



DOI 10.5862/JEST.219.13

УДК 621.317.75

А.М. Гатауллин, В.Л. Матухин, И.И. Низамов

МЕТОД НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТНЫХ ИЗОЛЯТОРОВ НАПРЯЖЕНИЕМ 35 кВ

A.M. Gataullin, V.L. Matukhin, N.I. Nizamov

NONDESTRUCTIVE TESTING METHOD OF POLYMER 35 KV COMPOSITE INSULATORS

Полимерные композитные изоляторы с кремнийорганической защитной оболочкой (ПКИ) на номинал действующего напряжения 35 кВ получают все более широкое распространение, замещая фарфоровые и стеклянные изоляторы. С самого начала на этапе производства ПКИ образуются характерные дефекты, которые приводят к их разрушению и, как следствие, к аварийным режимам работы электроэнергетической системы, причем разрушение ускоряется водой и последующим загрязнением поверхности. В представленной работе для контроля состояния ПКИ предложен метод неразрушающего контроля на основе анализа характеристик частичных разрядов. Метод позволяет на ранних стадиях развития разрушения изоляторов обнаруживать внутренние дефекты, воду и загрязнение поверхности изоляторов.

ЧАСТИЧНЫЕ РАЗРЯДЫ; НЕРАЗРУШАЮЩИЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ; ДИСТАНЦИОННЫЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ ИЗОЛЯТОРОВ; ДИАГНОСТИКА ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ; МОНИТОРИНГ СОСТОЯНИЯ ИЗОЛЯТОРОВ.

Recently the polymer composite insulators covered with the silicone protective shell (PCI) of the nominal voltage of 35 kV have become more widespread, instead of porcelain and glass insulators. As early as at the stage of production, PCIs form specific defects that lead to their destruction and as a consequence to the emergency modes of the power system. In order to control PCI, the present study proposes a nondestructive method of testing based on an analysis of partial discharges. The method is effective for detecting the internal defects and for detecting the defects which arise due to moistening insulator shells.

PARTIAL DISCHARGES; NON-DESTRUCTIVE METHODS OF CONTROL; REMOTE CONTROL INSULATORS METHOD; HIGH VOLTAGE ELECTRICAL EQUIPMENT DIAGNOSTICS; MONITORING OF INSULATORS.

Введение

В последнее время полимерные композитные изоляторы с кремнийорганической защитной оболочкой (ПКИ) на номинал действующего напряжения 35–500 кВ получают все более широкое распространение, замещая фарфоровые и стеклянные изоляторы. С самого начала на этапе производства ПКИ образуются характерные дефекты, которые приводят к их разрушению и, как следствие, к аварийным режимам (короткие замыкания) электроэнергетической системы. Конструкционно ПКИ состоит из металлических оконцевателей, ребер, стеклопла-

стикового изоляционного стержня и кремнийорганической защитной оболочки. Одним из характерных последствий развития дефектов является пробой ПКИ: прохождение электрической дуги сквозь стеклопластиковый стержень, границу раздела «стеклопластиковый стержень — защитная оболочка» или границу раздела «ребро — защитная оболочка» без выхода или с выходом на поверхность, сопровождающееся разрушением изоляционного элемента. Пробой изолятора развивается постепенно и часто является следствием эрозии (разрушения) поверхности защитной оболочки под воздействием влаги, которая, как правило, выявляется на по-



следней стадии разрушения ПКИ, например методом контроля электромагнитного излучения в инфракрасной (ИК) или ультрафиолетовой (УФ) области спектра с поверхности ПКИ [1]. Для уменьшения разрушительного воздействия влаги защитную оболочку ПКИ на этапе производства покрывают специальным гидрофобным составом [2]. Защитная оболочка при увлажнении покрывается каплями воды, которая испаряется, при этом на поверхности изолятора оседает пыль, частицы других загрязнителей, что является причиной ухудшения электрической прочности ПКИ, приводит к потерям электроэнергии за счет поверхностных разрядов. Поэтому методом визуального осмотра выявляют сильнозагрязненные изоляторы и чистят их поверхность. Влагу и загрязнители на поверхности защитной оболочки и внутри ПКИ можно причислить к одному из характерных дефектов ПКИ. Очевидно, что обнаружение влаги на начальной стадии эрозии — актуальная проблема, так как это трудно осуществить методом визуального осмотра и методами регистрации ИК или УФ излучений, которые эффективны в основном на последних стадиях развития разрушения ПКИ. В представленной работе для контроля состояния ПКИ предложен метод регистрации частичных разрядов (ЧР), рекомендуемый отечественными [3] и зарубежными стандартами [4] и активно развивающийся в последнее время [5], в том числе для диагностики полимерной изоляции электромагнитным методом [6]. Однако контроль влаги и загрязнений на ранних стадиях их образования на поверхности композитных изоляторов методом регистрации ЧР пока не был предложен.

Теоретический анализ

Конструкция ПКИ (рис. 1) такова, что на так называемых «юбках» защитной оболочки (ЮЗО) с большей вероятностью по отношению к другим участкам изолятора могут быть сосредоточены незаметные для человеческого глаза капли влаги, которые способствуют загрязнению изолятора. Сухой чистый изолятор вследствие особенностей производства ПКИ может содержать внутренние воздушные дефекты, или каверны (дефект типа 1), размером порядка десятков—сотен микрон, на которых возникают относительно небольшие по величине внутренние ЧР. Вода, которая попадает внутрь ПКИ, приводит к по-

явлению поверхностных частичных разрядов (ПЧР) и ускоряет его разрушение; ПЧР также способствуют нагреву и разрушению изолятора. Назовем влагу и загрязнения на поверхности ПКИ дефектом типа 2. Оба типа дефектов предлагаются контролировать методом ЧР.

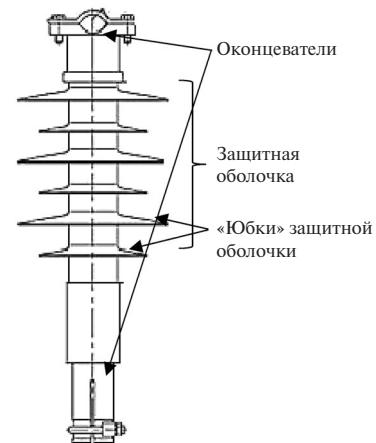


Рис. 1. Один из типичных ПКИ класса напряжения

Молекулы воды под воздействием внешне-го переменного электрического поля, обусловленного действующем напряжением, переориентируются и выравнивают поле, способствуют локальному нагреву и разрушению поверхности изолятора. Перепады температуры также способствуют разрушению изолятора. Очевидно, что дефекты типов 1 и 2 могут развиваться в процессе эксплуатации изолятора. Дефекты типа 1 и типа 2 приводят к появлению соответствующих ЧР типа 1 и типа 2. На следующем этапе влага и загрязнители попадают внутрь ПКИ, окончательно разрушая его. Метод ЧР предполагает анализ статистических распределений ЧР, в том числе в системах мониторинга состояния высоковольтной изоляции по характеристикам ЧР [7]. В связи с наличием дефектов двух типов важно разработать метод их распознавания на основе подходящей для этого теоретической модели. По мнению авторов, характер статистического распределения ЧР хорошо объясняется моделью многослойной изоляции ПКИ (рис. 2).

Величина ЧР зависит от емкости дефекта. При этом между емкостями дефектов и оставшейся части изоляции выполняется следующее соотношение:

$$C_3 \gg C_2 \gg C_1. \quad (1)$$

Емкостью C_1 для ПКИ можно пренебречь, так как она обычно не дает вклад в распределение ЧР по фазе действующего напряжения. Величины так называемого кажущегося заряда (заряд, действие которого в разрядный промежуток приводит к тем же эффектам, что и реальный заряд), предполагаемые отечественными и зарубежными стандартами, могут быть сопоставлены в соответствии с соотношением между емкостями:

$$q_3 \gg q_2. \quad (2)$$

Измерение кажущегося заряда эквивалентно измерению разности потенциалов, так как эти величины взаимосвязаны соотношением

$$q = CU, \quad (3)$$

где C — электрическая емкость дефекта, U — разность потенциалов между напряжением зажигания и гашения ЧР.

Чем больше величина электрической емкости, тем меньше вероятность пробоя этой емкости. Чем больше величина приложенного действующего напряжения, тем чаще будут перезаряжаться электрические емкости. Истинный заряд на дефекте определить практически невозможно, так как неизвестны паразитные емкости и емкость оставшейся части изоляции. Поэтому рационально регистрировать разность потенциалов, причем в одном месте, а кажущийся заряд можно рассчитывать, умножая разность потенциалов на коэффициент пересчета, определяемый предварительно с помощью процедуры калибровки, или сравнивать ЧР ПКИ с ЧР модельной системы, например «поверхность — игла». Система «поверхность — игла» удобна тем, что для нее можно с точностью до 5 % рассчитать величину напряженности $E_{\text{лок}}$ локального поля у катода, обусловленного неоднородностями разрядного промежутка, который связан с величиной напряженности $E_{\text{ср}}$ среднего поля, обусловленного действующим напряжением и расстоянием между электродами [8]:

$$E_{\text{лок}} = \frac{2hE_{\text{ср}}}{r \ln \left(1 + \frac{4h}{r} \right)}, \quad (4)$$

где h — расстояние между катодом (игла) и плоскостью; r — радиус катода.

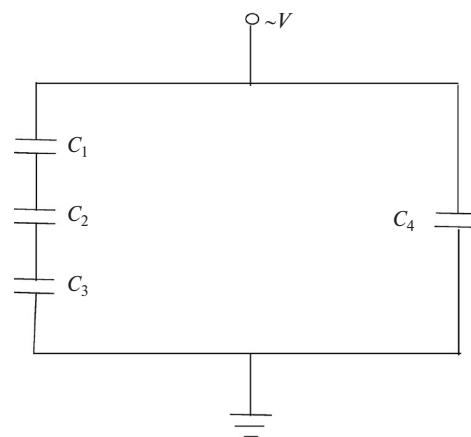


Рис. 2. Модель многослойной изоляции ПКИ: C_1 — электрическая емкость неповрежденной изоляции; C_2 — электрическая емкость, обусловленная внутренними воздушными кавернами; C_3 — электрическая емкость, обусловленная увлажнением ЮЗО; C_4 — электрическая емкость части изоляции, не содержащей дефекты

Формула (4) справедлива и для воздушных каверн в толще ПКИ. Независимо от объекта испытания (ПКИ или система «поверхность — игла») ЧР будут появляться, когда действующее напряжение становится выше напряжения зажигания короны. При этом в результате пробоя изоляционного промежутка будет наблюдаться провал суммарного напряжения. Согласно теории многослойной изоляции ожидается, что интенсивность и число типичных для объекта испытания (ОИ) ЧР будет увеличиваться с ростом действующего напряжения, а исчезновение ЧР будет наблюдаться при величине действующего напряжения ниже напряжения гашения короны. Для системы «поверхность — игла» и для сухого ПКИ, скорее всего, будет наблюдаться статистическое распределение ЧР типа 1, характерное для однородного разрядного промежутка. Для увлажненного ПКИ ожидается наложение статистических распределений ЧР типа 1 и типа 2.

Методика эксперимента

Для измерения ЧР была собрана лабораторная установка (рис. 3) с двумя ОИ — системой электродов «поверхность — игла» и ПКИ. Измерения проводились прибором R-400 производства ООО «Димрус» [9], при этом регистрировались и сопоставлялись статистические

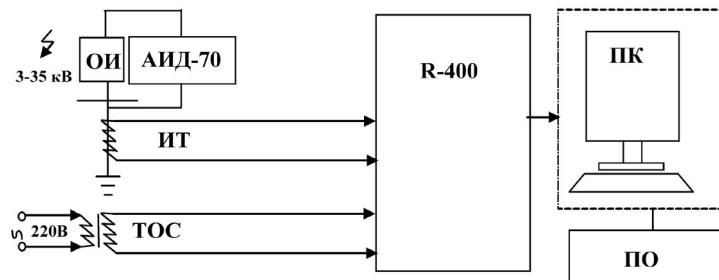


Рис. 3. Блок-схема лабораторной установки:

ОИ — объект испытания (система «поверхность — игла» и ПКИ); ИТ — измерительный импульсный трансформатор; ТОС — трансформатор опорного сигнала; регистратор ЧР R-400; АИД-70 — блок высокого напряжения; ПК — персональный компьютер; ПО — программное обеспечение прибора R-400

распределения ЧР в ПКИ и модельной системе «поверхность — игла». На катод системы «поверхность — игла» радиусом $r = 10$ мкм подавалось постоянное и переменное напряжение в диапазоне действующего напряжения 3–8 кВ, при этом расстояние от катода до плоскости было $h = 10$ мм. Таким образом, согласно (4) напряженность $E_{\text{лок}}$ локального электрического поля у катода превышала среднее значение $E_{\text{ср}}$ напряженности электрического поля в разрядном промежутке в 241 раз. На один из оконце-

вательей ПКИ как в сухом, так и в увлажненном состоянии подавалось переменное и постоянное напряжение в диапазоне 7–20 кВ.

Трансформатор опорного напряжения, входящий в состав прибора R-400, применялся для калибровки амплитуды регистрируемых сигналов ЧР и для построения распределения сигналов ЧР по фазе действующего напряжения частотой 50 Гц — так называемых амплитудно-фазовых диаграмм (АФД) [10] с интервалом по фазовому углу 15 градусов, которые в свою очередь необходимы для отделения явления «короны» от ЧР и ПЧР. Сопоставлялись распределения ЧР для всех трех объектов испытания: системы «поверхность — игла», сухого и увлажненного ПКИ.

Результаты и их обсуждение

Статистическое распределение ЧР в неоднородных разрядных промежутках (рис. 4) (к ним можно отнести увлажненные ПКИ) в соответствии с теорией отклоняются от статистического распределения ЧР в однородных разрядных промежутках (к которым можно отнести модельную систему «поверхность — игла» (рис. 5) и сухой ПКИ), что объясняется наличием воды на юбках ПКИ, она и вызывает на статистической зависимости характерный выброс. Типичные для каждого типа дефекта ЧР четко наблюдаются при постоянном напряжении (рис. 6). Можно сделать вывод, что вода на увлажненных ПКИ проявляется как при постоянном, так и при переменном напряжении. Различное количество одинаковых по амплитуде и форме ЧР для системы «поверхность — игла» и сухого ПКИ при переменном действующем напряжении объясняется различным количеством характерных



Рис. 4. Статистические распределение ЧР типов 1 и 2 (увлажненный ПКИ, переменное напряжение 35 кВ; развертка по горизонтали: амплитуда в [1 В] = [10⁴ пКл]; развертка по вертикали: число ЧР)

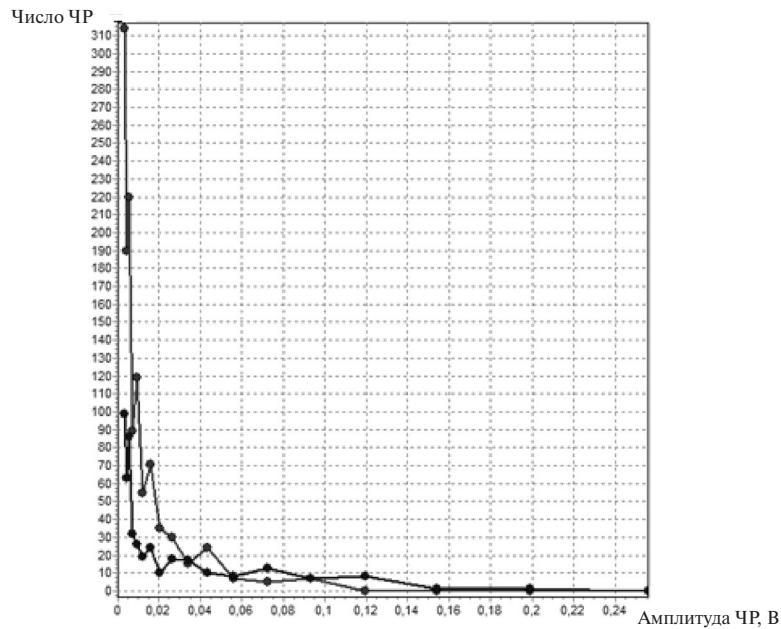


Рис. 5. Статистическое распределение модельных ЧР типа 1 («поверхность — игла»; переменное напряжение 7 кВ; предпробойная ситуация. Развертка по горизонтали — амплитуда в [1 В] = [10⁴ пКл]; развертка по вертикали — количество ЧР)

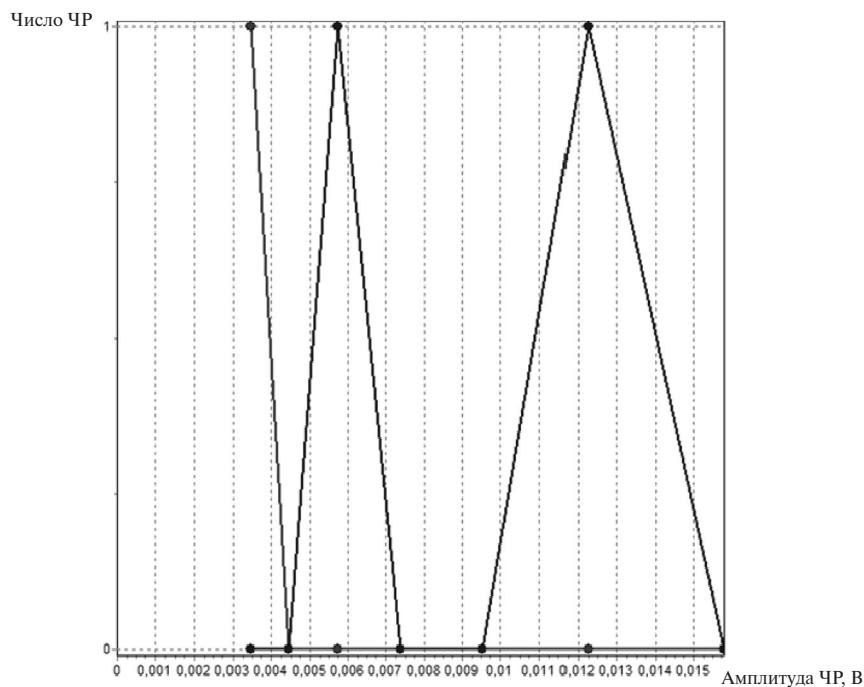


Рис. 6. ЧР, характерные для дефектов типа 1 и типа 2; увлажненный ПКИ, постоянное напряжение 35 кВ (плюс — на верхнем оконцевателе относительно земли). Снизу-вверх: отрицательные, положительные импульсы. Развертка по горизонтали: амплитуда в [1 В] = [10⁴ пКл], развертка по вертикали: количество ЧР)



внутренних дефектов и различной величиной приложенного напряжения, при этом статистическое распределение ЧР в обоих случаях имеет схожий характер, что обусловлено наличием дефектов с одинаковой степенью неоднородности напряженности $E_{\text{лок}}/E_{\text{ср}}$ электрического поля.

Наличие воды на юбках изолятора однозначно выявляется как при переменном напряжении, так и при постоянном, причем чем больше воды на юбках изолятора, тем больше характерных для увлажненной юбки изолятора проявляется на статистическом распределении ЧР.

Заключение

Разработан эффективный метод неразрушающего контроля полимерных композитных изоляторов напряжением 35 кВ по характеристикам частичных разрядов. Метод позволяет на ранних

стадиях увлажнения, загрязнения и, соответственно, разрушения изоляторов обнаруживать внутренние дефекты с характерными для них величинами ЧР в диапазоне 30–120 пКл и дефекты, обусловленные появлением влаги на поверхности ПКИ и дальнейшим ее проникновением внутрь изолятора с характерными для них величинами ЧР 1200 пКл и выше. С помощью системы «поверхность — игла» смоделированы внутренние ЧР, с точностью 5 % определена степень неоднородности напряженности электрического поля, обусловленного такими дефектами: $\frac{E_{\text{лок}}}{E_{\text{ср}}} = 241$, что позволяет косвенно оценить минимальный размер внутренних дефектов (каверны) порядка 20 мкм. Сравнение статистических распределений ЧР увлажненного и сухого ПКИ однозначно позволяет определить наличие влаги и загрязнений на ПКИ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гайворонский А.С. Опыт эксплуатации и диагностика подвесных полимерных изоляторов // Энергетик. 2010. № 10. С. 37–39.
2. Гатауллин А.М., Губаев Д.Ф. [и др.]. Наноматериалы и нанотехнологии в энергетике. Казань: КГЭУ, 2014.
3. МЭК 60270. Методы высоковольтных испытаний — измерение частичных разрядов. Международный стандарт / Пер. с англ. М., 2000.
4. ГОСТ 20074–83. Электрооборудование установок. Методы измерения частичных разрядов. М.: Государственный комитет СССР по стандартам, 1983. 24 с.
5. Гатауллин А.М., Крупнов А., Матухин В.Л. Моделирование, регистрация и обработка сигналов частичных разрядов с применением современных программно-аппаратных средств. Казань: КГЭУ, 2012.
6. Гатауллин А.М. Регистрация и обработка сиг-
- налов частичных разрядов // Приборы и техника эксперимента. 2014. № 4. С. 55–60.
7. Гатауллин А.М., Матухин В.Л., Наумов Б.А. Система мониторинга и диагностирования (СМИД) высоковольтного электрооборудования на основе анализа статистических параметров частичных разрядов // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2013. № 7–8. С. 19–26.
8. Mason J.H. Breakdown of solid dielectrics in divergent fields // Proc. IEEE. 1955. Vol. 102. P. 254–263.
9. Описание прибора R-400: ООО «Димрус». <http://dimrus.ru/manuals/r400.pdf>
10. Гатауллин А.М., Матухин В.Л., Наумов Б.А. Метод количественного учета характеристик сигналов частичных разрядов. // Материалы международной научно-практической конференции, Казань: Изд-во КВКИУ, 2011. С. 45–46.

REFERENCES

1. Gayvoronskiy A.S. Opyt ekspluatatsii i diagnostika podvesnykh polimernykh izolyatorov [Experience of operation and diagnosis of suspension polymer insulators]. Energetik. 2010. № 10. S. 37–39. (rus.)
2. Gataullin A.M., Gubayev D.F. [i dr.]. Nanomaterialy i nanotekhnologii v energetike [Nanomaterials and nanotechnology in the energy sector]. Kazan: KGEU, 2014. (rus.)
3. MEK 60270. Metody vysokovoltnykh ispytaniy — izmereniye chasticchnykh razryadov. Mezhdunarodnyy standart [The methods of high-voltage tests-measurement of partial discharges. International standard]. per. s angl. M., 2000. (rus.)
4. GOST 20074–83. Elektrooborudovaniye ustavok. Metody izmereniya chasticchnykh razryadov [Electrical installations. Methods for measuring partial discharges]. M.: Gosudarstvennyy komitet SSSR po standartam, 1983. 24 s. (rus.)
5. Gataullin A.M., Krupnov.A., Matukhin V.L. Modelirovaniye, registratsiya i obrabotka signalov chasticchnykh razryadov s primeneniem sovremennykh programmno-apparatnykh sredstv [Modeling, registration and process-



ing of signals PD using modern software and hardware]. Kazan: KGEU, 2012. (rus.)

6. **Gataullin A.M.** Registratsiya i obrabotka signalov chasticnykh razryadov [Registration and processing of signals PD]. *Pribory i tekhnika eksperimenta*. 2014. № 4. S. 55–60. (rus.)

7. **Gataullin A.M., Matukhin V.L., Naumov B.A.** Sistema monitoringa i diagnostirovaniya (SMID) vysokovoltnogo elektrooborudovaniya na osnove analiza statisticheskikh parametrov chasticnykh razryadov [System monitoring and diagnostics (CFM) of high-voltage electrical equipment based on the analysis of statistical parameters PD]. *Izvestiya vuzov. Problemy energetiki*. 2013. № 7–8. S. 19–26. (rus.)

8. **Mason J.H.** Breakdown of solid dielectrics in divergent fields [Breakdown of solid dielectrics in divergent fields] // Proc. IEEE. 1955. Vol. 102. P. 254–263.

9. Opisaniye pribora R-400 OOO «Dimrus» [OOO «Dimrus» device description R-400]: <http://dimrus.ru/manuals/r400.pdf>. (rus.)

10. **Gataullin A.M., Matukhin V.L., Naumov B.A.** Metod kolichestvennogo ucheta kharakteristik signalov chasticnykh razryadov [The method of quantifying the characteristics of partial discharge signals]. *Materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*. Kazan: Izd-vo KVKIU, 2011. S. 45–46. (rus.)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ГАТАУЛЛИН Айрат Мухамедович — кандидат технических наук доцент Казанского государственного энергетического университета. 420066, Казань, ул. Красносельская, 51. E-mail: gataullinam@mail.ru

МАТУХИН Вадим Леонидович — доктор технических наук профессор, заведующий кафедрой Казанского государственного энергетического университета. 420066, Казань, ул. Красносельская, 51. E-mail: matukhinvl@mail.ru

НИЗАМОВ Ильдар Ильдусович — аспирант Казанского государственного энергетического университета. 420066, Казань, ул. Красносельская, 51. E-mail: ildarn444@gmail.com

AUTHORS

GATAULLIN Airat M. — Kazan State Power Engineering University. 51, Krasnoselskaya St., Kazan, Russia, 420066. E-mail: gataullinam@mail.ru

MATUKHIN Vadim L. — Kazan State Power Engineering University. 51, Krasnoselskaya St., Kazan, Russia, 420066. E-mail: matukhinvl@mail.ru

NIZAMOV Il'dar I. — Kazan State Power Engineering University. 51, Krasnoselskaya St., Kazan, Russia, 420066. E-mail: ildarn444@gmail.com