

## ДИСТАНЦИОННАЯ ДИАГНОСТИКА ДЕФЕКТОВ В ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИЗОЛЯТОРАХ В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ

© 2018 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>Казанский государственный энергетический университет, 420066 Казань, Россия, ул. Красносельская, 51  
E-mail: \*alex.kutuzov@mail.ru, \*\*mardanov1992@mail.ru

Поступила в редакцию 21.04.2018

На основе ранее разработанного двухканального дистанционного метода измерения характеристик частичных разрядов впервые в условиях эксплуатации выполнено обследование технического состояния высоковольтных изоляторов на нескольких подстанциях ОАО Сетевая компания «Казанские электрические сети». По результатам предварительных стендовых измерений на модельных образцах и полевых измерений набора параметров частичных разрядов и их компьютерного анализа установлены диагностические признаки, позволяющие определять вид и место расположения наиболее опасных дефектов и степень их влияния на работоспособность изоляторов.

*Ключевые слова:* дистанционная диагностика, высоковольтные изоляторы, частичные разряды, дефекты, акустические и электромагнитные датчики.

DOI:

### ВВЕДЕНИЕ

В условиях одновременной эксплуатации на малом пространстве большого количества высоковольтных изоляторов (ВИ), что характерно для большинства подстанций энергетических систем, весьма актуальной является бесконтактная диагностика под рабочим напряжением. Реально используемые сейчас способы контроля состояния ВИ и прогнозирование дальнейших сроков их эксплуатации пока малоэффективны. Вследствие этого в последние десятилетия большое внимание было обращено на разработку неразрушающих бесконтактных способов контроля ВИ. К настоящему времени одним из наиболее эффективных является способ, использующий эффект так называемого «частичного разряда» (ЧР), то есть электрического разряда, который шунтирует лишь часть изоляции между электродами, находящимися под разными потенциалами. ЧР возникают вследствие ионизации газа или диэлектрика в электрическом поле и могут происходить как на поверхности раздела различных сред, так и внутри ВИ [1—3]. Физической причиной возникновения ЧР является пробой промежутка между электродами в приложенном электрическом поле. При исправном состоянии ВИ ЧР в основном возникают при напряжениях, превышающих рабочее напряжение для данного типа ВИ. Однако вследствие образования различных дефектов (трещин, газовых включений, расслоений и т.д.) напряженность электрического поля на дефекте может превышать напряженность поля в окружающем диэлектрике, что и является причиной пробоя или перекрытия изоляции по поверхности. ЧР, будучи следствием возникновения дефектов, в то же время могут при значительном увеличении мощности и количества приводить к частичному или полному разрушению ВИ. Таким образом, метод регистрации ЧР обладает определенными преимуществами по сравнению с другими физическими или химическими методами, поскольку позволяет выявлять дефекты на первоначальной стадии и тем самым диагностировать рабочее состояние ВИ без вывода его из эксплуатации. Такие характеристики ЧР, как понижение порога их возникновения, увеличение интенсивности и частота повторения, могут служить индикатором возникновения первичных дефектов в ВИ. Основными проблемами при использовании метода регистрации ЧР в ВИ являются неразработанность соответствующей аппаратуры и отсутствие нормированных параметров ЧР для реальных ВИ.

В последние годы был предложен ряд способов для дистанционного измерения характеристик ЧР на ВИ [4, 5], с помощью которых возможно диагностировать степень дефектности изолятора без определения вида и места дефекта, но только усредненные по всему образцу характеристики частичных разрядов. Как следует из проработанных источников информации, до настоящего времени не предложено каких-либо способов бесконтактного дистанционного контроля, основанного на регистрации и анализе частичных разрядов, для определения вида и места расположения дефектов в высоковольтных изоляторах в ходе их эксплуатации.

Как известно из теоретических и экспериментальных исследований [6—9], основными видами дефектов в высоковольтных изоляторах являются поверхностные трещины (для фарфора) или

объемные полости (для полимеров) в диэлектрическом стержне. Другим видом дефектов являются неплотные контакты между стержнем и оконцевателями. Дефекты в узлах сочленения стержня с оконцевателем наиболее опасны, поскольку электрическое поле в воздушном зазоре микроскопического размера может существенно превосходить среднюю напряженность поля по образцу; эмиссия с катода (электрода) также будет значительно увеличивать ток через дефект и тем самым уменьшать порог электрического пробоя. Поскольку в контакте между стержнем и оконцевателем, содержащем микроскопическую воздушную прослойку, возникает сильный градиент поля вблизи поверхности стержня, то при длительной эксплуатации происходят ускоренное старение и разложение диэлектрической среды, снижающие электрическую прочность изолятора. Поэтому важно разделять эти основные типы дефектов и места их расположения в изоляторе.

Таким образом, целью нашей работы стало создание более совершенного метода дистанционной диагностики рабочего состояния ВИ, способного выделять наиболее опасные дефекты.

### **МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК И КОМПЬЮТЕРНОГО АНАЛИЗА ПАРАМЕТРОВ ЧР**

Ранее на кафедре «Промышленная электроника и светотехника» (ПЭС) КГЭУ были разработаны метод и устройство, позволяющие дистанционно измерять характеристики ЧР и по ним определять степень работоспособности ВИ. В разработанном методе с помощью узконаправленных электромагнитной и акустической антенн происходит прием сигналов частичных разрядов в виде электромагнитных импульсов, усиление их с помощью широкополосных усилителей и отображение на экране осциллографа. Затем импульсы частичных разрядов поступают в аналого-цифровой преобразователь и далее в устройство обработки информации в цифровом виде. Сигналы частичных разрядов, синхронизованные с фазой высокого напряжения, накапливаются по узким фазовым интервалам в блоке памяти персонального компьютера. Затем это фазовое распределение количества импульсов и интенсивности сравнивается с ранее записанным распределением аналогичных сигналов для эталонного изолятора. Выделяются по определенной программе сигналы, превышающие безопасный для нормального функционирования уровень, по ним выявляют изоляторы с дефектами и определяют возможность их дальнейшего функционирования.

Этот метод предварительно был опробован на серии полимерных изоляторов типа ЛК 70/35, фарфоровых высоковольтных изоляторах (ФВИ) ИОС 110/400 и модельных образцах. Особое внимание было обращено на образцы, имевшие дефекты двух типов: повреждения оболочки стержня и повреждение контакта между стержнем и оконцевателем. Эти виды дефектов были вначале оценены визуально, а затем на экспериментальном стенде кафедры ПЭС КГЭУ измерены наборы характеристик ЧР [5].

### **РЕЗУЛЬТАТЫ ДИАГНОСТИКИ РАБОЧЕГО СОСТОЯНИЯ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИЗОЛЯТОРОВ НА ПОДСТАНЦИЯХ**

В данной статье представлены результаты первого обследования рабочего состояния серии фарфоровых ВИ, находящихся в эксплуатации, с помощью разработанного комплексного метода. Всего было обследовано 38 ФВИ типа ИОС 110/400 на подстанциях «Западная» и «Водозабор». Типичной особенностью таких подстанций является значительный разброс времени ввода ФВИ (с 1974 по 2012 г.), отсутствие каких-либо документированных данных о их состоянии на данный момент.

Измерения набора характеристик ЧР от каждого из изоляторов выполнялись двумя выносными антеннами с усилителями электромагнитных (частота 540 МГц) и акустических (40 кГц) импульсных сигналов ЧР. Расстояние от датчиков до ФВИ составляло порядка 6 метров. Использование узконаправленных антенн позволяло отличать сигналы ЧР от конкретных изоляторов. Фазовое рассогласование сигналов ЧР за счет различия скоростей распространения акустических и электромагнитных волн устранялось путем точного измерения расстояний с помощью лазерного дальномера.

Дополнительно к ранее разработанной методике измерений с помощью высокочастотного осциллографа регистрировались форма и ширина отдельных импульсов ЧР.

В соответствии с результатами предварительного изучения эффектов ЧР было установлено, что наибольшей диагностической информативностью при дистанционном контроле обладают (по степени значимости) такие параметры, как изменение фазовых интервалов генерации ЧР ( $\Delta\phi$ ), соответствующих наиболее мощным ЧР; их интенсивность ( $q_{\text{мощ}}$ ) и количество за фазовый интервал ( $N_{\text{мощ}}$ ); распределение количества ЧР по интенсивности в сравнении с бездефектными и полностью работоспособными изоляторами [5].

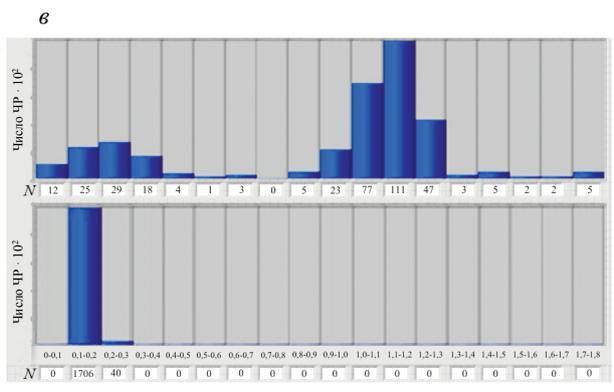
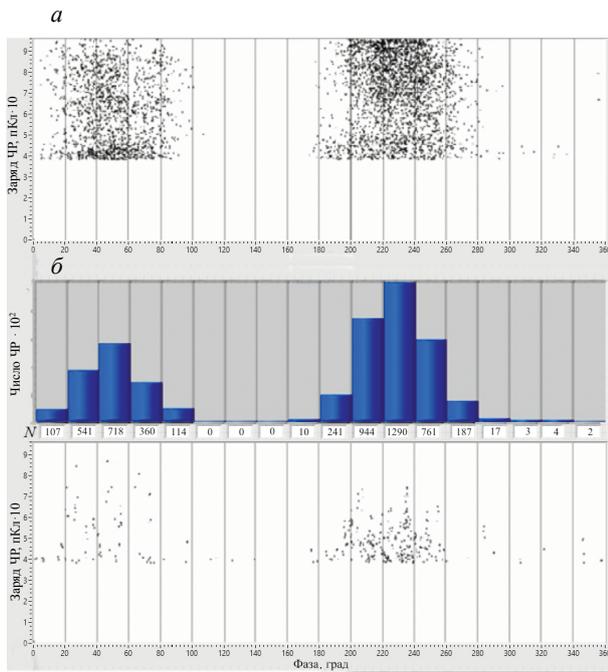


Рис. 1. Характеристики ЧР для работоспособного малодефектного изолятора № 3: амплитудно-фазовые характеристики (а) и зависимость количества ЧР от фазового угла (б), детектированные электромагнитным (а) и акустическим (б) датчиками; распределение количества (N) ЧР, детектированных электромагнитным датчиком, в зависимости от интенсивности (в).

Выполненный нами анализ особенностей набора характеристик ЧР позволил установить значительные различия в фазовом распределении интенсивности и количестве импульсов ЧР для исследованных ВИ. Часть характеристик ЧР имела типичное распределение, соответствующее ранее рассмотренным дефектам в виде трещин в модельных образцах из электротехнического фарфора или дефектов на поверхности стержней ФВИ и ПВИ (рис. 1).

Наше обследование позволило разделить ФВИ на три группы по степени дефектности, а следовательно, и работоспособности. К первой относятся полностью работоспособные ФВИ с минимальной интенсивностью ( $q < 200$  пКл) и количеством ( $N < 500$ ) ЧР, расположенных в фазовых интервалах вблизи  $90$  и  $270^\circ$ , ко второй — условно работоспособные и не требующие замены ФВИ, содержащие ЧР с  $q \leq 300$  пКл и  $N \leq 1000$  и  $\Delta\varphi$  в интервалах  $50\text{—}80^\circ$  и  $220\text{—}250^\circ$  действующего фазового напряжения, к третьей — ФВИ, сохраняющие работоспособность только в ограниченный интервал времени и требующие особого внимания и даже замены при ближайших регламентных обследованиях. Они

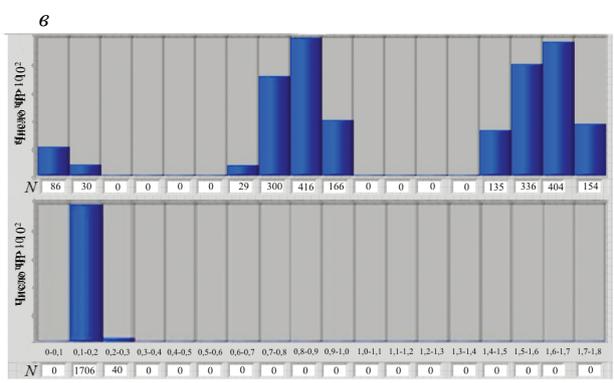
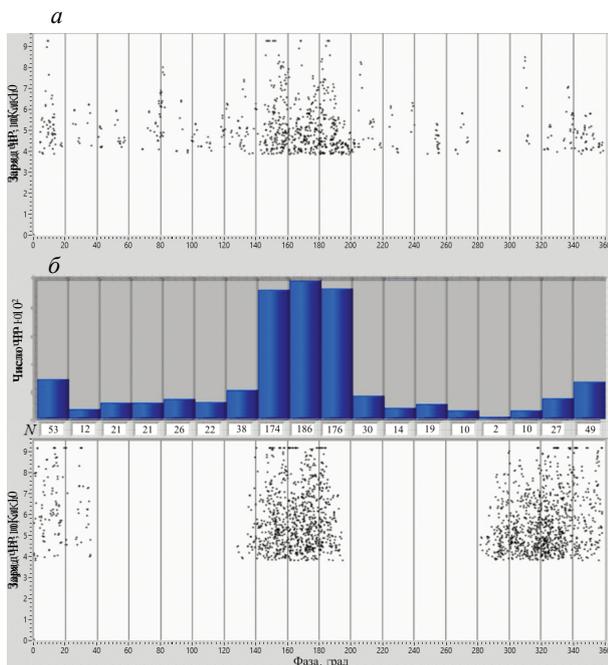


Рис. 2. Характеристики ЧР для ФВИ № 2, содержащего дефект стержень — оконцеватель: амплитудно-фазовые характеристики (а) и зависимость количества ЧР от фазового угла (б), детектированные электромагнитным (а) и акустическим (б) датчиками; распределение количества (N) ЧР, детектированных электромагнитным датчиком, в зависимости от интенсивности (в).

отличаются резким по сравнению с первыми двумя группами увеличением интенсивности мощных ЧР (до 2 нКл), количеством (в 2—5 раз) и сдвигом  $\Delta\varphi$  интервалов ЧР по отношению к фазовым периодам высокого напряжения (рис. 2, 3).

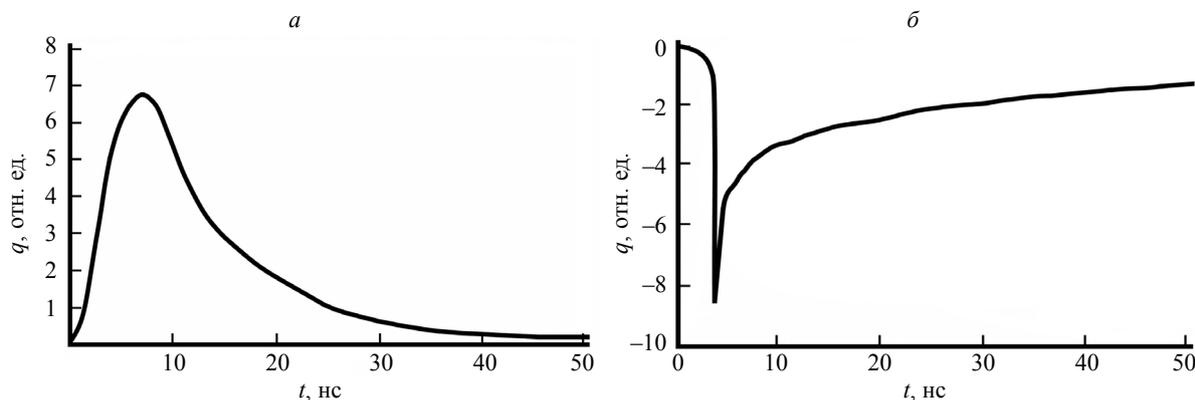


Рис. 3. Форма импульсов ЧР на дефекте стержень — оконцеватель:  
а — положительный импульс; б — отрицательный.

Поскольку ЧР в основном возникают вследствие процессов ионизации воздушного зазора, то их параметры определяются размерами трещины. Равномерное распределение количества и интенсивности ЧР в обоих полупериодах сети соответствует симметричности расположения поверхности зазора в приложенном поле [6], что вполне удовлетворяет характеристикам ЧР для двух первых групп ФВИ. Небольшая интенсивность ЧР вполне соответствует малым размерам трещин, которые незначительно влияют на электрофизическое состояние ФВИ.

Электрический пробой в другом виде дефекта изолятора (третья группа), как это уже рассматривалось теоретически [6—8] и экспериментально [9] на модельных образцах, имеет более сложный вид, чем при поверхностном пробое трещины. ЧР на дефекте между стержнем и оконцевателем характеризуются уширением и сдвигом фазовых интервалов излучения, увеличением их количества в отрицательных полупериодах напряжения, изменением формы ЧР. В данном случае пробой контакта, состоящего из электрода, зазора и стержня, происходит в воздушном зазоре за счет нормальной к зазору компоненты поля, путем излучения электронов из электрода (катода). В результате электронной бомбардировки поверхности диэлектрического стержня на последней образуется индуцированное заряженное поле ионов с плотностью до  $10^{-6}$ — $10^{-5}$  Кл/см, которое успевает изменить знак при изменении фазы приложенного напряжения на  $180^\circ$ .

Таким образом, момент возникновения и интенсивность ЧР определяются знаком и напряженностями приложенного и индуцированного полей, когда их сумма превышает поле электрического пробоя. Как показали расчеты и измерения, именно после перехода приложенного поля в отрицательную фазу возникает условие суммирования обоих полей, что сопровождается генерацией самых мощных ЧР, а при разности приложенного и индуцированного полей — уменьшением общего поля и затягиванием фазовой полосы излучения ЧР. Этот эффект теоретически был рассмотрен почти одновременно с нашими экспериментами [10].

Интенсивность ЧР так же зависит от площади и ширины зазора между электродом и диэлектрическим стержнем. Поскольку в условиях длительной эксплуатации эти параметры имеют случайный и неконтролируемый характер, то именно интенсивность и число несимметричных по фазовым полупериодам ЧР могут определяться параметрами дефекта. Более того, при длительной эксплуатации подобного дефектного контакта (вследствие электронно-тепловых процессов [10—13]) происходит ускоренное старение и даже повреждение диэлектрика, что в конечном итоге снижает электрическую прочность изолятора.

Следует отметить, что индуцированное поле  $E_i$  вследствие ЧР так же влияет на характеристики ЧР, смещая в сторону больших фазовых углов окончание интервалов излучения ЧР, но так как процессы генерации ЧР при смене знака приложенного напряжения симметричны, поскольку  $E_i < E_a$ , при малых размерах дефекта, то интенсивность и количество ЧР мало изменяются. Различие формы импульсов положительных и отрицательных ЧР связано с тем обстоятельством, что первые создаются индуцированными в плазме воздушного промежутка положительными зарядами, а вторые в основном инициируются более быстрым потоком индуцированных электронов.

## ВЫВОДЫ

Изложенные в статье результаты выполненного обследования рабочего состояния ВИ с помощью разработанного двухканального метода в стендовом и полевом вариантах доказали возможность дистанционно диагностировать степень работоспособности ВИ в условиях их эксплуатации и обнаруживать вид и место расположения наиболее опасных дефектов. Это стало возможным при добавлении к ранее установленным нами диагностическим признакам дистанционного контроля, отличающим исправные ВИ от дефектных, дополнительных признаков, позволяющих определять вид и место расположения дефектов. К ним относятся значительное расширение и изменение фазовых интервалов излучения ЧР, увеличение количества и интенсивности ЧР в отрицательных полупериодах высокого напряжения по сравнению с положительными полупериодами, уменьшение ширины отрицательных импульсов ЧР.

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

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Вдовико В.П.* Частичные разряды в диагностировании высоковольтного оборудования. Новосибирск: Наука, 2007. 156 с.
2. ГОСТ Р 55191—2012. Методы испытаний высоким напряжением. Измерения частичных разрядов. М.: Стандартинформ, 2014.
3. Международный стандарт IEC-1.2010. Методы испытаний высоким напряжением. М.: Стандартинформ, 2010.
4. *Голенищев-Кутузов А.В., Голенищев-Кутузов В.А., Евдокимов А.И., Черномашенцев А.Ю.* Способ бесконтактной дистанционной диагностики состояния высоковольтных изоляторов. Патент № 2483315. РФ, 26.12.2011.
5. *Голенищев-Кутузов А.В., Голенищев-Кутузов В.А., Евдокимов И.А., Марданов Г.Д., Хуснутдинов Р.А.* Дистанционная диагностика высоковольтных изоляторов // Дефектоскопия. 2016. № 8. С. 75—82.
6. *Ушаков В.Я.* Изоляция установок высокого напряжения. М.: Энергоатомиздат, 1994. 496 с.
7. *Вершинин Ю.Н.* Электронно-тепловые и дистанционные процессы при электрическом пробое твердых диэлектриков. Екатеринбург: Изд-во УрО РАН, 2000. 258 с.
8. *Pan C., Meng Y., Wu K., Han Z., Qin K., Cheng Y.* Simulation of partial discharge sequences using fluid equations // Journal of Physics D: Applied Physics. 2011. V 44. P. 255201.
9. *Голенищев-Кутузов А.В., Голенищев-Кутузов В.А., Хуснутдинов Р.А., Марданов Г.Д.* Комплексный дистанционный контроль высоковольтных изоляторов в условиях эксплуатации // Электротехника. 2017. № 3. С. 72, 73.
10. *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.
11. *Кинит Н.В., Петрунько Н.Н.* Оценка параметров частичных разрядов // Электричество. 2016. № 6. С. 51—56.
12. *Sasaki A., Kato S., Takahashii E., Kishimoto Y., Fujii T., Kanazawa S.* Simulation of discharge in insulating gas from initial partial discharge to growth of a stepped leader using the percolation model // Jap. J. Appl. Phys. 2016. V 55. No. 2. P. 026101.
13. *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.