

УДК 621.3.048

## КОМПЛЕКСНАЯ ДИАГНОСТИКА ДЕФЕКТОВ В ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИЗОЛЯТОРАХ

© 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>, \*, Ю. В. Ваньков<sup>1</sup>

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

\*E-mail: alex.kutuzov@mail.ru

Поступила в редакцию 20.06.2019 г.

После доработки 20.07.2019 г.

Принята к публикации 27.08.2019 г.

Разработан комплексный метод, позволяющий дистанционно с одновременным использованием электромагнитного, акустического и электрооптического датчиков измерять набор характеристик частичных разрядов и повышенных градиентов электрического поля под рабочим напряжением и таким образом определять вид, место расположения дефектов и степень их влияния на работоспособность высоковольтных изоляторов.

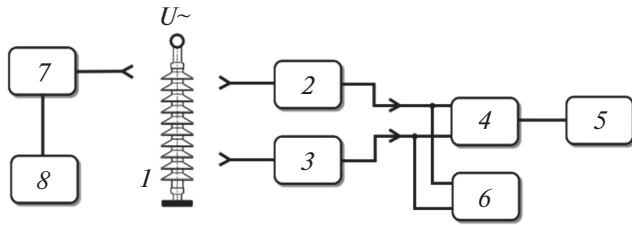
DOI: 10.1134/S0367676519120068

При длительном воздействии высокого напряжения и неблагоприятных условий эксплуатации в высоковольтных изоляторах (ВИ) возникают различные дефекты, приводящие в конечном итоге к электрическому пробое и даже полному их разрушению. Полному пробое, как правило, предшествуют микропробой или электрические разряды, которые шунтируют лишь часть изоляции между электродами, получившие название частичных разрядов (ЧР). ЧР являются результатом возникновения в процессе эксплуатации локальных повышений напряженности электрического поля (ЭП), которые могут превышать электрическую прочность ВИ. Существующие методы измерения различных характеристик ЧР (акустический, электромагнитный, оптический) дают возможность обнаруживать дефекты на ранней стадии их возникновения, отслеживать их развитие и, таким образом, оценивать их текущее состояние, что отражено в отечественных и международных стандартах [1–5]. В них предусматриваются только периодические испытания изоляции высоковольтного энергетического оборудования с выводом его из эксплуатации. Однако сейчас в связи со старением оборудования возникла существенная необходимость дистанционного бесконтактного контроля рабочего состояния высоковольтной изоляции (и особенно ВИ, на что неоднократно указывалось в ведомственных документах). Результаты ранних исследований показали [6–10], что успешный контроль состояния ВИ в процессе эксплуатации возможен только при одновременном и синхрон-

ном применении нескольких методов. Однако в настоящее время практически все выпускаемые диагностические приборы рассчитаны на использование одного метода – как правило, оптического, акустического или термографического. Более того, отсутствуют нормативные материалы по методикам дистанционного контроля ВИ.

На кафедре промышленной электроники Казанского государственного энергетического университета на основе многолетних исследований особенностей контактного и бесконтактного методов контроля был разработан дистанционный метод и соответствующая автоматизированная система для бесконтактного определения рабочего состояния ВИ, позволяющая выполнять обнаружение дефектов, определять их вид, места расположения и влияние на дальнейшую работоспособность до постановки ВИ в эксплуатацию, в процессе эксплуатации и после эксплуатации [11–15].

При выполнении измерений характеристик ЧР используется разработанный двухканальный аппаратно-программный комплекс (рис. 1). В нем электромагнитные и акустические импульсы ЧР после регистрации соответствующими активными антеннами усиливаются и преобразовываются в электромагнитные импульсы, которые после аналого-цифрового преобразования поступают в компьютер. С помощью разработанной программы происходит сбор, запись и обработка информации об амплитуде, частоте повторения и фазе сигналов. Накопление сигналов по узким фазовым интервалам



**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 ПГП.

(порядка  $20^\circ$ ) происходит в течение 18 с, что вполне соответствует стохастическому характеру возникновения ЧР. Процесс обработки сигналов ЧР заканчивается построением следующих характеристик: амплитуды и количества импульсов в каждом фазовом интервале и распределение количества импульсов по амплитудам ЧР. Полученное фазовое распределение параметров импульсов сравнивается с ранее записанным распределением параметров импульсных сигналов для (бездефектного) ВИ того же типа.

Определение повышенных градиентов поля (ПГП) выполняется либо на стенде кафедры с использованием регулируемого источника высокого напряжения УКД-70, либо непосредственно на подстанциях с помощью диэлектрической штанги.

Испытания разработанного измерительного комплекса и оригинальной компьютерной программы обработки полученных результатов были проведены в стендовом варианте на кафедре ПЭ КГЭУ и при полевых обследованиях фарфоровых и полимерных изоляторов на ряде подстанций Татэнерго. В ходе испытаний была установлена возможность измерения локальных перенапряжений и получения набора обобщенных характеристик ЧР, причем достоверность измеренных характеристик ЧР подтверждается сходностью данных, полученных электромагнитным и акустическим датчиками.

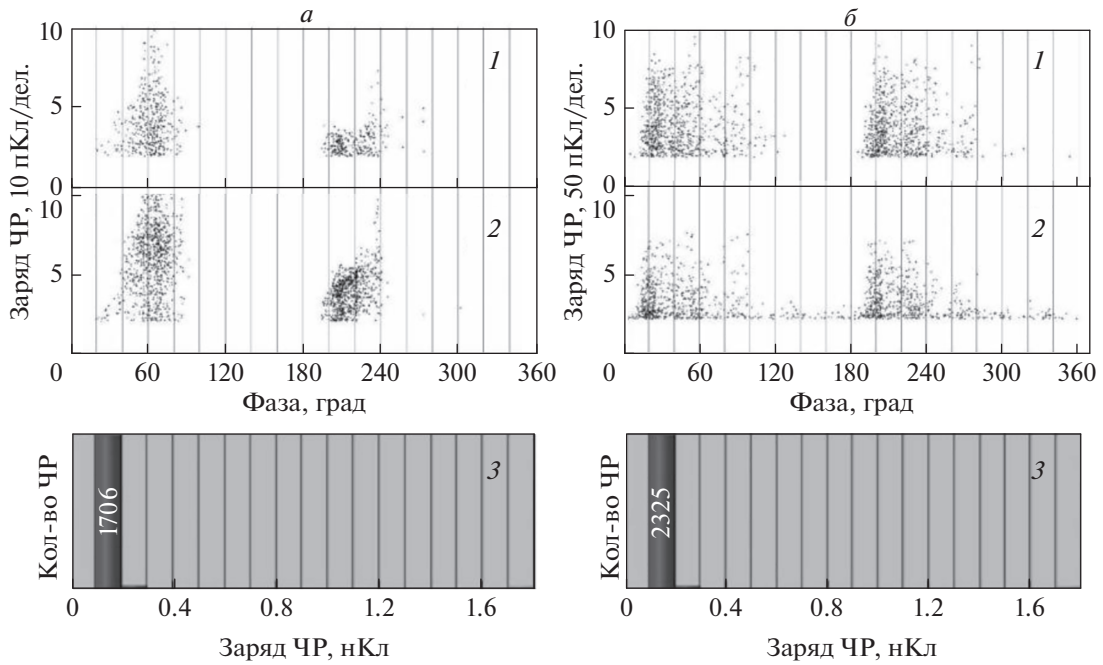
Выполненный более полный анализ параметров характеристик ЧР в сочетании с визуальным осмотром ВИ позволил разделить их на две группы по набору наиболее существенных отличий в параметрах характеристик ЧР: работоспособные и неработоспособные ВИ. Диагностические признаки, отличающие работоспособные ВИ от неработоспособных, нуждающихся в замене, следующие: возникновение ЧР с интенсивностью, значительно (в 2–3 раза) превышающей порог безопасности при номинальном рабочем напряжении; сдвиг фазовых интервалов, в которых интенсивность и количество импульсов ЧР наиболее велики, в сторону меньших фазовых углов; увеличение числа более мощных ЧР в общем количестве ЧР за фазовые интервалы, соответствующие наиболее мощным ЧР; наличие локальных ПГП.

Примеры полученных обобщенных характеристик ЧР и перенапряжений представлены на рис. 2 и в табл. 1, в которой приведены параметры наиболее интенсивных ЧР, составляющих ~10% от общего количества ЧР в каждом фазовом интервале. К работоспособным относятся ВИ № 1–5, а к неработоспособным – ВИ № 6–7. Между группами сдвиг фазы излучений ( $\Delta\varphi$ ) составляет 20–30%, возрастание интенсивности ( $q$ ) достигает 2–3 раз, а количество ЧР увеличивается в 2–3 раза. Различия в величинах параметров ЧР за период регистрации в течение 10 мин не превышало 2–3% для обоих датчиков.

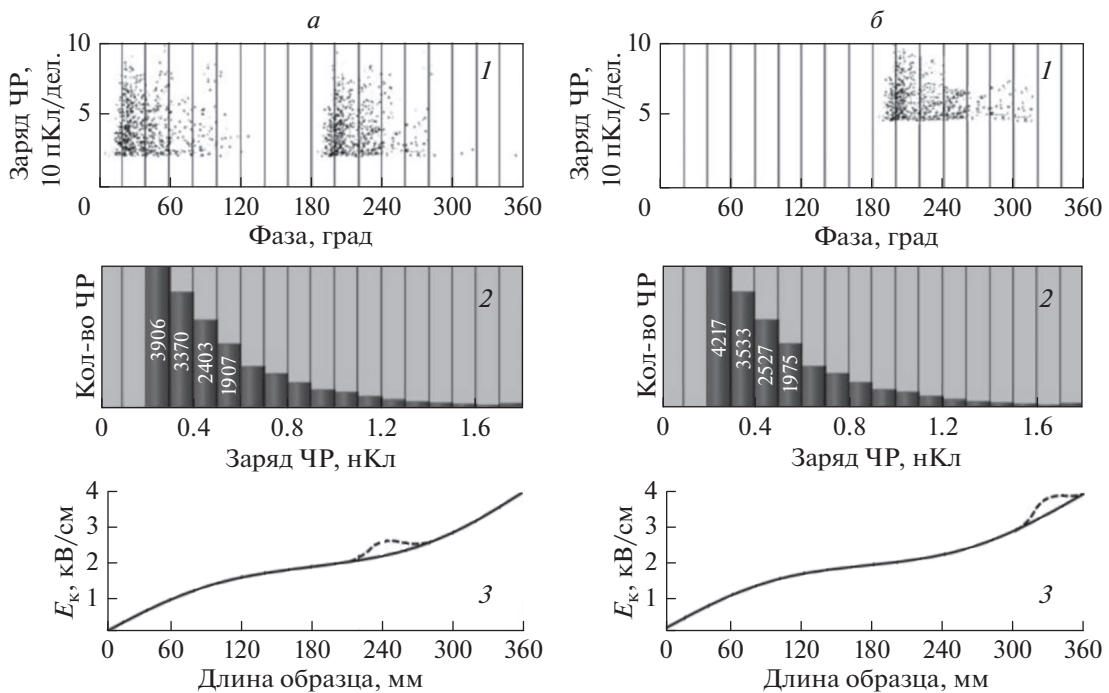
Оба вида малых дефектов характеризуются узкими мощными излучениями интенсивности  $N(q)$ , причем они совпадают для электромагнитных и акустических датчиков (рис. 2), но различаются по параметрам излучения (по фазовым интервалам и интенсивностям ЧР, по формам импульсов, по степени разогрева части стержня). С возрастанием размеров дефекта “стержень-оконцеватель” (рис. 3) наблюдалось увеличение фазовых интервалов излучения ЧР, возникли более мощные ЧР, и количество отрицательных ЧР возросло по сравнению с положительными ЧР. Одновременно наблюдались разогревы части стержневой изоляторов на расстоянии порядка 10 см вблизи оконцевателя, примерно на  $1\text{--}3^\circ\text{C}$ . По локально-

**Таблица 1.** Параметры характеристик ЧР для серии ВИ

№ ВИ	$\Delta\varphi$	$q$ , пКл	$N$	$\Delta\varphi$	$q$ , пКл	$N$
1	45–65	60	200	220–240	60	1600
2	40–60	60	220	225–235	50	2000
3	50–65	70	200	230–250	60	1900
4	50–65	60	150	220–240	65	1000
5	45–75	70	180	230–250	75	1700
6	40–50	290	250	230–240	300	2600
7	35–45	270	280	220–235	270	2550



**Рис. 2.** Параметры ЧР, измеренные электромагнитным (1) и акустическим (2) датчиками, для образцов ВИ с малыми дефектами: а – дефект на стержне, б – дефект “стержень-оконцеватель”. 3 – распределение количества ЧР в зависимости от интенсивности.



**Рис. 3.** Параметры ЧР, измеренные электромагнитным датчиком (1), для образцов ВИ с большими дефектами: а – дефект на стержне, б – дефект “стержень-оконцеватель”. 2 – распределение количества ЧР в зависимости от интенсивности. 3 – пространственное распределение индуцированных градиентов поля (для дефектного изолятора показано пунктиром).

му нагреву диэлектрического стержня и форме характеристик ЧР подобные дефекты были отнесены к дефекту типа “стержень-оконцеватель”.

Обнаруженные отличия в характеристиках ЧР для обоих видов дефектов позволили для их более полного сопоставления использовать разработанную феноменологическую модель, описывающую генерацию ЧР на дефекте. Особенностью больших дефектов является участие в процессе излучения ЧР индуцированных ими зарядов, образующих дополнительное поле  $E_i$  на поверхности диэлектрического стержня. Заряды создаются ионами и электронами в полости при ионизации воздуха стримерными ЧР, а затем осаждаются на диэлектрической поверхности. Интенсивности ( $E_{чр}$ ) последующих ЧР определяются комбинацией полей  $E_a$  и  $E_i$ . При одинаковых знаках поле  $E_{чр}$  возрастает, а при разных знаках — убывает. С ростом дефектов поле  $E_i$  возрастает, что приводит к возникновению поверхностных ЧР.

Наибольшее количество и интенсивность будут у отрицательных ЧР, создаваемых суммой отрицательных по знаку полей  $E_a$  и  $E_i$  в интервале фазовых углов  $130^\circ$ – $220^\circ$ ; фазовые интервалы положительных ЧР ( $0^\circ$ – $20^\circ$  и  $320^\circ$ – $340^\circ$ ) в основном создаются полем положительно индуцированных зарядов.

Таким образом, по результатам измерений комплексным дистанционным методом набора характеристик ЧР, выполненным при обследовании ФВИ на подстанциях, установлены три основных диагностических признака, позволяющие определять вид и место расположения наиболее опасных при эксплуатации дефектов. К ним относятся: значительное (в 2–3 раза) увеличение интенсивности ЧР, соответствующих отрицательным полупериодам высокого напряжения, по сравнению с положительными полупериодами, значительное отличие формы одиночных импульсов ЧР для положительных и отрицательных сигналов для дефектов “стержень-оконцеватель”, что не характерно для дефектов на стержне.

Разработана усовершенствованная модель описания особенностей ЧР, учитывающая вклад в излучение ЧР помимо приложенного поля, также и поля, индуцированного разрядами на диэлектрических поверхностях, ограничивающих область дефекта в полимерных и фарфоровых ВИ.

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

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Вдовико В.П.* Частичные разряды в диагностировании высоковольтного оборудования. Новосибирск: Наука, 2008. 155 с.
2. ГОСТ Р 55191-2012 (МЭК 60270:2000) Методы испытаний высоким напряжением. Измерения частичных разрядов. М.: Росстандарт, 2012. 49 с.
3. *Гайворонский А.С.* // Гл. энергетик. 2010. № 2. С. 15.
4. *Голенищев-Кутузов В.А., Голенищев-Кутузов А.В., Евдокимов Л.И., Черномащенко А.Ю.* Способ бесконтактной диагностики высоковольтных полимерных изоляторов. Пат. РФ № 2483312, МПК G01R 31/12. 2013.
5. *Бельский А.В., Бусарев А.В., Галеев Д.В., Зарипов Д.К.* // Прикл. физ. 2010. № 5. С. 108.
6. *Голенищев-Кутузов В.А., Голенищев-Кутузов А.В., Синюгин И.В. и др.* // Пробл. энергетики. 2014. № 7–8. С. 77.
7. *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: КГЭУ, 2018. С. 44.
8. *Киншт Н.В., Петрунько Н.Н.* // Электричество. 2016. № 6. С. 51.
9. *Kupershtokh A.L., Karpov D.I.* // J. Phys. Conf. Ser. 2016. V. 754. Art. № 102006.
10. *Callender G., Golosnoy I.O., Rapisarda P., Lewin P.L.* // J. Phys. D. 2018. V. 51. № 12. Art. № 125601.
11. *Голенищев-Кутузов А.В., Голенищев-Кутузов В.А., Марданов Г.Д., Хуснутдинов Р.А.* Способ бесконтактной дистанционной диагностики состояния высоковольтных изоляторов. Пат. РФ № 2597962, МПК G01R 31/08. 2016.
12. *Голенищев-Кутузов А.В., Голенищев-Кутузов В.А., Иванов Д.А. и др.* // Дефектоскопия. 2018. № 10. С. 10; *Golenishchev-Kutuzov A.V., Golenishchev-Kutuzov V.A., Ivanov D.A et al.* // Rus. J. Nondestruct. Test. 2018. V. 54. № 10. P. 682.
13. *Голенищев-Кутузов А.В., Голенищев-Кутузов В.А., Иванов Д.И., Марданов Г.Д.* // Изв. ВУЗов. Пробл. энергетики. 2018. Т. 20. № 3–4. С. 99.
14. *Голенищев-Кутузов А.В., Синюгин И.Е., Марданов Г.Д.* Программа записи, обработки и распределения сигналов частичных разрядов по амплитуде и фазе. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014612238. 2014.
15. *Голенищев-Кутузов А.В., Голенищев-Кутузов В.А., Иванов Д.А. и др.* Способ бесконтактной дистанционной диагностики состояния высоковольтных изоляторов. Пат. РФ № 2679759, МПК G01R 31/12. 2019.