

УДК 621.3.048

## КОНТРОЛЬ ТЕКУЩЕГО РАБОЧЕГО СОСТОЯНИЯ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИЗОЛЯТОРОВ

© 2023 г. В. А. Голенищев-Кутузов<sup>1</sup>, А. В. Голенищев-Кутузов<sup>1</sup>, А. В. Семенников<sup>1</sup>, \*,  
Р. И. Калимуллин<sup>1</sup>, Д. А. Иванов<sup>1</sup>

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

\*E-mail: camrosebe@gmail.com

Поступила в редакцию 24.07.2023 г.

После доработки 14.08.2023 г.

Принята к публикации 28.08.2023 г.

Рассмотрены особенности разработанного комплексного дистанционного метода диагностики текущего рабочего состояния и прогнозирования остаточного ресурса высоковольтных изоляторов в условиях эксплуатации. Метод основан на регистрации и последующем компьютерном анализе набора экспериментально установленных диагностических параметров частичных разрядов. Для поиска и локализации места, вида и степени опасности дефектов используется двухканальный бесконтактный метод регистрации частичных разрядов с применением электромагнитного и акустического датчиков в составе узкосфокусированных антенн. Особое внимание уделено изучению влияния наиболее опасных дефектов, возникающих за счет индуцированных электрических полей, созданных предыдущими частичными разрядами.

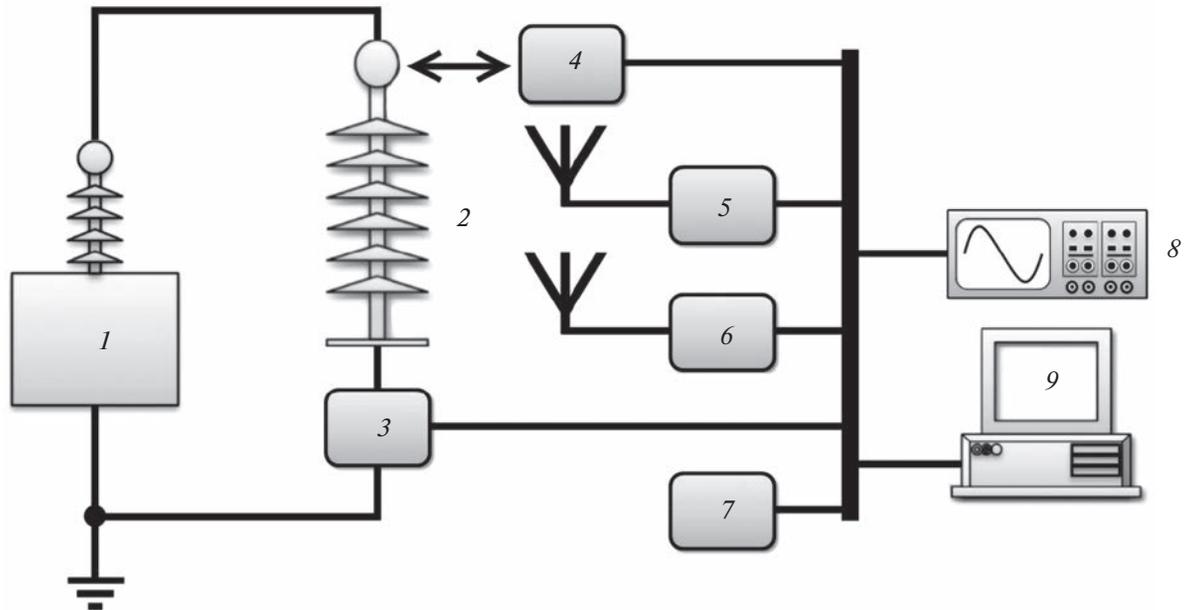
DOI: 10.31857/S0367676523703143, EDN: QLIKVU

На основе многочисленных работ по изучению электрофизических и химических процессов, приводящих к ускоренному разрушению диэлектрических элементов, и разработке на этой основе методов диагностики было установлено, что наиболее подходящими для контроля работоспособности диэлектрических элементов являются методы, использующие частичные разряды (ЧР), представляющие собой локальные электрические разряды под действием электрических полей, превышающих электрическую прочность диэлектрических материалов.

Периодический контроль развития дефектов в изоляторах стал еще более актуальным после обнаружения в изоляторах мощных частичных разрядов (МЧР), превышающих по интенсивности обычные ЧР в несколько раз. МЧР – это мощный частичный разряд, создающий на диэлектрических поверхностях дефекта индуцированное электрическое поле, сравнимое по напряженности с приложенным полем. Было установлено, что МЧР возникают за счет накопления зарядов на диэлектрических поверхностях больших дефектов, созданных предыдущими обычными по интенсивности ЧР. Большими дефектами считаются те, на которых возникают МЧР с интенсивностью  $q \geq 3$  нКл и образуются индуцированные ими электрические поля на диэлектрических поверхностях, которые могут значительно превы-

шать приложенные поля. Следует отметить ряд основополагающих работ, в которых были выполнены первые модельные эксперименты по изучению воздействия ЧР на дефекты в виде газовых полостей в диэлектрических материалах. На основе этих экспериментов были предложены первые модели механизмов ЧР и, в том числе, стримерно-таунсендовский [1, 2], а также началась разработка более совершенных дистанционных методов измерения характеристик ЧР [3]. Более того, в начале XXI века с повышением напряженности электрических полей, используемых в электроэнергетике на модельных дефектах, было обнаружено, что мощные ЧР с критическим зарядом свыше 3 нКл сами являются одной из главных причин возникновения и дальнейшего увеличения дефектов в диэлектрических элементах. Эти ЧР в итоге могут приводить к увеличению скорости развития дефектов и разрушению изоляции [3–5].

На основе изучения основных причин преждевременного старения и электрического разрушения ВИ был разработан комплексный метод контактного и дистанционного (бесконтактного) мониторинга диэлектрических элементов высоковольтного оборудования. Экспериментально полученный набор диагностических параметров дефектов, основанный на использовании четырех физических методов (акустического, электромагнитно-



**Рис. 1.** Блок-схема аппаратно-программного комплекса для испытаний ВИ: 1 – регулируемый источник высокого напряжения, 2 – испытуемый объект, 3 – электрический контактный датчик, 4 – электрооптический датчик, 5 – электромагнитный бесконтактный датчик, 6 – акустический датчик, 7 – датчик фазы высокого напряжения, 8 – цифровой осциллограф, 9 – персональный компьютер с АЦП.

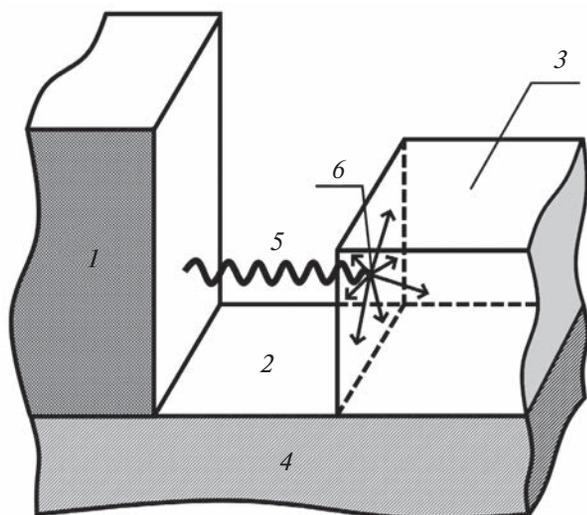
го, электрооптического и контактного), позволил регистрировать зарождение, развитие дефектов, а также определять техническое состояние ВИ с достаточной степенью достоверности.

Разработанный нами аппаратно-программный комплекс (АПК) (рис. 1) способен выполнять свои функции в двух режимах: стендовом (электрическом контактном и электрооптическом дистанционном) и дистанционном с использованием в обоих случаях набора датчиков (поз. 3–6 на рис. 1). В стендовом варианте при контактном измерении согласно ГОСТ Р 55191-2012 вместо сети используется регулируемый источник высокого напряжения (1). Общим для обоих вариантов является использование цифровой системы записи, обработки и вывода информации (8, 9). В дистанционном варианте измерительный комплекс устанавливается вблизи обследуемых ВИ.

В данной работе представлены результаты пока качественного рассмотрения механизмов ЧР на реальных высоковольтных изоляторах (ВИ). Мы постарались связать предложенную нами модель влияния предшествующих ЧР на ускорение процессов старения высоковольтных изоляторов и способы дистанционного обнаружения критического состояния ВИ на подстанциях с полученными в ряде работ результатами. Общими результатами для реальных изоляторов и модельных дефектов являются: смещение фазовых интервалов генерации ЧР с ростом дефектов к близким к нулевым фазам положительных и отрицательных полупериодов приложенного высокого

напряжения, увеличение плотности электронных зарядов на диэлектрической поверхности дефекта при накоплении количества предшествующих ЧР, повышение электропроводности и градиента поля на поверхности дефекта, уменьшение плотности электронного заряда в стримерном пучке в полости дефекта.

Изученные особенности кинетики временного изменения характеристик ВИ позволили разработать методику определения ускоренного роста дефектов под воздействием МЧР. Были исследованы процессы распространения индуцированных ЧР потоков электронов, отрицательных и положительных ионов вдоль одной или двух диэлектрических поверхностей дефекта. Если для малых дефектов ( $q \leq 3$  нКл) поток зарядов, распространяющийся вдоль газового промежутка дефекта, имеет стримерный характер [4] и затухает на диэлектрической поверхности, то для больших дефектов ( $q \geq 3$  нКл) поток заряженных частиц, переходя на диэлектрическую поверхность, начинает накапливаться, начиная от первого и последующих ЧР (рис. 2). При этом процессе часть ионов поглощается расположенными на поверхности ионными ловушками, а остальная их часть диффундирует от центра стримерного канала к периферии дефекта, создавая индуцированное поле  $E_s$  (ЧР). В первый момент после ЧР поле  $E_s$ , образованное электронами, имеет, как это было экспериментально обнаружено на модельных дефектах [6], громадный градиент плотности зарядов вдоль поверхности, инициирующий два эффекта. Во-первых, может возникать поверхностный (сколь-



**Рис. 2.** Конфигурация дефекта между фланцем и оболочкой ВИ: 1 – металлический фланец, 2 – полость дефекта, 3 – защитная диэлектрическая оболочка, 4 – стеклопластиковая труба, 5 – стример, 6 – распространение ЧР по диэлектрической поверхности дефекта.

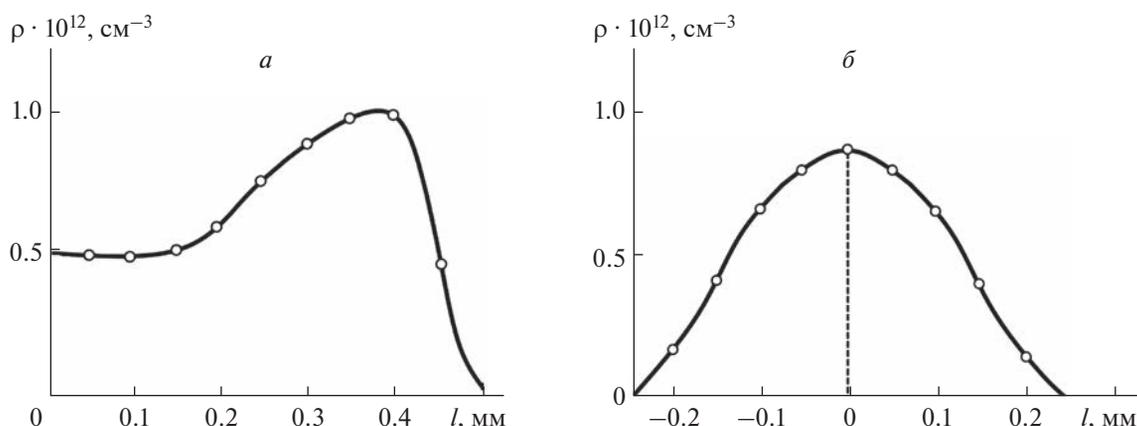
зующий вдоль поверхности) наносекундной длительности электрический разряд [7]. Во-вторых, вследствие электронно-деформационного эффекта [8], может возникать импульс акустических волн, интенсивность которого определяется концентрацией неравновесных носителей заряда. Оба эти эффекта присутствуют в случае генерации ЧР.

На диэлектрической поверхности дефекта после излучения МЧР возникает взаимодействие двух электрических полей – фазозависимого приложенного поля  $E_a$  и поля индуцированных зарядов  $E_s$ . Их полярности совпадают в фазовом интервале  $180^\circ\text{--}240^\circ$  и находятся в интервале  $0^\circ\text{--}90^\circ$  [9], что и регистрируется обоими датчиками (акустическим и электромагнитным)

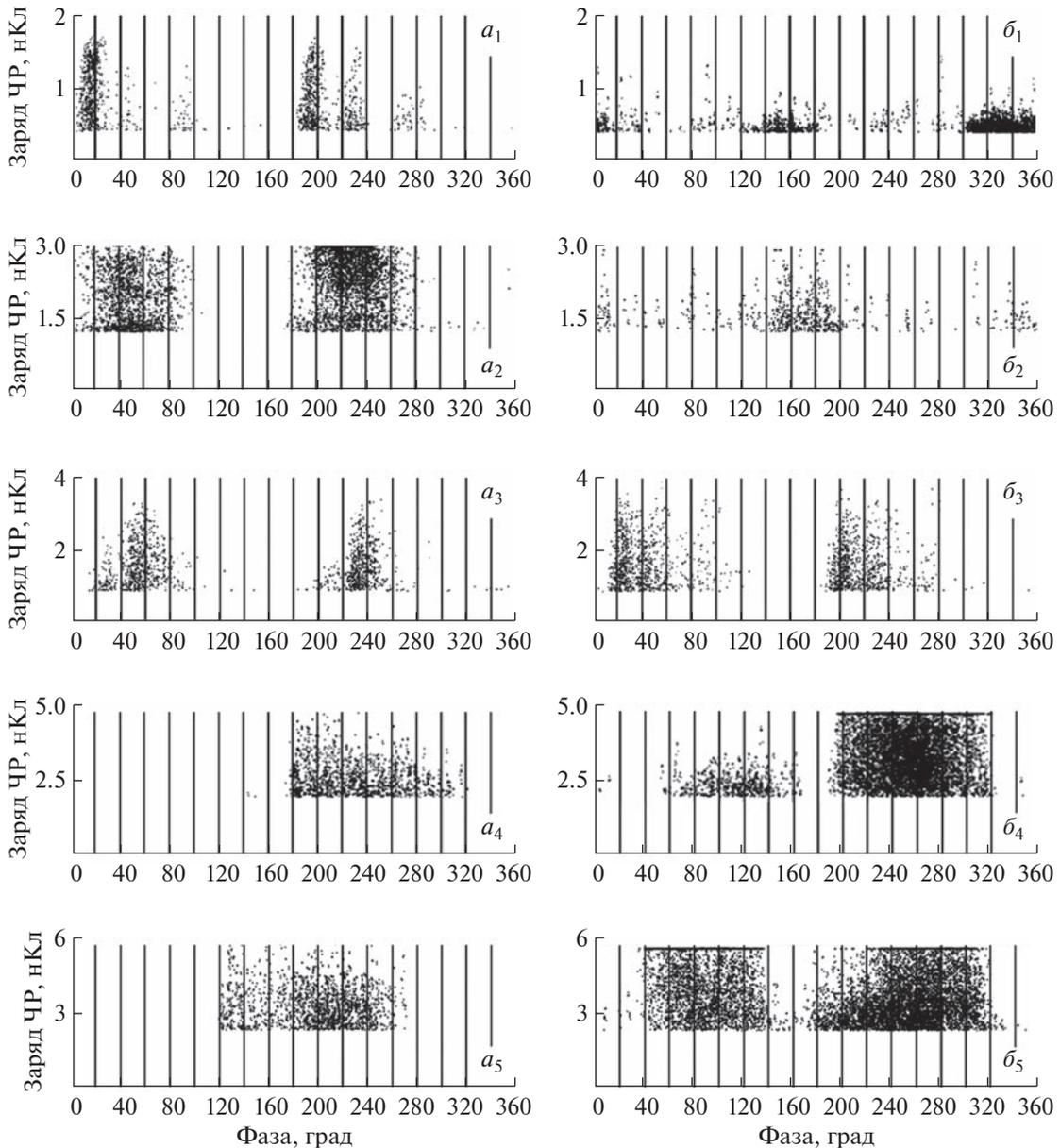
для дефектов с  $q < 3$  нКл. Однако в образцах с дефектами ( $q \geq 4$  нКл) значительное увеличение  $q$  при детектировании акустическим датчиком вызвано, в основном, процессом генерации акустических волн на поверхности дефекта, а уменьшение сигналов ЧР при детектировании электромагнитным датчиком (рис. 3) происходит за счет стримерного распространения электронов в полости дефекта с увеличением разности полей  $E_a - E_s$ . Нами предположено, что увеличение ширины и изменение формы мощных импульсов ЧР также вызвано описанным выше процессом генерации акустических импульсов на поверхности дефекта. Причем узкие импульсы ЧР (рис. 3б) относятся к их распространению только в полости дефекта, а широкие – к движению зарядов вдоль поверхности дефекта (рис. 3а) [10].

Последовательность процессов распространения импульсов ЧР через полость дефекта, а затем через диэлектрическую поверхность, экспериментально была обнаружена в работе [11], а затем в нашей работе [6]. Выполненные нами однократные измерения набора характеристик ЧР позволяют определять более точно только текущее состояние ВИ на подстанциях. Поэтому в ряде работ в последнее время стала обсуждаться проблема перехода от однократного обследования к непрерывному контролю (мониторингу) рабочего состояния с помощью использования различных физических методов. В наших последних работах мы использовали для этого уже разработанный набор диагностических параметров в основном основанный на мониторинге изменения фазовых характеристик, детектируемых электромагнитным и акустическим датчиками, что позволяет повысить точность прогнозирования остаточного ресурса ВИ [12].

Скорость развития наиболее опасных дефектов устанавливается по изменению таких диагностических параметров, как смещение мощных ЧР



**Рис. 3.** Распределения плотностей зарядов на дефекте “стержень–фланец” с интенсивностью 5 нКл в полимерном изоляторе: в полости дефекта (а) и на диэлектрической поверхности дефекта (б), измеренные электрооптическим датчиком с фокусированным лазерным пучком.



**Рис. 4.** Амплитудно-фазовые характеристики ЧР, детектированных электромагнитным (*а*) и акустическим (*б*) датчиками, для образцов с дефектом на границе “стержень—оконцеватель”;  $0.4 \leq q \leq 6.0$  нКл ( $a_1$ – $a_5$  и  $b_1$ – $b_5$ ).

в фазовые интервалы с приближением к началу полупериода ( $180^\circ$ – $360^\circ$ ), а также увеличение кажущегося заряда во временном интервале между двумя последовательными измерениями диагностических параметров. По скорости развития наиболее опасных дефектов может выполняться прогнозирование остаточного ресурса рабочего состояния изоляторов.

С учетом последних результатов по мониторингу высоковольтных диэлектрических элементов, основанных на оценке развития наиболее важных дефектов и стохастичности таких процессов, функцию старения ВИ можно представить в виде экспоненциальной временной зависимости от ряда диагностических параметров  $A(t)$ , таких как

общий ресурс в отсутствие дефектов ( $t_{\text{рес}}$ ),  $t_{\text{деф}}$  – момент образования регистрируемого дефекта,  $a$  – показатель отношения текущего времени к ресурсу. В этом случае функция  $A(t)$  состоит из двух интервалов: от  $t = 0$  до  $t_{\text{деф}}$ :  $t_{\text{деф}} - t_{\text{тек}}$ . время:

$$A(t) = A \left[ 1 - \left( \frac{t}{t_{\text{рес}}} \right)^a \right],$$

поскольку образование дефекта приводит к изменению (уменьшению)  $t_{\text{рес}}$  и  $A(t)$  в интервале ( $t_{\text{деф}} - t_{\text{тек}}$ ). Тогда  $A(t)$  будет иметь вид

$$A(t) = A \left( \frac{-t_{\text{деф}}}{t_{\text{рес}}} \right)^a - DA,$$

где  $DA$  – характеризует уменьшение  $A$  за счет дефекта. Показатель  $a$  будет иметь значение, зависящее от степени опасности дефекта.

В предельном случае  $t_{\text{деф}} = t_{\text{отказа}}$ , т.е. соответствует прекращению функционирования, следовательно

$$A(t) = A \left( 1 - \frac{t_{\text{отк}}}{t_{\text{рес}}^2} \right) - DA = 0.$$

Тогда остаточный ресурс

$$Dt_{\text{рес}} = t_{\text{рес}} \sqrt[4]{1 - DA} - t_{\text{деф}}.$$

Поскольку процесс старения имеет вероятностный характер, то значение  $DA$  является сложной функцией вида дефекта и физических процессов, вызывающих дефект, и значения  $DA$  в дальнейшем будут уточняться. Нами для уточнения остаточного ресурса предварительно использовались значения  $DA$ , полученные через функцию зависимости роста дефекта от временного сдвига, фазового сдвига и интенсивности МЧР, детектированных акустическим датчиком.

На рис. 4 приведены изменения интенсивности, количества и фазового сдвига МЧР для полимерного малодефектного ( $q \leq 3$  нКл) и бездефектного ВИ, измеренные с помощью электромагнитного и акустического датчиков с временным сдвигом в три месяца. В малодефектном образце все приведенные выше параметры сохранялись неизменными, а в дефектном образце они значительно изменялись, что стало причиной замены ВИ, т.е. его остаточный ресурс сократился до этого временного интервала ( $t_{\text{рес}} \leq 3$  мес.).

Для оценки остаточного ресурса более высоковольтных фарфоровых изоляторов были использованы образцы с более высокой интенсивностью ЧР ( $q \geq 5$  нКл) (рис. 3). Резкое уменьшение остаточного ресурса в пределах трех месяцев соответствовало уменьшению интенсивности и количества ЧР при измерении электромагнитным датчиком и увеличении подобных значений для  $q$  и  $N$  при измерении акустическим датчиком (рис. 4).

В результате более полного обследования технического состояния дефектов ВИ в процессе эксплу-

атации с зарядами ЧР выше 3 нКл с помощью электромагнитного и акустического методов было получено более полное доказательство предложенного ранее механизма значительного влияния остаточных от предыдущих ЧР электрических полей на диэлектрических поверхностях дефектов на процессы и механизмы последующих ЧР. Было установлено, что для дефектов с зарядами ЧР выше 3 нКл более точную информацию представляют характеристики ЧР, измеренные одновременно акустическим и электромагнитным датчиками.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Hikita M., Yamada K., Nakamura A. et al.* // IEEE Trans. Electr. Insul. 1990. V. 25. No. 3. P. 453.
2. *Morshuis P.H.F., Kreuger F.H.* // J. Phys. D. 1990. V. 23. No. 12. P. 1562.
3. *Аввакумов М.В., Голенищев-Кутузов А.В.* // Изв. вузов. Пробл. энерг. 2003. № 9–10. С. 134.
4. *Вдовико В.П.* Частичные разряды в диагностировании высоковольтного оборудования. Новосибирск: Наука, 2007. 155 с.
5. *Коробейников С.М., Овчинников А.Г.* Физические механизмы частичных разрядов. Новосибирск: Издательство НГТУ, 2022. 266 с.
6. *Голенищев-Кутузов А.В., Голенищев-Кутузов В.А., Семенников А.В. и др.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2022. Т. 86. № 11. С. 1660; *Golenishchev-Kutuzov V.A., Golenishchev-Kutuzov A.V., Semennikov A.V. et al.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2022. V. 86. No. 11. P. 1376.
7. *Кузьмин Г.Н.* // в кн: Физическая энциклопедия. Т. 4. М.: БРЭ, 1994. С. 544.
8. *Рауба Э.И.* // в кн: Физическая энциклопедия. Т. 1. М.: Советская энциклопедия, 1988. С. 598.
9. *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.* // Russ. J. Nondestruct. Test. 2018. V. 54. No. 10. P. 682.
10. *Florkowski M.I.* // Measurement. 2022. V. 196. Art. No. 111198.
11. *Nikonov V., Bartnics R., Wertheimer M.R.* // IEEE Transact. Plasma Sci. 2001. V. 29. No. 6. P. 866.
12. *Голенищев-Кутузов В.А., Голенищев-Кутузов А.В., Семенников А.В. и др.* // Изв. вузов. Пробл. энерг. 2023. Т. 25. № 1. С. 154.

## Monitoring of the current operating condition and forecasting of the residual life of high-voltage insulators

V. A. Golenishchev-Kutuzov<sup>a</sup>, A. V. Golenishchev-Kutuzov<sup>a</sup>, A. V. Semennikov<sup>a, \*</sup>,  
R. I. Kalimullin<sup>a</sup>, D. A. Ivanov<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Kazan State Power Engineering University, Kazan, 420066 Russia  
\*e-mail: campoce6e@gmail.com

The features of the developed complex remote method for diagnosing the current operating condition and predicting the residual life of high-voltage insulators under operating conditions are considered. The basis is the registration and subsequent computer analysis of a set of experimentally established diagnostic parameters of partial discharges. To find and localize the location, type and degree of danger of defects, a two-channel contactless method of registering partial discharges using electromagnetic and acoustic sensors as part of narrow-focused antennas is used. Special attention is paid in the article to the influence of the most dangerous defects arising due to induced electric fields created by previous partial discharges.