

УДК 621.3.048

## ДИСТАНЦИОННО ИЗМЕРЯЕМЫЕ ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ, ПОЗВОЛЯЮЩИЕ ОЦЕНИВАТЬ ОСТАТОЧНЫЙ РЕСУРС ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИЗОЛЯТОРОВ

© 2020 г. А. В. Голенищев-Кутузов<sup>1</sup>, \*, Д. А. Иванов<sup>1</sup>, Р. И. Калимуллин<sup>1</sup>, А. В. Семенников<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 15.07.2020 г.

После доработки 10.08.2020 г.

Принята к публикации 26.08.2020 г.

Рассмотрены особенности дистанционного бесконтактного мониторинга текущего рабочего состояния и прогнозирования остаточного ресурса высоковольтных изоляторов на основе разработанного набора диагностических параметров наиболее опасных дефектов. Особое внимание обращено проблеме возникновения сверхбольших частичных разрядов, которые возникают за счет накопления электрических зарядов на диэлектрических поверхностях дефекта от предыдущих частичных разрядов.

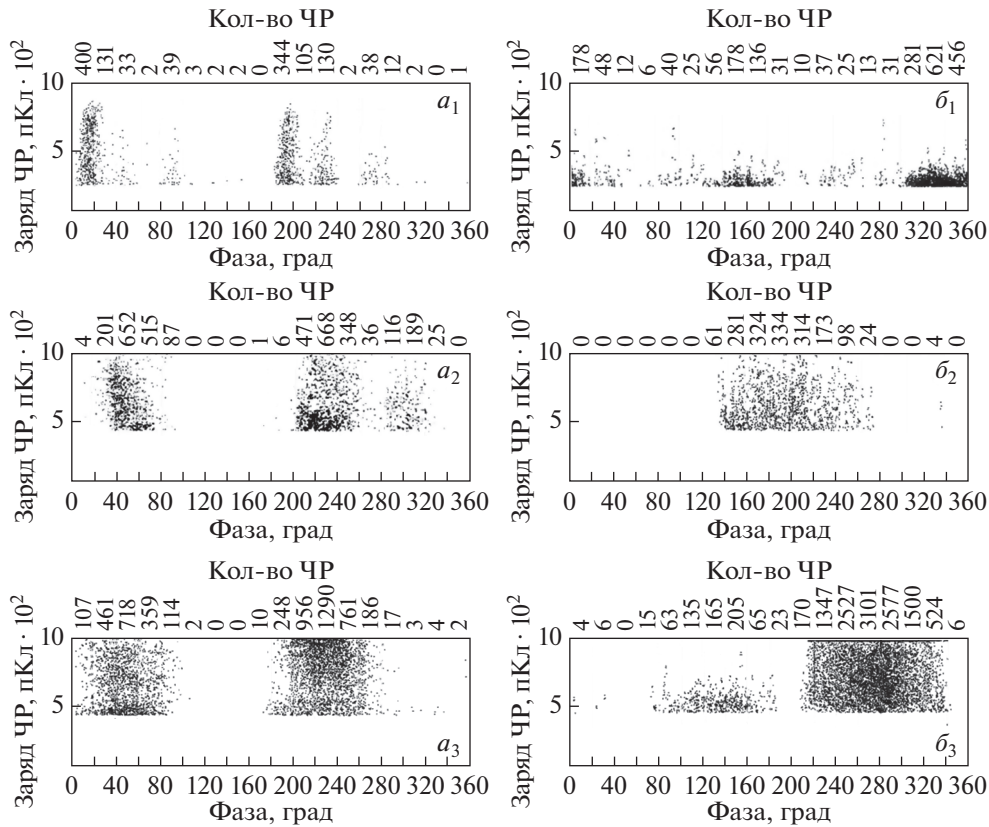
DOI: 10.31857/S0367676520120224

В последние годы в электроэнергетике происходит переход от диагностики рабочего состояния высоковольтных изоляторов (ВИ) при планово-профилактических обследованиях с отключением оборудования от электрической сети [1] к дистанционному контролю в процессе эксплуатации. В обоих случаях основным диагностическим параметром является набор характеристик частичных разрядов (ЧР) [2–4]. Существующие методы однократных измерений характеристик ЧР (электромагнитный, акустический, оптический) даже при комплексном использовании позволяют оценивать только текущее состояние ВИ [5–7]. Поэтому, уже в XXI в. начались разработки бесконтактных способов непрерывного мониторинга состояния ВИ [8–10]. Разработанные методы непрерывного контроля показаний оптических, емкостных, термодинамических датчиков, прикрепляемых непосредственно к каждому изолятору, позволяют регистрировать только резкое изменение проводящего состояния изоляторов и разбраковывать их по принципу: работоспособный – неработоспособный, не контролируя процесс развития дефектов.

Разработка более информативных методов периодического контроля (мониторинга) за развитием дефектов в изоляторах стала еще более актуальной после обнаружения сверхбольших ЧР, превышающих заряд обычных ЧР минимум в 2 раза [5].

Было установлено, что сверхбольшие ЧР возникают за счет накопления зарядов на диэлектрических поверхностях дефектов при ионизации заполненных воздухом полостей дефектов предыдущих ЧР. Наведенные заряды образуют индуцированное поле напряженностью ( $E_u$ ), которые могут значительно превышать напряженность электрического поля ( $E_a$ ), возникающего на дефекте при приложении напряжения сети. Сверхбольшие ЧР возникают при сложении одинаково направленных векторов напряженностей электрических полей  $E_u$  и  $E_a$ , что происходит в фазовых интервалах положительного ( $0^\circ$ – $50^\circ$ ) и отрицательного ( $180^\circ$ – $240^\circ$ ) полупериодов приложенного электрического напряжения  $U_a$ . Количество и заряд сверхбольших ЧР возрастают с увеличением размера дефекта и могут составлять 2–6 разрядов за каждый период высокого напряжения с интенсивностью 2–6 нКл [11]. Именно такие сверхбольшие ЧР вызывают деградацию диэлектрических поверхностей, ускоряя развитие дефектов и уменьшая срок эксплуатации изоляторов. Поэтому периодический контроль за характеристиками сверхбольших ЧР является одним из наиболее важных при дистанционном мониторинге состояния высоковольтных изоляторов.

При изложенных обстоятельствах целью нашей работы было создание способа дистанционного мониторинга технического состояния находящихся в эксплуатации высоковольтных изоляторов и установление их остаточного ресурса



**Рис. 1.** Амплитудно-фазовые диаграммы распределения отдельных частичных разрядов для изоляторов, содержащих дефекты на стержне (*а*) и дефекты на контакте стержень-оконцеватель (*б*): *1* – начальное развитие дефектов, *2* – более развитые дефекты, содержащие сверхбольшие ЧР, *3* – большие дефекты, представляющие опасность для дальнейшей эксплуатации.

посредством периодического дистанционного измерения электромагнитным и акустическим датчиками набора характеристик ЧР и последующего анализа ряда разработанных диагностических параметров наиболее опасных дефектов [7].

При использовании уже известных разработанных способов комплексной диагностики работоспособности ВИ [6] возможно определение таких важных диагностических параметров дефектов как: вид, место расположения, размер, скорость развития, степень влияния на дальнейшую работоспособность посредством периодического измерения разработанного набора характеристик частичных разрядов, обеспечивающего получение значений диагностических параметров дефекта.

Для более полного обоснования разработанного способа были выполнены измерения набора соответствующих характеристик частичных разрядов на сериях полимерных и фарфоровых высоковольтных изоляторов, содержащих различные виды наиболее опасных дефектов, отличающихся расположением и размерами. Измерения характеристик выполнялись на стенде и на подстанциях с помощью электромагнитного и аку-

стического приемников. На рис. 1 представлены амплитудно-фазовые диаграммы распределения отдельных ЧР для изоляторов, содержащих дефекты на стержне (*а*) и дефекты на контакте стержень-оконцеватель (*б*). Верхняя диаграмма (*1*) соответствует начальному развитию дефектов, не представляющих опасность для работы изоляторов. Диаграммы (*2*) относятся к более развитым дефектам и содержат сверхбольшие ЧР с зарядом  $q > 2$  нКл. Для дефектов на стержне они расположены симметрично на положительном и отрицательном фазовых полупериодах высокого напряжения. Для дефектов “стержень-оконцеватель” такие разряды характерны только для отрицательного полупериода. На диаграммах (*3*) приведены распределения ЧР для образцов с большими дефектами, представляющими опасность для дальнейшей эксплуатации. Для них характерно значительное увеличение количества и заряда сверхбольших ЧР, а также расширение фазовых интервалов генерации.

Также были обнаружены сдвиги фазовых интервалов генерации ЧР для дефектных ВИ, находившихся в эксплуатации при обследовании их с интервалом в три месяца (рис. 2). При этом было

установлено возрастание заряда и увеличение числа ЧР за один фазовый интервал. Эти факты, согласно разработанной физической модели, свидетельствуют о возрастании размеров дефектов, генерирующих сверхбольшие ЧР.

По результатам обследования контактным и дистанционным методами [5] серии полимерных (ЛК35/70) и фарфоровых (ИОС 110/400) изоляторов были установлены наиболее важные диагностические параметры, в значительной степени дополняющие подобные параметры, рекомендованные ГОСТ Р55191-2012.

К таким параметрам относятся: наличие сверхбольших ЧР, их фазовое распределение, смещение по фазе и увеличение заряда с течением времени. Наличие наиболее опасных дефектов определяется по возникновению сверхбольших ЧР, предельные значения определяются материалом и видом высоковольтных изоляторов.

Вид и место расположения наиболее опасных дефектов определяется по фазовому распределению сверхбольших ЧР. Симметричное их расположение в положительных и отрицательных полупериодах приложенного напряжения характеризует дефекты на оболочке стержня изолятора, а наличие сверхбольших ЧР только при отрицательном полупериоде соответствует дефекту на контакте стержень-оконцеватель.

Скорость развития наиболее опасных дефектов устанавливается по изменению таких диагностических параметров, как смещение сверхбольших ЧР в фазовые интервалы с приближением к началу полупериодов ( $0^\circ$  и  $180^\circ$ ), а также увеличение кажущегося заряда во временном интервале между двумя последовательными измерениями диагностических параметров. По скорости развития наиболее опасных дефектов выполняется прогнозирование остаточного ресурса рабочего состояния изоляторов.

Способ дистанционного мониторинга технического состояния высоковольтных изоляторов осуществляется посредством следующих операций:

- На первом этапе для каждого вида высоковольтных изоляторов с помощью рекомендованного ГОСТом контактного метода устанавливаются предельные значения параметров характеристик сверхбольших ЧР, не создающие пробоя дефектов изоляторов, но влияющие на скорость развития дефектов.

- На следующем этапе эти установленные контактным способом нормированные диагностические параметры сопоставляются со значениями тех же параметров частичных разрядов, измеренными дистанционно радиочастотным приемником с узконаправленной антенной. Затем импульсные сигналы частичных разрядов, синхронизированные с фазой высокого напряжения, накопленные в течении не менее 18 с, распределяются в соответ-

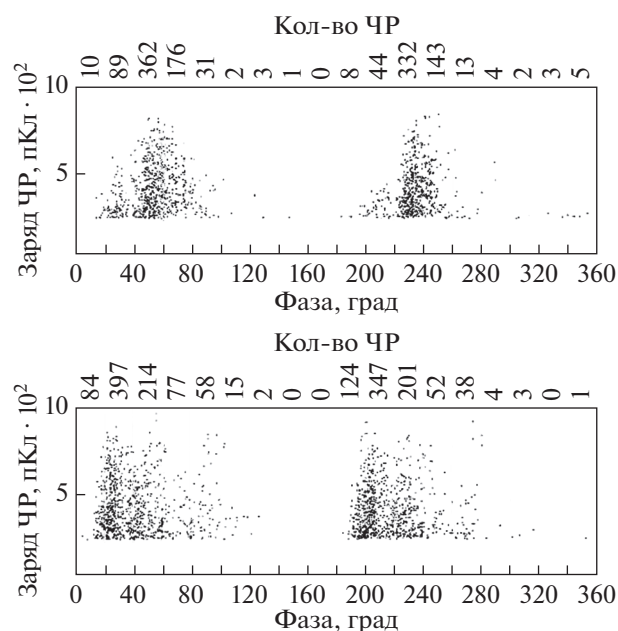


Рис. 2. Фазовый сдвиг интервала генерации сверхбольших ЧР в сторону меньших углов.

ствии с разработанной компьютерной программой по заряду, количеству и фазовым углам, образуя необходимый набор диагностических параметров, характеризующих состояние изолятора на момент данного измерения. Обработанный набор параметров в нормализованном виде сохраняется в базе данных.

- На последнем этапе путем сравнения результатов текущего измерения значений диагностических параметров со значениями тех же параметров, полученными при предыдущих дистанционных измерениях, делается вывод об остаточном ресурсе (сроке службы) изоляторов, а также о периодичности дальнейших дистанционных измерений.

Таким образом, выполненные стендовые и полевые испытания разработанной методики и измерительного комплекса [6, 12] показали реальную возможность его использования для мониторинга состояния ВИ, находящихся в режиме эксплуатации.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках соглашения № 075-15-2020-172.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ Р55191–2012. Методы испытаний высоким напряжением. Измерения частичных разрядов.
2. *Salustiano R., Capelini R.M., de Abreu S.R. et al. // Proc. 2014 ICHVE (Poznan, 2014). P. 1.*
3. *Гайворонский А.С. // Гл. энерг. 2010. № 2. С. 23.*

4. *Вдовико В.П.* Частичные разряды в диагностировании высоковольтного оборудования. Новосибирск: Наука, 2007. 156 с.
5. *Голенищев-Кутузов А.В., Голенищев-Кутузов В.А., Иванов Д.А. и др.* // Дефектоскопия. 2019. № 8. С. 34.
6. *Голенищев-Кутузов А.В., Голенищев-Кутузов В.А., Иванов Д.А. и др.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2019. Т. 83. № 12. С. 1651; *Golenishchev-Kutuzov A.V., Golenishchev-Kutuzov V.A., Ivanov D.A. et al.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2019. V. 83. № 12. P. 1490.
7. *Голенищев-Кутузов В.А., Голенищев-Кутузов А.В., Иванов Д.А. и др.* Способ бесконтактной дистанционной диагностики состояния высоковольтных изоляторов. Патент РФ № 2679759, кл. G01R 31/12. 2018.
8. *Симановский И.В.* // Электротехника. 2013. № 3. С. 43.
9. *Балобанов Р.Н., Зарипов Д.К.* // Электротехника. 2016. № 6. С. 16.
10. *Старцев В.В., Любимов В.А., Соловьев Э.П., Солодков Ю.А.* Индикатор состояния высоковольтной изоляции. Патент РФ № 2392679, кл. H01B17/00. 2010.
11. *Callender G., Golosnoy I.O., Rapisarda P. et al.* // J. Phys. D. 2018. V. 51. № 12. Art. № 125601.
12. *Ivanov D.A., Golenishchev-Kutuzov A.V., Yaroslavsky D.A. et al.* // ARPN J. Engin. App. Sci. 2018. V. 13. № 6. P. 2358.