

УДК 621.313.048.001.4

Применение алгоритмов обработки изображения в системе дистанционного электронно- оптического контроля внешней изоляции высоко- вольтных сетей

А.Г. ОВСЯННИКОВ, Н.И. ПАУЛИ, Р.С. АРБУЗОВ

Профилактический контроль внешней изоляции высоковольтного оборудования является неотъемлемой частью его эксплуатации. В последнее время большое внимание уделяется разработке новых методов контроля под рабочим напряжением. Один из них, оптический, реализуется с помощью электронно-оптических усилителей яркости света и обеспечивает высокую эффективность контроля изоляции вследствие малой трудоемкости, высокой чувствительности и безопасности. Однако внедрение данного метода существенно сдерживается из-за субъективной оценки исходной информации, что требует высокой квалификации и опыта инспектирующего персонала. В статье представлены результаты разработки метода компьютерной обработки энограмм, с помощью которых можно реализовать ранее определенные критерии отбраковки дефектной изоляции и, таким образом, в значительной мере компенсировать основной недостаток оптического метода диагностики высоковольтных изоляционных конструкций.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для исключения потерь энергии и снижения уровня радио- и акустических помех провода, арматура и внешняя изоляция высоковольтного оборудования проектируются с некоторым запасом по отношению к порогу возникновения коронных (КР) и поверхностных частичных разрядов (ПЧР). Различного рода недостатки, допущенные при проектировании, конструировании, изготовлении или монтаже, а также дефекты, появившиеся в процессе эксплуатации, приводят к возникновению или усилению интенсивности КР и ПЧР. Таким образом, задачи приемосдаточного и профилактического контроля можно решать путем регистрации интенсивности разрядных процессов на изоляционных конструкциях.

Одним из перспективных в данном направлении является оптический способ контроля, базирующийся на применении электронно-оптических усилителей яркости света. В результате разработки и внедрения методик и аппаратуры была продемонстрирована высокая эффективность оптической диагностики [1...6]: контроль проводился на работающем оборудовании с земли, дистанционно, быстро и безопасно. Были также определены корреляционные связи между характеристиками оптического излучения разрядных процессов и состоянием внешней изоляции электрооборудования. Однако оценка визуальной информации проводилась субъективно, и результат контроля во многом определялся интеллектом и опытом оператора. С появлением техники цифровой записи и преобразования изображений возможность компьютерной обработки визуальной информации для повышения достоверности контроля изоляции приобрела реальные очертания.

Цель данной работы - разработка алгоритма и программного обеспечения для выделения и вычисления яркостных характеристик в изображениях КР и ПЧР на энограммах, полученных при помощи системы регистрации, со-

стоящей из электронно-оптического дефектоскопа и видеокамеры или цифрового фотоаппарата.

В качестве одного из примеров применения оптического способа диагностики можно указать дефектоскопию подвесной фарфоровой изоляции. Появление в гирляндах фарфоровых изоляторов воздушных линий электропередач и открытых распределительных устройств пробитых изоляторов приводит к увеличению падения напряжения на исправных изоляторах, что влечет за собой повышение интенсивности оптического излучения ПЧР на них в соответствии с эмпирической зависимостью [3]

$$I \sim k U^5, \quad (1)$$

где U - падение напряжения на изоляторе; I - интенсивность ПЧР; k - коэффициент пропорциональности.

Таким образом задача контроля решается по следующим этапам:

- регистрация ПЧР с помощью дефектоскопа;
- оценка интенсивности излучения, I ;
- определение падения напряжения U на изоляторе по (1);
- оценка количества и места положения пробитых изоляторов в гирлянде по таблицам распределения напряжения в исправных и дефектных гирляндах.

Предполагается, что регистрация изображений с экрана электронно-оптического дефектоскопа производится с помощью цифрового фотоаппарата, цифровой или аналоговой видеокамеры. В последнем случае необходимая информация в виде отдельных кадров оцифровывается с помощью специальных преобразователей и вводится в компьютер. Получение конечных результатов диагностики изоляции оборудования должно производиться на основе методов обработки изображений, с выделением и вычислением яркостных характеристик участков изображения, соответствующих ПЧР и КР.

В разрабатываемом алгоритме решаются следующие задачи:

- обработка изображения с целью выделения участков с изображениями ПЧР на контролируемом изоляторе гирлянды;
- селекция ПЧР относительно фоновых бликов на поверхности изолятора;
- вычисление характеристик оптического излучения ПЧР: яркости, площади и интенсивности, т.е. интеграла яркости по площади излучателя;
- создание протокола результатов измерения.

2. РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА

В начале рассмотрим типичный образец исходной регистрируемой информации.



Рис. 1. Типичная эпограмма изолятора с поверхностными разрядами:
 а - исходное изображение с выделенным фрагментом свечения ПЧР;
 б - гистограмма распределения яркостей в выделенном фрагменте

На рис.1, а представлено изображение изолятора, на котором наблюдаются ПЧР в виде ярких точек (на рисунке эти участки обведены прямоугольной рамкой) и фоновые блики от сторонних источников света. На рис.1,б показана гистограмма распределения яркостей изображения, из которой видно, что распределение черно-белых оттенков в изображении имеет резко выраженный неравномерный характер. Кроме того, необходимо отметить небольшие размеры световых пятен, соизмеримые с элементами разложения.

На рис.2 представлены распределения яркости вдоль отдельных строк изображения: вдоль строки, содержащей очаги свечения ПЧР (рис. 2, а); вдоль строки, пересекающей участки изображения с бликами на поверхности изолятора, которые вызваны внешней фоновой подсветкой (рис. 2, б).

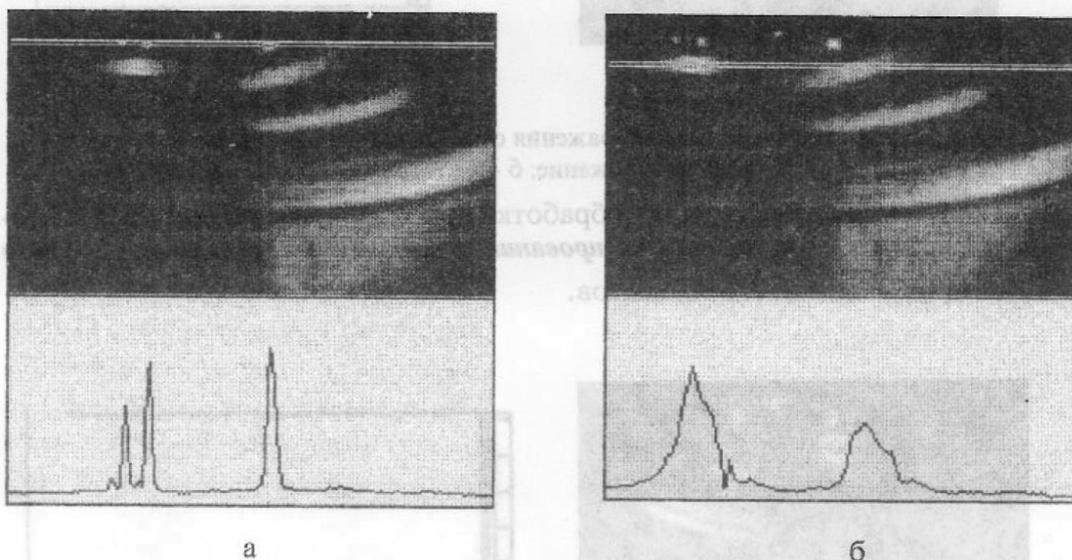


Рис.2. Распределение яркости вдоль строк изображения
а - с изображением ПЧР; б - с изображением фоновых бликов

Из их сравнения видно, что яркости ПЧР и бликов имеют близкие величины. Единственной отличительной особенностью является крутизна фронта перехода от черного к белому: для ПЧР характерна более высокая скорость нарастания яркости. На этом свойстве и строился разрабатываемый алгоритм обработки. Традиционный метод выделения светового пятна [7] основан на использовании составной маски вида

$$H(j,k) = H_s(j,k) * H_L(j,k), \tag{2}$$

где $H_s(j,k)$ - сглаживающая маска, представляющий фильтр нижних частот; $H_L(j,k)$ - одна из масок оператора Лапласа.

На рис.3 приведено изображение, полученное в результате применения такого метода,

где
$$H_s = 1.9 \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}, \quad H_L = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ -1 & 4 & -1 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}.$$

Видно, что эффективность подавления фоновых бликов очень высока, однако и изображения ПЧР подверглись заметным искажениям: значительно уменьшились размеры и яркость пятен. Очевидно, что если съемка будет проводиться с большего расстояния (это бывает в реальных условиях, когда к inspected объекту трудно подойти близко), то изображения очагов

ПЧР, имеющих малые размеры, в результате применения традиционного метода исчезнут.

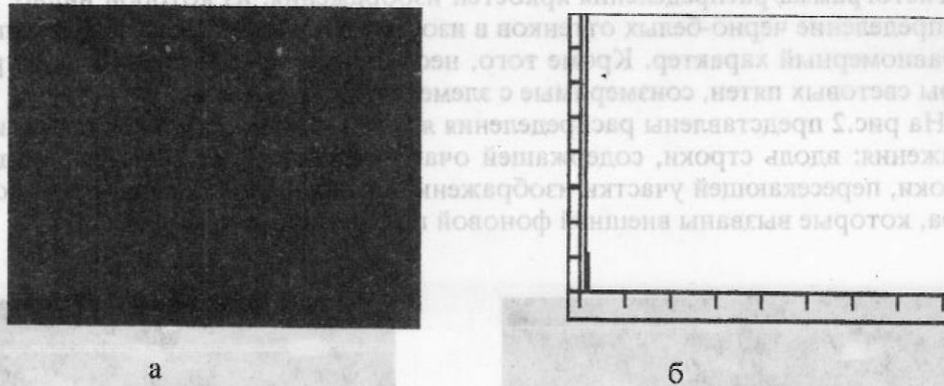


Рис.3. Обработка изображения с помощью составной маски
а - изображение; б - гистограмма

На рис. 4 показан результат обработки этого же изображения при помощи *нелинейного метода контрастирования*, в котором был применен оператор Собела [7] с окном из 3*3 элементов.

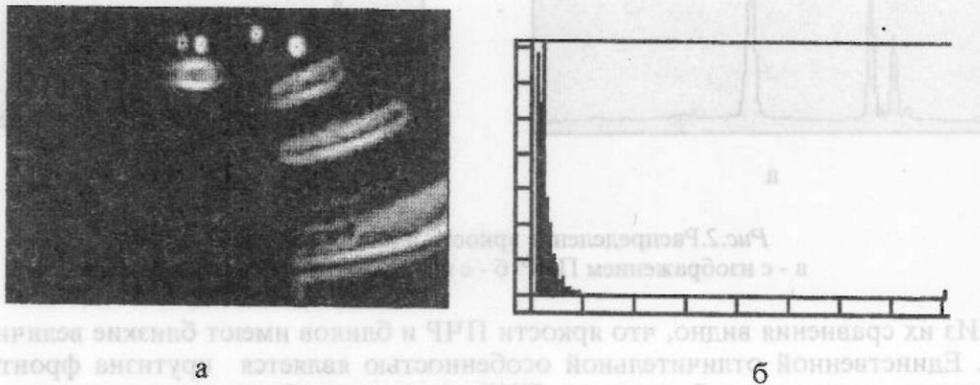


Рис. 4. а - обработанное изображение;
б - гистограмма распределения яркости

На рис. 5 показаны использованные обозначения элементов окна.

A_0	A_1	A_2
A_7	$F(j,k)$	A_3
A_6	A_5	A_4

Рис. 5. Обозначения элементов окна

Для контрастирования перепадов вычислялась величина

$$G(j, k) = (X^2 + Y^2)^{-0.5}, \tag{3}$$

где

$$X = (A_2 + 2A_3 + A_4) - (A_0 + 2A_7 + A_6),$$

$$Y = (A_0 + 2A_1 + A_2) - (A_6 + 2A_5 + A_4).$$

Из сравнения исходного и обработанных двумя способами изображений видно, что применение нелинейного метода контрастирования обеспечивает визуально более выраженный эффект, хотя имеет место и некоторое повыше-

ние контраста бликов. Главным достоинством метода, по сравнению с традиционным, является сохранение информации о площади пятна, что упрощает решение задачи селекции ПЧР относительно бликов, например, методом разделения по порогу, и важно для определения интенсивности излучения разрядных процессов.

Обычно при обработке изображения для автоматического выделения в нем некоторого светового пятна задается пороговое значение яркости, которое известно априорно или вводится с помощью реперного источника света в виде точки, светового клина и т.д. В данном случае, когда интенсивность излучения ПЧР и фона может меняться в широких пределах, задать некоторый порог яркости невозможно. Не был введен в конструкцию дефектоскопов и реперный источник света. Поэтому задача выявления очагов ПЧР решалась по принципу превышения уровня средней яркости на выделенном интерактивным способом участке кадра, содержащем изображения ПЧР. На следующем этапе решалась метрологическая задача определения интенсивности излучения ПЧР путем определения яркости (максимальной, минимальной, средней) и площади пятен свечения ПЧР. При этом необходимо было учесть влияние на результат вычислений и яркости фона.

Указанные задачи обработки оптической информации решались следующим образом. При ближайшем рассмотрении изображения, полученного в результате применения оператора Собела, можно заметить, что размер пятна после обработки несколько увеличивается, что позволяет получить информацию об уровне яркости фона на основе *анализа граничных точек*. На использовании свойства увеличения размера пятна при применении оператора Собела и строился алгоритм выделения и анализа пятна.

На рис.6 показан участок снимка, содержащий ПЧР, после преобразования при помощи разделения по порогу.

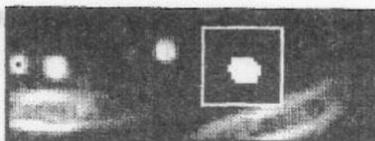


Рис. 6. Результат обработки изображения ПЧР

Алгоритм определения порога основан на анализе гистограммы распределения яркости на выделенном участке, причем ставилась задача, чтобы выбор порога не зависел от размера выделяемого участка. Порог вычислялся по следующему алгоритму:

$$J_{\text{пор}} = \min(M_{\text{фон}}, J_{\text{мед}}), \quad (4)$$

где $J_{\text{пор}}$ - пороговая яркость; $J_{\text{мед}}$ - среднее значение яркости, вычисляемое как полусумма максимальной и минимальной яркости на выделенном участке изображения, $M_{\text{фон}}$ - среднее значение яркости фона

$$M_{\text{фон}} = \sum_{J=0}^{J < M} JP(J), \quad (5)$$

где M - взвешенное среднее значение яркости на выделенном участке; J - уровни яркости; $P(J)$ - распределения вероятностей значений яркости первого порядка.

Распределение частот первого порядка, оценивающее $P(J)$, описывается выражением

$$P(J) = N(J) / N, \quad (6)$$

где $N(J)$ - число элементов в окне, имеющих уровень J ; N - полное число элементов, имеющих уровень $\leq M$.

Такой подход обеспечил уменьшение влияния на вычисление порогового значения размера выделенного окна и наличия в окне паразитных засветок.

Далее, для выделения и кодирования граничных точек анализируемого участка изображения был применен цепной код. Элементами цепного кода являлись направления от одного пиксела изображения контура к следующему обнаруживаемому пикселу контура. Считалось, что каждый элемент изображения объекта имеет 8 соседних элементов, которые расположены по следующим направлениям: $n * 45^\circ$, где $n = 0...7$ (рис.7).

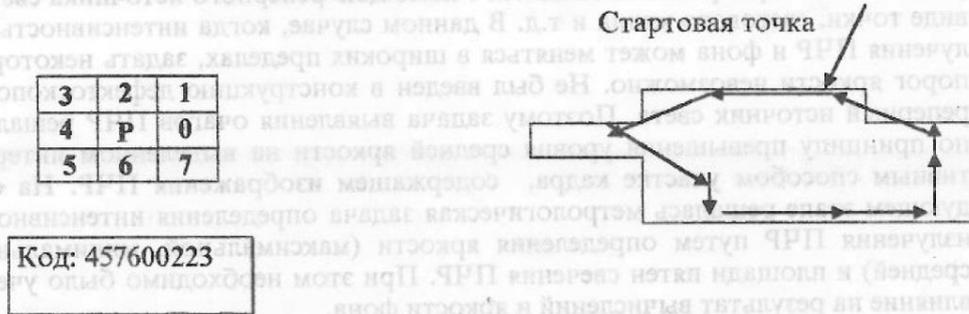


Рис. 7. Выделение и кодирование граничных точек преобразуемого участка изображения

Полученное таким образом контурное описание пятна накладывалось поверх исходного изображения ПЧР. Далее, чтобы вычислить яркостные характеристики излучения ПЧР, необходимо было четко отделить точки, которые принадлежат фону и очагу ПЧР. Для этого и использовалось то свойство преобразования Собела, при котором несколько увеличивался размер исходного пятна. Таким образом, оказывалось, что элементы выделенного контура принадлежали фону, и поэтому пороговое значение вычислялось на их основе. Алгоритм вычисления порогового значения выглядел следующим образом:

$$I_{\text{пор}} = M_{\text{гр}} + \sigma_{\text{гр}}, \quad (7)$$

где $M_{\text{гр}}$ - средневзвешенное значений яркости точек, лежащих на границе; $\sigma_{\text{гр}}$ - среднеквадратичное отклонение.

На рис 8. представлен результат обработки изображения пятна, показанного на рис. 5, и приведены такие его характеристики, как площадь, максимальная, минимальная и средняя яркость, а также интенсивность.

3. КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ ПРОГРАММЫ

Изначально ставилась задача разработки программы - в среде Windows. В качестве базового языка был выбран Visual Basic 4.0.

Программа предназначена для обработки изображений с целью выделения, описания и протоколирования яркостных и площадных характеристик особенностей очагов ПЧР и КР.

4. ВОЗМОЖНОСТИ ПРОГРАММЫ

Тип вводимого изображения - 24 бит *RGB* или 8 бит серого.

Преобразование 24 *RGB* к 8 серого.

Вывод гистограммы распределения яркостей изображения.

Сегментирование и контрастирование перепадов яркости.

Вывод графика распределения яркостей вдоль строки изображения.

Интерактивное выделение участков, содержащих изображения ПЧР и КР.

Ввод меры длины для привязки к масштабу объекта.



Рис. 8. Конечный результат количественной обработки изображения

Автоматическое определение порога яркости для выделения и вычисления количественных характеристик излучения ПЧР и КР: яркостей, площади и интенсивности.

Протоколирование результатов измерения.

Возможность вызова внешних программ обработки непосредственно из программы с передачей изображения через системный буфер обмена.

5. ПОРЯДОК РАБОТЫ:

На рис. 9 показан внешний вид главного окна программы. Работа начинается с ввода исходного изображения. Для этого необходимо выбрать пункт меню "открыть". После появления окна открытия файла необходимо выбрать файл, содержащий исходное изображение в *BMP* - или *DIB* - формате. Можно также обрабатывать изображения, полученные при помощи цифровой камеры «Casio QV-10», который дает изображения в собственном формате «*SAM*» (поставляется вместе с камерой). Для этого в программе предусмотрен вызов конвертера в *BMP* формат. Программа работает с изображениями, в которых каждая точка представлена 256 уровнями серого, поэтому предусмотрено автоматическое преобразование цветного (24 бит *RGB*) к 8-битовому монохромному изображению.

Выбирая из меню пункт "Гистограмма" и соответствующий инструмент из панели инструментов, можно исследовать распределения яркости во всем изображении и вдоль произвольной строки развертки. Пункт меню "Эффекты" и раздел "Выделение границ" запускают преобразование изображения на основе оператора Собела.

Далее на преобразованном изображении с использованием панели инструментов выделяется участок изображения, содержащий интересующую нас особенность (пятно свечения ПЧР), осуществляется бинаризация (разделение по порогу), производится цепное кодирование контура пятна и вычисление его характеристик по исходному изображению с учетом фоновой освещенности. Результаты измерения выводятся в виде, показанном на рис. 8.

Кроме того, в программе предусмотрен ввод меры длины, что позволяет получать характеристики, привязанные непосредственно к изображаемому объекту. Для этого необходимо выбрать на панели инструментов кнопку с символом масштаба.

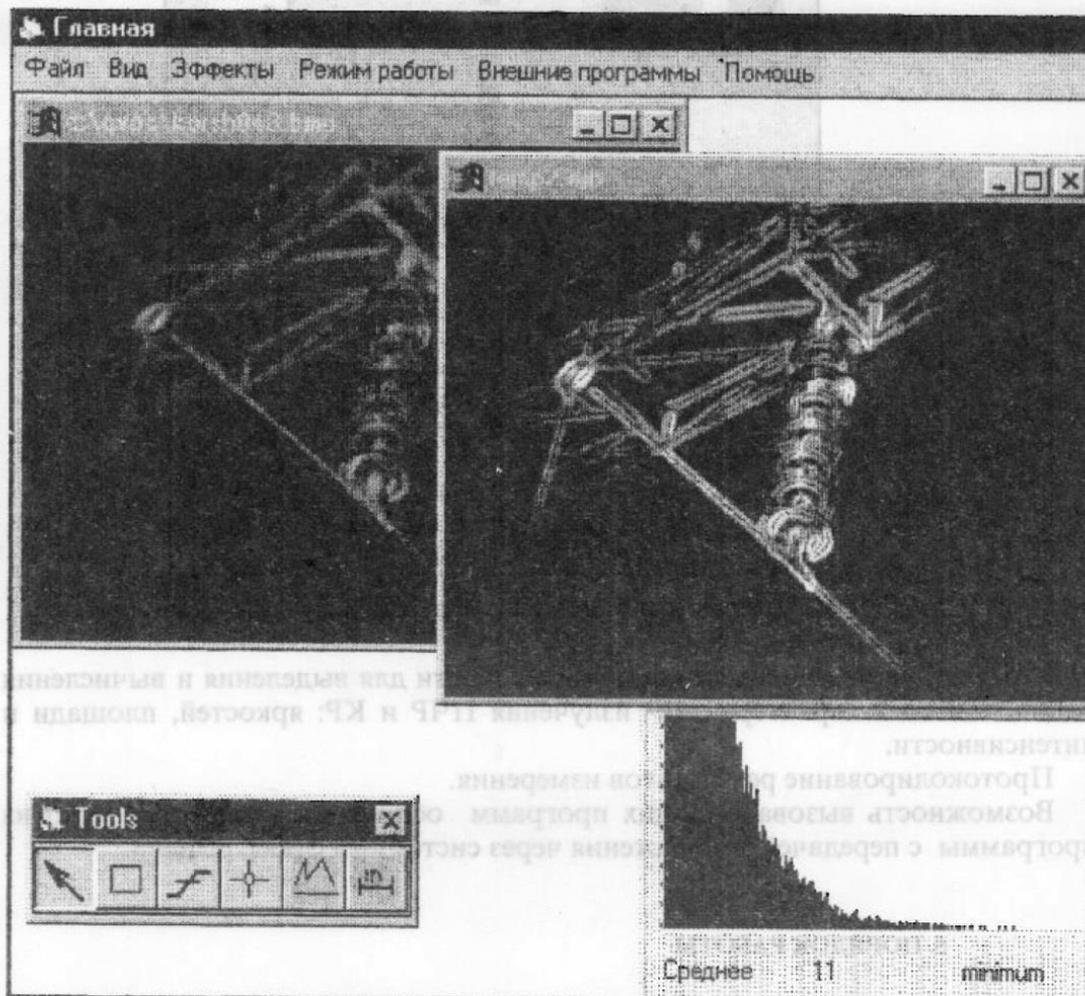


Рис. 9. Внешний вид главного окна программы

Затем нужно пометить две точки на изображении, расстояние между которыми априорно известно, например, по размеру изоляционной детали изолятора, на котором оценивается интенсивность ПЧР, и ввести с клавиатуры расстояние между ними в метрах. Далее все результаты измерений (площадь, интенсивность) будут выводиться в реальных единицах. По результатам измерения создается протокол, который хранится в файле в текстовом формате и может быть просмотрен или распечатан при помощи любого текстового редактора.

Кроме того, в программе предусмотрен вызов внешних программ обработки изображений. Для этого необходимо выбрать из меню "Внешние программы" одну из программ, при этом исходное изображение автоматически загружается в системный буфер. После окончания работы с внешней программой преобразованное изображение необходимо скопировать в буфер и выйти из программы. Далее при помощи команды "Вставка" меню "Файл" скопировать преобразованное изображение.

6. ПУТИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ОПТИЧЕСКОГО МЕТОДА КОНТРОЛЯ ИЗОЛЯЦИИ

Полученные результаты привели авторов к пониманию необходимости некоторой адаптации аппаратуры и методики регистрации, дальнейшего совершенствования алгоритмов и повышения сервисного уровня программного обеспечения.

При доработке аппаратуры в ее состав будет введен источник опорного яркостного сигнала. Будет реализован дополнительный стробирующий режим питания электронно-оптического преобразователя и усовершенствован входной светофильтр, что в значительной мере снизит яркость фоновых бликов на изображении контролируемой изоляции. В методическом плане оператору будет рекомендовано сделать не менее двух кадров одного и того же объекта с КР или ПЧР, что поможет очистить анализируемое изображение от шумов регистрирующей камеры. Оба указанных мероприятия должны повысить метрологическую надежность обработки изображений.

Доработка алгоритмов будет проводиться в направлении автоматического учета нелинейных свойств электронно-оптического преобразователя и регистрирующей камеры. Предполагается использование цепного кодирования для реализации функций автоматического поиска и идентификации изоляторов на изображении [8]. Некоторые нерассмотренные в данной статье виды диагностики оборудования оптическим методом потребуют разработки специфических приложений. Наконец, для получения главного результата диагностики, т.е. ответа на вопрос о качестве контролируемой изоляции, вида и степени опасности дефекта, потребуется расширенное привлечение базы знаний по характеристикам изоляции и наработанных критериев контроля.

При доработке программы основное внимание будет уделено удобству пользователя в части автоматизации обработки зарегистрированной информации от момента ввода изображения до получения протокола контроля. На первом этапе в качестве языка программирования был выбран *Visual Basic 4.0* из-за его удобства при исследовании и отработке алгоритма. Для создания окончательного программного продукта будут использованы другие языки, что значительно сократит время обработки информации.

ВЫВОДЫ

Проведен анализ эпограмм, содержащих изображения контролируемого высоковольтного оборудования, коронных и поверхностных частичных разрядов, а также фоновых бликов на изоляции. Выявлены характерные признаки, позволяющие отделить полезные оптические сигналы от помех.

Разработан алгоритм обработки исходного изображения, предназначенный для выделения и вычисления характеристик оптического излучения ПЧР. В алгоритме использован метод нелинейного контрастирования с помощью оператора Собела. Для выделения и описания пятен свечения были применены цепное кодирование и сегментация по порогу на основе статистической обработки гистограммы распределения яркостей.

Разработано программное обеспечение, которое может рассматриваться как основа, где заложены большие возможности интерактивного режима и возможности привлечения внешних программ.

[1] А.с. 883907 (СССР). Оптический способ дистанционного контроля состояния наружной и линейной изоляции / Овсянников А.Г., Коробейников С.М., Сибириков В.Г., Яншин Э.В. // Открытия. Изобретения. - 1981. - № 43.

[2] Овсянников А.Г., Яншин К.В. Об одной из причин разрушения стеклянных изоляторов // Энергетик. - 1982. - №1. - С. 22-23.

- [3] Овсянников А.Г., Сибиряков В.Г. Дистанционный оптический контроль подвесной дефектной изоляции ВЛ // Энергетик. - 1986. - №10. - С. 24-26.
- [4] Овсянников А.Г., Левичев В.Ю., Сибиряков В.Г. Электронно-оптический дефектоскоп "Филин-3" // Приборы и техника эксперимента. - 1987. - №2. - С. 237.
- [5] Левичев В.Ю., Овсянников А.Г., Крылов М.Н., Сибиряков В.Г. Применение дефектоскопа "Филин" для выявления загрязненной изоляции ВЛ // Энергетик. - 1987. - №3. - С. 25-26.
- [6] Копылов В.М., Левичев В.Ю., Овсянников А.Г. и др. Электронно-оптическая дистанционная дефектоскопия изоляции воздушных высоковольтных линий ЭП и подстанционного оборудования // Междун. коллоквиум по высоковольтной испытательной технике. - Л.:НИИПТ, 1988.
- [7] Прэтт У. Цифровая обработка изображений. В 2 кн./ М.:Мир, 1982.-Кн.1-310 с.;Кн. 2-790 с.
- [8] Freeman H. On the Encoding of arbitrary Geometric Configurations // IRE Trans. - 1961. - V. EC-10(2), № 6. - P.260-268.

Овсянников Александр Георгиевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, заведующий кафедрой техники и электрофизики высоких напряжений НГТУ, начальник Новосибирской СПБ филиала РАО «ЕЭС России» БП «Электросетьсервис», заслуженный работник Минтопэнерго РФ. Основное направление научных исследований - физика газового разряда, диагностика высоковольтного энергетического оборудования. Имеет более 100 публикаций.

Паули Николай Иогансович, научный сотрудник НИИ прикладной геодезии. Основное направление научной деятельности - создание прикладных программ обработки оптических изображений. Имеет 16 публикаций.

Арбузов Роман Сергеевич, магистрант НГТУ. Основное направление научной деятельности - применение оптико-электронной техники для диагностики энергетического оборудования. Имеет 2 публикации.