

УДК 621. 397

Многоканальный прибор для оперативной диагностики технического оборудования

А. Б. Бельский, А. В. Бусарев, Д. Р. Галеев, Д. К. Зарипов, И. М. Валеев

Представлены результаты разработки комплексного прибора, предназначенного для диагностики технического оборудования. Рассмотрены особенности разработки многоканального прибора, регистрирующего излучение в инфракрасном, видимом и ультрафиолетовом диапазонах спектра. Представлены результаты натурных экспериментов по выявлению тепловых аномалий и разрядных процессов на действующем высоковольтном электрооборудовании.

PACS: 85.60.-q

Ключевые слова: диагностика электрооборудования, многоканальный оптико-электронный прибор, телевизионный, тепловизионный, ультрафиолетовый, канал.

Введение

Проблемы дистанционной диагностики высоковольтного электрооборудования являются весьма актуальными в связи с обновлением оборудования в энергетике. В данной работе рассматриваются особенности разработки многоканальных оптико-электронных приборов диагностики, регистрирующих излучение в инфракрасном, видимом и ультрафиолетовом диапазонах спектра.

Достоинство этих приборов состоит в возможности одновременной регистрации тепловых аномалий и разрядных процессов на работающем обо-

рудовании с точной фиксацией местоположения дефекта, что повышает достоверность диагностики. Зарубежные многоканальные оптико-электронные приборы DayCor (Ofil, Израиль)*, CoroCam и MultiCam (CSIR, ЮАР) являются универсальными и позволяют проводить диагностику в любое время суток и с движущегося носителя. Однако стоимость этих приборов (> 30 тыс. евро) является недоступной для подавляющего большинства потенциальных потребителей. Расчеты и натурные эксперименты, проведенные на предприятиях, эксплуатирующих высоковольтное оборудование, показывают, что создание сравнительно недорогого диагностического прибора в современных условиях возможно при разумном ограничении на условия применения, а именно: отсутствие прямого солнечного освещения, быстро передвигающегося носителя и жесткого лимита времени на обработку видеoinформации. 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. Поэтому в многоканальных приборах нет необходимости строить полноформатное изображение во всех каналах. Достаточно иметь хорошее изображение телевизионного качества в канале, формирующем изображение в видимом диапазоне спектра, по которому можно будет ориентироваться в пространстве. На данное изображение накладывается изображение инфракрасного (ИК) и ультрафиолетового (УФ) каналов меньшего формата. Более того, в некоторых случаях, например, при регистрации электрических разрядов на небольших расстояниях от объекта, может быть доста-

Бельский Александр Борисович, зам. генерального директора по науке.

Бусарев Анатолий Владимирович, ведущий инженер.

Галеев Дамир Раисович, инженер.

Зарипов Дамир Камилевич, начальник сектора.

ОАО "Красногорский завод им. С. А. Зверева".

Россия, 143400, Московская область, г. Красногорск-7, ул. Речная, 8.

Тел. (495) 561-80-00.

Email: kmz@zenit-foto.ru

Валеев Ильгиз Миргалимович, зав. кафедрой, профессор.

Казанский государственный энергетический университет.

Россия, 420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51.

Тел. (843) 519-42-24.

Email: kgeu@kgeu.ru

Статья поступила в редакцию 12 мая 2010 г.

* Крупенин Н. В., Голубев А. В., Завидей В. И., Вихров М. А. Опыт применения электронно-оптических приборов при контроле технического состояния энергетического оборудования // Сб. науч. тр. ВЭИ, под общей редакцией д-р техн. наук В. Д. Ковалева. — М., 2008.

точным использованием в УФ-канале одноэлементного фотоприемника или замена данного канала ультразвуковым дефектоскопом. Применение в ИК- и УФ-каналах одноэлементных и матричных фотоприемников малого формата (160×120 элементов и менее) позволит существенно снизить стоимость прибора, в том числе и за счет использования более простых объективов. Также можно отметить, что применение современных сравнительно недорогих низкоуровневых телевизионных камер во многих случаях предпочтительнее использования дорогостоящих электронно-оптических преобразователей.

Конструкция и технические параметры прибора

Изложенная концепция принята ОАО КМЗ за основу при разработке модульного многоканального прибора для оперативной диагностики технического оборудования. В общем случае прибор состоит из трех модулей: телевизионного (ТВ), чувствительного в спектральной области 0,4—1,0 мкм; тепловизионного (ТПВ), чувствительного в области 8—14 мкм и ультрафиолетового, чувствительного в области спектра 0,2—0,4 мкм. В отдельной модификации УФ-модуль может быть заменен ультразвуковым модулем, чувствительным в полосе звуковых частот 20—50 кГц. Изображения и информация со всех модулей переда-

ется на системную плату мобильного компьютера и дисплей.

ТВ- и ТПВ-модули совместно с системной платой и необходимыми периферийными устройствами объединены в единой конструкции теплотелевизионного прибора, блок-схема которого представлена на рис. 1. Низкоуровневая телевизионная камера А3 преобразовывает изображение, сформированное объективом А1, в аналоговый видеосигнал стандартного телевизионного формата и подает его на вход TV1 двухканальной платы видеозахвата А8. На вход TV2 платы видеозахвата А8 поступает видеосигнал, сформированный объективом А2 и тепловизионным модулем А4. Плата видеозахвата А8 преобразовывает аналоговые телевизионный и тепловизионный 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 совместно поступают с сигнального выхода системной платы А9 через плату сопряжения А13 на дисплей А14.

Кинематический узел в составе электродвигателя А6 и калибровочной шторки А7 служит для ввода шторки в оптический тракт тепловизионного канала на стадиях периодической калибровки тракта в процессе работы прибора. Режимы работы ТПВ-модуля задаются через плату управления А5.

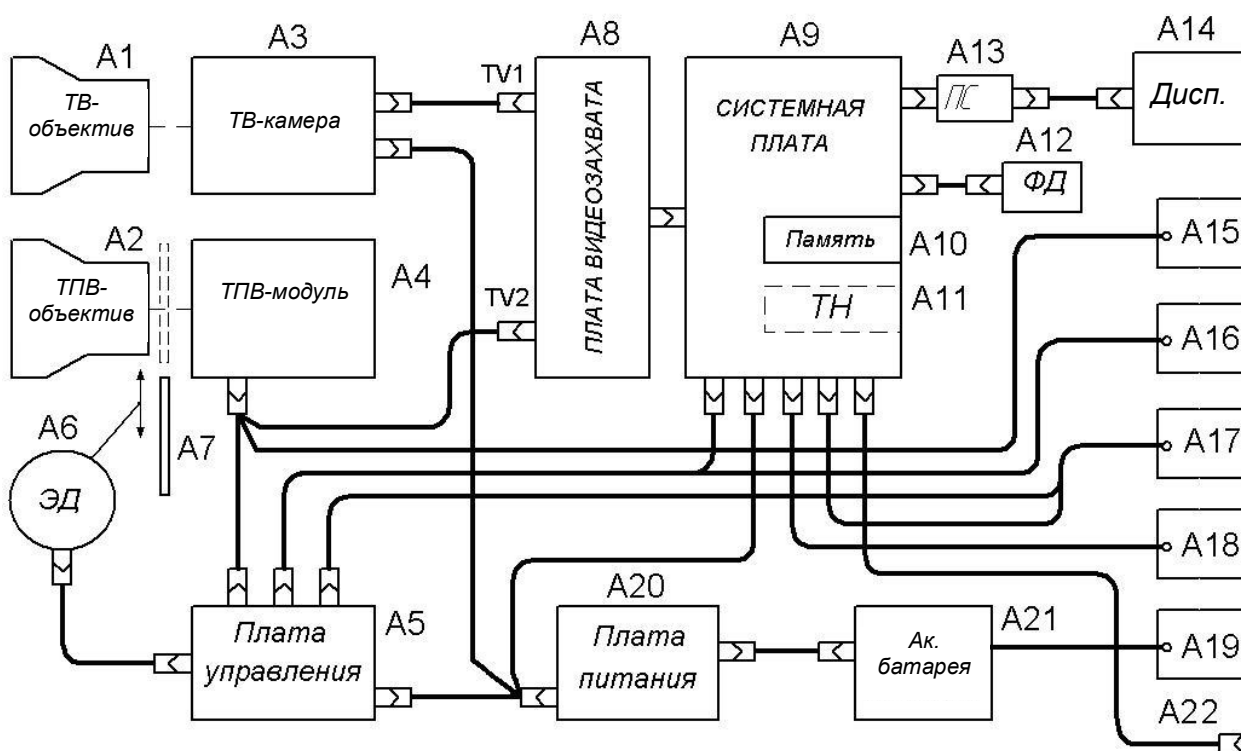


Рис. 1. Блок-схема теплотелевизионного прибора

Твердотельный накопитель A11 служит для хранения и загрузки операционной системы и прикладных программ. Флеш-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). Технические параметры экспериментального образца прибора представлены в табл. 1.

Как показывают расчеты и подтверждают эксперименты, поток излучения от коронных разрядов (КР) и поверхностных частичных разрядов (ПЧР), возникающих на дефектах изоляционных конструкций промышленного электрооборудования, достаточен для их регистрации посредством низкоуровневой ТВ-камеры. Однако применение ТВ-камеры для регистрации КР и ПЧР ограничивается темным временем суток, так как большие фоновые засветки от небосвода в дневных условиях не позволяют достичь достаточно низкого порога чувствительности. Кроме того, даже при ра-

боте ночью заметность электрических разрядов ограничивают засветки, вызванные искусственными источниками освещения. По этой причине в УФ-модуле в качестве фотоприемника использован датчик УФ-излучения типа UV TRON фирмы HAMAMATSU, чувствительный в солнечно слепом спектральном диапазоне 185—300 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 10—20 м.

Конструктивно УФ-модуль выполнен в виде отдельного блока, содержащего сферическое фокусирующее зеркало, датчик с платой управления, плату согласования, аккумуляторную батарею, органы управления и индикации.

Технические параметры УФ-модуля представлены в табл. 2. Расчетные значения пороговой чувствительности к излучению электрических разрядов (ЭР) и перечень возможных областей применения УФ- и ТВ-модулей в задачах диагностики изоляционных конструкций высоковольтных линий (ВЛ) представлены в табл. 3 и 4.

Таблица 1

Технические параметры теплотелевизионного прибора

Наименование параметра	ТПВ-канал	ТВ-канал
Тип фотоприемника	Неохлаждаемая микроболومترическая 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, град	6,4×4,8	7,7×5,7
Элементарное поле зрения, мрад	0,7×,7	0,18×,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, мс при частоте кадров 25 Гц	10	Переменное от 0,01 до 20
Вывод видеoinформации	Экран встроенного дисплея, USB-порт, флеш диск	
Вид видеoinформации с USB-порта, SD-карты	Файлы потоковых видеофильмов 25 Гц / Одиночные стоп-кадры	
Питание	Встроенная аккумуляторная батарея / Зарядное устройство	
Энергопотребление, Вт	16—17	
Масса, кг	1,5	
Габариты, мм	222×112×131	
Диапазон рабочих температур, °С	0—60	

Таблица 2

Технические параметры ультрафиолетового модуля

Наименование параметра	Значение
Пороговая облученность фотокатода, Вт / см ²	6·10 ⁻¹⁴
Диаметр фотокатода, мм	7,9
Диаметр входного зрачка приемного объектива, мм	100
Дальность обнаружения дефекта на высоковольтных линиях 35 кВ, м	10—15
Масса, кг	0,5

Таблица 3

Пороговая чувствительность УФ- и ТВ-модулей

Дальность до ЭР, м	Пороговый заряд ЭР, нКл	
	УФ-модуль	ТВ-модуль
10	30	4,5
15	70	7
20	130	9
40	500	17
80	–	34
400	–	170

Таблица 4

Сравнительная оценка УФ- и ТВ-модулей

Диапазоны величин заряда ЭР, нКл	Типовые источники излучения	Возможности УФ-модуля	Возможности ТВ-модуля
1—50	ПЧР на сухих исправных изоляционных конструкциях ВЛ при номинальных рабочих напряжениях	Обнаружение дефектов по повышенной интенсивности ПЧР с дистанций 10—15 м	Определение степени развития дефекта путем измерения интенсивности ПЧР с дистанций до 20 м и обнаружение дефекта с дистанций до 100 м
10—500	ПЧР на изоляционных конструкциях с загрязненной поверхностью	Обнаружение дефектов и определение степени загрязнения изоляторов с дистанций 10—20 м	Определение степени загрязнения изоляторов с дистанций 50—100 м, обнаружение дефектов с дистанций до 400 м
100—1000	КР на дефектах проводов и изоляционных конструкций ВЛ 35 кВ. КР на элементах исправных конструкций ВЛ 150—300 кВ	Определение степени развития дефекта с дистанций 20—30 м	Определение степени развития дефекта с дистанций до 100 м, обнаружение дефектов с дистанций до 400 м

Программное обеспечение прибора, работающее под управлением операционной системы Windows XP Embedded, включает программу формирования совмещенного теплотелевизионного изображения и программу обработки изображений. Программа формирования теплотелевизионного изображения обеспечивает совмещение текущих ТВ- и ТПВ-кадров в реальном времени и вывод итогового изображения на экран дисплея.

Рис. 2 иллюстрирует достоинства теплотелевизионной съемки. В суммарном теплотелевизионном изображении (см. рис. 2, б и в) детали объекта, имеющие одинаковую температуру, выявляются по контрасту в видимой области спектра, а детали, неразличимые в видимой области — по температурному контрасту. Доля яркости ТПВ-изображения в суммарном изображении задается оператором.

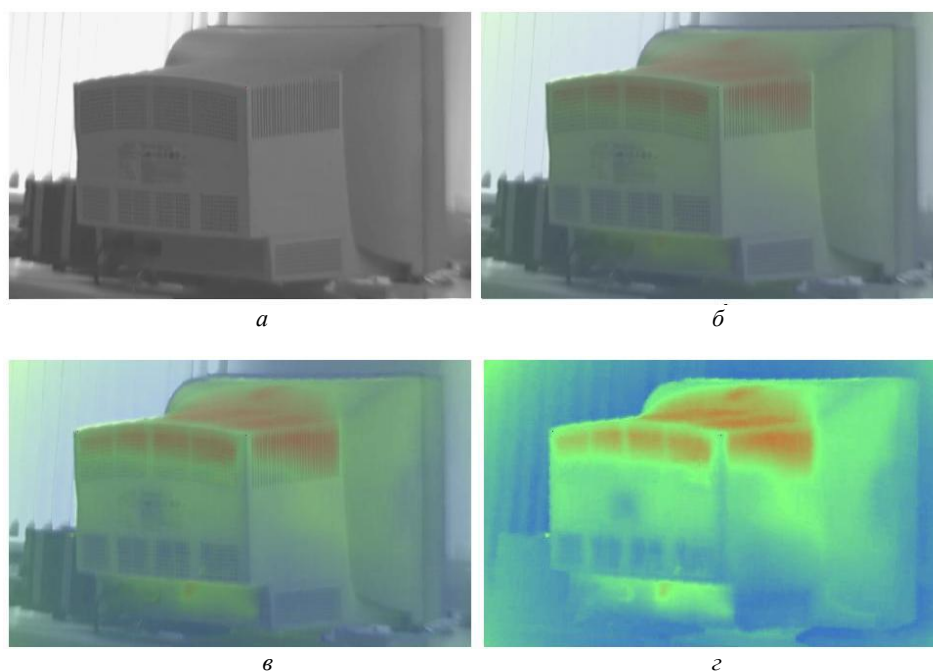


Рис. 2. Теплотелевизионные изображения с долей яркости ТПВ-составляющей в суммарном изображении: а — 0 %; б — 20 %; в — 40 %; г — 100 %

Программа обработки изображения реализует традиционные алгоритмы межкадрового накопления видеoinформации, 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 пикселей изображения по совокупности обрабатываемых кадров. Эффективность используемых алгоритмов обработки и преимущества совмещения ТВ- и ТПВ-изображений на примере выявления дефектов в полимерной высоковольтной изоляции показаны на рис. 3—5.

Результаты лабораторных и натуральных экспериментов

На рис. 3 приведены результаты обработки серии из 11 тепловизионных кадров изображения дефектного полимерного изолятора ЛК 35/70, полученных в ходе испытаний прибора в высоко-

вольтной лаборатории КГЭУ. Градиент температур по поверхности изолятора составлял 0,1—0,2 °С. В отличие от одиночных исходных кадров (см. рис. 3, *а*) в итоговом суммарном изображении (см. рис. 3, *б*) тепловая аномалия на изоляторе уверенно обнаруживается.

На рис. 4 представлены результаты обработки и совмещения ТВ- и ТПВ-изображений. На телевизионном кадре (см. рис. 4, *а*) хорошо виден объект. На тепловизионных кадрах (см. рис. 4, *б* и *в*) видна температурная аномалия, а контуры объекта не просматриваются из-за слабого контраста сцены, обусловленного приблизительным равенством температур объекта и фона. На итоговом изображении (см. рис. 4, *г*), полученном путем обработки последовательности ТПВ-кадров и совмещения с ТВ-кадром, фиксируется местоположение дефекта. На рис. 5 представлены телевизионные изображения гирлянды изоляторов на действующей высоковольтной линии 35 кВ. Съемка производилась в ночных условиях при безоблачном небе. На изображении, сформированном из совокупности 183 кадров (см. рис. 5, *б*), выявляется зона свечения электрических разрядов (указано стрелкой).

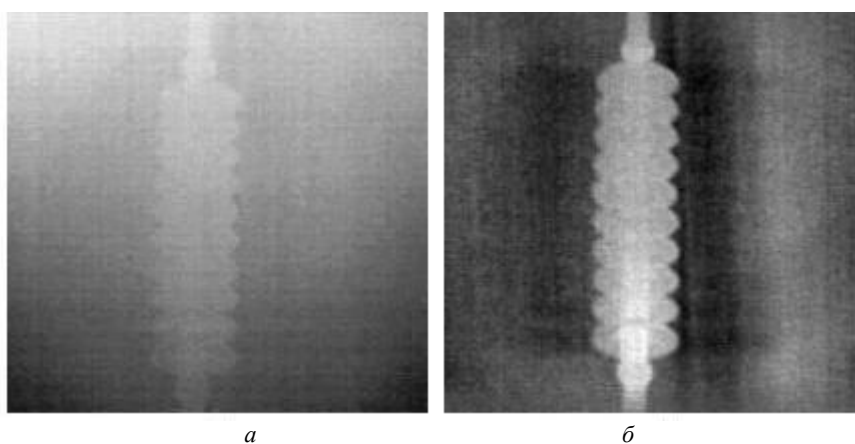


Рис. 3. Тепловизионные изображения изолятора, полученные в лабораторных условиях: *а* — изображение отдельного кадра; *б* — результат обработки

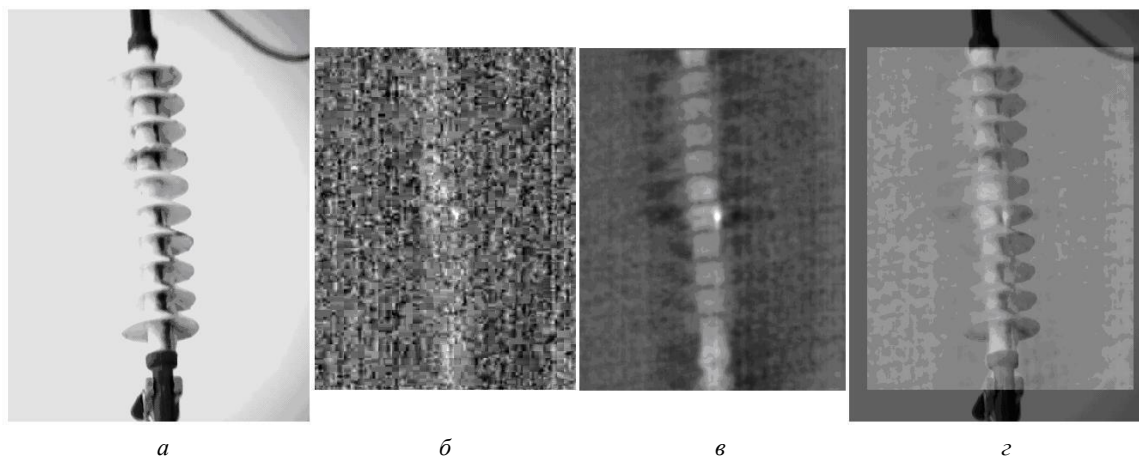
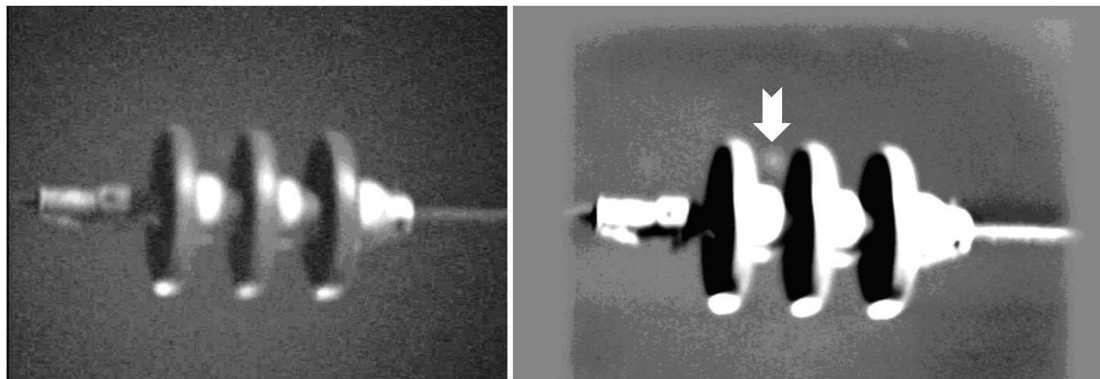


Рис. 4. Стадии обработки теплотелевизионного изображения:

а — ТВ-изображение изолятора; *б* — изображение отдельного ТПВ-кадра; *в* — результат обработки серии ТПВ-кадров; *г* — итоговое теплотелевизионное изображение



*Рис. 5. Телевизионные изображения гирлянды изолятора:
а — изображение отдельного кадра; б — результат обработки*

Заключение

Экспериментальный образец теплотелевизионного прибора прошел натурные испытания на объектах Юдинской дистанции электроснабжения Горьковской железной дороги ОАО "Российские железные дороги" в августе 2008 г. В общей сложности на всех обследованных объектах было обнаружено 45 дефектов оборудования. Произведенные в ходе ремонта и замены оборудования выборочные измерения полностью подтвердили результаты диагностики.

Результаты проведенных лабораторных и натурных экспериментов показывают возможность повышения эффективности диагностики высоковольтного электрооборудования за счет совместной обработки данных, поступающих от датчиков, регистрирующих излучение в инфракрасном, видимом и ультрафиолетовом диапазонах спектра. Современное состояние элементной базы позволяет создать недорогой малогабаритный трехспектральный диагностический прибор, включающий телевизионный, тепловизионный и ультрафиолетовый каналы, на основе системной платы мобильного мини-компьютера.

Multi-channel device for operative diagnostics of the technical equipment

A. B. Belsky, A. V. Busarev, D. R. Galeev, D. K. Zaripov

"S.A. Zverev Krasnogorsky zavod" JSC, 8 Rechnaja str., Krasnogorsk-7, 143400, Russia

Email: kmz@zenit-foto.ru

I. M. Valeev

Kazan State Power Engineering University, 51 Krasnoselskaja str., Kazan, 420066, Russia

Email: kgeu@kgeu.ru

The design of a complex device for diagnostics of the technical equipment is presented. Considered are the particularities of development of a multi-channel device for registration of radiation in infrared, visible, and ultraviolet range of the spectrum. Results of laboratory and natural experiments on finding the heat anomaly and electrical discharges on acting high-voltage electrical equipment are presented.

PACS: 85.60.-q

Keywords: diagnostics of technical equipment, multi-channel optical and electronic device, television, thermovision, ultraviolet, channel.