

ПОЛУЧЕНИЕ ДАННЫХ ДЛЯ ОБУЧЕНИЯ СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ ПО ВЫЯВЛЕНИЮ ГАЗОВЫХ ВКЛЮЧЕНИЙ В СТЕКЛЯННОЙ ДЕТАЛИ ИЗОЛЯТОРА ПС-70Е

А.В. Коржов, korzhovav@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8504-9668>
П.В. Лонзингер, lonzingerpv@susu.ru, <https://orcid.org/0009-0001-0961-926X>
В.И. Сафонов, safonovvi@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6452-9286>
В.А. Сурин, surinja@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3091-5370>
М.А. Ческидова, cheskidovama@susu.ru, <https://orcid.org/0009-0002-9400-9585>
К.Н. Белов, belovkn@susu.ru, <https://orcid.org/0009-0003-1915-5061>
Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

Аннотация. Рассмотрены вопросы получения данных для обучения систем технического зрения, способных выявлять сферические воздушные включения в стеклянных деталях подвесных изоляторов марки ПС-70Е. Данные представлены для воздушных пузырей диаметрами 1 и 2 мм в головке стеклянной детали. Расчет электрического поля при работе изолятора в наихудших условиях эксплуатации позволил выявить области размещения дефектов с нарушением электрической прочности. Для определения наличия дефектов по одному изображению была создана трехмерная модель трассировки лучей, в которой подсветка стеклянной детали осуществляется ортогонально снизу, а съемка производится со стороны головки. На основе моделирования выявлены области расположения воздушных включений диаметрами 1 и 2 мм, в которых дефекты не различимы. Установлено, что имеются области расположения дефектов, в которых наблюдается нарушение электрической прочности, но которые не удастся выявить при применяемых условиях съемки. Доля областей при изученных условиях, одновременно относящихся к двум названным категориям, составляет суммарно 6,7 и 2,5 % для пузырей с диаметрами 1 и 2 мм соответственно. Имеются области расположения пузырей, для которых наблюдается значительное искажение фигур дефектов при описанных условиях (22,4 и 20,0 % для пузырей 1 и 2 мм соответственно).

Ключевые слова: электрическая прочность, газовое включение, стеклянные подвесные изоляторы, цифровое моделирование, метод конечных элементов

Благодарности. Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (грант № FENU-2023-0025).

Для цитирования: Получение данных для обучения системы технического зрения по выявлению газовых включений в стеклянной детали изолятора ПС-70Е / А.В. Коржов, П.В. Лонзингер, В.И. Сафонов и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». 2024. Т. 24, № 2. С. 27–36. DOI: 10.14529/power240203

Original article
DOI: 10.14529/power240203

OBTAINING DATA FOR TRAINING A VISION SYSTEM TO DETECT GAS INCLUSIONS IN THE GLASS PART OF AN PS-70E INSULATOR

A.V. Korzhov, korzhovav@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8504-9668>
P.V. Lonzinger, lonzingerpv@susu.ru, <https://orcid.org/0009-0001-0961-926X>
V.I. Safonov, safonovvi@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6452-9286>
V.A. Surin, surinja@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3091-5370>
M.A. Cheskidova, cheskidovama@susu.ru, <https://orcid.org/0009-0002-9400-9585>
K.N. Belov, belovkn@susu.ru, <https://orcid.org/0009-0003-1915-5061>
South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

Abstract. This paper considers obtaining data for training technical vision systems to detect spherical air inclusions in the glass parts of suspended insulators of the PS-70E brand. The data are provided for air bubbles with diameters of 1 and 2 mm in the head of the stackable part. Based on the distribution patterns of the electric field, the location

of the bubbles in which the electrical strength is violated during the operation of the insulator under the worst operating conditions, i.e. under a voltage of 40 kV, are identified. To determine the presence of bubbles from one image, a three-dimensional ray tracing model was created in which the illumination of the glass part is carried out orthogonally from below, and the image is taken from the side of the head. The modeling identifies the locations of the air bubbles in which defects are not distinguishable. There are areas of defects in which there is a violation of electrical strength, which cannot be identified under the applicable conditions of removal. The proportion of regions that simultaneously belong to the two categories is 6.7 and 2.5 % for holes with diameters of 1 and 2 mm, respectively. There are bubble locations for which there is a significant distortion of the defect figures under the described conditions (22.4 and 20.0 % for bubbles of 1 and 2 mm, respectively).

Keywords: electrical strength, gas inclusion, glass suspension insulators, digital modeling, finite element method

Acknowledgments. The research was carried out at the expense of the Russian Ministry of Science and Higher Education (state assignment for fundamental scientific research No. FENU-2023-0025 (2023250Г3)).

For citation: Korzhov A.V., Lonzinger P.V., Safonov V.I., Surin V.A., Cheskidova M.A., Belov K.N. Obtaining data for training a vision system to detect gas inclusions in the glass part of an PS-70E insulator. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*. 2024;24(2):27–36. (In Russ.) DOI: 10.14529/power240203

Введение

В процессе изготовления стеклянных деталей изоляторов возможно появление дефектов, ухудшающих механические и электроизоляционные качества изолятора. Эти дефекты в настоящее время фиксируются визуально на просвет оператором производственной линии [1]. Наличие субъективного фактора и ошибок в определении возможных дефектов способно вызвать появление бракованных изделий в конечной продукции. Отсутствие точной идентификации параметров дефектов и статистических данных [2] не позволяет анализировать состояние производственной линии и прогнозировать свойства стеклянных изоляторов при их дальнейшей эксплуатации. Повышение точности выявления дефектов на этапе производства возможно с использованием систем технического зрения. Реализация систем технического зрения на основе нейронных сетей требует предварительного обучения на основе помеченных шаблонов [3, 4].

Для стеклянных изоляторов особенно остро стоит вопрос о получении набора помеченных обучающих изображений в достаточном количестве и с достаточным качеством. Сбор, сегментация и маркировка высококачественных изображений могут быть чрезмерно затратными как по времени, так и по ресурсам. В некоторых случаях данная проблема может быть решена при помощи предварительной подготовки модели с использованием общего набора данных, такого как ImageNet [5], а затем точной настройки на меньшем наборе изображений, непосредственно связанных с целями проекта. Однако в зависимости от специфических требований к конечной модели обобщенный набор данных может оказаться бесполезным.

Сложности в определении дефектов связаны со слабой контрастностью изображений и бликами от поверхности стекла. В процессе эксплуатации форм для затвердевания стеклянной детали изменяются оптические характеристики поверхности детали, например, возможно появление матовой поверхности головки стеклянной детали. В результате контуры изображений дефектов, расположен-

ных глубоко в головке, размываются. Перечисленные обстоятельства создают сложности при применении методов технического зрения для выявления дефектов в стеклянной детали.

Виды дефектов стеклянных деталей изоляторов и нормативные требования к ним определены в [6]. Влияние на электрофизические свойства оказывает наличие газовых включений в деталях. При нарушении электрической прочности газового включения возникают ЧР, которые могут привести к разрушению стеклянной детали. Представленные в [6] требования к газовым включениям не содержат информации о допустимом размещении пузырей, отвечающих указанным параметрам. Например, невозможно однозначно утверждать, произойдет ли пробой пузыря диаметром 2 мм при его расположении вблизи внутренней границы головки.

Исследования о размерах и местоположении критических дефектов не являются систематическими. В [7] авторы рассматривают влияние загрязнений и поверхностных дефектов на картину распределения электрического поля вдоль пути утечки изоляторов. Статья [8] посвящена вопросу появления частичных разрядов при наличии на поверхности полимерных изоляторов капель воды. В [9] рассмотрены закономерности нарушения электрической прочности стеклянных изоляторов при наличии в стеклянной детали различных дефектов. Авторами сделан вывод о том, что нарушения электрической прочности стеклянных изоляторов в большей мере связано с развитием локальных разрядных процессов, чем с возникновением избыточных механических напряжений под воздействием усиленного неоднородными включениями электрического поля. По итогам исследования авторами сформулирован ряд рекомендаций по ведению технологического процесса с целью стабилизации электрической прочности высоковольтных стеклянных изоляторов. Публикация [10] посвящена вопросам влияния параметров поверхностных загрязнений изоляторов на картину распределения в нем электрического поля.

Таким образом, актуальным является определение влияния параметров и расположения воздушных включений в стеклянных изоляторах на их электрофизические свойства. Также актуальным является установление предельных параметров газовых включений (размеров и относительного расположения в стеклянной детали), которые могут быть выявлены и классифицированы нейронными сетями с помощью оптических изображений стеклянных деталей.

Расчет картин распределения электрического поля в изоляторе

Электрическая прочность газового включения определяется множеством факторов, таких как состав газа, его температура и давление, форма и размеры включения и т. д. Критическая напряженность электрического поля является параметром, по величине которого можно судить об электрической прочности. Для выявления размеров газовых включений, при которых возможно развитие самостоятельного разряда, необходим расчет картин распределения электрического поля методом конечных элементов [11, 12].

При частоте 50 Гц вихревая составляющая электрического поля пренебрежительно мала и ее можно не учитывать при проведении численного расчета. В таком случае целесообразно применение квазистационарной формулировки полевой задачи в частотной области [13].

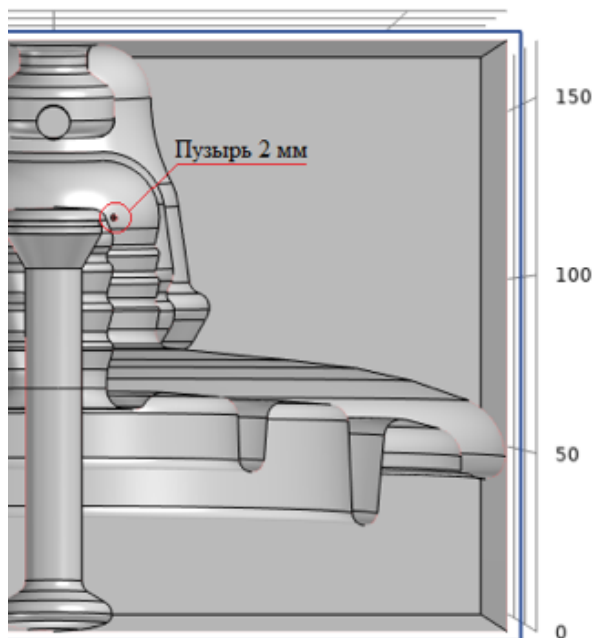


Рис. 1. Трехмерная геометрическая модель изолятора
ПС-70Е в разрезе по осевому сечению
Fig. 1. Axial section of a model of the PS-70E (U70)
insulator

Стеклянная деталь изолятора обладает осевой симметрией. В то же время наличие внутри стек-

лянной детали газового включения не позволяет применять двумерные осесимметричные модели для расчета картин распределения электрического поля. Для рассматриваемого в статье изолятора ПС-70Е исследуемая модель с дефектом в виде воздушного пузыря показана на рис. 1.

Согласно [14] изолятор ПС-70Е должен выдерживать напряжение 40 кВ. Определение границ нарушения электрической прочности дефектов целесообразно проводить при наихудших условиях эксплуатации, т. е. при напряжении с амплитудным значением 56,57 кВ. Поэтому граничные условия в модели приняты 0 кВ для шапки изолятора и 56,57 кВ – для стержня.

При рабочих напряжениях с частотой 50 Гц материал каждого элемента изолятора характеризуется постоянными значениями удельной проводимости и диэлектрической проницаемости. Свойства материалов, входящих в состав доменов рассматриваемой модели, назначены по справочным данным из множества открытых источников. Проводимость стекла в модели на основе данных из [1, 15] принята равной 10^{-8} См/м из следующих условий: наихудшие условия эксплуатации изолятора (температура до 100 °С) и наибольшая напряженность поля в дефекте. Диэлектрическая проницаемость стекла принята равной 7.

Минимальный размер элемента сетки для метода конечных элементов определяется размерами дефекта. Домен, соответствующий воздушному пузырю, был разбит сеткой из тетраэдральных элементов со стороной не более 2,5 % радиуса пузыря. Расчет поля, проведенный для исходной сетки и для сетки с меньшими размерами тетраэдров, показал устойчивость результатов расчета от размера элемента сетки.

Для верификации применяемых моделей был проведен расчет поля для изолятора без дефекта. По результатам расчета найдена емкость системы проводников «стержень – шапка», равная 38,989 пФ. Сопоставление найденного значения с результатами опытного определения емкости изолятора ПС-70Е (равной 40 пФ) показало отличие не более 2,5 %, что говорит о правильности построения модели и выбора характеристик материалов в ее доменах.

В целях определения областей расположения газовых включений с нарушением электрической прочности был проведен расчет картин распределения электрического поля для пузырей воздуха диаметрами 1 и 2 мм. Для каждого расположения были определены максимальное и минимальное значения напряженности поля в пределах пузыря.

При расположении сферического воздушного включения в однородном поле вводится понятие «критическая напряженность поля», которая определяется по эмпирической формуле [16]:

$$E_{кр} = p \cdot \left(\frac{E}{p}\right)_{cr} \cdot \left(1 + \frac{B}{(2 \cdot p \cdot R)^n}\right). \quad (1)$$

Здесь p – давление, Па; $\left(\frac{E}{p}\right)_{cr} = 24,2 \text{ В} \cdot \text{Па}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$; $B = 8,6 \text{ м}^2 \cdot \text{Па}^2$ и $n = 0,5$ для воздуха; R – радиус дефекта сферической формы. Если принять давление внутри пузырьков воздуха равным 1 атм (10^5 Па), то для пузырьков воздуха диаметрами 1 и 2 мм соответственно $E_{кр} = 4,5 \text{ МВ/м}$ и $E_{кр} = 3,89 \text{ МВ/м}$.

Поскольку электрическое поле в дефекте неоднородно, для оценки электрической прочности дефектов предлагается использовать критерий:

$$R(\max(E), \min(E)) = \begin{cases} \text{«НЭП»}, & \text{если } \max(E) \text{ и } \min(E) \geq E_{кр}; \\ \text{«ВНЭП»}, & \text{если } \max(E) \geq E_{кр} \text{ и } \min(E) < E_{кр}; \\ \text{«ЭПНН»}, & \text{если } \max(E) \text{ и } \min(E) < E_{кр}, \end{cases} \quad (2)$$

Здесь $\max(E)$ и $\min(E)$ – соответственно максимальная и минимальная напряженности электрического поля внутри воздушного пузыря. В дефектах из категории «НЭП» будет наблюдаться развитие первичного разряда, из категории «ЭПНН» – электрическая прочность не будет нарушена. Для промежуточной категории «ВНЭП» требуются дополнительные исследования для определения возможности развития первичного разряда.

В соответствии с критерием (2) был получен набор данных, характеризующий электрическую прочность пузырей воздуха диаметрами 1 и 2 мм в головке стеклянной детали изолятора ПС-70Е. На основе полученных данных на рис. 2 построены области расположения дефектов в соответствии с принятыми категориями: «НЭП» (красный), «ВНЭП» (желтый), «ЭПНН» (синий).

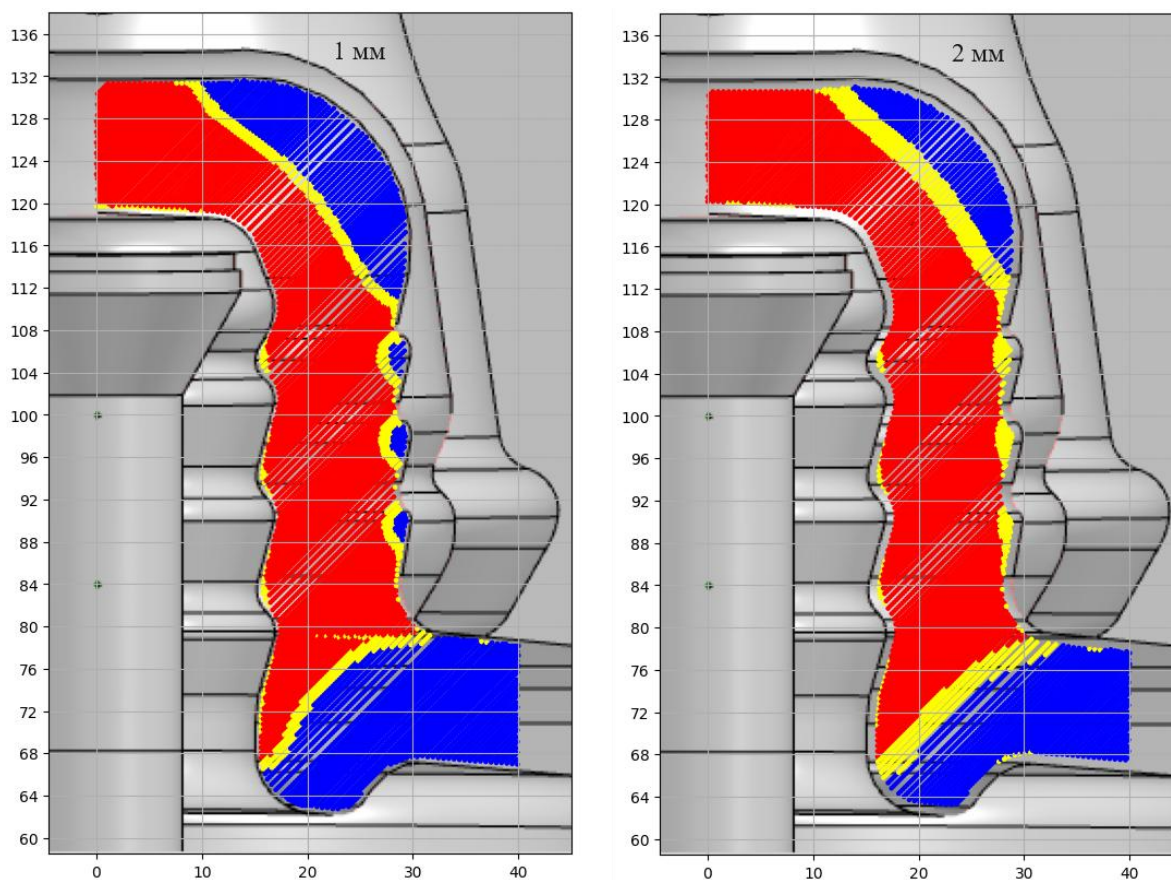


Рис. 2. Области расположения пузырей диаметрами 1 и 2 мм в стеклянной детали изолятора ПС-70Е, выделенные по отношению к сохранению электрической прочности
Fig. 2. The locations of bubbles with diameters of 1 and 2 mm in the glass part of the PS-70E (U70) insulator, highlighted in relation to the preservation of electrical strength

Оптическая модель изолятора

Для генерации реалистичных изображений чаще всего используют модели, сгенерированные в САД-системах и нарисованные в системах создания компьютерной графики [17–22]. Моделирование прозрачных объектов осуществляется с помощью программного обеспечения для создания трехмерной графики с функцией трассировки лучей и просчета реалистичных отражений и преломлений [23]. Поскольку длина волны видимого света намного меньше размеров дефектов в детали (от 0,1 до 2 мм), можно ограничиться приближением геометрической оптики. Одним из эффективных инструментов создания такого рода моделей является программный пакет Blender 3D.

Для стеклянной детали изолятора ПС-70Е в Blender 3D разработана модель, предназначенная для изучения трассировки лучей. Принят материал стеклянной детали Glass BSDF с коэффициентом преломления 1,5 [24]. Для верхней части головки параметр Roughness принят равным 0,16, для остальной детали – 0,1. Это позволяет учесть появление матовости поверхности детали.

Выявление дефектов в стеклянной детали изолятора по одному изображению позволит сократить временные затраты на исследование каждого конкретного образца. Наибольшее число потенциальных дефектов может быть зафиксировано при съемке со стороны головки с ортогональной подсветкой снизу тарелки. Поэтому источником равномерного белого излучения принята часть плоскости, расположенная под тарелкой изолятора. Проведенные исследования показали, что изменение интенсивности освещения стеклянной детали в широком диапазоне (от 10 до 100) слабо сказывается на эффективности обнаружения дефектов. Поэтому далее в качестве источника принята светящаяся плоскость из материала с белой текстурой и атрибутом Emission, равным 20. На высоте 47 см (определяется параметрами камеры) от участка плоскости расположена виртуальная камера с фокусным расстоянием 38,4 мм и размером матрицы 24 мм. Получаемое в результате моделирования изображение разрешением 4096 × 4096 рассчитывается в результате 100 сэмплов (итераций). Для определения параметров трассировки лучей принят набор Fast Global Illumination. Указанные параметры выбраны из условия оптимальности времени моделирования при достаточном соответствии модели дефекта реальным объектам.

Модель изолятора без дефектов (эталонное изображение) была импортирована в Blender 3D в формате STL. Имитация воздушных включений проводилась с помощью добавления в сцену объекта UVSphere и последующего исключения его из геометрии детали методами логического преобразования.

Для подтверждения идентичности модельных изображений стеклянных деталей и изображений

реальных объектов применена метрика CatSIM [25]. Выявлено, что сходство между двумя изображениями изоляторов с разными дефектами, полученными съемкой реальных объектов, составляет 0,67. Сравнение изображений, полученных при помощи описанного моделирования, и изображений реальных объектов дало значение, равное 0,58. Можно утверждать, что изображения, полученные методом моделирования, достоверно отражают все существенные оптические эффекты.

В результате был получен набор изображений воздушных пузырей диаметром 1 и 2 мм при всех расположениях их центров, рассмотренных ранее на этапе моделирования картин электрических полей. Все полученные изображения были переведены в черно-белый формат. Из изображений стеклянной детали с дефектами проводилось попиксельное вычитание эталонного изображения, после чего полученное изображение было подвергнуто медианной фильтрации с ядром 9. Равенство нулю всех пикселей разностного изображения свидетельствовало об отсутствии в изображении детали информации о дефекте и, следовательно, невозможности его выявления системой технического зрения. Критерием наличия такого рода информации выбрано количество пикселей разностного изображения, интенсивность которых превышает пороговое значение (принятое равным 10).

Для воздушных пузырей диаметрами 1 и 2 мм на рис. 3 построены области, выделенные на основании принятого критерия наличия информации. Координаты пузырей, у которых количество пикселей не превышает 10 (больше ядра медианной фильтрации на единицу), представлены на рис. 3. черными точками. В случае, если пузырь относится к категориям «НЭП» или «ВНЭП» и не может быть обнаружен, черная точка показана соответствующим цветом. Для пузырей, у которых количество пикселей превышает 10, но меньше удвоенного медианного по всему набору данных (679 для 1 мм, 2924 для 2 мм), цвет точки кодируется оттенком серого в соответствии с максимальной интенсивностью среди пикселей разностного изображения (от 0 до 255). Остальные пузыри показаны синими точками.

Считая вероятность возникновения дефекта равномерной по всей детали, дефект невозможно выявить в 19,5 % для пузырей диаметром 1 мм и 7,5 % – для пузырей размером 2 мм. Однако вероятность не выявить опасный дефект (категории «НЭП» и «ВНЭП») составляет только 5,7 и 0,9 % для пузырей диаметром 1 мм соответственно. Для пузырей диаметром 2 мм указанные значения соответственно равны 1,2 и 1,4 %. Процентное соотношение пузырей, представленных на изображении фигурами с искаженной геометрией (области с синими точками), составляет 22,4 и 20,0 % для пузырей 1 и 2 мм соответственно.

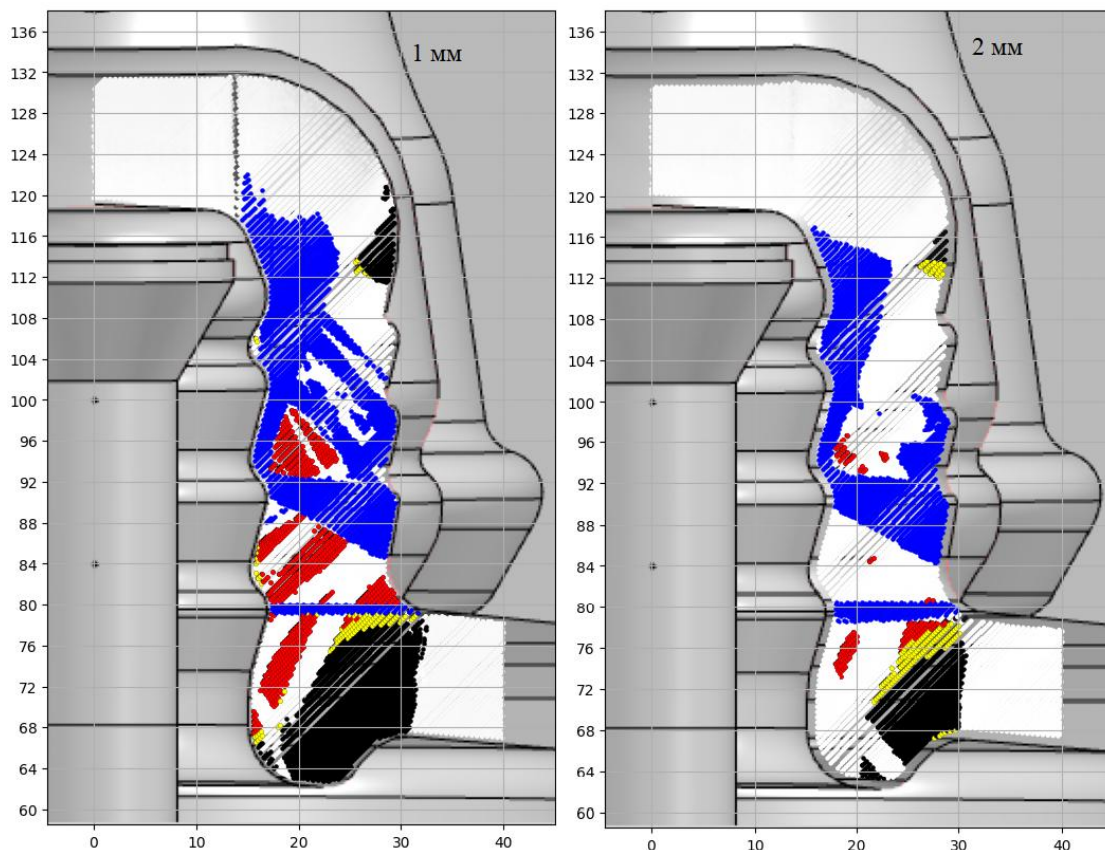


Рис. 3. Области расположения пузырей воздуха диаметрами 1 и 2 мм в стеклянной детали изолятора ПС-70Е, выделенные по отношению к наличию на изображениях визуальной информации о дефекте
Fig. 3. Locations of air bubbles with diameters of 1 and 2 mm in the glass part of the PS-70E (U70) insulator, highlighted in relation to visual information about the defect in the images

Обсуждение результатов

Структура проведенного исследования представлена на рис. 4.

Согласно алгоритму на рис. 4 можно получить данные для всего диапазона размеров дефектов и величин электрического поля. На основе полученных изображений дефектов и их классификации система технического зрения, обученная выявлять дефекты, будет способна выдавать оценку возможности нарушения электрической прочности газовых включений при том или ином их расположении в пределах стеклянной детали.

Сопоставление рис. 2 и 3 позволяет утверждать, что при изученных условиях возможно та-

кое расположение воздушных пузырей диаметрами 1 и 2 мм, при котором их выявление методами технического зрения на основе одного изображения затруднено. С другой стороны, при названном расположении ожидается нарушение электрической прочности внутри пузырей. Доля таких областей при изученных условиях составляет единицы процентов, что говорит о потенциальной высокой эффективности выявления опасных дефектов по одному изображению стеклянных изоляторов. При необходимости повышения эффективности следует провести усовершенствование оптических методов выявления дефектов в стеклянных деталях изоляторов.

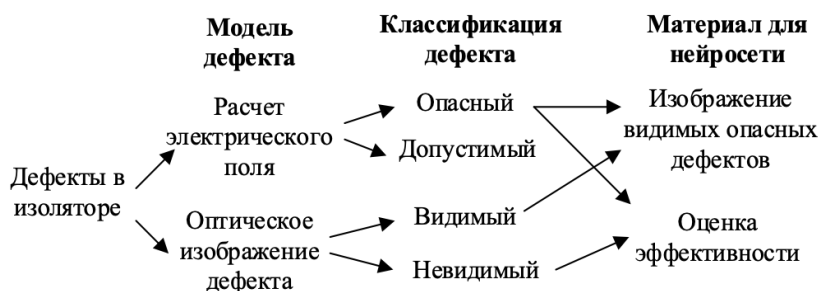


Рис. 4. Структура проведенного исследования
Fig. 4. The structure of the research

Стоит упомянуть, что данные, показанные на рис. 3, построены по критерию количества пикселей разностного изображения, интенсивность которых превышает 10. Выбор такого значения интуитивно понятен, но требует строгого обоснования либо пересмотра в дальнейших исследованиях. Синие области на рис. 3 содержат точки с координатами пузырей, у которых полученные изображения содержат информацию о дефекте в виде деформированных фигур. Наличие таких областей требует соответствующего обучения систем технического зрения с целью однозначной идентификации такого рода дефектов. Также в дальнейших исследованиях следует учесть фактор фонового шума, присутствующего в реальных изображениях.

Наличие областей, в которых невозможно выявление дефектов по одному изображению, является следствием сложной геометрической формы рассматриваемого объекта. Области, в которых дефект невозможно определить, образовались в результате полного внутреннего отражения лучей, идущих от выбранного источника освещения. Исследование возможности обнаружения дефекта по одному изображению было продиктовано прежде всего технико-экономической целесообразностью такого способа обнаружения дефекта. Выбор конкретного источника освещения был выполнен исключительно экспериментальным подбором лучшего варианта. В связи с этим становится актуальным вопрос о выборе оптимального количества и

месторасположения источников для освещения деталей сложной формы при выявлении в ней дефектов. Также интересным является вопрос о том, при каких изменениях формы стеклянной детали необходимо переобучение нейронной сети, а какие изменения формы являются незначительными. Указанные проблемы требуют проведения дальнейших исследований.

Заключение

Проведено исследование способа сбора информации для обучения нейронной сети, способной выявлять опасные с точки зрения нарушения электрической прочности дефекты в изоляторах. Исследование показало, что сложная форма детали не позволяет эффективно выявлять все имеющиеся опасные дефекты по одному изображению детали с дефектом. Для изолятора ПС-70Е 6,6 и 2,5 % опасных дефектов с диаметрами 1 и 2 мм не могут быть выявлены из-за того, что информация о дефекте отсутствует на изображении детали. Имеются области расположения пузырей, для которых наблюдается значительное искажение фигур дефектов при описанных условиях (22,4 и 20,0 % для пузырей 1 и 2 мм соответственно). Таким образом, выбранный метод получения изображений в целях обучения нейронных сетей имеет ряд недостатков. Для улучшения эффективности обнаружения дефекта необходимо совершенствование методов получения изображений стеклянных деталей изоляторов.

Список литературы

1. Цимберов А.М., Штерн А.В. Стекланные изоляторы. М.: Энергия, 1973. 200 с.
2. Summary of insulator defect detection based on deep learning / Jun Liu, MingMing Hu, JunYuan Dong, Xu Lu // Electric Power Systems Research. 2023. Vol. 224. P. 109688. DOI: 10.1016/j.epsr.2023.109688
3. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс: пер. с англ. 2-е изд. М.: Вильямс, 2006. 1103 с.
4. Гархов Д.А. Нейронные сети. Модели и алгоритмы. М.: Радиотехника, 2005. 253 с.
5. ImageNet: A large-scale hierarchical image database / J. Deng, W. Dong, R. Socher et al. // 2009 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Miami, FL, USA, 2009. P. 248–255. DOI: 10.1109/CVPR.2009.5206848
6. ГОСТ 6490–2017. Изоляторы линейные подвесные тарельчатые. Общие технические условия. М.: Стандартинформ, 2018. 36 с.
7. Comparative analysis of electric field distribution on glass and ceramic insulator using finite element method / D. Fahmi, L.A. Novario, I.M.Y. Negara, R. Wahyudi // 2016 International Seminar on Intelligent Technology and Its Applications (ISITIA). Lombok, Indonesia, 2016. P. 515–520. DOI: 10.1109/ISITIA.2016.7828713
8. Nazemi M.H., Hinrichsen V. Partial discharge investigation and electric field analysis of different oscillation modes of water droplets on the surface of polymeric insulator under tangential AC electric field stress // 2013 IEEE International Conference on Solid Dielectrics (ICSD). Bologna, Italy, 2013. P. 194–197. DOI: 10.1109/ICSD.2013.6619788
9. Влияние технологических факторов на электрическую прочность высоковольтных стеклянных изоляторов / Ким Ен Дар, Б.П. Гордиевич, В.И. Ковалев, С.М. Цурак // Сучасні будівельні матеріали. 2014. Вип. 2014-1 (105). С. 156–162.
10. Benguesmia H., M'ziou N., Boubakeur A. Simulation of the potential and electric field distribution on high voltage insulator using the finite element method // Diagnostyka. 2018. Vol. 19 (2). P. 41–52. DOI: 10.29354/diag/86414
11. Усачев А.Е. Методы расчета электрических полей: учеб. пособие. Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2013. 111 с.

12. Шевченко С.Ю., Окунь А.А. Анализ методов расчета электрических полей установок высоких напряжений // *Электротехника і Електромеханіка*. 2010. № 4. С. 59–62.
13. Дубицкий С. Инженерное моделирование квазистатического электромагнитного поля в программе ELCUT для задач электроники // Сборник «Электромагнитная совместимость в электронике». 2018. С. 84–88.
14. URL: <https://energocode.ru/izolyatory-ps-70-e/?ysclid=lw08ct22na336805241>.
15. Ржевская С.П. Электрические материалы. Диэлектрики: курс лекций. Минск: БНТУ, 2009. 142 с.
16. Niemeyer L., Fruth B., Gutfleisch F. Simulation of Partial Discharges in Insulation Systems // Proc. 7th Int. Symp. High. Dresden, 1991, paper 71.05.
17. Joseph L. Robot Operating System for Absolute Beginners. Apress, 2018. DOI: 10.1007/978-1-4842-3405-1
18. Synthetic Image Data for Deep Learning / J.W. Anderson, M. Ziolkowski, K. Kennedy, A.W. Apon. 2022. DOI: 10.48550/arXiv.2212.06232
19. Donzallaz P.Y. How to set up unity's high definition render pipeline for high-end visualizations. Jan 2020. [Online]. URL: <https://blogs.unity3d.com/2020/01/09/how-to-set-up-unitys-unityshigh-definition-render-pipeline-for-high-end-visualizations/>.
20. Martin E., Vo Van L. We have you covered with the measured materials library. Feb 2019. [Online]. URL: <https://blogs.unity3d.com/2019/02/08/we-have-you-covered-with-themeasured-materials-library/>.
21. Lagarde S., Lachambre S., Jover C. An artist-friendly workflow for panoramic HDRI // ACM SIGGRAPH 2016 Courses, ser. SIGGRAPH '16. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery. 2016. [Online].
22. Doan H.-G., Nguyen N.-T. New blender-based augmentation method with quantitative evaluation of CNNs for hand gesture recognition // *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*. 2023. Vol. 30 (2). P. 796–806. DOI: 10.11591/ijeecs.v30.i2.pp796-806
23. Siczka R., Pańczyk M. Blender as a tool for generating synthetic data // *Journal of Computer Sciences Institute*. 2020. Vol. 16. P. 227–232. DOI: 10.35784/jcsi.2086
24. ГОСТ 30698–2014. Стекло закаленное. Технические условия. М.: Стандартинформ, 2015. 20 с.
25. Thompson G.Z., Maitra R. CatSIM: A Categorical Image Similarity Metric // arXiv preprint arXiv:2004.09073. 2020.

References

1. Tsimberov A.M., Shtern A.V. *Steklyannye izolyatory* [Glass insulators]. Moscow: Energiya; 1973. 200 p. (In Russ.)
2. Jun Liu, MingMing Hu, JunYuan Dong, Xu Lu. Summary of insulator defect detection based on deep learning. *Electric Power Systems Research*. 2023;224:109688. DOI: 10.1016/j.epr.2023.109688
3. Haykin S. *Neural Networks*. 2nd edition. Moscow: Vil'yams; 2006. 1103 p. (In Russ.)
4. Tarkhov D.A. *Neyronnye seti. Modeli i algoritmy* [Neural networks. Models and algorithms]. Moscow: Radiotekhnika; 2005. 253 p. (In Russ.)
5. Deng J., Dong W., Socher R., Li L.-J., Li K., Fei-Fei L. ImageNet: A large-scale hierarchical image database. In: *2009 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Miami, FL, USA; 2009. P. 248–255. DOI: 10.1109/CVPR.2009.5206848
6. GOST 6490–2017 (IEC 60383:1993, NEQ; IEC 61211:2004, NEQ). *Izolyatory lineynye podvesnye tarel'chatye. Obshchie tekhnicheskie usloviya* [State Standard 6490–2017 (IEC 60383:1993, NEQ; IEC 61211:2004, NEQ). Linear suspended disc insulators. General technical conditions]. Moscow: Standartinform; 2018. 36 p. (In Russ.)
7. Fahmi D., Novario L.A., Negara I.M.Y., Wahyudi R. Comparative analysis of electric field distribution on glass and ceramic insulator using finite element method. In: *2016 International Seminar on Intelligent Technology and Its Applications (ISITIA)*. Lombok, Indonesia; 2016. P. 515–520. DOI: 10.1109/ISITIA.2016.7828713
8. Nazemi M.H., Hinrichsen V. Partial discharge investigation and electric field analysis of different oscillation modes of water droplets on the surface of polymeric insulator under tangential AC electric field stress. In: *2013 IEEE International Conference on Solid Dielectrics (ICSD)*. Bologna, Italy; 2013. P. 194–197. DOI: 10.1109/ICSD.2013.6619788
9. Kim Yen Dar, Gordievich B.P., Kovalev V.I., Tsurak S.M. *Vliyanie tekhnologicheskikh faktorov na elektricheskuyu prochnost' vysokovol'tnykh steklyannykh izolyatorov* [The influence of technological factors on the electrical strength of high-voltage glass insulators]. *Suchasni budivel'ni materiali* [Modern building materials]. 2014;2014-1(105):156–162. (In Russ.)

10. Benguesmia H., M'ziou N., Boubakeur A. Simulation of the potential and electric field distribution on high voltage insulator using the finite element method. *Diagnostyka*. 2018;19(2):41–52. DOI: 10.29354/diag/86414
11. Usachev A.E. *Metody rascheta elektricheskikh poley: ucheb. posobie* [Methods of calculating electric fields: study guide]. Kazan: Kazan State Energy University; 2013. 111 p. (In Russ.)
12. Shevchenko S.Yu., Okun' A.A. [Analysis of methods for calculating electric fields of high voltage installations]. *Elektrotehnika i Elektromehanika* [Electrical engineering and electromechanics]. 2010;4:59–62. (In Russ.)
13. Dubitskiy S. [Engineering simulation of a quasi-static electromagnetic field in the ELCUT program for electronics tasks]. In: *Sbornik "Elektromagnitnaya sovmestimost' v elektronike"* [Collection "Electromagnetic compatibility in electronics"]. 2018. P. 84–88. (In Russ.)
14. Available at: <https://energocode.ru/izolyatory-ps-70-e/?ysclid=1w08ct22na336805241>.
15. Rzhetskaya S.P. *Elektricheskie materialy. Dielektriki: kurs lektsiy* [Electrical materials. Dielectrics: a course of lectures]. Minsk: BNTU; 2009. 142 p. (In Russ.)
16. Niemeyer L., Fruth B., Gutfleisch F. Simulation of Partial Discharges in Insulation Systems. In: *Proc. 7th Int. Symp. High. Dresden, 1991*, paper 71.05.
17. Joseph L. *Robot Operating System for Absolute Beginners*. Apress; 2018. DOI: 10.1007/978-1-4842-3405-1
18. Anderson J.W., Ziolkowski M., Kennedy K., Apon A.W. *Synthetic Image Data for Deep Learning*. 2022. DOI: 10.48550/arXiv.2212.06232
19. Donzallaz P.Y. How to set up unity's high definition render pipeline for high-end visualizations. Jan 2020. [Online]. Available at: <https://blogs.unity3d.com/2020/01/09/how-to-set-up-unitys-unityshigh-definition-render-pipeline-for-high-end-visualizations/>.
20. Martin E., Vo Van L. We have you covered with the measured materials library. Feb 2019. [Online]. Available at: <https://blogs.unity3d.com/2019/02/08/we-have-you-covered-with-themeasured-materials-library/>.
21. Lagarde S., Lachambre S., Jover C. An artist-friendly workflow for panoramic HDRI. In: *ACM SIGGRAPH 2016 Courses, ser. SIGGRAPH '16*. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery. 2016. [Online].
22. Doan H.-G., Nguyen N.-T. New blender-based augmentation method with quantitative evaluation of CNNs for hand gesture recognition. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*. 2023;30(2):796–806. DOI: 10.11591/ijeecs.v30.i2.pp796-806
23. Sieczka R., Pańczyk M. Blender as a tool for generating synthetic data. *Journal of Computer Sciences Institute*. 2020;16:227–232. DOI: 10.35784/jcsi.2086
24. GOST 30698–2014 (EN 12150-1:2001, NEQ; EN 12140-2:2004, NEQ). *Steklo zakalennoe. Tekhnicheskie usloviya* [State Standard 30698–2014 (EN 12150-1:2001, NEQ; EN 12140-2:2004, NEQ). Tempered glass. Technical conditions]. Moscow: Standartinform; 2015. 20 p. (In Russ.)
25. Thompson G.Z., Maitra R. CatSIM: A Categorical Image Similarity Metric. *arXiv preprint arXiv:2004.09073*. 2020.

Информация об авторах

Коржов Антон Вениаминович, д-р техн. наук, доц., проф. кафедры электрических станций, сетей и систем электроснабжения, первый проректор – проректор по научной работе, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; korzhovav@susu.ru.

Лонзингер Петр Владимирович, канд. техн. наук, доц. кафедры электрических станций, сетей и систем электроснабжения, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; lonzingerpv@susu.ru.

Сафонов Валерий Иванович, канд. физ.-мат. наук, доц., доц. кафедры электрических станций, сетей и систем электроснабжения, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; safonovvi@susu.ru.

Суринов Владимир Анатольевич, канд. физ.-мат. наук, старший преподаватель кафедры прикладной математики и программирования, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; surinva@susu.ru.

Ческидова Мария Александровна, аспирант, преподаватель кафедры прикладной математики и программирования, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; cheskidova@susu.ru.

Белов Кирилл Николаевич, аспирант, ассистент кафедры оптоинформатики, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; belovkn@susu.ru.

Information about the authors

Anton V. Korzhov, Dr. Sci. (Eng.), Ass. Prof., Prof. of the Department of Power Plants, Networks and Power Supply Systems, Vice-Rector for Research, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; korzhovav@susu.ru.

Petr V. Lonzinger, Cand. Sci. (Eng.), Ass. Prof. of the Department of Power Plants, Networks and Power Supply Systems, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; lonzingerpv@susu.ru.

Valery I. Safonov, Cand. Sci. (Phys. and Math.), Ass. Prof., Ass. Prof. of the Department Power Plants, Networks and Power Supply Systems, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; safonovvi@susu.ru.

Vladimir A. Surin, Cand. Sci. (Phys. and Math.), Senior Lecturer of the Department Mathematics and Programming, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; surinva@susu.ru.

Mariya A. Cheskidova, Postgraduate Student, Lecturer of the Department Mathematics and Programming, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; cheskidova@susu.ru.

Kirill N. Belov, Postgraduate Student, Assistant of the Department Optoinformatics, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; belovkn@susu.ru.

Статья поступила в редакцию 04.04.2024; одобрена после рецензирования 06.05.2024; принята к публикации 06.05.2024.

The article was submitted 04.04.2024; approved after review 06.05.2024; accepted for publication 06.05.2024.