

# **ЭНЕРГОРЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ В РЕСПУБЛИКЕ ТАТАРСТАН**

Доклады  
XVIII Международного симпозиума  
«Энергоресурсоэффективность и энергосбережение»

13–15 марта 2018 г.

**Казань  
2018**

УДК 620.22-022.53(082)  
ББК 30.3я43  
Н25

*Под общей редакцией директора  
ГАУ «Центр энергосберегающих технологий Республики Татарстан  
при Кабинете Министров Республики Татарстан»  
доктора технических наук, профессора,  
заслуженного энергетика Республики Татарстан,  
лауреата премии Правительства Российской Федерации  
в области науки и техники  
Е.В. Мартынова*

**С о с т а в и т е л и:**

*Е.В. Мартынов, В.В. Чесноков, С.В. Артамонова*

**Энергоресурсоэффективность и энергосбережение в Республике Татарстан:** док. / под общ. ред. Е.В. Мартынова; сост.: Е.В. Мартынов, В.В. Чесноков, С.В. Артамонова // XVIII Междунар. симп., Казань, 13-15 марта 2018 г. / – Казань: Издательство: ИП Шайхутдинов А.И., 420138, РТ, г. Казань, ул. Дубравная, д. 12, кв. 87, 2018. – 402 с.

ISBN 978-5-905861-21-5

Доклады XVIII Международного симпозиума посвящены актуальным проблемам повышения эффективности использования материальных и энергетических ресурсов, разработки и реализации региональных и производственных программ энергоресурсоэффективности.

Предназначены для специалистов, работающих в промышленности, энергетике, финансовых и банковских структурах, работников муниципальных образований, преподавателей учебных заведений, аспирантов и студентов.

*Материалы докладов публикуются в авторской редакции.*

*Ответственность за содержание тезисов возлагается на авторов.*

*Все права защищены. Материалы Сборника докладов не могут быть воспроизведены в любой форме или любыми средствами, электронными или механическими, включая фотографирование, магнитную запись или иные средства копирования или сохранения информации без письменного разрешения ГАУ «Центр энергосберегающих технологий Республики Татарстан при Кабинете Министров Республики Татарстан».*

**ISBN 978-5-905861-21-5**

© ГАУ «Центр энергосберегающих технологий Республики Татарстан при Кабинете Министров Республики Татарстан», 2018 г.  
© Оформление ИП Шайхутдинов А.И., 2018 г.



**КОМПЛЕКСНАЯ ДИСТАНЦИОННАЯ ДИАГНОСТИКА  
ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИЗОЛЯТОРОВ**

*Голенищев-Кутузов А. В., Иванов Д. А., Марданов Г. Д., Семенников А. В., Аввакумов М. В.,  
ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», г. Казань*

**COMPLEX REMOTE DIAGNOSTICS OF HIGH-VOLTAGE INSULATORS**

*A. V. Golenishchev-Kutuzov, D. A. Ivanov, G. D. Mardanov, A. V. Semennikov, M. V. Avvakumov,  
Kazan State Power Engineering University, Kazan*

**Аннотация**

Разработан комплексный двухканальный метод дистанционной диагностики рабочего состояния высоковольтных изоляторов, основанный на одновременной регистрации и компьютерной обработке сигналов частичных разрядов, детектированных электромагнитным и акустическим датчиками. С помощью созданного на этом методе устройства, были установлены диагностические признаки, позволяющие отличать работоспособные изоляторы от дефектных в реальных условиях их эксплуатации.

**Annotation**

A complex two-channel method for remote diagnostics of the operating state of high-voltage insulators was developed, based on the simultaneous recording and computer processing of partial discharge signals detected by electromagnetic and acoustic sensors. With the help of the device created on this method, diagnostic features were established that make it possible to distinguish between working insulators from defective ones in the real conditions of their operation.

**Введение**

Устойчивость работы современного энергетического оборудования высокого напряжения во многом определяется надежностью его изолирующих элементов. Наиболее уязвимыми в этом плане являются высоковольтные изоляторы (ВИ), поскольку при длительном воздействии высокого напряжения и неблагоприятных условиях эксплуатации происходит преждевременное старение керамических или полимерных изоляционных материалов. В результате образуются различные дефекты, приводящие, в конечном итоге, к электрическому пробое и даже к полному разрушению ВИ. В настоящее время отсутствуют какие-либо нормативные документы, регламентирующие контроль наличия дефектов, измерения их параметров и влияния на рабочее состояние ВИ, находящихся под высоким напряжением. Согласно последнему ГОСТ Р191–2012 [1] и Международному стандарту IEC 60060-1.2010 [2], предусматриваются только периодические испытания высоковольтного энергетического оборудования с предварительным выводом их из рабочего состояния. В основу определения параметров дефектов и их влияния на работоспособность изоляции положен электрический контактный метод измерения характеристик частичных разрядов (ЧР) с помощью специализированных для каждого вида оборудования стендов, с использованием регулируемых источников высокого напряжения.

Как известно [3], полному пробое, как правило, предшествуют микропробой или электрические разряды, которые шунтируют лишь часть изоляции между электродами. Они и получили название частичных разрядов (ЧР). Они являются результатом возникновения, в процессе эксплуатации, локальных повышений напряженности приложенного электрического поля в объеме или на поверхности изоляции, превышающей её электрическую прочность. Возрастные размеры дефектов под действием разнообразных факторов сопровождается увеличением интенсивности и числа ЧР внутри фазовых интервалов, а также понижением напряженности

поля, необходимого для возникновения ЧР; последнее эквивалентно изменению фазы переменного рабочего напряжения. Именно измерение этих характеристик положено в основу ГОСТ. Вследствие вероятностного характера возникновения ЧР, их характеристики отличаются большим разнообразием и реально можно устанавливать только усредненные параметры, позволяющие отличать работоспособные изоляторы от дефектных, требующих замены [4].

Методы измерения различных характеристик ЧР дают возможность обнаруживать дефекты на ранней стадии их возникновения, отслеживать их развитие и таким образом оценивать текущее состояние изоляционных элементов, что отражено в отечественных и международных документах и стандартах. ГОСТом 55191-2012 предусмотрено измерение только контактным способом, на стенде, двух основных характеристик отдельных ЧР: кажущийся заряд (интенсивность), напряжение его возникновения и, при необходимости, – нескольких дополнительных характеристик ЧР: скорости и частоты повторения, среднего тока и мощности. Как показали эксперименты, этих характеристик недостаточно для оценки рабочего состояния ВИ в процессе эксплуатации. Как отмечается в указанном ГОСТе, максимально допустимое значение какой-либо характеристики ЧР, при большой номенклатуре электротехнических изделий, устанавливается дополнительным отраслевым нормативом на оборудование конкретного типа. Но пока технические нормативы для ВИ не разработаны. Практически и в наши дни повреждения ВИ в виде видимых трещин, сколов, пробоев определяются на работающем оборудовании в основном визуально. При этом надо учитывать, что дефекты сантиметровых размеров по-разному влияют на дальнейшую работоспособность ВИ, – в зависимости от материала, размеров и приложенного высокого напряжения.

В современных условиях, всё более значимой становится необходимость дистанционно-бесконтактного контроля рабочего состояния высоковольтного оборудования, особенно ВИ. На это неоднократно указывалось в многочисленных ведомственных документах [4]. Однако, до сих пор нет нормативных материалов по дистанционному контролю ВИ. Существуют лишь отдельные попытки использования различных методов измерения ЧР для контроля энергетического оборудования, причем, в основном, для контроля силовых трансформаторов [5].

Частичные разряды сопровождаются излучением коротких, длительностью от 10-7 до 10<sup>-10</sup> с, электромагнитных импульсов в широком частотном диапазоне – от 105 до 10<sup>17</sup> Гц, и акустических импульсов – в диапазоне 20 Гц – 200 кГц. Для дистанционной регистрации таких излучений были разработаны соответствующие методы, каждому из которых присущи как определенные достоинства, так и недостатки. Электромагнитный метод, при высокой чувствительности, подвержен сильному влиянию на точность измерений ЧР радиочастотных помех и электрических разрядов от работающего оборудования. Акустический способ, имеющий высокую помехоустойчивость от электромагнитных полей и хорошую разрешающую способность к обнаружению дефектного изолятора (и в ряде случаев – даже места дефекта), обладает малой чувствительностью. Оптические и термографические методы эффективны только при отсутствии солнечной засветки и работают в определенном температурном интервале окружающей среды.

Следует отметить, что при дистанционном контроле важную роль имеет расстояние от измерительных датчиков до ВИ, которое составляет для подвесных изоляторов на воздушных линиях передачи  $r \geq 30$  м, а для опорных ВИ, используемых в распределительных устройствах станций и подстанциях примерно 6-8 м. В этом случае наиболее важными характеристиками электромагнитных и акустических датчиков (в виде параболических или линейных антенн) является разрешающая способность для выявления дефектных изоляторов и чувствительность соответствующих приёмников. Существует значительное различие в угловых разрешающих способностях  $\theta$  для электромагнитных и акустических волн, с учетом разницы



в скоростях распространения этих волн и соответствующих длин волн  $\lambda$ , поскольку  $\theta$  пропорционально  $\lambda/D$ , где  $D$  – диаметр или линейный размер антенны. С учетом особенностей распространения электромагнитных и акустических волн (для акустических волн – это дальняя, а для электромагнитных – ближняя зона распространения), линейное разрешение для электромагнитного датчика составляет 5-2 м при  $r = (30-10)$  м, а для акустического датчика, соответственно, – 1-0,3 м. Следовательно, даже с использованием совершенных направленных антенн и усилителей, невозможно указанными способами, а также – с использованием тепловизоров, определять места, и тем более – размеры дефектов, дистанционно. Существует только возможность выделения одиночных дефектных изоляторов электромагнитным датчиком в пределах до 100 м, а выделение дефектных изоляторов внутри групп возможно лишь при одновременном применении электромагнитных и акустических способов на более малых расстояниях – до 10-15 м.

Можно сделать вывод, что успешный контроль состояния изолирующих элементов высоковольтного оборудования возможен только при одновременном использовании нескольких рассмотренных выше методов. Но в настоящее время практически все выпускаемые промышленностью диагностические приборы – как отечественные, так и зарубежные, рассчитаны, в основном, на использование одного метода, чаще – либо акустического, либо термографического. И они пока нашли применение лишь для контроля изоляции высоковольтных силовых трансформаторов и кабелей.

Нами был разработан комплексный метод оперативного контроля рабочего состояния ВИ, сочетающего одновременную дистанционную регистрацию ЧР с помощью электромагнитного и акустического датчиков, и созданной компьютерной программы. Как показали предварительные исследования [6-8], разработанный метод способен определять необходимые характеристики ЧР, и отображать их в виде распределения амплитуды и числа ЧР, в зависимости от фазы рабочего напряжения и распределения их числа по интенсивности.

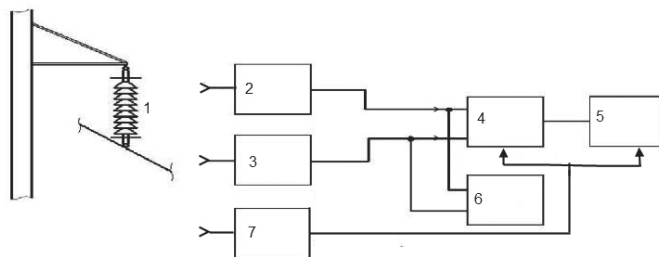


Рис. 1. Блок схема измерительного устройства

1 – высоковольтный изолятор; 2 – приемник электромагнитных сигналов; 3 – приемник акустических сигналов; 4 – аналого-цифровой преобразователь; 5 – персональный компьютер; 6 – двухканальный осциллограф; 7 – приемник опорного сигнала для регистрации фазы.

Регистрация электромагнитных импульсов ЧР (рис. 1) осуществляется направленной антенной DCA-711, соединенной с широкополосным перестраиваемым приемником AOR AR 5000A, позволяющим определять импульсы в интервале частот 0,5-600 МГц. Регистрация акустических импульсов осуществляется на частоте 40 кГц активной параболической антенной, соединенной с приемником SDT-270. Выбор частоты измерений был обоснован такими факторами, как частотная зависимость затухания волн, производственные шумы и электромагнитные помехи окружающего электрического оборудования. Так, акустические шумы

доминируют в низкочастотной области (20 Гц – 20 кГц), верхний частотный предел ограничен частотной зависимостью затухания, ( $f \geq 100$  кГц). В интервале 35-45 кГц, как показали эксперименты, при отношении сигнал/шум  $\approx 2$ , акустические импульсы от ЧР регистрируются на расстоянии 15-25 м. С учетом низкочастотных производственных электромагнитных помех в диапазоне (50-200 МГц) и выше 600 МГц, наиболее предпочтительными для электромагнитной регистрации ЧР являются полосы 20-50 МГц и 400-550 МГц, причем, интенсивность сигналов ЧР значительно выше во второй полосе, чем в первой.

Далее, усиленные сигналы от приемников поступают на двухканальный цифровой осциллограф DSO3062A, выполняющий функцию непосредственного отображения сигналов с электромагнитного и акустического датчиков в виде амплитудно-фазовых характеристик импульсов ЧР. Затем, синхронизированные с фазой переменного напряжения сети сигналы ЧР поступают на плату сбора данных АЦП NIUSB 6341. Оцифрованные сигналы от электромагнитного и акустического приемников поступают в компьютер, в котором с помощью разработанной программы [8] происходит сбор, запись, обработка информации об амплитуде, частоте повторения и фазе сигналов. Накопление сигналов по узким фазовым интервалам (порядка 20 град.) происходит в течение 18 с, что вполне удовлетворяет стохастическому характеру возникновения ЧР. Процесс обработки сигналов ЧР заканчивается построением следующих характеристик: амплитуд и числа импульсов в каждом фазовом интервале и распределения числа импульсов по амплитудам.

Полученное фазовое распределение параметров импульсов сравнивается с ранее записанным распределением параметров импульсных сигналов для бездефектного ВИ того же типа. Поскольку скорости распространения электромагнитных и акустических импульсов отличаются на несколько порядков, то для их синхронизации с каждым конкретным фазовым интервалом используется блок фазовой синхронизации, учитывающий расстояние между дефектом и датчиками.

### Литература

1. ГОСТ 55191-2012. Методы испытаний высоким напряжением. Измерения частичных разрядов М. Стандартинформ. 2014.
2. Международный стандарт IEC 60060-1.2010. Методы испытаний высоким напряжением.
3. Pan C. Meng Y., Wu R., Han Z., Qin R., Cheng Y., Simulation of partial discharge sequences using fluid equation. Journal of Physics D: Applied Physics, 2011, v. 44, p. 255201.
4. Приказ РАО «ЕЭС России» «О повышении надежности опорно-стержневых изоляторов» № 252 от 06.05.2002 г.
5. Наноматериалы и нанотехнологии в энергетике. Монография/под ред. Э.В. Шамсутдинова и О.С. Зуевой. В 2 т.; Т. 1. – Казань: Казан. Гос. Энерг. Ун-т, 2014. – 400 с.
6. Голенищев-Кутузов А. В., Голенищев-Кутузов В. А., Марданов Г. Д., Хуснутдинов Р. А., Евдокимов И. А. Дистанционная диагностика высоковольтных изоляторов «Дефектоскопия», № 8, 2016, с. 75-82.
7. Голенищев-Кутузов В. А., Голенищев-Кутузов А. В., Евдокимов А. И., Черномашенцев А. Ю. Способ бесконтактной дистанционной диагностики состояния высокополимерных изоляторов. Пат. 2483315 РФ 26.12.2011.
8. Голенищев-Кутузов А. В., Сюнюгин И. Е., Марданов Г. Д. Программа записи, обработки и распределения сигналов ЧР по амплитуде и фазе. Свидетельство о государственной регистрации для ЭВМ № 2014612238 РФ 23.12.2013.