

## МНОГОКАНАЛЬНЫЙ ПРИБОР ДЛЯ ДИСТАНЦИОННОЙ ДИАГНОСТИКИ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

© 2009 г. А. Б. Бельский\*, канд. техн. наук; Д. К. Зарипов\*, канд. техн. наук;  
А. В. Бусарев\*; Д. Р. Галеев\*; И. М. Валеев\*\*, доктор техн. наук; В. В. Караев\*\*

\* ОАО “Красногорский завод им. С.А. Зверева”, г. Красногорск, Московская обл.

\*\* Казанский государственный энергетический университет (КГЭУ), г. Казань

E-mail: kmz@zenit-foto.ru

Рассматриваются особенности разработанного многоканального прибора, регистрирующего оптическое излучение в инфракрасном, видимом и ультрафиолетовом диапазонах спектра. Исследована эффективность прибора при диагностике высоковольтного оборудования на объектах энергетики, а также в ходе лабораторных экспериментов на примере выявления дефектов полимерного изолятора. Показано, что наличие тепловизионного канала позволяет обнаружить потенциальный дефект изолятора на ранней стадии его развития, до появления электрических разрядов. В то же время при обнаружении на изоляторе наряду с тепловыми аномалиями и электрическими разрядами по излучению в видимом и ультрафиолетовом диапазонах спектра можно говорить о развившемся дефекте.

**Ключевые слова:** дистанционная диагностика, многоканальный прибор, высоковольтное электрооборудование.

Коды OCIS: 120.4290

Поступила в редакцию 14.04.2009

В данной работе рассматриваются особенности разработки многоканальных приборов диагностики, регистрирующих излучение в инфракрасном (ИК), видимом и ультрафиолетовом (УФ) диапазонах спектра применительно к задачам дистанционной диагностики высоковольтного электрооборудования. Достоинство этих приборов в возможности одновременной регистрации тепловых аномалий и разрядных процессов на работающем оборудовании с точной фиксацией местоположения дефекта, что повышает достоверность диагностики. Зарубежные многоканальные системы CoroCam и MultiCam (CSIR, ЮАР), DayCor (Ofil, Израиль) [1] являются универсальными и позволяют проводить диагностику в любое время суток как с неподвижного, так и движущегося носителя, например с вертолета или железнодорожного вагона [2]. Однако стоимость этих приборов (более 30 тыс. евро) такова, что они являются недоступными для подавляющего большинства потенциальных потребителей. Расчеты и натурные эксперименты, проведенные на предприятиях, эксплуатирующих высоковольтное оборудование, показывают, что создание сравнительно недорогого диагностического прибора возможно при разумном ограничении

на условия применения, а именно – проводить видеосъемку с неподвижного носителя или с рук оператора. В отличие от работы с движущегося носителя в этом случае появляется возможность осуществить дополнительную обработку видеинформации не отходя от места проведения работ. Кроме того, практика диагностики высоковольтного электрооборудования показывает, что повреждения большинства элементов (контакты, изоляторы и т. д.) носят локальный характер. Дефект проявляется на небольшом участке пространства. Для регистрации таких дефектов достаточно иметь хорошее изображение телевизионного (ТВ) качества в канале, формирующем изображение в видимом диапазоне спектра, по которому можно ориентироваться в пространстве. На данное изображение накладывается изображение ИК канала меньшего формата. Более того, в некоторых случаях, например при регистрации электрических разрядов на небольших расстояниях от объекта, может быть достаточным использование в УФ канале одноэлементного фотоприемника или замена данного канала ультразвуковым (УЗ) дефектоскопом. Применение одноэлементных приемников в УФ канале и матричных фотоприемников малого

формата ( $160 \times 120$  элементов и менее) в ИК канале позволит существенно снизить стоимость прибора, в том числе и за счет использования более простых объективов.

Как показывают расчеты и эксперименты, поток излучения от электрических разрядов, возникающих на дефектах изоляционных конструкций промышленного электрооборудования, достаточен для их регистрации посредством современных низкоуровневых ТВ камер. Однако применение ТВ камер для регистрации разрядов ограничивается темным временем суток, так как большой динамический диапазон входных сигналов в дневных условиях приводит к необходимости диафрагмирования входного потока, что не позволяет достичь необходимого порога чувствительности. Для регистрации электрических разрядов в дневных условиях необходимо обеспечить работу УФ канала в солнечно-слепом спектральном диапазоне.

Изложенная концепция принята Красногорским заводом им. С.А. Зверева за основу при разработке модульного многоканального носимого прибора для оперативной диагностики технического оборудования. В общем случае прибор состоит из трех модулей: низкоуровневого ТВ модуля, чувствительного в спектральной

области  $0,4\text{--}1,0$  мкм; тепловизионного (ТПВ) модуля, чувствительного в области  $8\text{--}14$  мкм и УФ модуля, чувствительного в области спектра  $0,2\text{--}0,4$  мкм. В отдельной модификации УФ модуль может быть заменен УЗ модулем, чувствительным к акустическим колебаниям в полосе частот  $20\text{--}50$  кГц. Изображения и информация со всех модулей передается на системную плату мобильного компьютера и дисплей.

ТВ и ТПВ модули совместно с системной платой и необходимыми периферийными устройствами объединены в единой конструкции ТПВ-ТВ прибора, блок-схема которого приведена на рис. 1. Низкоуровневая ТВ камера А3 преобразовывает изображение, сформированное объективом А1, в аналоговый видеосигнал стандартного ТВ формата и подает его на вход TV1 двухканальной платы видеозахвата А8. На вход TV2 платы А8 поступает видеосигнал, сформированный объективом А2 и ТПВ модулем А4. Плата видеозахвата А8 преобразовывает аналоговые ТВ и ТПВ видеосигналы в цифровой вид и подает их на системную плату А9 с платой памяти А10, где производится совместная или раздельная обработка цифровых изображений посредством соответствующего программного обеспечения. ТВ и ТПВ изображения по отдельности или

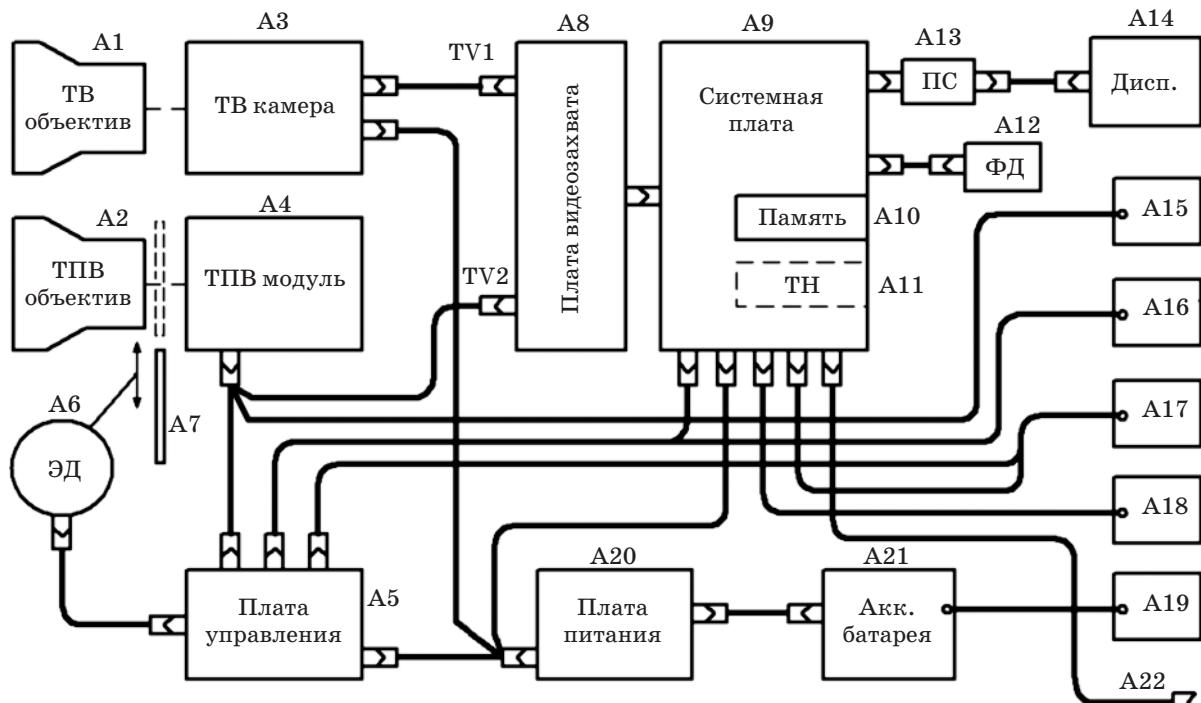


Рис. 1. Блок-схема ТПВ-ТВ прибора (пояснения в тексте).

**Таблица 1.** Технические параметры ТПВ–ТВ прибора

Параметр	ТПВ канал	ТВ канал
Тип фотоприемника	Неохлаждаемая микроболометрическая матрица	ПЗС-матрица EXview HAD
Количество фоточувствительных элементов	160×120	752×582
Размеры фоточувствительного элемента, мкм	35×35	6,5×6,25
Рабочий спектральный диапазон, мкм	8–14	0,4–1,0
Поле зрения, угл. град	6,4×4,8	7,7×5,7
Элементарное поле зрения, мрад	0,7×0,7	0,18×0,17
Относительное отверстие объектива	1/1,1	1/1,4
Порог чувствительности по СКО шума, К (лк)	не более 0,1	(0,00015)
Время накопления сигнала при частоте кадров 25 Гц, мс	10	переменное от 0,01 до 20
Выход видеинформации	Экран встроенного дисплея, USB-порт, CF диск	
Вид видеинформации	Файлы потоковых видеофильмов 25 Гц/одиночные стоп-кадры	
Питание	Встроенная аккумуляторная батарея/зарядное устройство	
Энергопотребление, Вт	15	
Масса, кг	1,5	
Габариты, мм	222×112×131	
Диапазон рабочих температур, °C	0–60	

совместно поступают с сигнального выхода системной платы A9 через плату сопряжения A13 на дисплей A14. Кинематический узел в составе электродвигателя A6 и калибровочной шторки A7 служит для ввода шторки в оптический тракт ТПВ канала на стадиях периодической калибровки в процессе работы прибора. Режимы работы ТПВ модуля задаются через плату управления A5. Твердотельный накопитель A11 служит для хранения и загрузки операционной системы и прикладных программ. CF диск A12 предназначен для долговременного хранения результатов видеосъемки. Плата питания A20 преобразовывает напряжение, поступающее от аккумуляторной батареи A21, в напряжения, необходимые для работы составных частей прибора. Органы управления и индикации обеспечивают навигацию по программному меню, управление работой прикладных программ (джойстик A15 и трекбол A18), управление работой прибора (кнопки A16, A17) и индикацию заряда аккумуляторной батареи (светодиод A19). Информация с УФ и УЗ модулей передается на системную плату через разъем A22 по интерфейсу RS 232. Технические параметры экспериментального образца прибора представлены в табл. 1.

УФ модуль выполнен в виде отдельного блока, содержащего сферическое фокусирующее зеркало, фотоприемник с платой питания,

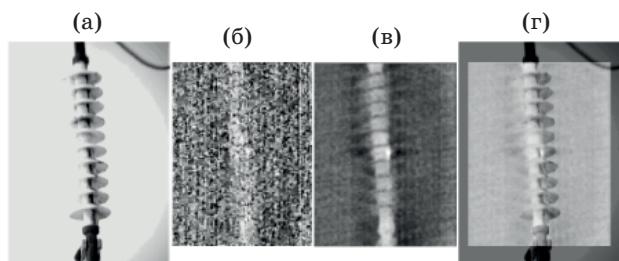
плату управления, аккумуляторную батарею, органы управления и индикации. В качестве фотоприемника в УФ модуле использован датчик УФ излучения типа UV TRON фирмы NAMAMATSU, чувствительный в солнечно-слепом спектральном диапазоне 185–280 нм. Датчики UV TRON традиционно применяются в качестве датчиков пламени. Однако, как показывают расчеты и лабораторные эксперименты, при наличии фокусирующей оптики чувствительность датчиков достаточна для регистрации электрических разрядов на изоляционных конструкциях высоковольтных линий с расстояний 15–20 м. Технические параметры УФ модуля представлены в табл. 2.

Программное обеспечение прибора, работающее под управлением операционной системы

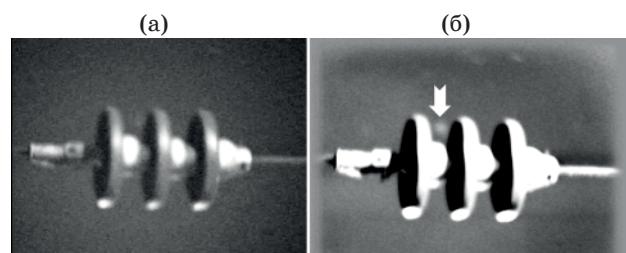
**Таблица 2.** Технические параметры УФ модуля

Параметр	Значение
Пороговая облученность фотокатода, Вт / см <sup>2</sup>	$6 \times 10^{-14}$
Диаметр фотокатода, мм	7,9
Диаметр входного зрачка приемного объектива, мм	100
Дальность обнаружения дефекта на высоковольтных линиях 35 кВ, м	15–20
Масса, кг	0,5

Windows XP Embedded, включает программу формирования совмещенного ТПВ–ТВ изображения и программу постобработки изображений. Программа формирования ТПВ–ТВ изображения обеспечивает совмещение текущих ТВ и ТПВ кадров в реальном времени и вывод итогового изображения на экран дисплея. Программа постобработки изображения реализует традиционные алгоритмы межкадрового накопления видеинформации, предусматривающие захват кадров изображения, нормирование динамического диапазона яркостей, компенсацию фоновых неоднородностей, вносимых аппаратной частью, совмещение изображений во всей серии обрабатываемых кадров, наложение изображений друг на друга и усреднение яркостей пикселов изображения по совокупности обрабатываемых кадров. Накопление видеинформации производится посредством обработки файла видеофильма, сохраненного в памяти ТПВ–ТВ прибора. Обработка производится прикладной программой, заложенной в прибор, и может осуществляться сразу же после записи непосредственно на месте проведения работ. Возможность увеличить количество обрабатываемых кадров до сотен и тысяч в ходе постобработки позволяет повысить качество ТВ и ТПВ изображений и снизить порог чувствительности, что позволяет выявлять дефекты, не обнаруживаемые при наблюдении изображения непосредственно во время видеосъемки. Рис. 2 и 3 иллюстрируют применение алгоритмов обработки изображений на примере выявления дефектов в высоковольтной изоляции. На ТВ кадре (рис. 2а) хорошо виден объект – полимерный изолятор на фоне стены в замкнутом помещении. На одиночном ТПВ кадре (рис. 2б) видна температурная аномалия, однако контуры изолятора не просматриваются из-за слабого контраста сцены, обусловленного приблизительным равенством температур объекта и фона. Изображение, представленное на рис. 2в, получено путем накопления видеинформации из последовательности 1000 ТПВ кадров. На итоговом изображении (рис. 2г), полученном путем обработки последовательности ТПВ кадров и совмещения с ТВ кадром, фиксируется местоположение дефекта. На рис. 3 представлены телевизионные изображения гирлянды изоляторов на действующей высоковольтной линии 35 кВ. Съемка проводилась вочных условиях при безоблачном небе. На изображении, сформированном из совокупности 183 кадров (рис. 3б) выявляется зона свечения электрических разрядов (указано стрелкой).



**Рис. 2.** Стадии обработки ТПВ–ТВ изображения: а – ТВ изображение изолятора, б – изображение отдельного ТПВ кадра, в – результат обработки серии ТПВ кадров, г – итоговое ТПВ–ТВ изображение.



**Рис. 3.** Телевизионные изображения гирлянды изоляторов: а – изображение отдельного кадра, б – результат обработки.

В целом ТПВ–ТВ прибор обеспечивает достаточно высокую эффективность диагностики высоковольтного электрооборудования. В процессе натурных испытаний на объектах электроснабжения железной дороги с помощью экспериментального образца прибора в течение 3-х суток было обнаружено 45 дефектов. Достоверность результатов диагностики подтверждена выборочными измерениями в ходе ремонта и замены дефектного оборудования. Как показали натурные испытания разработанного прибора при диагностике контактной сети железной дороги, низкоуровневый ТВ канал имеет ограничения по уровню освещенности пространства. Даже при работе ночью заметность электрических разрядов ограничиваются засветками, вызванные искусственными источниками освещения. По нашим оценкам, для эффективного выявления разрядов посредством ТВ канала уровень освещенности не должен превышать значений  $10^{-2}$  лк.

Для оценки эффективности разработанного многоканального прибора и в целях создания методического обеспечения к нему (применительно к диагностике высоковольтного оборудования) были проведены лабораторные исследования возможности выявления дефектов в изоляции

на примере полимерного изолятора. Выбор объекта исследования не случаен. С одной стороны, диагностика изоляторов является наиболее востребованной в связи с высокой долей выхода из строя высоковольтного оборудования из-за повреждения изоляции [2]; с другой – полимерные изоляторы применяются сравнительно недавно и отсутствует общепринятая методика контроля их технического состояния в процессе эксплуатации. Эксперименты были проведены в высоковольтной лаборатории Казанского государственного энергетического университета.

Целью проведенных экспериментов была оценка необходимости использования нескольких оптических каналов при диагностике полимерных изоляторов. Из практики хорошо известно [1, 3], что существует корреляция в обнаружении дефектов изоляторов при одновременном использовании тепловизоров и УЗ дефектоскопов, особенно при выявлении развитых повреждений. Однако остается открытым вопрос, насколько целесообразно в такой ситуации одновременное использование двух дорогостоящих приборов.

Значительная часть повреждений изоляторов из полимерных материалов обусловлена снижением сопротивления изоляции в результате действия разрядов на загрязненной и увлажненной их поверхности в процессе эксплуатации [4]. Под действием атмосферных осадков происходит существенное увеличение токов утечки в слое загрязнения на поверхности изолятора. Вследствие неоднородности загрязненного слоя плотность тока в различных точках не одинакова, что обуславливает градиент температур по поверхности и возникновение электрических разрядов.

Для проведения исследований был использован полимерный изолятор ЛК 70/35 (см. рис. 2а). Загрязнение и увлажнение изолятора имитировалось нанесением полос графитовым карандашом на поверхность изолятора. В ходе экспериментов помимо ТПВ-ТВ прибора и УФ модуля использовался УЗ дефектоскоп УД-8В. Изменение тока утечки по поверхности изолятора создавалось путем изменения подаваемого на изолятор напряжения переменного тока частотой 50 Гц в интервале от 0 до 40 кВ с шагом 5 кВ. При каждом значении напряжения записывалось изображение в ТПВ и ТВ каналах, а наличие и интенсивность разрядов фиксировались УФ модулем и прибором УД-8В. При записи изображения с ТВ канала свет в лаборатории выключался и фоновая освещенность в помещении создавалась светом, проникающим в помещение с улицы.

Результаты измерений представлены на рис. 4 в виде графиков изменения температуры в окрестностях “дефекта” (кривая 1), интенсивности УФ излучения (кривая 2) и интенсивности акустических УЗ волн (кривая 3), вызванных электрическими разрядами вдоль поверхности изолятора. Перед проведением измерений пороги чувствительности УФ и УЗ датчиков были выравнены в процессе регистрации тестового коронного разряда. По отношению к кривой 1 шкала на оси ординат соответствует значениям разности температур между изолятором в окрестностях “дефекта” и фоном в °С. По отношению к кривым 2 и 3 отсчет на оси ординат соответствует количеству пороговых значений в амплитуде сигнала, зарегистрированного УФ и УЗ датчиками в процессе эксперимента.

Анализ кривых на рис. 4 показывает, что температурные аномалии обнаруживаются при меньших значениях подаваемого на изолятор напряжения, чем это необходимо для возникновения разрядов (зона А). При дальнейшем повышении напряжения и пересечении границ зон А и Б создаются условия для возникновения разрядов, обнаруживаемых сначала УЗ прибором, а затем УФ модулем и ТВ камерой.

Как видно из сопоставления кривых 2 и 3 рис. 4, появление и характер изменения интенсивности светового и звукового излучения разрядов имеют существенные различия. Возрастание напряжения (в зоне Б) приводит к возникновению поверхностных частичных разрядов (ПЧР) на поверхности, что сопровождается ультразвуковым излучением достаточно боль-

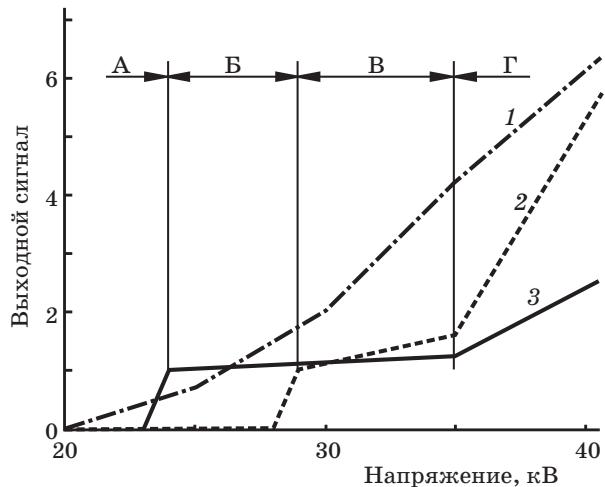


Рис. 4. Зависимости сигналов ТПВ (1), УФ (2) и УЗ (3) датчиков от напряжения на изоляторе.

шой интенсивности. Дальнейшее повышение напряжения на изоляторе (в зоне В) сопровождается появлением УФ излучения и незначительным возрастанием акустических колебаний. И, наконец, при достижении напряжения значений в зоне Г происходит электрический пробой воздушного промежутка между “юбками” изолятора, который смог зарегистрировать низкоуровневый ТВ канал прибора.

Наиболее важный вывод из проведенных экспериментов заключается в том, что поскольку поверхностная проводимость изолятора и токи утечки определяются степенью загрязнения [4], то ТПВ контроль позволяет обнаружить потенциальный дефект на ранней стадии его развития, до появления разрядов. Наличие тепловой аномалии и возникновение УЗ излучения, вероятно, свидетельствуют о развивающемся дефекте или повышенном загрязнении поверхности изолятора. Наконец, при обнаружении одновременно и тепловых аномалий, и регистрации электрических разрядов в УФ и УЗ каналах можно говорить о развивающемся дефекте.

В целом проведенные исследования показали, что разработанный прибор обладает достаточно

высокими параметрами для его применения в целях диагностики технического оборудования. Совместное применение датчиков информации создает предпосылки к выявлению новых признаков наличия дефектов и повышению достоверности диагностики.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Крупенин Н.В., Завидей В.И., Голубев А.В., Милованов С.В., Вихров М.А., Головичер В.А. Особенности технологии проведения оптической диагностики электрооборудования // Энергетик. 2009. № 1. С. 47.
2. 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.
3. Арбузов Р.С., Лавров В.Ю., Толчин В.М., Овсянников А.Г. Ультрафиолетовая и инфракрасная дефектоскопия изоляционных конструкций // Энергетик. 2004. № 8. С. 34–35.
4. Пинталь Ю.С., Сергеев Ю.Г. Разряд в воздухе вдоль загрязненной и увлажненной поверхности изолятора. М.: Изд. МЭИ, 2002. 32 с.