

## КОМПЛЕКСНАЯ БЕСКОНТАКТНАЯ ДИАГНОСТИКА РАБОТОСПОСОБНОСТИ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИЗОЛЯТОРОВ

© 2019 г. А.В. Голенищев-Кутузов<sup>1,\*</sup>, В.А. Голенищев-Кутузов<sup>1</sup>, Д.А. Иванов<sup>1</sup>,  
Г.Д. Марданов<sup>1,\*\*</sup>, А.В. Семенников<sup>1,\*\*\*</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», Россия 420066 Казань,  
ул. Красносельская, 51

E-mail: \*alex.kutuzov@mail.ru, \*\*mardanov1992@mail.ru, \*\*\*camposebe@gmail.com

Поступила в редакцию 23.04.2019, после доработки 26.04.2019  
принята к публикации 08.05.2019

С помощью разработанного комплексного способа бесконтактной дистанционной диагностики работоспособности высоковольтных изоляторов, включающего первоначальное обнаружение локальных областей с повышенными градиентами электрического поля и измерение набора характеристик частичных разрядов, были исследованы особенности дефектов на стержне и контакте «стержень-оконцеватель» полимерных и фарфоровых изоляторов. Обнаружено излучение сверхбольших частичных разрядов и исследованы их особенности. По результатам измерений была построена схема электрофизических процессов, сопровождающих излучение сверхбольших частичных разрядов, и установлены причины их возникновения.

*Ключевые слова:* дистанционная диагностика, высоковольтные изоляторы, градиенты электрического поля, сверхбольшие частичные разряды, дефекты.

DOI: 10.1134/S0130308219080049

### ВВЕДЕНИЕ

В последнее десятилетие особое внимание в электроэнергетике как в России, так и за рубежом, было обращено на проблему возрастания числа аварий в высоковольтном оборудовании, возникших из-за повреждений высоковольтных изоляторов (ВИ). Анализ аварий на подстанциях и открытых распределительных устройствах показал, что повреждения ВИ в большинстве случаев вызваны не только естественным старением в приложенном электрическом поле (ЭП), но и перенапряжениями, а также наличием первоначальных дефектов при изготовлении ВИ. Вследствие этого в последние годы разрабатывались различные методы бесконтактной диагностики ВИ с целью выявления дефектов на ранней стадии их развития [1—4]. Особое внимание было обращено на метод частичных разрядов (ЧР), поскольку их характеристики позволяют получить информацию о параметрах дефектов [5, 6]. К сожалению, при дистанционной диагностике с использованием метода ЧР с увеличением расстояния между датчиками и ВИ уменьшается чувствительность и регистрируются сигналы только от крупных дефектов. Это обстоятельство было подтверждено впервые выполненными обследованиями ВИ на подстанциях Татэнерго с помощью двухканального дистанционного метода с использованием электромагнитного и акустического датчиков [7], а также при дистанционной диагностике полимерных ВИ тепловизионными датчиками [1].

Более того, в ряде недавних теоретических работ [8—12] моделировалась возможность возникновения сильных градиентов ЭП, индуцированных ЧР на дефектах в диэлектриках. По нашим предварительным оценкам, подобные индуцированные градиенты полей (ИГП) могут превосходить по напряженности значения ЭП в дефектных полостях ВИ при нормальном рабочем напряжении и создавать сверхбольшие ЧР (СБЧР), вызывающие разрастание дефектов, особенно в полимерных ВИ.

В качестве модельных объектов в этих работах рассматривались только простейшие структуры в виде полимерных блоков, содержащих заполненные воздухом полости. Однако при таком моделировании практически не обращалось внимание на специфику возникновения мощных ЧР и их влияние на увеличение существующих и зарождение новых дефектов. При проведении измерительных экспериментов предполагалось применение контактного способа измерения параметров ЧР.

Поскольку ранее компьютерная симуляция процессов распространения ЧР в диэлектрических воздушных полостях не сопровождалась их экспериментальным подтверждением, то целью нашей работы стало изучение влияния ЧР на физическое состояние обнаруженных ранее дефектов в ВИ [7]. Для выполнения поставленной цели в разработанный нами измерительный комплекс добавлен

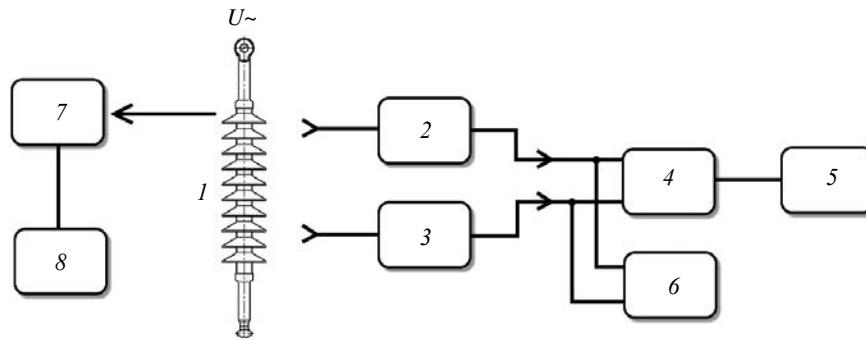


Рис. 1. Блок-схема дистанционного двухканального аппаратно-программного комплекса:

1 — высоковольтный изолятор; 2 — электромагнитный датчик; 3 — акустический датчик; 4 — аналого-цифровой преобразователь; 5 — персональный компьютер; 6 — двухканальный осциллограф; 7 — электрооптический датчик; 8 — измеритель ИГП.

блок бесконтактного измерения локальных ИГП и поля ЧР, основанный на электрооптическом эффекте с применением фотонного кристалла в качестве датчика напряженности приложенного поля (рис. 1) [13, 14]. Для большей достоверности при оценке вида и параметров дефектов была усовершенствована физическая модель формирования импульсов ЧР в зависимости от вида и расположения дефектов в реальных ВИ. Также дополнена компьютерная программа, позволяющая наиболее полно анализировать характеристики ЧР при их детектировании одновременно электромагнитным и акустическим датчиками, а также выделять наиболее мощные ЧР. Были разработаны измерительный комплекс для изучения влияния дефектов на работоспособность ВИ и многоступенчатая программа, включающая первоначальное обнаружение локальных областей ВИ с повышенными ИГП, измерение набора характеристик ЧР двумя датчиками, определение вида и места расположения основных дефектов ВИ, оценка влияния мощных ЧР на динамику дефектов в ВИ.

### АППАРАТУРА, ОСОБЕННОСТИ МЕТОДИКИ ИЗМЕРЕНИЙ И ОБРАЗЦЫ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИЗОЛЯТОРОВ

В разработанном комплексе локация областей с повышенной напряженностью ЭП и измерение градиентов напряженности поля в ВИ (1) осуществляются электрооптическим датчиком (2) (рис. 2) по значению изменения коэффициента отражения лазерного пучка от указанного датчика, которое пропорционально напряженности ЭП. С использованием электрооптического датчика (2), размещенного на диэлектрической штанге (3) и соединенного через поляризационный дискриминатор и волоконный световод (4) с лазерным излучателем (6) и фотоприемником (7),

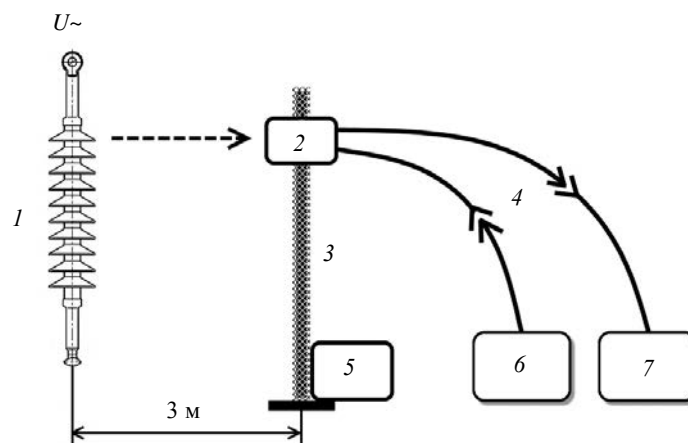


Рис. 2. Общая схема измерений градиентов электрического поля:

1 — высоковольтный изолятор; 2 — электрооптический датчик; 3 — диэлектрическая штанга; 4 — волоконный световод; 5 — блок перемещения; 6 — лазерный излучатель; 7 — фотоприемник.

проводят сканирование по поверхности высоковольтного изолятора. Одновременно с помощью блока перемещения (5) и разработанной компьютерной программы регистрируют пространственное положение электрооптического датчика на поверхности изолятора и соответствующую ему напряженность электрического поля; измеряют нормальные и тангенциальные компоненты градиентов напряженности электрического поля. Далее пространственное распределение градиентов поля сравнивают с ранее записанным распределением поля для эталонного высоковольтного изолятора.

Электрооптический датчик состоит из сегнетоэлектрического кристалла, на поверхности которого сформирована периодическая доменная структура (ПДС (фотонный кристалл)). Для повышения чувствительности и разрешающей способности при локации градиентов напряженности поля используются резонансные свойства ПДС для данной длины волны лазерного излучателя (эффект Поккельса).

Условие максимального отражения лазерной волны с длиной  $\lambda_0$  от ПДС выполняется при равенстве

$$\lambda_0 = 2nD,$$

где  $n$  — показатель преломления;  $D$  — период ПДС.

Сдвиг резонансной длины волны датчика в электрическом поле  $E$

$$\lambda_m = (\lambda_0 - \lambda_E) = n^3 r D E$$

приводит к изменению коэффициента отражения  $R$  в зависимости от  $\lambda_m$  (рис. 3).

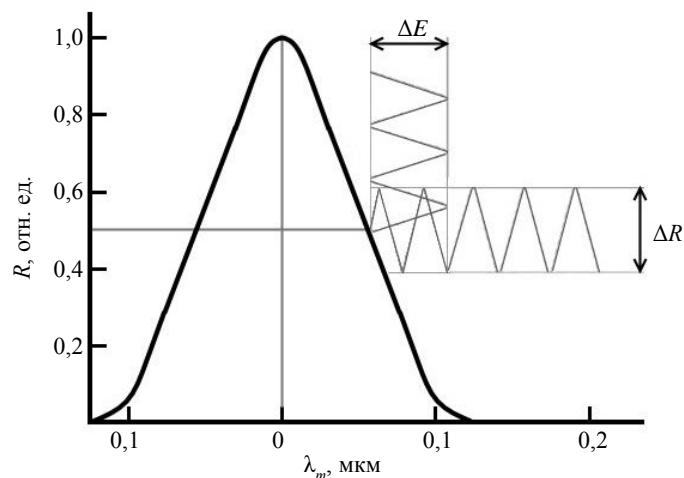


Рис. 3. Зависимость значения коэффициента отражения  $R$  от изменения резонансной длины волны.

Если длину волны лазерного излучения  $\lambda_m$  настроить на середину склона спектральной кривой отражения, соответствующей значению  $R_{\max}/2$ , то переменное электрическое поле будет создавать соответствующее изменение коэффициента отражения. Использование практически линейного отрезка  $dR/d\lambda_m$  позволяет в линейном масштабе определять значения поля  $E$ .

Испытания в стендовом варианте показали, что разрешающая способность по пространственному обнаружению градиентов ЭП, определяемая длиной и периодом доменов в ПДС, составляет порядка 1,5-2 мм, а точность измерения градиентов — не менее 50 В/см. Датчик позволяет не только определять локальные градиенты приложенного ЭП, но и регистрировать их динамические изменения в зависимости от фазы переменного напряжения  $\Delta E/\Delta \varphi$ , соответствующие характеристикам ЧР, измеряемым электромагнитным и акустическим датчиками.

Таким образом, разработанный комплексный метод диагностики ВИ впервые позволил определять вид, место расположения и степень влияния дефектов на работоспособность ВИ [13] как в стендовом, так и полевом вариантах.

Как уже отмечалось ранее [7], при функционировании ВИ наиболее опасны дефекты на контакте между стержнем и оконцевателем (электродом), а также и на стержне. В первом случае дефект можно представить в виде полости, заполненной воздухом и ограниченной с одной стороны

диэлектрической поверхностью, а с другой — металлической поверхностью, во втором случае — полостью, ограниченной двумя диэлектрическими поверхностями. В обоих видах дефектов можно приближенно считать, что превышение поля в полости ( $E_{\text{п}}$ ) по отношению к приложенному полю в диэлектрике ( $E_{\text{д}}$ )  $E_{\text{п}}/E_{\text{д}}$  пропорционально отношению диэлектрических проницаемостей  $\epsilon_{\text{д}}/\epsilon_{\text{в}}$ .

Для стендового исследования процессов взаимодействия приложенного поля  $E_{\text{п}}$  с дефектом были визуально отобраны полимерные ВИ ЛК 70/35, снятые с эксплуатации при плановом обследовании и имевшие дефекты вида «контакт «стержень-оконцеватель»» и «на стержне». Для полевых исследований были выбраны фарфоровые ВИ ИОС 110/400, находящиеся под рабочим напряжением 110 кВ.

Уже в ходе предварительного анализа полученных характеристик ЧР и ИГП с помощью разработанной компьютерной программы были установлены сопоставимость и непротиворечивость выявленных данных с помощью электромагнитных и акустических датчиков. Поэтому на рис. 4 и 5 приведены характеристики ЧР только для электромагнитных датчиков.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Выполненный анализ измеренных характеристик ЧР и локальных ИГП в зависимости от фазы приложенного напряжения (см. рис. 4, 5) позволил получить ряд новых, ранее не выявленных в экспериментах, особенностей ЧР и определить их связь с видами и параметрами дефектов в ВИ. По-видимому, наиболее важным было обнаружение СБЧР, интенсивности которых превышали 1,5-2 нКл. Как следует из наших экспериментов на ВИ ЛК 70/35, их влияния было достаточно для увеличения размеров уже существовавших дефектов и зарождения новых. Анализ

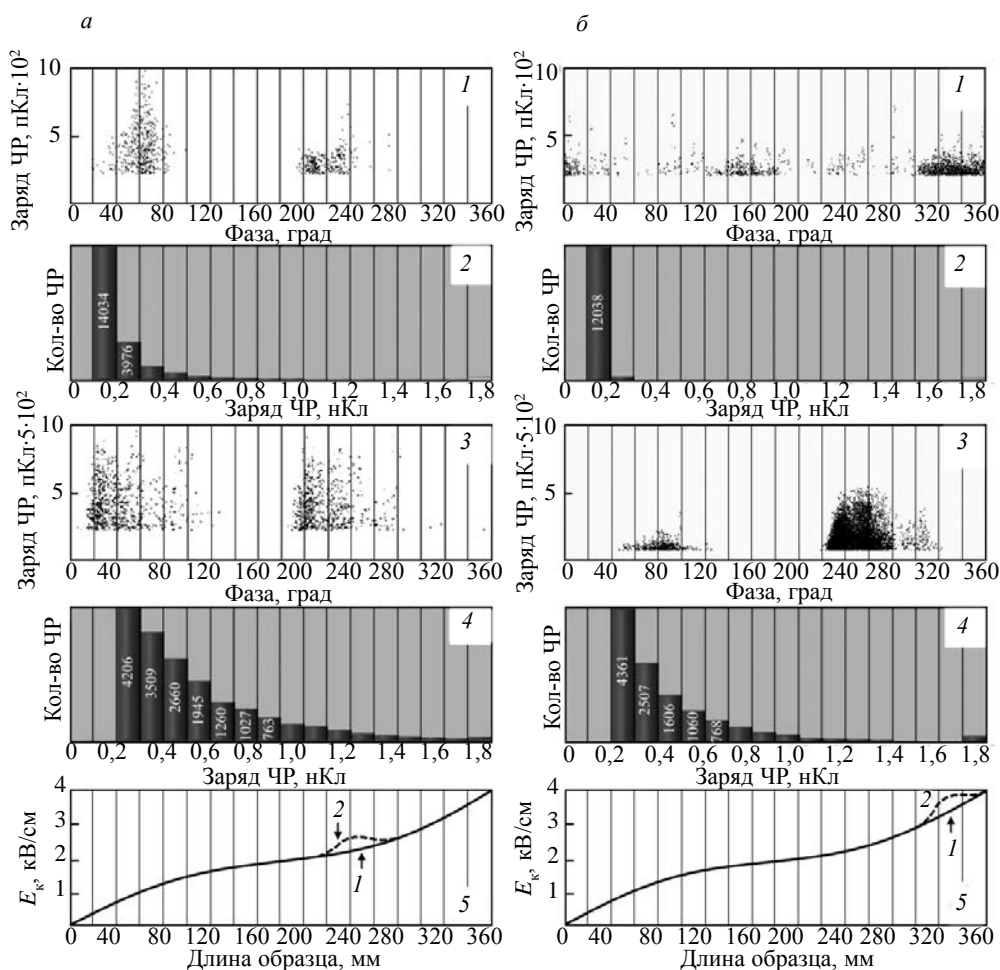


Рис. 4. Параметры ЧР (1—4) и ИГП (5) в полимерных ВИ, измеренные электромагнитным и электрооптическим датчиками соответственно:

а — для образцов с дефектами на стержне; б — с дефектами «стержень-оконцеватель»;  
1, 2 — для малых дефектов; 3, 4 — для больших; 5 — пространственное распределение ИГП.

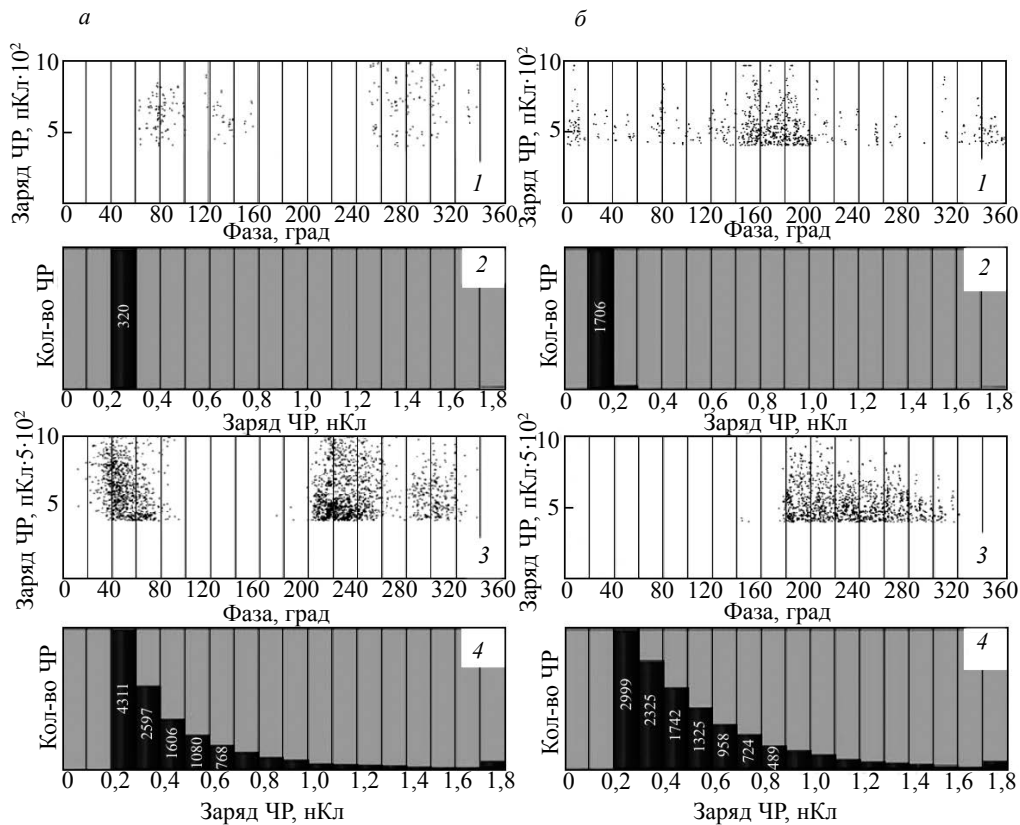


Рис. 5. Параметры ЧР в фарфоровых изоляторах. Все индексы на графиках соответствуют рис. 4.

характеристик ЧР ИГП и визуальное обследование ВИ ЛК 70/35 позволили несколько условно разделить дефекты на малые (*a1*, *b1*) и сверхбольшие (*a3*, *b3*) не только по интенсивности ЧР, но и по распределению количества ЧР в зависимости от интенсивности, представленному на рис. 4 и 5 (*a2* и *b2*, *a4* и *b4*). В образцах ВИ с дефектами на стержне наблюдались в основном одиночные СБЧР с положительной и отрицательной полярностями, а для дефектов «стержень-оконцеватель» — только в отрицательной фазе приложенного напряжения. Причем число СБЧР могло возрастать в каждом периоде с увеличением размера дефекта.

Для образцов ВИ с дефектами на стержне характерны узкие фазовые интервалы излучения СБЧР (рис. 4 и 5 *a3*), а для ВИ с дефектами «стержень-оконцеватель» — более широкие фазовые интервалы излучения (рис. 4 и 5 *b3*).

Приведенные на рис. 4 *a5*, *b5* характеристики пространственного распределения ИГП для ВИ ЛК 70/35 и фазовое изменение индуцированного поля  $E_a$ , представленное на рис. 6 (кривая 4), вполне соответствуют друг другу, что позволило расширить диапазон измеряемых параметров ЧР и ЭП и, таким образом, более точно определять вид дефектов в ВИ.

На основе полученных данных по фазовым характеристикам ЧР и градиентам ЭП была построена схема электрофизических процессов (см. рис. 6), происходящих в полостях обоих дефектов в течение одного периода приложения высокого напряжения, в которой представлены изменения поля  $E_n$  в полости, поля  $E_a$  на диэлектрических поверхностях полости, индуцированного частичными разрядами, и фазовые интервалы генерации ЧР.

До начала излучения импульсов ЧР поле  $E_n$  в полости однородно. С ростом поля  $E_n$ , начиная с нулевой фазы, до достижения условия  $E_n \geq E_n(0-50^\circ)$  ( $E_n$  — поле электрического пробоя) начинается излучение малых ЧР. Оно сопровождается накоплением зарядов на диэлектрических поверхностях полости, которые образуют поле  $E_a$ , противоположное по знаку приложенному полю  $E_n$ . Поле  $E_a$  возрастает с каждым последующим ЧР, пока не превысит поле  $E_n$ , что приведет к прекращению излучения ЧР и дальнейшему росту поля  $E_a$ . Причем вследствие малой электропроводности диэлектрика поле  $E_a$  сохраняется до следующего ЧР. После смены фазы приложенного напряжения при  $180^\circ$  поля  $E_n$  и  $E_a$  становятся одинаковыми по знаку и их векторное сложение  $(E_n + E_a) > E_n$  приводит к излучению СБЧР ( $180-240^\circ$ ).

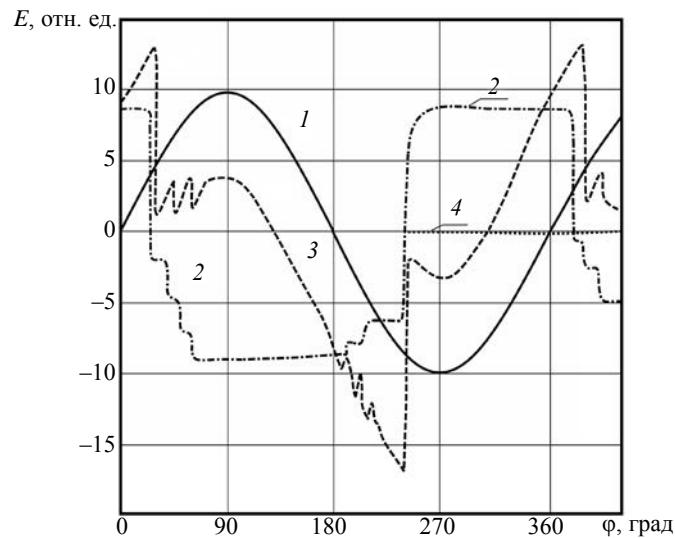


Рис. 6. Диаграмма распределения ЭП в полости дефекта в зависимости от фазы приложенного ЭП:  
 1 — приложение поля  $E_n$  в полости дефекта; 2 — поле индуцированных зарядов  $E_a$  на диэлектрических поверхностях полости;  
 3 — суммарное поле в полости  $E_n \pm E_a = E_c$ ; 4 — изменение поля  $E_c$  в дефекте «стержень-оконцеватель».

В отличие от малых ЧР, сверхбольшие разряды происходят от той поверхности полости, на которой возникают сверхбольшие градиенты ЭП. Такой мощный разряд возможен при большом размере поверхности полости, что и подтверждается в экспериментах. На схеме (см. рис. 6) возникновение отрицательного СБЧР соответствует резкому изменению поля  $E_a$  при  $\varphi \approx 240^\circ$ . Для дефекта с одной диэлектрической поверхностью (контакт «стержень-оконцеватель») процесс излучения СБЧР на этом фазовом цикле ( $\varphi < 270^\circ$ ) заканчивается, а для дефекта с двумя диэлектрическими поверхностями при дальнейшем увеличении фазовых углов происходит накопление зарядов и образование поля  $E_a$  противоположного знака (фазовый интервал  $240\text{—}360^\circ$ ). Этот процесс заканчивается возникновением положительного СБЧР уже в фазовом интервале следующего цикла приложенного напряжения ( $0\text{—}50^\circ$ ).

В соответствии с предложенной нами схемой в каждом цикле поля  $E_n$  с началом малых ЧР возрастает скорость генерации электронов в процессе разряда, что приводит к более ранней фазе начала излучения ЧР и соответствующего поля зарядов на поверхности без изменения их полярности. СБЧР, наоборот, возникают при смене поляризации максимального поля  $E_c$  внутри полости. Причем с ростом размера полости увеличение разрядного промежутка приводит к возрастанию числа и скорости электронов, а следовательно, к большей интенсивности СБЧР и их числа в каждом цикле высокого напряжения.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам выполненных нами экспериментов по изучению дефектов в полимерных и фарфоровых ВИ вначале в стендовом варианте с регулируемым источником высокого напряжения, а затем в полевых условиях, были сделаны следующие выводы: измеренные характеристики ЧР электромагнитным и акустическим датчиками согласуются между собой с точностью до 20-25%. Их фазовое распределение вполне соответствует фазовым изменениям характеристик ИГП, измеренным электрооптическим датчиком, а также градиентам температуры, измеренным тепловизионным датчиком. Для обоих видов дефектов установлены зависимости количества, интенсивности и фазового интервала излучения сверхбольших ЧР от размера дефекта. Причем для дефектов на стержне характерны положительные и отрицательные СБЧР, а для дефектов на контакте «стержень-оконцеватель» — только отрицательные СБЧР. Поскольку именно СБЧР, как показали стендовые измерения, являются основной причиной повреждения ВИ в процессе эксплуатации, то необходимо проводить подобные предварительные испытания на стенде с регулируемым источником высокого напряжения для каждого вида ВИ перед их постановкой в эксплуатацию и использовать полученные характеристики для диагностики состояния дефектов в процессе эксплуатации [15].

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 18-08-00203.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Гайворонский А.С.* Повреждения полимерных изоляторов и их диагностика при эксплуатации // Главный энергетик. 2010. № 2. С. 23—27.
2. *Salustiano R., Capelini R.M., de Abreu S.R., Martinez M.L.B., Tavares I.C., Ferraz G.M.F., Romano M.A.A.* Development of new methodology for insulators inspections on aerial distribution lines based on partial discharge detection tools / ICHVE International Conference on High Voltage Engineering and Application. 8—11 Sept. 2014. IEEE, 2014. P. 1—4.
3. *Голенищев-Кутузов А.В., Голенищев-Кутузов В.А., Марданов Г.Д., Хуснутдинов Р.А., Евдокимов И.А.* Дистанционная диагностика высоковольтных изоляторов // Дефектоскопия. 2016. № 8. С. 75—82.
4. *Bartnics R.* Partial discharges. Their mechanism, detection and measurement // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2002. V. 9, No. 5. P. 763—808.
5. *Вдовико В.П.* Частичные разряды в диагностировании высоковольтного оборудования. Новосибирск: Наука, 2007. 156 с.
6. *Кинит Н.В., Петрунько Н.Н.* Об оценке параметров частичных разрядов // Электричество. 2016. № 6. С. 51.
7. *Голенищев-Кутузов А.В., Голенищев-Кутузов В.А., Иванов Д.А., Марданов Г.Д., Семенников А.В.* Дистанционная диагностика дефектов в высоковольтных изоляторах в процессе эксплуатации // Дефектоскопия. 2018. № 10. С. 10—14.
8. *Ilias H.A., Chen G., Lewin P.L.* The influence of spherical cavity surface charge distribution on the sequence of partial discharge events // Journal of Physics D: Applied Physics. 2011. V. 44. No. 24. P. 245202.
9. *Wu K., Pan C., Meng Y., Cheng Y.* Dynamic behavior of surface charge distribution during partial discharge sequences // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2013. V. 20. No. 2. P. 612—619.
10. *Kupershtokh A.L., Karpov D.I.* Simulation of waves of partial discharges in a chain of gas inclusions located in condensed dielectrics // Journal of Physics: Conference Series. 2016. V. 754. P. 102006.
11. *Villa A., Barbieri L., Gondola M., Leon-Garzon A.R., Malgesini R.* A PDE-based partial discharge simulator // Journal of Computational Physics. 2017. V. 345. P. 687—705.
12. *Callender G., Golosnoy I.O., Rapisarda P., Lewin P.L.* Critical analysis of partial discharge dynamics in air filled spherical voids // Journal of Physics D: Applied Physics. 2018. V. 51. No. 12. P. 125601.
13. *Голенищев-Кутузов А.В., Голенищев-Кутузов В.А., Марданов Г.Д., Хуснутдинов Р.А.* Способ бесконтактной дистанционной диагностики состояния высоковольтных изоляторов / Патент № 2597962. РФ. 20.09.2016.
14. *Голенищев-Кутузов А.В., Голенищев-Кутузов В.А., Марданов Г.Д., Семенников А.В.* Датчик высоких электрических полей на фотонном кристалле // Изв. РАН. Серия физическая. 2019. Т. 83. № 1. С. 125—127.
15. *Голенищев-Кутузов А.В., Голенищев-Кутузов В.А., Иванов Д.А., Марданов Г.Д., Семенников А.В.* Способ бесконтактной дистанционной диагностики состояния высоковольтных изоляторов / Патент на изобретение № 2679759. РФ. 21.03.2018.