно определять тип дефекта только в изоляции кабеля. Дефекты изоляторов определялись как «дефекты с возможной опасностью пробоя», но типы дефектов не распознавались. Следовательно, средства обнаружения дефектов частичных разрядов нуждаются в улучшении. Полученные результаты исследований будут полезны при разработке средств распознавания дефектов ЧР и расширения базы диаграмм амплитудно-фазовых распределений частичных разрядов в дефектах.

Библиографический список

1. Hauschild W., Lemke E. High-voltage test and measuring techniques. Springer, 2014. 518 p. ISBN 3642453511; 9783642453519.
2. Birlasekaran S., Leong W. H. Comparison of known PD signals with the developed and commercial HFCT sensors // IEEE Transactions on Power Delivery. 2007. Vol. 22, Issue 3. P. 1581 – 1590. DOI: 10.1109/TPWRD.2007.899795.
3. Tian Y., Lewin P. L., Davies A. E. [et al.]. Partial discharge detection in cables using VHF capacitive couplers // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2003. Vol. 10, Issue 2. P. 343 – 353. DOI: 10.1109/TDEI.2003.1194121.
4. Heinrich R., Jobava R., Gheonjian A. [et al.]. Investigation and optimization of a sensor for partial discharge detection on high voltage XLPE cables // Proceedings of III International Seminar/ Workshop on Direct and Inverse Problems of Electromagnetic and Acoustic Wave Theory. (IEEE Cat. No. 98EX163). 1998. P. 134 – 137. DOI: 10.1109/DIPED.1998.730961.
5. Ghosh R., Chatterjee B., Dalai S. A method for the localization of partial discharge sources using partial discharge pulse information from acoustic emissions // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2017. Vol. 24, Issue 1. P. 237 – 245. DOI: 10.1109/TDEI.2016.006080.
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. Mackenzie E. A., Crossey J., de Pablo A. [et al.]. On-line monitoring and diagnostics for power transformers // 2010 IEEE International Symposium on Electrical Insulation. 2010. P. 1 – 5. DOI: 10.1109/ELINSL.2010.5549734.
8. 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.
9. Mohammadi H., Haghjoo F. Distributed capacitive sensors for partial discharge detection and defective region identification in power transformers // IEEE Sensors Journal. 2017. Vol. 17, Issue 6. P. 1626 – 1634. DOI: 10.1109/JSEN.2017.2651028.

10. 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, Issue 4. P. 7360–7387. DOI: 10.3390/s150407360.

11. Rajalakshmi B., Kalaivani L. Analysis of Partial Discharge in underground cable joints // 2015 International Conference on Innovations in Information, Embedded and Communication Systems (ICIIECS). 2015. P. 1–5. DOI: 10.1109/ICIIECS.2015.7193000.

12. Plueksawan W., Apiratikul P., Boonchiam P. [et al.]. Partial discharge pattern analysis in cylindrical insulators model of transformer // 2008 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis. 2008. P. 113–117. DOI: 10.1109/CMD.2008.4580243.

13. 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 (1). P. 184–195. DOI: 10.1016/j.ijepes.2013.04.015.

14. Zhang Z., Yang J., Jia J. [et al.]. Research on Partial Discharge State Detection in GIS Based on Internet of Things Technology // *Journal of Physics: Conference Series*. IOP Publishing. 2020. Vol. 1549. DOI: 10.1088/1742-6596/1549/4/042012.

15. Lu Y., Su Y., Wang F. Partial Discharges Pattern Classification in High Voltage Circuit Breakers // *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*. 2018. Vol. 153, Issue 4. 042046. DOI: 10.1088/1755-1315/153/4/042046.

16. Ahmed Z., Hussain G. A., Varacka L. [et al.]. Analysis of partial discharge signals in medium voltage XLPE cables // 2016 17th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE). 2016. P. 1–6. DOI: 10.1109/EPE.2016.7521817.

17. Guan J., Guo M., Fang S. Partial Discharge Pattern Recognition of Transformer Based on Deep Forest Algorithm // *Journal of Physics: Conference Series*. IOP Publishing. 2020. Vol. 1437, Issue 1. 012083. DOI: 10.1088/1742-6596/1437/1/012083.

18. Raymond W. J. K. [et al.]. High noise tolerance feature extraction for partial discharge classification in XLPE cable joints // *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2017. Vol. 24, Issue 1. P. 66–74. DOI: 10.1109/TDEI.2016.005864.

19. Zaeni A., Kasnalestari T., Khayam U. Partial discharge signal denoising by using hard threshold and soft threshold methods and wavelet transformation // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing. 2019. Vol. 602, Issue 1. 012034. DOI: 10.1088/1757-899X/602/1/012034.

20. Wang J., Zhang Zhaoguang, Zhichong Zhang [et al.]. Multi-source partial discharge detection and rapid localization of switchgear based on comprehensive diagnosis method // *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2020. Vol. 440, Issue 3. 032122. DOI: 10.1088/1755-1315/440/3/032122.

21. Deng R., Zhu Y., Liu X. [et al.]. Multi-source Partial Discharge Identification of Power Equipment Based on Random Forest // *IOP Conference Series: Earth and Environmental*

Science. IOP Publishing. 2019. Vol. 237, Issue 6. 062039. DOI: 10.1088/1755-1315/237/6/062039.

22. Поляков Д. А., Никитин К. И., Терещенко Н. А., Комаров И. В., Полякова У. В. Исследование зависимости мощности частичных разрядов от напряжения в кабелях с изоляцией из сшитого полиэтилена // *Омский научный вестник*. 2020. № 1 (169). С. 39–44. DOI: 10.25206/1813-8225-2020-169-39-44.

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

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

КОМАРОВ Илья Владимирович, магистрант гр. ЭЭМ-185 факультета элитного образования и магистратуры ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 8480-2692

AuthorID (РИНЦ): 998511

Адрес для переписки: darkterror2308@gmail.com

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

ПОЛЯКОВА Ульяна Викторовна, инженер отдела электроснабжения ПАО «ОМХП», г. Омск.

Для цитирования

Поляков Д. А., Терещенко Н. А., Комаров И. В., Никитин К. И., Полякова У. В. Исследование характеристик частичных разрядов в искусственных дефектах линий электропередачи // *Омский научный вестник*. 2020. № 6 (174). С. 63–68. DOI: 10.25206/1813-8225-2020-174-63-68.

Статья поступила в редакцию 28.10.2020 г.

© Д. А. Поляков, Н. А. Терещенко, И. В. Комаров, К. И. Никитин, У. В. Полякова