

КОМПЬЮТЕРНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

COMPUTER SOFTWARE AND COMPUTING EQUIPMENT

Научная статья
УДК 004.67
<https://doi.org/10.24143/2072-9502-2022-3-30-37>

Программно-аппаратный комплекс диагностики состояния электрических изоляторов на основе технического зрения

Сергей Владимирович Головки¹✉, Юлия Александровна Головки²

¹*Астраханский государственный технический университет,
Астрахань, Россия, g_s_v_2007@mail.ru[✉]*

²*Астраханский государственный университет им. В. Н. Татищева,
Астрахань, Россия*

Аннотация. Контроль состояния внешней изоляции электрооборудования является одним из основных видов диагностики при эксплуатации электрических сетей, т. к. дефекты приводят к ионизации воздушных пустот и образованию частичных коронных разрядов. Указанные разрядные процессы постепенно разрушают изоляцию, вызывая потери энергии, радиопомехи, и влияют на пожарную безопасность эксплуатируемого электрооборудования. Распространенными неисправностями электрических изоляторов являются пробой, перекрытия и механические повреждения. Необходимость определения стойкости к поверхностным частичным разрядам возрастает в случае использования новых полимерных материалов в связи с их свойствами. Одним из вариантов осуществления автоматизированного контроля количества и площади коронных разрядов является разработка систем с компьютерным (техническим) зрением. Накопленный специалистами многолетний опыт диагностики с помощью ультрафиолетовых дефектоскопов и тепловизоров продемонстрировал высокую эффективность проверки наличия повреждений высоковольтного оборудования и линии электропередач. Применение технологий технического зрения в программно-аппаратном комплексе позволит устранить ошибки при подсчете и анализе вспышек, а также минимизировать участие человека в ряде монотонных операций, уменьшить потери рабочего времени, связанных с человеческим фактором, защитить жизнь и здоровье работников.

Ключевые слова: электрические изоляторы, диагностика, электрический разряд, система технического зрения, программно-аппаратный комплекс, алгоритм принятия решений

Для цитирования: Головки С. В., Головки Ю. А. Программно-аппаратный комплекс диагностики состояния электрических изоляторов на основе технического зрения // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2022. № 3. С. 30–37. <https://doi.org/10.24143/2072-9502-2022-3-30-37>.

Software and hardware complex based on technical vision for diagnosing electrical insulators

Sergey V. Golovko¹✉, Julia A. Golovko²

¹Astrakhan State Technical University,
Astrakhan, Russia, g_s_v_2007@mail.ru✉

²Astrakhan State University name of V. N. Tatishcheva,
Astrakhan, Russia

Abstract. Control of the equipment dielectric insulation is one of the most important types of diagnostics in operation of the electrical networks, because the defects cause ionization of voids and partial corona discharges. These discharges gradually destroy the insulation causing the energy loss, radio interference and decreasing the fire safety of the operated electrical equipment. Common failures of electrical insulators are breakdowns, overlaps and mechanical damage. The need to determine the resistance against the surface discharges increases in case of using the new polymer materials due to their characteristics. Developing the systems with computer (technical) vision is one of the ways for implementing automated control of the quantity and the area of corona discharges. The long-term experience of diagnostics accumulated by the specialists by using the ultraviolet flaw detectors and thermovision cameras has demonstrated the high efficiency in checking the damages in the high-voltage equipment and power lines. Application of vision technologies in the hardware and software complex will eliminate errors in checking and analyzing the flares, as well as minimize human participation in a number of monotonous operations, reduce the loss of working time caused by the human factor, protect the life and health of workers.

Keywords: electrical insulators, diagnostics, electric discharge, technical vision system, hardware and software complex, decision making algorithm

For citation: Golovko S. V., Golovko Ju. A. Software and hardware complex based on technical vision for diagnosing electrical insulators. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Management, Computer Science and Informatics*. 2022;3:30-37. (In Russ.) <https://doi.org/10.24143/2072-9502-2022-3-30-37>.

Введение

К распространенным неисправностям электрических изоляторов (ЭИ) относятся пробой, перекрытия и механические повреждения. Механические повреждения конструкции изоляторов возникают в результате атмосферных перенапряжений, попадания посторонних предметов, обледенения, загрязнений площади поверхности, ионизации воздуха вокруг изолятора, отключения разъединителей под нагрузкой, внутреннего разрушения фарфора из-за химической коррозии пестиков, разрушения птицами и т. п. [1].

Существуют различные методы диагностирования ЭИ, среди которых можно выделить контактный и дистанционный. При контактном методе определяется напряжение на ИЭ с помощью измерительной штанги. Дистанционные ультрафиолетовый (УФ) и инфракрасный методы имеют значительное преимущество, т. к. они не только указывают направление обнаружения неисправности или дефекта, но и визуализируют его локацию, измеряя интенсивность излучения в инфракрасном или УФ спектре для определения степени опасности имеющейся неисправности [2, 3].

Основным недостатком аналоговых устройств является ручная обработка полученных результатов, что приводит к ошибкам и неточностям вслед-

ствие влияния человеческого фактора. Автоматизация рассматриваемого процесса позволит исключить ошибки при анализе и подсчете вспышек, а также освободить персонал от ряда монотонных операций, потери рабочего времени и влияния вредных факторов.

Актуальность рассматриваемой темы заключается в повышении экономической эффективности производителей электрической энергии за счет снижения ее потерь во внешнюю среду.

Целью исследования является своевременное определение неисправностей ЭИ с применением разработанного программно-аппаратного комплекса диагностики электрооборудования на основе технического зрения.

Разработка математической модели для прогнозирования состояния изоляторов

Экспертная система прогнозирования состояния изоляторов должна решать задачи, которые направлены на повышение подлинности результатов электродиагностики. Предполагается выполнение следующих этапов действия системы:

- обработка результатов обследования;
- сравнительный анализ с предыдущими результатами диагностирования при различных режимах работы;

- вычисление нечеткости в численном виде;
- конечный вывод.

В качестве преимущества диагностической системы с использованием элементов нечеткой логики выделяется возможность формирования базы правил с помощью лингвистического языка. Таким образом, корректировать базу правил может человек, который не имеет профессиональной подготовки в области программирования. Процесс дополнения или изменения характеристик потребует

повышенных знаний в указанной области, однако работа с существующими элементами возможна и на начальном уровне.

Эффективным итогом работы диагностической системы является итоговый отчет, содержащий описание каждой рассматриваемой ситуации, результаты математического анализа полученных данных, а также сведения о степени их адекватности для каждого ответа (рис. 1).

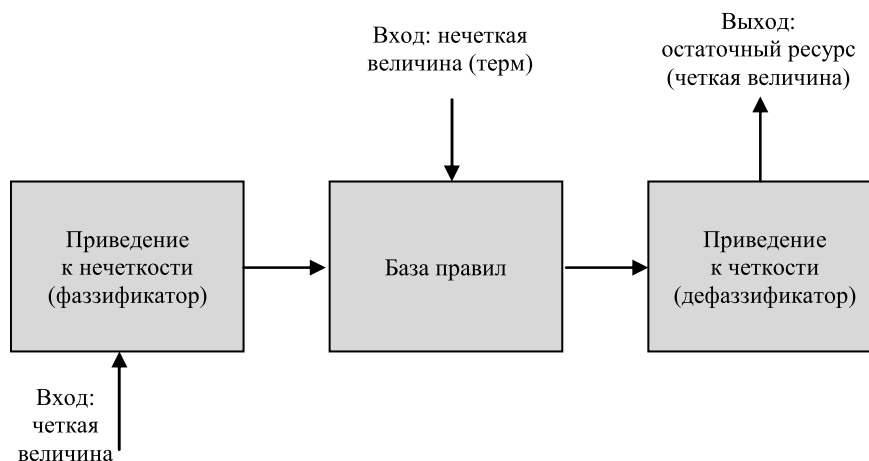


Рис. 1. Структурная схема экспертной системы диагностики электрических изоляторов

Fig. 1. Structural diagram of the expert system for diagnosing electrical insulators

Случайный характер диагностических признаков позволяет использовать модифицированные функции, которые основываются на гауссовом распределении:

$$\mu(u) = \exp\left(-\frac{(u-b)^2}{2c^2}\right),$$

где u – абсцисса; b – координата максимума; c – коэффициент концентрации.

Полученные в результате математических расчетов степени значимости различных параметров для оценки состояния изоляторов уже позволяют эксперту сделать выводы об их состоянии, однако можно получить значительно более точную экспертную оценку, основываясь на методах нечеткой логики. Для разработки такой системы нами была выбрана программа SciLab, являющаяся, по сути, бесплатным аналогом системы Matlab. Для работы с инструментами нечеткой логики в SciLab существует специальная надстройка Fuzzy Logic Toolbox.

Для определения степени повреждения ЭИ задаются лингвистические значения переменных, соответствующие степени механического повреждения, площади, интенсивности и расположению разрядов. Дополнительно, для повышения точности оценки состояния изоляторов, переоценим данные характеристики по 10-балльной шкале.

При этом для разных типов изоляторов будут установлены определенные лингвистические значения. Например, для фарфоровых изоляторов правила будут следующие:

- механическое повреждение: сильное и слабое;
- площадь разрядов: большая и маленькая;
- расположение разрядов: некритическое, значимое, критическое;
- интенсивность разрядов: слабая, средняя, сильная.

После ввода всех необходимых данных и задания правил, связывающих входы и выходы, возможно провести агрегирование и дефазификацию с целью получения точного значения вероятности замены изолятора. Этот этап представляет собой получение численного значения для каждой определяемой переменной, используемой внешними исполнительными механизмами системы автоматического управления, на основе суммирования выходных лингвистических переменных.

Процедура перехода от значения аккумуляции функции принадлежности $\mu(x)$ результирующей лингвистической переменной к значению выходной переменной происходит следующим образом:

- *Centre of Gravity*, заключающийся в расчетах центра тяжести площади $y = \int x \min x \max x \mu(x) dx$, где $[x \max; x \min]$ – носитель нечеткого множества;

– методы модальных значений: $y = x \min$, $y = x \max$.

Полученные результаты позволяют сделать вывод об адекватности используемых подходов, основанных на применении нечеткой логики, к решению задачи экспертной диагностики состояния изоляторов.

Программно-аппаратный интеллектуальный комплекс на основе УФ-камеры для определения состояния ЭИ

Программно-аппаратный комплекс включает в себя Raspberry Pi Camera Module v1.3. Работа

камеры PiCam основана на CMOS-датчике с использованием оптики Omnivision OV5647, которая представлена 1/4-дюймовым 5-мегапиксельным модулем и CMOS с 8/10-битным выводом картинки RGB/RAW. Выбор камеры PiCam основывается на упрощенном процессе фиксирования данных и обработке изображений с применением плат Raspberry Pi и языка программирования Python. Популярное использование компьютеров Raspberry Pi в различных сенсорных приложениях связано с их низкокзатратным энергопотреблением и доступной ценой [4] (рис. 2).



Рис. 2. Внешний вид программно-аппаратного комплекса для диагностики состояния изоляторов

Fig. 2. Appearance of the software and hardware complex for diagnosing the insulators

Одним из первых этапов в разработке УФ-камеры для повышения чувствительности датчика к диапазону длин волн от 100 до 400 нм является использование микролинз и оптических фильтров Байера, которые будут располагаться над датчиком в пластиковом корпусе. Фильтр Байера позволяет замаскировать датчик в виде мозаики RGB и ослабить большую часть излучения. Указанный процесс изменяет характеристики PiCam-камеры, превращая ее в монохромный датчик [5].

Для фиксации изображения необходимо извлекать данные с датчика в расширении RAW, а не в стандартном выводе изображений JPEG. Вначале изображения сохраняются на камеру в метаданных 8-битного изображения JPEG, затем

эти двоичные данные извлекаются и сохраняются в виде изображений PNG для сохранения формата 10-битного цифрового числа RAW. Эти изображения могут быть непосредственно обработаны и проанализированы.

Разработка программы для определения признаков повреждения изоляторов

В представленном ниже алгоритме оценки состояния изоляторов приведена только одна из трех последовательностей проведения работы с получаемыми данными, а именно система принятия решений на основе данных о площади вспышки коронного разряда (рис. 3) [6].

Головко С. В., Головки Ю. А. Программно-аппаратный комплекс диагностики состояния электрических изоляторов на основе технического зрения

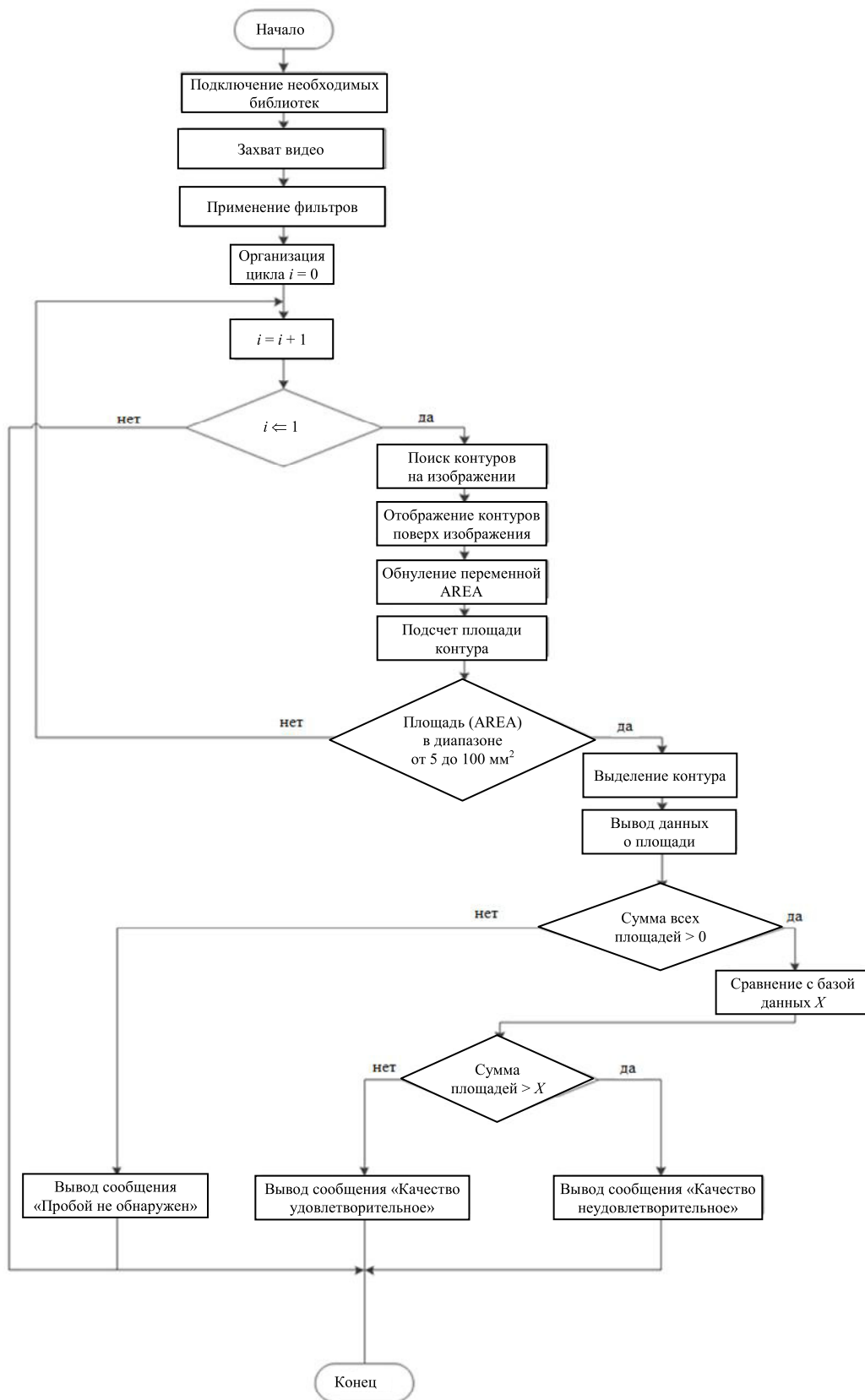


Рис. 3. Алгоритм программы оценки состояния электрических изоляторов

Fig. 3. Algorithm for the program of assessing the state of electrical insulators

Для определения положения пятен относительно изолятора алгоритм дополняется ветвлениями, связанными с несколькими вариантами расположения. В соответствии с алгоритмом выполняется операция захвата видеозображения УФ-камеры, определяется дистанция до изолятора и запускается процесс регистрации всплшек. Аппаратное решение комплекса должно располагаться на неподвижном штативе для исключения искажения изображения, на рекомендуемом для установки устройства расстоянии. Данный критерий обусловлен необходимостью обеспечения достаточного

для правильной идентификации угла, под которым наблюдается изолятор [7, 8].

Основными элементами функциональной схемы программно-аппаратного комплекса являются УФ-камера, модуль обработки сигнала и модуль принятия решений. Обработка видеосигнала включает в себя операции по выделению контуров изолятора и светящихся в УФ-диапазоне пятен на фоне остальных объектов, что позволяет идентифицировать положение коронных разрядов относительно изолятора, а также операции по подсчету их количества и площади (рис. 4).

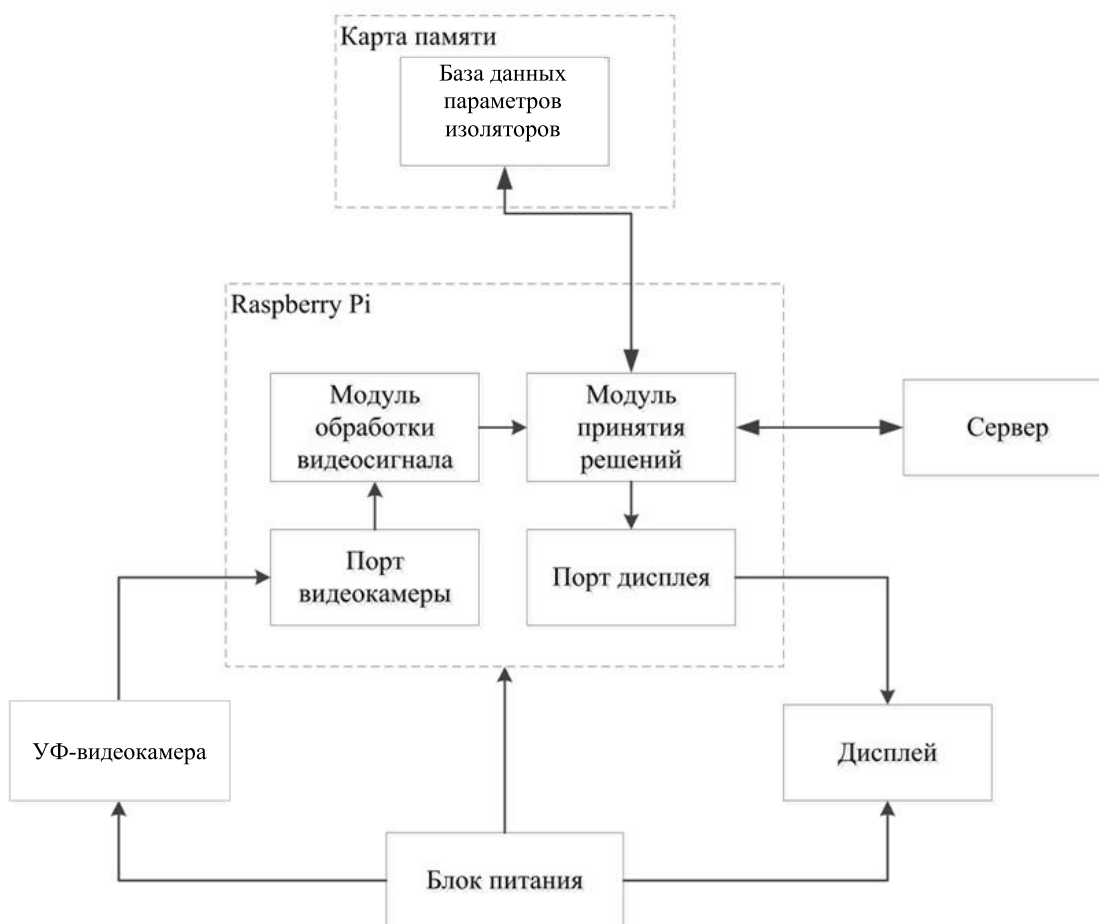


Рис. 4. Функциональная схема программно-аппаратного комплекса регистрации повреждений электрических изоляторов

Fig. 4. Functional diagram of the hardware-software complex for recording damages in electrical insulators

Далее информация поступает в модуль принятия решений, где оценивается степень повреждения изолятора. На дисплей комплекса в режиме реального времени выводится графическая информация о положении, количестве и площади коронных разрядов и текстовая информация о степени повреждения, которая формируется на основе алгоритма обучения [9].

Контурный анализ отличается довольно слабой устойчивостью к внешним факторам. Частичное перекрытие или плохая видимость объекта диагностирования может привести к невозможности детектирования или к ложным срабатываниям. Однако быстродействие данного типа анализа и простота его реализации позволяют успешно

применять данный метод при оценке степени повреждения изоляторов.

На рис. 5 показан один из этапов работы программы, а именно выделение контуров изолятора

для подсчета элементов и результат работы алгоритма для определения его границ соответственно.

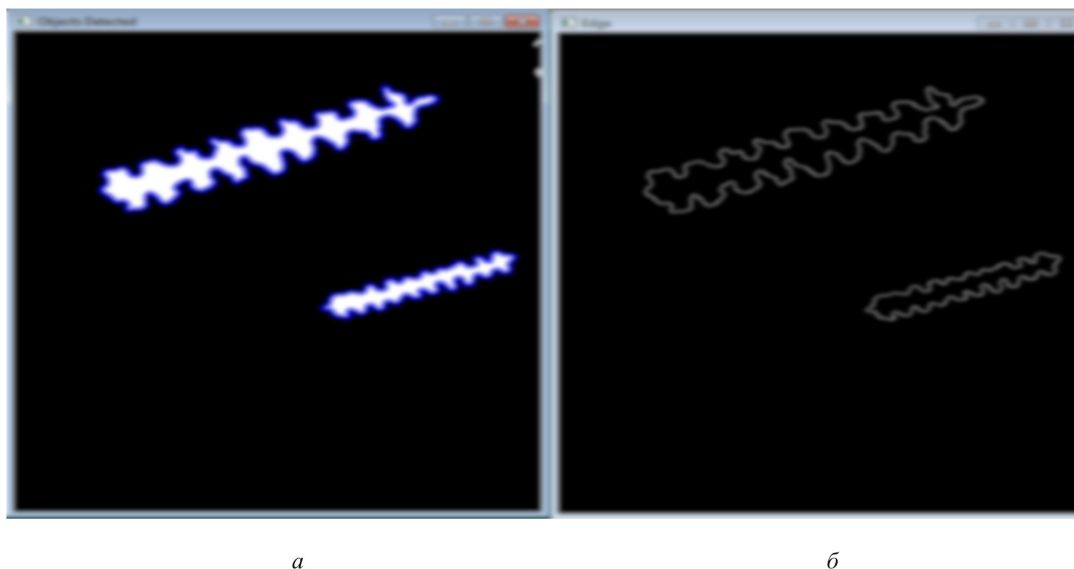


Рис. 5. Этап видеозахвата (а) и обработки (б) изображения с изолятором

Fig. 5. Stage of video capture (a) and image processing (b) with insulator

После программного захвата изоляторов осуществляется процедура определения центра колонны изоляторов, количества элементов и периодичности их расположения, расстояния до изолятора. Такие данные предоставляют возможность для определения абсолютного положения разрядов.

Настройки параметров определения площади разряда автоматически корректируются с учетом расстояния до исследуемого объекта.

На следующем этапе применяется оптическая фильтрация и изолятор выделяется на фоне неба и окружающих объектов, а также применяется контурный анализ:

- принимается, что форма контура содержит достаточную диагностическую информацию об объекте;

- пренебрегают внутренними точками объекта диагностирования.

Перечисленные положения ограничивают область применения контурного метода, которые, в большей степени, связаны со сложностями получения контура на изображениях:

- в связи с одинаковой яркостью с фоном объект диагностирования не всегда имеет четкую границу или может быть зашумлен внешними факторами, что является одной из причин невозможного получения контура;

- взаимное перекрытие объектов диагностирования или их групповое расположение приводит

к тому, что контур образуется неправильно и расходится с границами объекта.

Однако контурный метод диагностирования объектов позволяет перейти от пространственного изображения к пространству контуров, а это приводит к существенному снижению сложности математических вычислений и алгоритмов принятия решений.

Заключение

В результате работы была сформирована обширная база основных признаков неисправностей электрических изоляторов, на основании которых прошло обучение интеллектуальной системы принятия решений, являющейся неотъемлемой частью разработанного программно-аппаратного комплекса.

Для работы диагностической системы используются данные о линейных размерах электрических изоляторов, поступающих от видеокамеры или задающихся по справочным данным. Данная процедура необходима для детальной оценки площади разрядов и их расположения.

Эффективность применения разработанной методики доказана посредством проведения экспериментальных исследований на участке линии электропередачи от АИИЭ КУЭ ПС-110 кВ «Бузанская» до ПС-110 кВ «Сеитовка» Красноярского района Астраханской области, на опорах № 90 и № 419 ВЛ 110 кВ.

Список источников

1. Методические указания по дистанционному оптическому контролю изоляции воздушных линий электропередачи и распределительных устройств переменного тока напряжением 35–1150 кВ СТО. URL: <https://www.fsk-ees.ru/upload/docs/56947007-29.240.003-2008.pdf> (дата обращения: 16.04.2022).
2. Ильина Е. В., Растегняев Д. Ю. Опыт применения приборов ультрафиолетового контроля в электросетевой компании // Энергоэксперт. 2014. № 4. С. 70–71.
3. Плотников Ю. И., Скороходов Д. А., Герасимов В. П., Федоршин Ю. М., Грачев В. Ф. Перспективы создания компьютеризированной системы диагностирования изоляторов контактной сети по УФ излучению // Железные дороги мира. 2004. № 7. С. 50–53.
4. Солям Я. Э. Программирование компьютерного зрения на языке Python. М.: ДМК Пресс, 2016. 312 с.

References

1. Metodicheskie ukazaniia po distantsionnomu opticheskomu kontroliu izolatsii vozdushnykh linii elektropereдачи i raspredelitel'nykh ustroystv peremennogo toka napriazheniem 35–1150 kV SТО [Guidelines for remote optical monitoring insulation of overhead power lines and AC switchgears 35–1150 kV SТО]. Available at: <https://www.fsk-ees.ru/upload/docs/56947007-29.240.003-2008.pdf> (accessed: 16.04.2022).
2. Il'ina E. V., Rastegniaev D. Yu. Opyt primeneniia priborov ul'trafiolietovogo kontrolya v elektrossetevoi kompanii [Experience in using ultraviolet control devices in electric grid company]. *Energoekspert*, 2014, no. 4, pp. 70-71.
3. Plotnikov Yu. I., Skorokhodov D. A., Gerasimov V. P., Fedorishin Yu. M., Grachev V. F. Perspektivy sozdaniia komp'yuterizovannoi sistemy diagnostirovaniia izolatorov kontaktnoi seti po UF izlucheniui [Prospects for creating computerized system for diagnosing contact network insulators by UV radiation]. *Zheleznye dorogi mira*, 2004, no. 7, pp. 50-53.
4. Solem Ia. E. *Programmirovaniie komp'yuternogo zreniia na iazyke Python* [Computer vision programming in Python language]. Moscow, DMK Press, 2016. 312 p.
5. Zakirullin R. S. Opticheskie fil'try dlia smart-okon [Optical filters for smart windows]. *Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2017, no. 7, pp. 83-92.

5. Закируллин Р. С. Оптические фильтры для смарт-окон // Вестн. Оренбург. гос. ун-та. 2017. № 7. С. 83–92.
6. Катюлев А. Н., Северцев Н. А. Математические методы в системах поддержки принятия решений: учеб. пособие. М.: Абрис, 2012. 311 с.
7. Назарычев А. Н. Справочник инженера по наладке, совершенствованию технологии и эксплуатации электрических станций и сетей / под ред. А. Н. Назарычева. М.: Инфра-Инженерия, 2016. 928 с.
8. Коиспаева О. Г., Головки С. В., Надеев М. А. Технологическое видеонаблюдение как инструмент защиты интеллектуального прибора учета электроэнергии от сторонних лиц // Вестн. Астрахан. гос. техн. ун-та. 2020. № 2 (70). С. 7–13.
9. Федосов В. П., Нестеренко А. К. Цифровая обработка сигналов в LabVIEW: учеб. пособие / под ред. В. П. Федосова. М.: ДМК Пресс. 456 с.

6. Katulev A. N., Severtsev N. A. *Matematicheskie metody v sistemakh podderzhki priniatiia reshenii: uchebnoe posobie* [Mathematical methods in decision support systems: textbook]. Moscow, Abris Publ., 2012. 311 p.
7. Nazarychev A. N. *Spravochnik inzhenera po naladke, sovershenstvovaniuu tekhnologii i ekspluatatsii elektricheskikh stantsii i setei* [Handbook of engineer on adjustment, improvement of technology and operation of electric stations and networks]. Pod redaktsiei A. N. Nazarycheva. Moscow, Infra-Inzheneriia Publ., 2016. 928 p.
8. Koispaeva O. G., Golovko S. V., Nadeev M. A. Tekhnologicheskoe videonabludenie kak instrument zashchity intellektual'nogo pribora ucheta elektroenergii ot stononnikh lits [Technological video surveillance as tool to protect intelligent electricity meter from third parties]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2020, no. 2 (70), pp. 7-13.
9. Fedosov V. P., Nesterenko A. K. *Tsifrovaia obrabotka signalov v LabVIEW: uchebnoe posobie* [Digital signal processing in LabVIEW: tutorial]. Pod redaktsiei V. P. Fedosova. Moscow, DMK Press. 456 p.

Статья поступила в редакцию 18.05.2022; одобрена после рецензирования 01.07.2022; принята к публикации 07.07.2022
The article was submitted 18.05.2022; approved after reviewing 01.07.2022; accepted for publication 07.07.2022

Информация об авторах / Information about the authors

Сергей Владимирович Головки – кандидат технических наук; доцент кафедры электрооборудования и автоматизации судов; Астраханский государственный технический университет; g_s_v_2007@mail.ru

Юлия Александровна Головки – кандидат технических наук; доцент кафедры информационной безопасности и цифровых технологий; Астраханский государственный университет им. В. Н. Татищева; pjulia2014@yandex.ru

Sergey V. Golovko – Candidate of Technical Sciences; Assistant Professor of the Department of Electrical Equipment and Automation of Ships; Astrakhan State Technical University; g_s_v_2007@mail.ru

Julia A. Golovko – Candidate of Technical Sciences; Assistant Professor of the Department of Information Security and Digital Technologies; Astrakhan State University name of V. N. Tatishcheva; pjulia2014@yandex.ru

