

УДК 004.932

АНАЛИЗ ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ И ИДЕНТИФИКАЦИИ ВНУТРЕННИХ ДЕФЕКТОВ В ЗАКРЫТЫХ ГАЗОВЫХ СМЕСИТЕЛЯХ

© Tan H., Li L., Wu G., Wang Q.

*State Grid Chongqing Electric Power Research Institute,
401123, Middle Section of Huangshan Avenue, 80, Chongqing, China
E-mail: longli_li@yeah.net*

Наличие дефектов внутренней структуры закрытых газовых смесителей (ЗГС) серьёзно влияет на нормальную работу оборудования. Для их обнаружения требуется эффективный неразрушающий метод. Исследована возможность использования рентгеновских цифровых изображений для контроля ЗГС. Кратко описан процесс их регистрации. В целях повышения качества исходных данных улучшена фильтрация шума алгоритмом нелокальных средних путём применения в нём коэффициента корреляции между областями изображения. Предложена модификация метода адаптивного выравнивания гистограммы с ограничением контраста. Система детектирования и предлагаемые методы обработки изображений были использованы для контроля двух ЗГС электроэнергетической компании (г. Чунцин, Китай). Установлено, что метод с высокой точностью выявляет дефекты оборудования и показывает его надёжность. Это исследование даёт теоретическую основу для дальнейшего внедрения рентгеновской технологии в область контроля оборудования ЗГС.

Ключевые слова: закрытый газовый смеситель, регистрация цифровых изображений, подавление шума на рентгенограммах, повышение качества изображения.

DOI: 10.15372/AUT20190609

Введение. Закрытые газовые смесители (ЗГС) играют важную роль в энергосистеме [1]. Повреждение их внутренних структур может привести к отказу оборудования. Прибор ЗГС имеет относительно большой размер и сложную конструкцию. Если возникает неисправность, его обычно приходится демонтировать для ремонта [2], что может привести к большим экономическим потерям и повлиять на электроснабжение подключённых к станции объектов. Поэтому для обеспечения стабильной работы ЗГС необходим безопасный и эффективный метод обнаружения и анализа внутренних дефектов без длительного прерывания процесса их эксплуатации.

Рентгеновская диагностика является перспективным методом неразрушающего контроля в промышленности [3], который также используется при проверке состояния ЗГС. Показано, что технология цифрового рентгеновского изображения может применяться для обнаружения частичного разряда без демонтажа ЗГС [4], а также для определения положения частичного разряда [5]. При этом оказалось, что полученные результаты согласуются с результатами сверхвысокочастотного и ультразвукового зондирования, что подтверждает надёжность технологии.

При обследовании трубопроводов выяснилось, что контраст на краю рентгеновского изображения низкий [6] и это может повлиять на надёжность обнаружения дефектов. Поэтому изображение нуждается в предварительной обработке в целях повышения его качества. В [7] для этого выполнены медианная фильтрация и пороговая обработка гистограммы, кроме того, проанализированы дефекты изображений посредством кривой оттенков серого. В [8] выполнены коррекция плоского поля и гамма-коррекция рентгеновских изображений, а также разработан гибридный метод улучшения изображения, сочетающий

резкую частотную локализацию, контурлет-преобразование и выравнивание гистограммы. При этом получены значительные улучшения контрастности и детализации изображений, что подтвердило эффективность предложенного метода.

Цель данного исследования — выявление дефектов внутренней структуры ЗГС путём рентгеновской цифровой визуализации, а также разработка метода цифровой обработки изображений, включающего процедуру подавления шума, и преобразование гистограммы для повышения контраста дефектов. В испытаниях на тестовом объекте получены хорошие результаты, что даёт определённую теоретическую основу для применения разработанной технологии проверки ЗГС.

1. Цифровая обработка изображений. *1.1. Подавление шума на изображении.* Изображение, полученное с помощью рентгенографии, включает в себя шум от рассеяния рентгеновских лучей, внутренние шумы детектора и т. д. Наличие этих шумов затрудняет обнаружение дефекта и его анализ, поэтому такое изображение должно быть предварительно обработано. В этом исследовании был усовершенствован алгоритм фильтрации нелокальных средних, который даёт возможность в полной мере использовать остаточную информацию в изображениях, что позволяет не только эффективно удалять шумы, но и максимально сохранять детализацию объектов. Принцип работы традиционного алгоритма нелокальных средних представлен в [9]. Результат фильтрации изображения $v(i)$ в пикселе с номером i даётся выражением

$$NL[v](i) = \sum_{j \in I} w(i, j)v(j), \quad (1)$$

где I — множество номеров пикселей, образующих некоторую область изображения; $w(i, j)$ — вес, значение которого зависит от сходства пикселей i и j . В свою очередь, сходство между пикселями зависит от сходства между различными областями, которое может быть выражено гауссовым взвешенным евклидовым расстоянием между блоком $N(i)$ соседей пикселя i и блоком $N(j)$ соседей пикселя j . Чем меньше это расстояние, тем больше сходство пикселей i и j . Для удобства в качестве блока соседей взято квадратное окно размером $(2k + 1) \times (2k + 1)$, $k = 1, 2, 3, \dots$, имеющее в центре рассматриваемый пиксель. Гауссово взвешенное евклидово расстояние может быть представлено как

$$d(i, j) = \|v(N(i)) - v(N(j))\|_{2,a}^2, \quad (2)$$

где a обозначает стандартное отклонение ядра Гаусса. Влияние шума может быть уменьшено путём свёртки с гауссовым ядром. Тогда вес можно выразить в виде

$$w(i, j) = \frac{1}{Z(i)} \exp\left(-\frac{\|v(N(i)) - v(N(j))\|_{2,a}^2}{h^2}\right), \quad (3)$$

где h — параметр фильтрации, $h = c\sigma$ (c — целое число, σ^2 — дисперсия шума); $Z(i)$ — нормировочная константа:

$$Z(i) = \sum_j \left(\frac{\|v(N(i)) - v(N(j))\|_{2,a}^2}{h^2}\right), \quad (4)$$

которая используется для предотвращения выхода значения градации серого цвета пикселя из границ, установленных на исходном изображении. Выражение (4) обеспечивает условия $0 \leq w(i, j) \leq 1$ и $\sum_j w(i, j) = 1$.

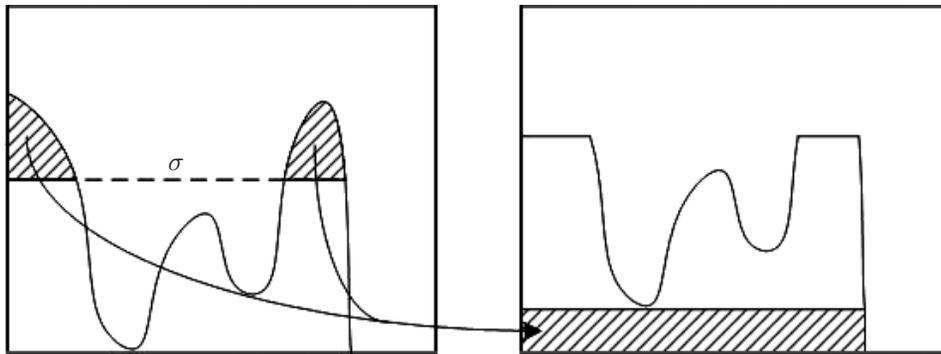


Рис. 1. Метод выравнивания гистограммы

Традиционный алгоритм нелокальных средних требует большого объёма вычислений и в связи с этим имеет низкую скорость обработки изображения. Кроме того, при высоком уровне шума появляются большие значения весов, что может привести к неудовлетворительному результату фильтрации. Поэтому для улучшения алгоритма нелокальных средних для оценки сходства изображения в различных областях был использован коэффициент корреляции

$$C(i, j) = \frac{\psi(v(i) - \bar{v}(i), v(j) - \bar{v}(j))}{\sqrt{\psi(v(i) - v(i'), v(i) - v(i'))\psi(v(j) - v(j'), v(j) - v(j'))}}, \quad (5)$$

где $\psi(\alpha, \beta) = \sum \alpha\beta$ (суммирование ведётся по пикселям, составляющим блок соседей); $\bar{v}(i)$ и $\bar{v}(j)$ — средние значения областей $N(i)$ и $N(j)$ соответственно. С использованием коэффициента корреляции (5) вес в алгоритме нелокальных средних был переопределён согласно выражению

$$w(i, j) = (1 - C(i, j))/2. \quad (6)$$

Отсюда, учитывая евклидово расстояние в исходном алгоритме, можно получить

$$d(i, j) = \frac{1}{\text{Num}(j)} w(i, j) \|v(N(i)) - v(N(j))\|_{2,a}^2, \quad (7)$$

где через $\text{Num}(j)$ обозначено количество пикселей j . Выражение (7) подставляем в (2) и получаем алгоритм улучшенной фильтрации.

1.2. *Процедура повышения качества изображения.* Цифровое изображение должно быть улучшено для получения полезной информации и определения внутренних дефектов ЗГС. В этом исследовании использовалось контрастное ограниченное адаптивное выравнивание гистограммы (алгоритм CLAHE) [10] (рис. 1). Шаги алгоритма:

1. Исходное изображение делится на блоки размером $m \times n$ (m и n — количество строк и столбцов соответственно).

2. Рассчитывается гистограмма каждого блока и обозначается как $H(k)$, где k — номер уровня серого цвета, $k \in [0, M - 1]$ (M — количество возможных уровней).

3. Рассчитывается предельное значение σ амплитуды сдвига: $\sigma = mn/\alpha k$, где α — положительный параметр, называемый коэффициентом усечения.

4. Пиксель, для которого k превышает σ в каждом блоке, равномерно распределяется по другим уровням серого, и гистограмма исходного изображения выравнивается. В конечном итоге имеем выровненную гистограмму, которую обозначим $G(k)$.

5. Значение серого для пикселя в центре блока получается в соответствии с $G(k)$, а затем серое значение изображения вычисляется с помощью билинейной интерполяции.

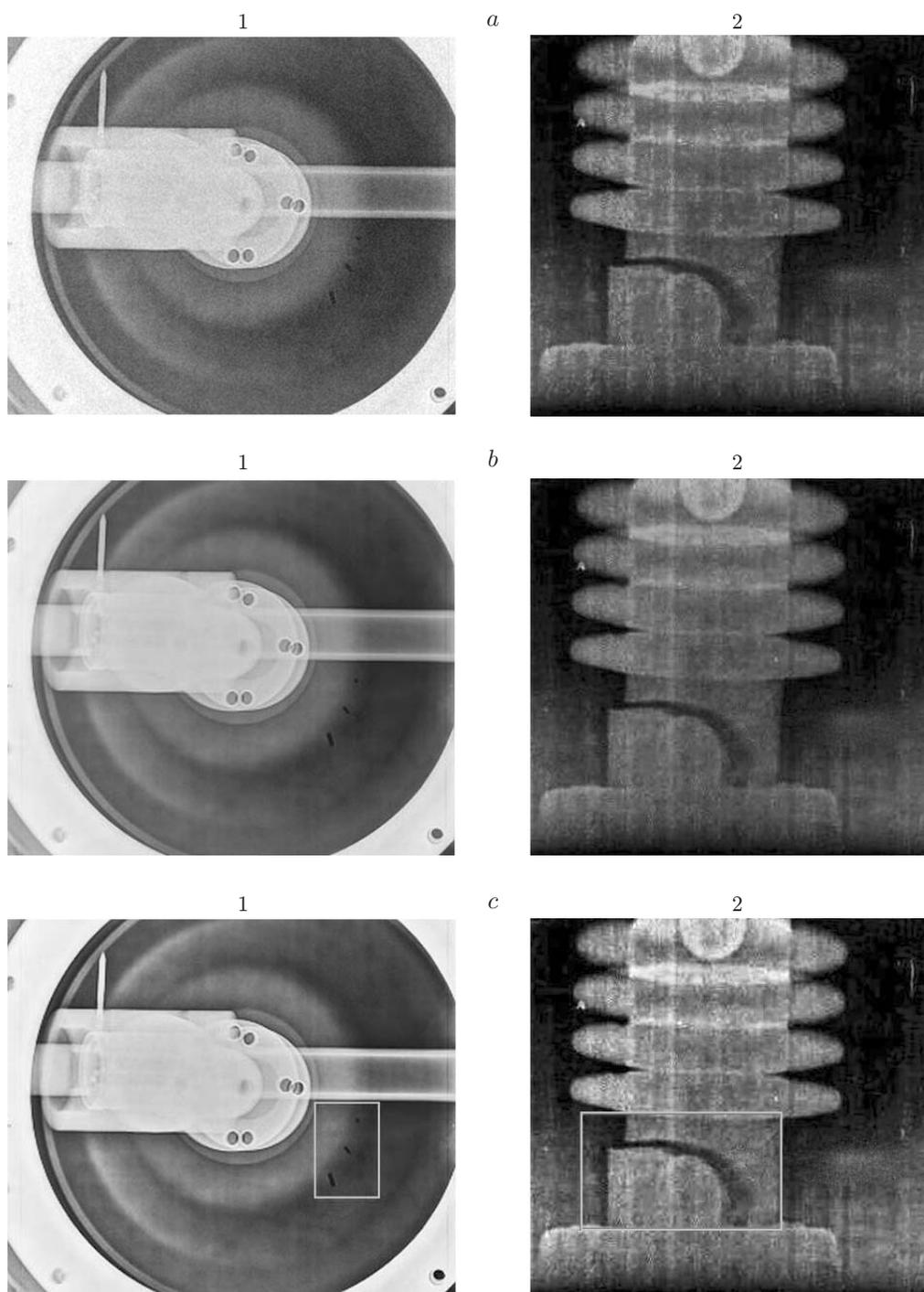


Рис. 2. Результаты применения разработанной системы: исходные цифровые изображения (a), изображения после подавления на них шума (b), итоговые изображения (c)

2. Пример детектирования и анализа изображений. Для тестирования разработанных методов были взяты два ЗГС электроэнергетической компании (г. Чунцин). При этом было предварительно установлено, что в дисковом изоляторе прибора 1 есть дефект, а прибор 2 имеет дефекты в секции шины. Изображения, полученные с помощью рентгеновской системы цифрового детектирования, показаны на рис. 2.

На рис. 2, *a* видно, что из-за рассеяния рентгеновского излучения и других помех изображения имеют относительно плохую визуализацию деталей и низкий контраст, вследствие чего по ним нельзя точно судить об имеющихся дефектах в ЗГС. В связи с этим они нуждаются в дальнейшей обработке. Вначале изображения были очищены от шума улучшенным алгоритмом нелокальных средних (разд. 1.1), чтобы облегчить точную диагностику дефектов. Результат представлен на рис. 2, *b*. После обработки пиковое отношение сигнал/шум для изображений приборов 1 и 2 составило 31,34 и 30,62 соответственно. Таким образом, шум был почти удалён в сравнении с исходными изображениями. При этом их разрешение не уменьшилось, детали не были уничтожены, а качество значительно улучшилось.

Для дальнейшего повышения качества изображений использовался модифицированный алгоритм SLANE (разд. 1.2). Сначала изображения выравнивались по гистограмме, а затем их пиксели были дополнительно скорректированы, что представлено на рис. 2, *c*. В результате этих процедур обнаружено, что контраст между объектом и фоном дополнительно увеличен, детали стали более чёткими, а внутренние дефекты двух ЗГС достоверно обнаружены. Найдено, что дефект прибора 1 полностью заключён внутри изолятора диска, а дефект прибора 2 состоит в том, что секция шины, поддерживающей изолятор, имеет трещины. Исходя из приведённого примера можно предположить, что цифровая рентгеновская диагностика имеет хорошую практическую перспективу для обнаружения дефектов внутренней структуры ЗГС. Благодаря предложенному методу обработки изображений получен хороший визуальный эффект, что позволило точно определить положение и тип дефектов. Таким образом, разработанный метод может успешно применяться при проверке ЗГС.

3. Обсуждение. В данном исследовании развиваются методы обработки цифровых рентгеновских изображений для обнаружения внутренних дефектов ЗГС. Из-за наличия различных помех в зарегистрированном цифровом изображении неизбежно возникает шум. Для его подавления использовался алгоритм нелокальных средних, который был модифицирован посредством применения коэффициента корреляции, чтобы улучшить скорость и качество обработки изображений, а также был предложен модифицированный алгоритм SLANE, повышающий контраст изображения и при этом хорошо сохраняющий его детали.

Для обработки зарегистрированных цифровых изображений использовались алгоритмы подавления шума и улучшения контраста, предложенные в данной работе. Полученные результаты представлены на рис. 2, *c*, где видно, что после применения указанных процедур качество изображения заметно улучшилось, а дефекты стали отчётливо видны. Дефектом прибора 1 была полость внутри дискового изолятора, а дефект прибора 2 заключался в том, что секция шины, поддерживающая изолятор, имела трещину. Тестовый пример показал, что метод, разработанный в этом исследовании, может применяться для контроля ЗГС.

Заключение. В предлагаемом исследовании изучено применение технологии рентгеновских цифровых изображений для обнаружения дефектов внутренней структуры ЗГС, зарегистрированы рентгеновские снимки ЗГС. Для получения цифровых изображений высокого качества были разработаны методы подавления шума и улучшения контраста. На примере анализа тестовых изображений можно заключить, что рассматриваемая технология достоверно определяет дефекты и заслуживает дальнейшего продвижения и применения в области проверки состояния ЗГС, находящихся в процессе эксплуатации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Gao W., Ding D., Zhao D., Liu W.** Propagation properties of high-frequency electromagnetic wave through typical in-field GIS structures // IEEE Trans. Power Delivery. 2014. **29**, N 6. P. 2476–2484.
2. **Wei G., Xiao M., Xia H.-Y. et al.** Mobile maintenance room of GIS equipment at the voltage class of 220 kV // Appl. Mech. Mater. 2015. **713-715**. P. 1360–1363.
3. **Du Plessis A., Le Roux S. G., Guelpa A.** Comparison of medical and industrial X-ray computed tomography for non-destructive testing // Case Stud. Nondestr. Test. Eval. 2016. **6**. P. 17–25.
4. **Cai X., Wang D., Yu H. et al.** The application of X-ray digital real-time imaging technology in GIS defect diagnosis // Proc. Eng. 2011. **23**. P. 137–143.
5. **Yan T., Zhang R. J., Dong Z. W. et al.** Localization of partial discharge defects in GIS // High Voltage Apparatus. 2017. **53**, N 6. P. 182–190.
6. **Yazdani S., Yusof R., Riazi A. H. et al.** Evaluation of pipelines in industrial radiography using image processing techniques // Adv. Sci., Eng. Med. 2014. **6**, N 1. P. 81–85.
7. **Zhang P. L., Zhao Z. Q., Wang Y. P.** X-ray testing of weld defect of automatic recognition and alarm technology research // Appl. Mech. Mater. 2014. **472**. P. 495–502.
8. **Ren Y., Wu Sh., Wang M., Cen Zh.** Study on construction of a medical X-ray direct digital radiography system and hybrid preprocessing methods // Comput. Math. Methods. Med. 2014. **6**. 495729.
9. **Bhushan Ch., Chong M., Choi S. et al.** Temporal non-local means filtering reveals real-time whole-brain cortical interactions in resting fMRI // PLoS ONE. 2016. **11**, N 7. DOI: doi.org/10.1371/journal.pone.0158504.
10. **Chang Y., Jung C., Ke P. et al.** Automatic contrast limited adaptive histogram equalization with dual gamma correction // IEEE Access. 2018. **6**. P. 11782–11792.

Поступила в редакцию 22.02.2019

После доработки 06.05.2019

Принята к публикации 14.05.2019
