



ТЕПЛОВИЗИОННЫЙ КОНТРОЛЬ И ДИАГНОСТИКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

В. А. СТОРОЖЕНКО, С. Н. МЕШКОВ, В. А. МАСЛОВА

Описаны физические основы тепловизионного контроля и диагностики энергетического оборудования, его современная приборная и нормативная базы. Приведены объекты энергетического оборудования, его основные дефекты и неисправности, обнаруживаемые с помощью этого метода, а также статистические данные и примеры эффективного применения метода. Указаны направления дальнейшего развития тепловизионного контроля и диагностики энергетического оборудования.

Physical backgrounds of energetic equipment thermovision testing and diagnosis as well as its apparatus and standard base are described. Objects of energetic equipment, their main defects and disturbances, which can be detected by this method, are described. Statistics and examples of effective use of the method are listed. Possible directions of further development of thermovision control and energetic equipment diagnostics are shown.

Тепловизионный метод контроля и диагностики основан на анализе тепловой карты объекта, получаемой с помощью тепловизора. По тепловой карте (термограмме) можно судить о внутренней структуре объекта (по аналогии с рентгеноскопией), в частности, обнаруживать ее аномалии, которые являются скрытыми дефектами.

По данным Infrasppection Institute этот метод применяют более 200 крупнейших корпораций и фирм мира. Среди них такие, как Ford, General Electric, Volvo, Martin Lockheed Marietta, Boeing, Sharp, Sony, NASA, British Airways, Airbus Industry, Union Carbide и др.

Основными преимуществами метода являются: безопасное обслуживание; снижение эксплуатационных расходов; улучшенное и более дешевое техобслуживание; рост прибыли.

Перспективной областью применения тепловизионного контроля и диагностики является энергетическое оборудование.

Физические основы тепловизионного метода.

По мере корроирования и износа (старения) компонентов электрооборудования происходит изменение их электрических свойств, преимущественно сопротивления. В общем случае такие изменения проявляются через повышение температуры на поверхности. Измеряя эти температуры методом, позволяющим дифференцировать их по отношению к тепловому фону окружающей среды, можно обнаруживать частичные отказы компонентов [1]. Следовательно, электроннадзор можно проводить с увеличенными интервалами между циклами контроля и этим создавать предпосылки для эффективного планирования профилактического обслуживания.

Количество тепловой энергии, излучаемой неисправным компонентом, является функцией его нагрузки (тока) и условий окружающей среды. Увеличение тока в цепи в большинстве случаев приводит к ненормальному нагреванию компонентов, что создает благоприятные условия для контроля. Некоторые зарождающиеся неисправности

не проявляются до тех пор, пока соответствующий компонент не окажется под большой нагрузкой. В то же время, серьезные неисправности почти всегда обнаруживаются независимо от режима нагрузки. Условия окружающей среды также могут влиять на термодинамические свойства поверхностей, подавляя или, наоборот, усиливая желаемый эффект. Высокая влажность воздуха или холодный ветер могут охлаждать поверхность контролируемого объекта и тем самым уменьшать повышенную теплоотдачу с поверхности. И наоборот, при измерениях в ночное время при тихой погоде эффект перегрева усиливается.

Дефекты в энергонагруженных узлах образуются непрерывно. Опыт передовых стран показывает, что с помощью периодических проверок количество возникающих и деградирующих дефектов можно поддерживать на некотором минимальном уровне. Отмеченные изменения электрического сопротивления обычно происходят постепенно, благодаря чему ремонт или замену неисправных элементов можно предусмотреть своевременно на базе графика текущего ухода.

Приборная база, применяемая для тепловизионного контроля. Приборная база тепловизионного метода достаточно разнообразна. В настоящее время крупнейшими мировыми производителями тепловизионной техники (FLIR Systems, Raytheon, Indigo, Micron (все-США), NEC (Япония), CEDIR (Франция), AEG (Германия) и др.) выпускается большое количество моделей камер с высокими техническими и эксплуатационными характеристиками [2]. Основные параметры современных тепловизоров: интервал температур — от -40° до $+2000^{\circ}\text{C}$; температурное разрешение — до $0,05^{\circ}\text{C}$; быстродействие — до 60 Гц; поле зрения — до $18^{\circ}\times 24^{\circ}$. Фирмы-производители применяют гибкую ценовую политику, при которой стоимость тепловизионных систем зависит от их комплектации, в особенности от числа объективов, фильтров, устройств записи и документирования термограмм, а также программного продукта. Отпускная цена фирмы на базовые комплекты показывающих теп-



Таблица 1. Виды энергетического оборудования и характерные выявляемые дефекты

Виды оборудования	Характерные дефекты
Генераторы	Межлистовые замыкания в стали статора, ухудшение качества паек стержней и катушек обмоток статора и ротора, нарушения в работе газОВОДОМАСЛОСИСТЕМ, закупорка полостей элементарных проВодников стержней обмоток статора генераторов с водяным охлаждением, витковые замыкания в обмотках статора, нарушение изоляции подшипников генератора — турбины с протеканием тока и т. п., эффективность работы щеточно-контактного аппарата.
Электродвигатели	Витковые замыкания в обмотке статора, нарушения в работе охлаждающих устройств, некачественные контактные соединения кабелей питания.
Силовые трансформаторы и автотрансформаторы	Возникновение магнитных полей рассеяния, нарушения в работе охлаждающих систем (маслонасосов, фильтров, вентиляторов), а также оценка их эффективности, нарушение внутренней циркуляции масла в баке трансформатора (образование застойных зон) в результате шламообразования, конструктивных просчетов, разбухания или смещения изоляции обмоток в трансформаторах с большим сроком службы, витковые замыкания в обмотках встроенных трансформаторов тока, дефекты вводов и контактных соединений токоведущих частей.
Баковые, масляные и воздушные выключатели	Ухудшение состояния контактов дугогасительных устройств, внутрибаковой изоляции, контактных соединений аппаратных зажимов, вводов выключателей, витковые замыкания в обмотках встроенных трансформаторов тока.
Трансформаторы тока	Нарушение контактных соединений аппаратных зажимов первичной и вторичной обмоток, подсоединенной ошиновки и внутренних переключающих устройств, существенное ухудшение внутренней изоляции (шламообразование, смещение изоляции и др. дефекты).
Вентильные разрядники и ограничители перенапряжений	Дефекты шунтирующих сопротивлений (обрыв, отсыревание), неравномерность распределения напряжения по элементам, нарушения геометрии элементов.
Конденсаторы	Пробой секций элементов конденсаторов, неравномерность распределения напряжения по колонке элементов конденсаторов, некачественные контактные соединения элементов силовых конденсаторов и конденсаторов продольной компенсации.
Разъединители, отделители, шинные мосты	Нарушения разъемных контактных соединений, аппаратных зажимов, гибких связей, трещины в штыревых и опорно-стержневых изоляторах.
Высокочастотные заградители	Нарушения контактных соединений аппаратных зажимов.
КРУ и КРУН	Нарушения контактных соединений ошиновки вводных проходных изоляторов, болтовых соединений ошиновки КРУ (неприслонного типа) и КРУН, контактных соединений разъединителей, трансформаторов тока, выключателей, изоляции кабельных разделок (в зависимости от исполнения КРУ и КРУН).
Комплектные токопроводы	Образование короткозамкнутых контуров в экранах и металлоконструкциях, эффективность охлаждения ошиновки токопроводов.
Воздушные линии электропередачи	Дефектные контактные соединения проводов при контроле с земли.
Кабельное хозяйство электростанций	Пожароопасность кабелей по их тепловому состоянию.
Котлы	Состояние внутренней футеровки работающего котла, труб поверхностей нагрева котлов (имеющих значительные внутренние отложения, окалину, посторонние предметы) после их монтажа, реконструкции, до и после кислотной промывки.
Турбины и паропроводы	Состояние тепловой изоляции, оценка эффективности маслосистем.
Газоходы	Нарушение герметизации, присосы холодного воздуха.
Топливоподача	Очаги самовозгорания угольной пыли в бункерах и угля на складе.
Дымовые трубы	Некачественные швы бетонирования, трещины несущего ствола, коррозию и обрушения футеровки, нарушения тепловой изоляции в прослойке между стволом и футеровкой, зольные отложения и пр.
Градири, водо- и воздухоохладители, пруды-охладители	Эффективность охлаждения воды при контроле с земли.

ловизоров и камер (DVE-1000, PalmIR Pro, ThermoView™ Ti30, IR SnapShot 525, ThermoCam E2) составляет от 12 до 30 тыс. у.е., измерительные

приборы могут стоить 50-70 тыс. у.е. (ThermaCam 695, ThermoCam P60, Galileo), а стоимость специализированных моделей, например, устанавли-



ваемые на гидроплатформах летательных аппаратов, до 150 тыс. у.е.

Современные пирометры обладают большим набором сервисных функций (лазерными прицелами, автоматической фокусировкой на объект, сохранением результатов и т. д), что позволяет с успехом их использовать для решения ряда задач контроля и диагностики энергетического оборудования. Стоимость пирометров значительно ниже (порядка нескольких тысяч условных единиц).

Энергетическое оборудование и выявляемые тепловизионным контролем дефекты и нарушения. Виды энергетического оборудования и выявляемые тепловизионным контролем характерные дефекты представлены в табл. 1 [3].

В мире накоплен большой опыт применения тепловизионного контроля в энергетике. Например, опыт энергетических компаний в Швеции, которые осуществляют 100%-ный контроль подстанций, показал (до 150 тыс. узлов в год), что альтернативы тепловизионному контролю в этой области нет, так как узлы непрерывно нагреваются. В Бельгии благодаря многолетнему планомерному использованию тепловизионного контроля число отказов на электрических подстанциях сократилось с 2,32 до 0,24 %. В Норвегии все линии электропередач перед сроком истечения гарантии подлежат тепловизионному контролю.

В СССР применение теплового метода для контроля высоковольтных линий сэкономило до 600 тыс. рублей в год на регион в результате уменьшения числа аварий, отключений и недоотпуска энергии. Снижение трудозатрат на контроль 100 трансформаторов дало эффект около 10 млн рублей. В табл. 2 приведены дополнительные сведения по эффективности тепловой диагностики [2].

Статистические данные по применению тепловизионного метода. Наиболее массовым объектом контроля в электроэнергетике являются контакты открытых и закрытых распределительных устройств. По оценкам распределение дефектов по контактам составляют, %: болтовые соединения — 50, опрессованные — 5,1, сварные — 1,3, контакты разъединителей — 43, провода — 0,6.

Величины перегревов идентифицируются на трех или четырех уровнях [1].

По некоторым данным [4], распределение дефектов на контактах по типу оборудования имеет следующий вид, % общего числа дефектов: зажимы и контактные соединения — 48; подвижные контакты — 20; контакты на ВЧ-заградителях — 24; другие дефекты — 8.

По имеющимся оценкам превышение температуры дефектов (ΔT) по группам выглядит так [5]:

ΔT , °C	% общего числа дефектов
Менее 5	64
от 5 до 10	13
от 10 до 20	15
выше 20	8

Классификация дефектов по категориям ремонта в зависимости от превышения температуры приведена ниже [5]:

Категория ремонта	ΔT , °C	% общего числа дефектов
Плановый	< 14	82
Внеплановый	15...30	15
Аварийный	> 30	3

В России нормами проведения теплового контроля является РД 34.45-51.300-97 «Объем и нормы испытаний электрооборудования» РАО «ЕЭС России». Аналогичный отечественный документ ГКД 34.20.302-2002 «Нормы випробування електрообладнання» выпущен в Украине в 2002 г.

Согласно отечественным и международным стандартам приняты следующие правила для принятия решений по обслуживанию:

избыточная температура 5... 10 °C: начальная степень неисправности, которую следует держать под контролем и принимать меры по ее устранению во время ремонта, запланированного графиком;
избыточная температура 10...30 °C: развившийся дефект, принять меры по устранению при

Таблица 2. Эффективность тепловой диагностики

Тип оборудования	Технико-экономические последствия, вызванные дефектами в энергетическом оборудовании
Разнообразное электрическое оборудование	<i>Дуга, короткое замыкание, пожар</i> Ремонт пультов переключения: 10... 15 тыс. у.е. Замена: 80... 100 тыс. у.е. Потери времени: несколько недель или месяцев
Трансформаторы	<i>Дуга, короткое замыкание, пожар</i> Перемотка 50000 КВт: 10... 50, 40...70 тыс. у.е. Замена: 80... 140 тыс. у.е. Потери времени: несколько недель или месяцев
Двигатели и генераторы	<i>Дефектные подшипники приводят к разрушению железа или обмотки. Наличие дефектных щеток, разрушающих кольца или коммутаторы, что приводит к разрушению обмоток. Разрушение объектов нагрузки.</i> Перемотка: 50... 100 тыс. у.е. Замена: 100... 200 тыс. у.е. Потери времени: несколько недель или месяцев

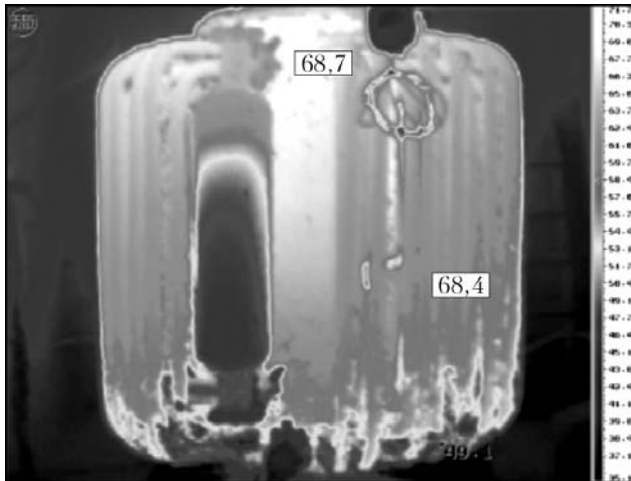


Рис. 1. Термограмма трансформатора ТМ-1200

ближайшем выводе электрооборудования из работы;

избыточная температура выше 30 °С: аварийный дефект, требует немедленного устранения.

Примечание. Избыточная температура — превышение измеренной температуры контролируемого узла над температурой аналогичных узлов других фаз, находящихся в одинаковых условиях.

Предотвращая аварийные выключения, с помощью тепловизионного контроля можно обеспечить более эффективное управление инвентарными запасами. В общем случае запасные электрические компоненты заказывают исходя из расчетных спецификаций, полученных от изготовителей. Периодический термографический контроль позволяет планировать снабжение запасными частями с большим приближением к реальным условиям возникновения и развития неисправностей в компонентах. Это позволяет заменять только действительно неисправные компоненты, тем самым сокращая затраты времени, труда и материалов.

Отечественный опыт тепловизионного контроля энергетического оборудования. В настоящее время в Украине уже существует ряд предприятий и организаций, которые проводят тепловизионный контроль и диагностику энергетического оборудования.

К таким организациям относится научно-технический центр «Термоконтроль» Национального университета радиоэлектроники (г. Харьков). В центре работают специалисты III уровня по тепловому методу (IT). В НТЦ «Термоконтроль» получен ряд приоритетных результатов в области теплового контроля. Разработанные алгоритмы позволяют расшифровать термограммы и по внешним тепловым характеристикам определить внутреннее состояние объектов контроля [6].

В период с 1998–2004 г. специалистами центра были проведены работы на ряде крупных энергетических объектов, таких как Змиевская ГРЭС, Желтоводское энергетическое предприятие, Стахановский завод ферросплавов [7, 8].

Например, на Стахановском заводе ферросплавов за три дня было обследовано все энергохозяйство предприятия, в которое входили печные трансформаторы ЭОЦНК-16000, 21000; трансфор-

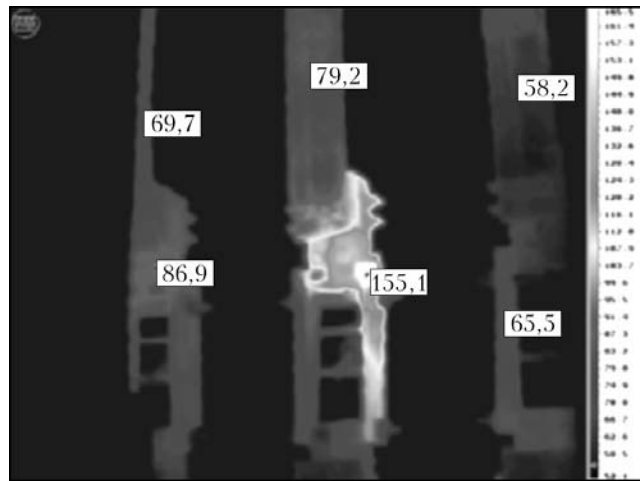


Рис. 2. Термограмма дефекта болтового соединения шинного разъединителя ВРВ 2000/10 (избыточная температура $\Delta T = 75,9$ °С)

маторы ТМ-1200, распределительные устройства ВРВ2000/10, ВМПЭ 3200/10 и др. [8]. На рис. 1 показана термограмма трансформатора ТМ-1200.

Обнаружено ряд объектов с избыточной температурой 10...30 °С, что означает развившиеся дефекты, для которых необходимо принимать меры по устранению неисправности при ближайшем выводе из работы. Например, на рис. 2 показана термограмма дефекта болтового соединения шинного разъединителя ВРВ 2000/10.

При термографическом обследовании печных трансформаторов плавильного цеха выявлено, что средняя температура корпуса трансформатора ЭОЦНК-21000, прошедшего капитальный ремонт, на 5...11 °С ниже, чем у аналогичных, работающих в том же режиме, что говорит о качестве проведенного ремонта [8].

Выводы

Тепловизионный контроль является перспективным направлением диагностики энергетического оборудования.

В настоящее время существуют развитая приборная база метода, программные методы документирования и обработки термограмм.

Существует основа нормативной базы тепловизионного контроля в энергетике.

Для более широкого применения тепловизионного метода контроля и технической диагностики энергетического оборудования необходимо проведение работ по следующим направлениям:

разработка норм тепловизионного контроля по конкретным группам отечественного энергетического оборудования, которые могут быть основой для создания технических условий, государственных и отраслевых стандартов;

разработка алгоритмов и программ расшифровки тепловых карт (термограмм) для диагностики состояния энергетического оборудования;

создание системы подготовки и аттестации операторов-термографистов.

1. Маслова В. А., Стороженко В. А. Термография в диагностике и неразрушающем контроле. — Харьков: Компания СМІТ, 2004. — 160 с.



2. *Вавилов В. П., Климов А. Г.* Тепловизоры и их применение. — М.: Интел универсал, 2002. — 88 с.
3. *Бажанов С. А.* Перспективы использования инфракрасной диагностики в энергетике // Энергетик. — № 8. — С. 8–9.
4. *Мешков С. Н., Мельник С. И., Кухарев Ю. А.* Перспективы применения теплового контроля в энергосберегающих технологиях // Вест. Харьков. нац. ун-та. — № 2. — 2000. — С. 45–46.
5. *Власов А. Б., Джура А. В.* Результаты многолетнего использования тепловизора для контроля состояния электрооборудования в Колэнерго // Электрич. станции. — 1996. — № 8. — С. 61–63.
6. *Стороженко В. А., Мешков С. Н., Криворучко В. И., Силин А. А.* Термография: мировой опыт и пути развития в Украине // Мат. Третьей Укр. науч.-техн. конф. «Неруйнівний контроль та технічна діагностика 2000». — Днепропетровск. — С. 30–34.
7. *Мешков С. Н., Мельник С. И., Ефременко В. Г.* Компьютерная обработка термографической информации для диагностики теплоэнергетического оборудования // Сб. науч. тр. по мат. 4-й Междунар. конф. «Теория и техника передачи, приема и обработки информации» («Новые информационные технологии»). — Харьков. — 1998. — С. 446–447.
8. *Стороженко В. А., Хорло Н. Ф., Мешков С. Н.* Определение эксплуатационных характеристик энергетического оборудования термографическим методом // Информ. мат. семинара-выставки «Современные технологии и приборы неразрушающего контроля и технической диагностики». — Харьков. — 2003. — С. 23–26.

Харьков. ин-т техн. электроники

Поступила в редакцию
25.05.2005



УКРАИНСКОЕ ОБЩЕСТВО НЕРАЗРУШАЮЩЕГО
КОНТРОЛЯ И ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ
НПФ «ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ»
НПФ «УЛЬТРАКОН»
УКРАИНСКИЙ ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЦЕНТР
«НАУКА.ТЕХНИКА.ТЕХНОЛОГИЯ»



**с 7 мая по 14 мая 2006 г. в г. Кемер (Турция)
проводят 4-ю Научно-практическую конференцию**

«Организация неразрушающего контроля качества продукции в промышленности»

Для участия в конференции приглашаются руководители предприятий, связанные с обеспечением качества и сертификацией выпускаемой продукции: технические директора, главные инженеры, зам. директора по качеству, главные механики, руководители подразделений неразрушающего контроля, начальники ЦЗЛ, ОТК, службы металлов и т. д., а также лица, заинтересованные в усовершенствовании функционирования системы обеспечения качества, в частности, ее составной части — неразрушающего контроля.

Цель конференции — определение наиболее эффективных путей развития служб неразрушающего контроля качества на промышленном предприятии в современных условиях. Выработанные на конференции подходы к построению служб неразрушающего контроля качества и их место в системах управления качеством позволят разработать эффективную стратегию ее развития и оптимизировать затраты на функционирование и техническое перевооружение.

Тематика конференции

- Общие вопросы неразрушающего контроля качества и сертификации продукции
- Нормативно-техническое обеспечение деятельности служб НК
- Приборное оснащение лабораторий НК
- Вопросы подготовки и аттестации специалистов, аккредитация подразделений НК

Для включения доклада в программу конференции и регистрации участников необходимо до 1 марта 2006 г. выслать тезисы доклада объемом до 1 печатной стр. и заявку по адресу:
НПФ «Диагностические приборы», 04050, г. Киев, а/я 50 или E-mail: kozin@ndt-ua.com.

Для докладчиков и сопровождающих лиц предусмотрена скидка.

По оргвопросам, касающимся проведения конференции,
обращаться к Козину Александру Николаевичу,
зам. директора НПФ «Диагностические приборы»:
тел./факс: (044) 247 67 18 или тел.: (044) 495 11 45.

Подробная информация по мере ее поступления будет размещаться
на вэб-сайте: www.ndt-ua.com