

УДК 621.3.048

## ЛАЗЕРНО-ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ ДЕФЕКТНОСТИ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

© 2022 г. В. А. Голенищев-Кутузов<sup>1</sup>, А. В. Голенищев-Кутузов<sup>1</sup>, А. В. Семенников<sup>1</sup>, \*,  
Р. И. Калимуллин<sup>1</sup>, Д. А. Иванов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
“Казанский государственный энергетический университет”, Казань, Россия

\*E-mail: [catpocbe@gmail.com](mailto:catpocbe@gmail.com)

Поступила в редакцию 30.06.2022 г.

После доработки 15.07.2022 г.

Принята к публикации 22.07.2022 г.

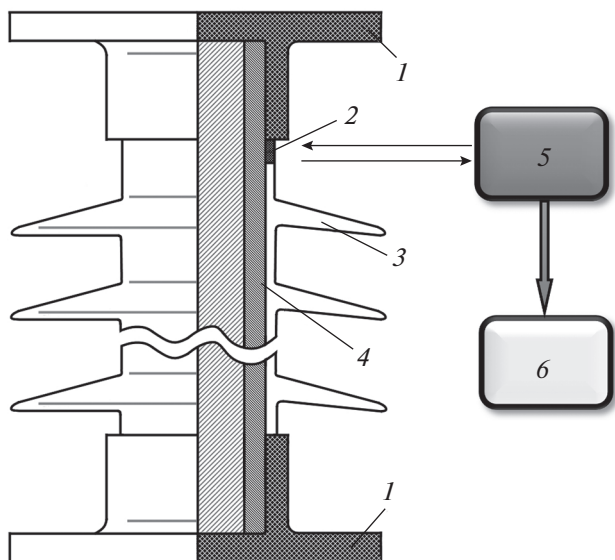
Рассмотрены особенности визуализации и измерения остаточных частичных зарядов, накопленных на дефектах диэлектрического высоковольтного оборудования в процессе эксплуатации, с использованием эффекта Поккельса. С помощью сканирующих остросфокусированных лазерных пучков установлено влияние электрических полей ранее накопленных на дефектах частичных зарядов на скорость старения высоковольтных изоляторов.

DOI: 10.31857/S0367676522110151

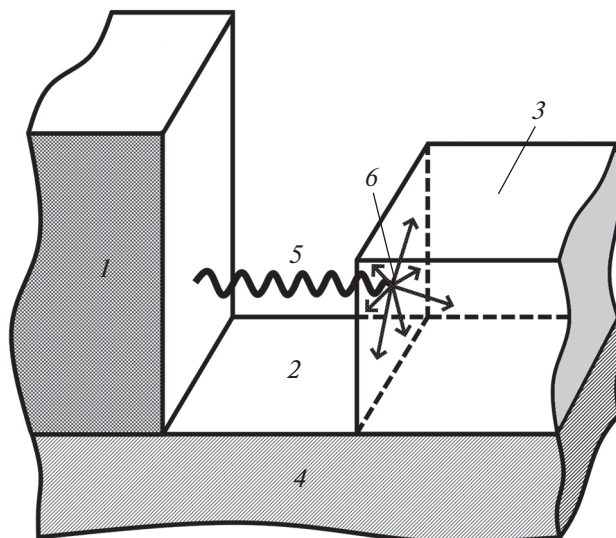
В условиях эксплуатации высоковольтного диэлектрического оборудования воздействие электрических полей с высокой напряженностью приводит к возникновению частичных разрядов (ЧР), т.е. локальных электрических разрядов в местах дефектов, образованных поверхностными или объемными газовыми полостями. Такие ЧР наиболее характерны для высоковольтных изоляторов (ВИ), вводов и переключателей. В последнее десятилетие регистрация набора характеристик ЧР стало одним из основных методов диагностики рабочего состояния высоковольтных диэлектрических элементов при плановых ремонтах или обследовании. К основным экспериментальным методам можно отнести электрический, электромагнитный, акустический и тепловизионный с последующей компьютерной обработкой полученных результатов [1, 2]. Вследствие проблем разброса (стохастичности) получаемых усредненных результатов, используемые ранее методы не позволяли определять конкретный вклад различных ЧР в процессы старения ВИ [3–5]. В настоящее время намечился прогресс в измерении локальных характеристик ЧР и анализе их влияния на электрическую устойчивость различных типов (и особенно полимерных) ВИ. Его можно связать с разработкой более чувствительных и пространственно разрешенных в пределах дефектов измерений, основанных на использовании бесконтактных электрооптических методов [6–10]. Важным элементом использования сканирующих узко сфокусированных лазерных пучков стала возмож-

ность обнаружения неоднородностей в распределении остаточных поверхностных зарядов по металлической и диэлектрической поверхностям дефекта [11]. Особое внимание в ранее разработанном оптоэлектронном методе было обращено на использование в нем активных оптических материалов, обладающих сильным линейным электрооптическим эффектом. Следствием эффекта Поккельса в оптических кристаллах является двулучепреломление. Именно такие кристаллы типа  $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$  (BSO) были использованы уже в первых работах по изучению поверхностного распределения зарядов в полостях дефектов, поскольку их чувствительность к плотности поверхностных зарядов превышала  $1 \text{ пКл/см}^2$  с пространственным разрешением не ниже  $200 \text{ мкм}$  [7]. Однако на протяжении последних лет [12–16] измерение временного и пространственного распределения остаточных полей, наведенных предыдущими ЧР, проводилось только на искусственно сформированных в диэлектрических материалах дефектах в виде неплотного контакта между металлическим высоковольтным электродом, диэлектрическим слоем с отверстием, имитирующим дефект, и заземленным электродом.

Нами впервые были выполнены эксперименты по изучению пространственной и временной зависимости остаточных зарядов на диэлектрической поверхности наиболее опасного дефекта реальных ВИ – между металлическим электродом и диэлектрическим стержнем при наличии газового промежутка. Газовый промежуток можно рас-



**Рис. 1.** Схема лазерно-электрического устройства при исследовании опорного полимерного изолятора: 1 – металлические фланцы изолятора, 2 – полость дефекта, 3 – защитная диэлектрическая оболочка с ребрами, 4 – стеклопластиковая труба, 5 – лазерный излучатель с поляризационным дискриминатором, 6 – фотоприемник.



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

смагивать в виде замкнутой полости, обладающей пониженной устойчивостью к ЧР, который определяет вероятность последующего электрического пробоя [9]. Подобный вид дефекта вполне эквивалентен рассмотренному в работе модельному дефекту [7], но при изучении серии ВИ может иметь место большее разнообразие форм и размеров полостей дефектов.

В наших экспериментах использовались короткие импульсы ( $10^{-8}$ – $10^{-9}$  с) второй гармоники лазера на иттрий-алюминиевом гранате с длиной волны 532 нм (рис. 1), которые через поляризационный дискриминатор фокусировались в малый диаметр и через волоконный световод, соединенный с фотоприемником, выполнялось сканирование диэлектрической поверхности газовой полости и газового промежутка (рис. 2). Измерение индуцированного ЧР поля выполнялось с помощью тонкой пластины сегнетоэлектрического кристалла BSO, обладающего сильным электрооптическим эффектом (оксид кремния и висмута). В случае проявления линейного эффекта Поккельса изменение фазы поляризованного оптического пучка  $\Phi$  определялось плотностью поверхностных зарядов  $\sigma$ :

$$\Phi = \frac{2\pi n_0^3 r d \sigma}{\lambda \epsilon_0 \epsilon}$$

где  $n_0$  – коэффициент преломления,  $r$  – соответствующий геометрии кристалла электрооптический коэффициент,  $d$  – толщина кристалла.

Таким методом возможно было определять характеристики каждого ЧР, синхронизированные с моментом подачи каждого периода переменного высокого напряжения. Причем было установлено различие в процессе прохождения импульса ЧР через газовую полость, а затем через диэлектрическую поверхность дефекта. На первом этапе ЧР в виде стримера распространяется вдоль приложенного электрического поля и состоит из свободных электронов, а также из положительных и отрицательных ионов. На втором этапе ЧР могут распространяться на всю плоскость диэлектрического стержня изолятора, в то время как на первом этапе стример занимает только часть сечения газовой полости. Однако увеличение размера полости дефекта, приводящее к повышению скорости распространения стримера и количества индуцированных электронов, также повышает интенсивность мощных ЧР.

Поскольку скорость движения электронов на порядок превышает скорость ионов, то стримеры состоят в основном из электронов. На втором этапе поток заряженных частиц ЧР переходит на диэлектрическую поверхность дефекта и может значительно расширяться в пределах всей поверхности дефекта. На этом этапе возникают остаточные заряды, образованные положительными и отрицательными ионами (рис. 3). За счет

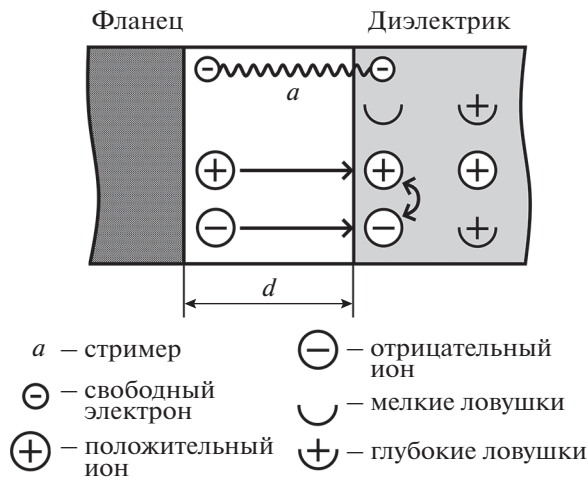


Рис. 3. Диаграмма перемещения индуцированных зарядов в полости дефекта.

повышения интенсивности ЧР на поверхности возникает дополнительное оптическое излучение в ультрафиолетовой области до момента рекомбинации положительных и отрицательных ионов на диэлектрической поверхности.

Значительное возрастание интенсивности ЧР в отрицательной части каждого периода приложенного напряжения вызвано, на наш взгляд, несколькими факторами (рис. 3): возрастанием площади самого ЧР на диэлектрической поверхности, накоплением зарядов от предыдущих ЧР, а также возрастанием поверхностной проводимости. Именно их совокупность создает стохастичность в параметрах последовательности ЧР. Особенно важным в таком процессе является возникновение мощных ЧР ( $q \geq 5-10$  нКл) при сложении в фазовом интервале ( $180^\circ-240^\circ$ ) напряженностей приложенного и индуцированного поля предыдущих ЧР. Постепенное возрастание таких мощных ЧР, по-видимому, является главной причиной ускоренного старения изоляции высоковольтных энергетических систем. Поскольку такие мощные ЧР возникают не более одного за период приложенного высокого напряжения, то их обнаружение было практически невозможным при использовании усредненных методов регистрации вследствие стохастичности их характеристик.

Таким образом, использование в разработанном методе электрооптического эффекта, позволило нам определять интенсивности и распределение ЧР на поверхностных дефектах в ВИ, и более точно оценить степень их работоспособности и остаточный ресурс.

Разработанный лазерно-электрический метод контроля дефектности высоковольтных изоляторов, основанный на использовании сегнетоэлек-

трического кристалла BSO в качестве электрооптического датчика, используется в лабораторных условиях для изучения электрофизических процессов в различных диэлектрических материалах и изделиях под воздействием изменяемых высоких напряжений. Данный метод может найти практическое применение при исследовании электрофизических и физико-химических процессов в изолирующих материалах в условиях эксплуатации и разработки на этой основе новых или модифицированных материалов, более совершенных изолирующих конструкций.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках темы государственного задания на выполнение НИР по теме “Распределенные автоматизированные системы мониторинга и диагностики технического состояния воздушных линий электропередачи и подстанций на основе технологии широкополосной передачи данных через линии электропередач и промышленного интернета вещей” (соглашение № 075-03-2022-151 от 14.01.2022).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коробейников С.М., Овсянников А.Г. Физические механизмы частичных разрядов: монография. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2021. 269 с.
2. Голенищев-Кутузов В.А., Абдуллазянов Э.Ю., Голенищев-Кутузов А.В. и др. // В кн.: Новые технологии, материалы и оборудование в энергетике. Диагностика твердотельной изоляции высоковольтного энергетического оборудования. Т. 3. Казань: Изд-во КГЭУ, 2018. С. 44.
3. Кучинский Г.С. Частичные разряды в высоковольтных конструкциях. Ленинград: Энергия, 1979. 224 с.
4. Кириленко В.М. // В кн.: Электрофизическая аппаратура и электрическая изоляция. Частичные разряды как основной фактор разрушения твердых диэлектриков (основы теории). М.: Энергия, 1970. С. 447.
5. Kawasaki T., Terashima T., Zhu Y., Takada T. // J. Phys. D. 1994. V. 27. P. 1646.
6. Zhu Y., Takada T., Tu D. // J. Phys. D. 1995. V. 28. P. 1468.
7. Wu K., Pan Ch., Meng Y., Cheng Y. // IEEE. Trans. Diel. Electr. Insul. 2013. V. 20. No. 2. P. 612.
8. Голенищев-Кутузов В.А., Голенищев-Кутузов В.А., Марданов Г.Д., Семенников А.В. // Изв. РАН. Сер. физ. 2019. Т. 83. № 1. С. 125; Golenishchev-Kutuzov A.V., Golenishchev-Kutuzov V.A., Mardanov G.D., Semennikov A.V. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2019. V. 83. No. 3. P. 353.
9. Гайворонский А.С. // Главн. энергетик. 2010. № 2. С. 23.
10. Ilias H.A., Tunio M.A., Mokhlis H. et al. // IEEE. Trans. Diel. Electr. Insul. 2015. V. 22. No. 1. P. 463.

11. Голенищев-Кутузов А.В., Исмагилов И.Р., Калимуллин Р.И., Семенников А.В. // *Машиностр. и инж. образование*. 2014. № 3. С. 32.
12. Pan Ch., Wu K., Meng Y. et al. // *IEEE. Trans. Diel. Electr. Insul.* 2017. V. 24. No. 1. P. 217.
13. Li s., Li J. // *High Voltage*. 2017. V. 2. No. 2. P. 82.
14. Stollenwerk L., Laven J.G., Purwins H.G. // *Phys. Rev. Lett.* 2007. V. 98. No. 25. Art. No. 255001.
15. Zhao Z., Huang D.D., Wang Y.N., Li J.T. // *Plasma Sources Sci. Technol.* 2020. V. 29. Art. No. 015016.
16. Pan Ch., Wu K., Meng Y. et al. // *IEEE. Trans. Diel. Electr. Insul.* 2020. V. 27. No. 6. P. 1951.

## Laser-electrical method for defect control of high-voltage dielectric elements

V. A. Golenishchev-Kutuzov<sup>a</sup>, A. V. Golenishchev-Kutuzov<sup>a</sup>, A. V. Semennikov<sup>a, \*</sup>,  
R. I. Kalimullin<sup>a</sup>, D. A. Ivanov<sup>a</sup>

<sup>a</sup>*Kazan State Power Engineering University, Kazan, 420066 Russia*

<sup>\*</sup>*e-mail: campoce6e@gmail.com*

The features of visualization and measurement of residual partial charges accumulated on defects in dielectric high-voltage equipment during operation using the Pockels effect are considered. With the help of scanning sharply focused laser beams, the influence of electric fields previously accumulated on defects of partial discharges on the aging rate of high-voltage insulators has been established.