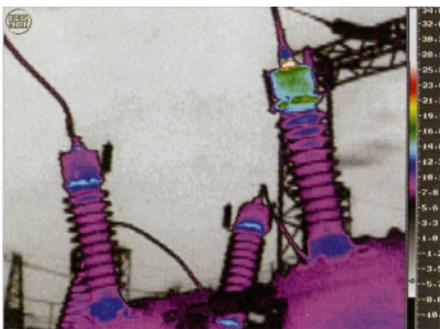


# ТЕПЛОВИЗИОННЫЙ КОНТРОЛЬ И ДИАГНОСТИКА ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

*В статье рассматриваются актуальные вопросы тепловизионного контроля и диагностики электрооборудования.*

Вопросы диагностики электрооборудования в последнее время приобретают все большую актуальность по целому ряду причин. Прежде всего за последнее десятилетие произошел резкий рост доли оборудования, отработавшего нормативный срок службы. В России доля такого оборудования уже к 2000 году превысила 50% всех установленных мощностей. Кроме того, в результате перехода к рыночным отношениям и недофинансирования в течение ряда лет в необходимых объемах проведения планово-профилактических работ снизилось качество и надежность энергоснабжения и значительно увеличилась повреждаемость электрооборудования.



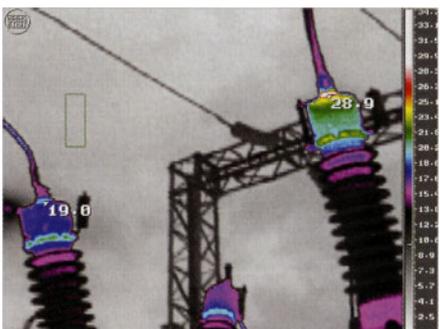
В частности, в энергосистемах России такое положение характерно для трансформаторов на подстанциях 35-750 кВ, являющихся одним из их важнейших элементов, определяющих надежность электроснабжения. По данным анализа повреждаемости силовых трансформаторов, проведенного «ОРГРЭС», из общего числа отказов трансформаторов около 60% их приходится на трансформаторы с наработкой более 12 лет, и при этом около 45% всего парка трансформаторов имеют срок службы более 20 лет. К тому же в последнее время в энергосистемах России опасными факторами стали длительные повышения напряжения и постоянный рост мощности коротких замыканий.

Постоянно действующими факторами экономики являются хроническая недостаточность средств на проведение технического обслуживания и модернизации энергооборудования и «вымывание» квалифицированных кадров служб главного энергетика.

Все это ставит проблему оценки состояния и прогнозирования работоспособности и остаточного ресурса на одно из первых мест в системе обслуживания. При этом все большее внимание уделяется разработке методов и систем диагностики, которые позволяют контролировать состояние оборудования в процессе эксплуатации.

К числу таких современных и высокоэффективных способов диагностики относится тепловизионное обследование. Оно позволяет обнаруживать дефекты на ранней стадии их развития. Весьма эффективны тепловизионные обследования по выявлению дефектов действующего электрооборудования, в том числе контактных соединений, участков перегрузки кабелей; они позволяют провести оценку теплового состояния трансформаторов различного назначения, электродвигателей, разрядников, реакторов и другого электрооборудования в процессе их эксплуатации без снятия напряжения.

Такая диагностика электрооборудования информативна и удобна. Применение тепловизионных обследований позволяет перейти к системе поддержания эксплуатационной готовности оборудования путем организации мониторинга технического состояния электрооборудования и проведения ремонта по результатам этого мониторинга.



Суть теплового (тепловизионного) метода диагностики заключается в дистанционной регистрации температурного поля на поверхности контролируемого оборудования измерительной аппаратурой, построении и анализе термограмм с использованием ПЭВМ для обнаружения и классификации дефектов и принятия решения по дальнейшей эксплуатации оборудования. Наличие дефекта при такой диагностике характеризуется аномальным изменением (как правило, повышением) температуры в дефектной зоне по сравнению с качественными областями.

В качестве средства измерения поверхностной температуры предусматривается использование тепловизора или ИК-сканера, регистрирующего ИК-излучение вдоль линии сканирования, положение которой контролируется на мониторе по видимому

изображению объекта.

Преимуществами тепловизионной диагностики электрооборудования по сравнению с другими методами неразрушающего контроля являются:

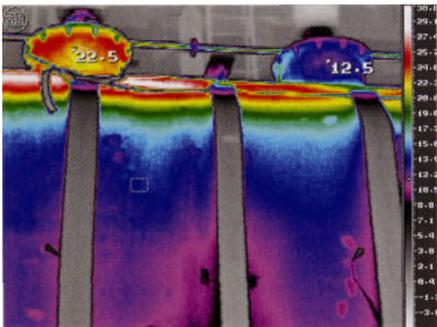
- обследование объектов в процессе эксплуатации без снятия напряжения;
- возможность классификации дефектов по степени их опасности;
- возможность объективного документирования обнаруженных дефектов.

Основными техническими требованиями к параметрам этих средств являются:

- спектральный диапазон - 2,5-5,0 или 8,0-14,0 мкм;
- погрешность измерения температуры -  $\pm 2,00^{\circ}\text{C}$ ;
- чувствительность -  $0,20^{\circ}\text{C}$ ; -диапазон измеряемых температур -  $-20^{\circ}\text{C} +150^{\circ}\text{C}$ ;
- формат изображения - не менее  $320 \times 240$  элементов для тепловизоров и не менее 100 элементов для сканеров;

- количество сохраняемых изображений - не менее 30;
- температурные условия работы -  $-15^{\circ}\text{C} +50^{\circ}\text{C}$ .

В некоторых случаях, например при обследовании контактных соединений, допустимо использование



В качестве средств, повышающих точность, надежность и достоверность измерений, рекомендуется

использовать термометр цифровой с погрешностью измерения температур не выше  $0,1^{\circ}\text{C}$ , анемометр и цифровую фотокамеру, если тепловизор или сканер не фиксирует видеоизображение. Рекомендуется использовать тепловизор с возможностью получения видеоизображения. Основным нормативным документом, в котором даются рекомендации и критерии оценки состояния электрооборудования по результатам тепловизионного обследования, являются «Объем и нормы испытаний электрооборудования» (РД 34.45-51.300-97, 6-е изд.).

В качестве критериев оценки технического состояния токоведущих соединений предусматриваются:

- превышение температуры - разность между измеренной температурой нагрева и температурой окружающего воздуха;
- избыточная температура - превышение измеренной температуры контролируемого узла над температурой аналогичных узлов, находящихся в одинаковых условиях;
- коэффициент дефектности

(Кд) — отношение измеренного превышения температуры контактного соединения к превышению температуры, измеренному на целом участке шины (провода), отстоящем от данного контактного соединения на расстоянии не менее 1 м.



Непрерывным условием расчета этих критериев являются знание токовой нагрузки  $I_{\text{раб}}$  контролируемого оборудования и значения номинального тока  $I_{\text{ном}}$ . Приведенные в нормативной документации допустимые значения превышения температуры рассчитаны для номинального тока  $I_{\text{ном}}$ , поэтому измеренное значение превышения температуры  $T_{\text{изм}}$  следует привести к номинальному току через соотношение:

$$T_{\text{ном}} = T_{\text{изм}} (I_{\text{ном}} / I_{\text{раб}})^2$$

Этим соотношением можно пользоваться при измерении превышения температуры контактов и болтовых контактных соединений (КС) при токах нагрузки  $(0,6—1,0) I_{\text{ном}}$ . При токах нагрузки  $(0,3—0,6) I_{\text{ном}}$  в качестве норматива следует использовать значение температуры  $T_{0,5}$ , пересчитанное к  $0,5 I_{\text{ном}}$ :

$$T_{0,5} = T_{\text{изм}} (0,5 I_{\text{ном}} / I_{\text{раб}})^2$$

Тепловизионные обследования электрооборудования при токах нагрузки менее  $0,3 I_{\text{ном}}$  не рекомендуется проводить, так как такая нагрузка не способствует выявлению дефектов особенно на ранней стадии их развития.

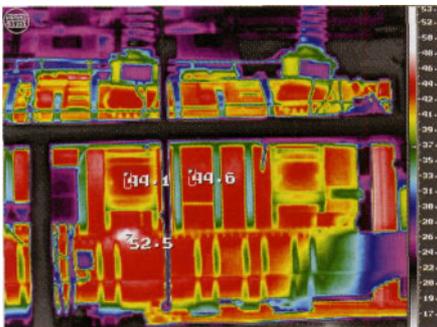
Получаемые расчетным путем значения превышения температуры  $T_{\text{ном}}$  и  $T_{0,5}$  позволяют для контактов и болтовых КС оценить степень неисправности, используя критерий называемый «избыточная температура».

Если избыточная температура находится в пределах  $5^{\circ}\text{C}—10^{\circ}\text{C}$ , то это оценивается как начальная стадия неисправности и следует принимать меры по ее устранению в ходе запланированного ремонта.

Избыточная температура в  $10^{\circ}\text{C}—30^{\circ}\text{C}$  оценивается как развившийся дефект, который следует устранять при ближайшем выводе электрооборудования из работы.

Если избыточная температура превышает  $300^{\circ}\text{C}$ , то это оценивается как аварийная ситуация, требующая немедленного устранения дефекта.

Оценку состояния сварных соединений или КС, выполненных обжатием, рекомендуется проводить также



Оценку теплового состояния силовых кабелей рекомендуется проводить по критерию «коэффициент дефектности Кд». Это позволяет установить степень неисправности.

Если  $K_d < 1,2$ , то это оценивается, как начальная степень неисправности.

Если  $K_d = 1,2—1,5$ , то это уже развившийся дефект. Как аварийная оценивается ситуация, когда  $K_d > 1,5$ .

Использование тепловизоров и сканеров позволяет провести диагностику не только таких достаточно простых узлов, как контактные соединения, но и оценивать техническое состояние таких типов оборудования, как трансформаторы, электродвигатели и т.п.

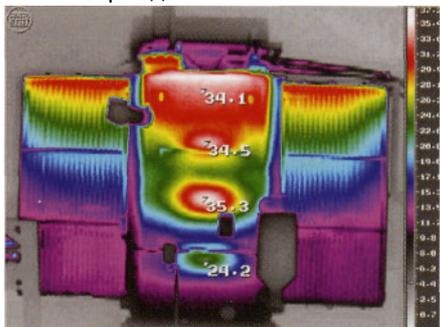
Трансформаторы входят в состав основного оборудования электрических станций, повышающих, понижающих и распределительных подстанций. Их важность в энергосистемах приводит к необходимости проведения комплексного диагностического обследования, основная цель которого - это дать объективную оценку состояния трансформаторов, выявить дефекты, разработать рекомендации по их устранению и осуществлять их дальнейшую безаварийную эксплуатацию.

Наряду с традиционными методами диагностики трансформаторов, такими, как определение уровня и места расположения источников частичных разрядов, хроматографический анализ растворенных в масле газов (ХАРГ), все большее применение получает тепловизионное обследование трансформаторов. Оно

позволяет оценить его тепловое состояние и исправность входящих в него систем и узлов.

Опыт проведения тепловизионной диагностики силовых трансформаторов показывает, что она позволяет обнаружить следующие неисправности:

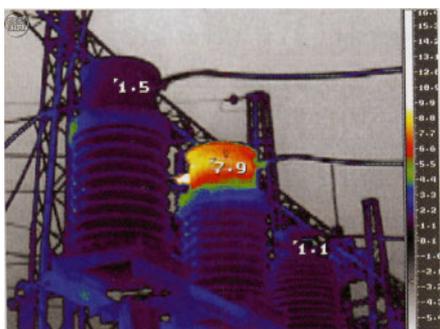
- нарушения механической изоляции обмоток, выгорание витков обмотки из-за токов короткого замыкания;
- перегревы магнитопровода из-за токов короткого замыкания; нарушения работы охлаждающих систем (маслонасосов, вентиляторов, фильтров и т.п.);
- нарушение в работе устройств регулирования напряжения под нагрузкой (РПН);
- ~ образование застойных зон масла в баке трансформатора;
- нарушения герметичности бака;
- перегревы внутренних контактных соединений обмоток низкого напряжения с выводами трансформатора;
- повреждения маслonaполненных вводов.



Анализ повреждаемости маслonaполненного оборудования, проведенный в РАО «ЕЭС России», показал, что в силовых трансформаторах и шунтирующих реакторах 87,7% нарушений приходится на три основных узла - маслonaполненные вводы, обмотки и устройства РПН, устройства регулирования напряжения без нагрузки (ПБВ). Поэтому при тепловизионном обследовании трансформаторов этим узлам следует уделить особое внимание.

При анализе результатов тепловизионного обследования необходимо учитывать конструктивное исполнение данного типа трансформатора, способ охлаждения обмоток и магнитопровода, условия и длительность эксплуатации. Это требует проведения предварительной подготовки к обследованию путем изучения паспортных и конструктивных данных трансформатора, срока и условий эксплуатации, сведений о результатах проведенных ремонтов, степени загрузки трансформатора.

Итогом тепловизионного обследования трансформатора является отчет с фиксацией обнаруженных дефектов, степени их развития, даются рекомендации по устранению дефектов и прилагаются термограммы дефектов и их привязка к видеоизображению. Это позволяет планировать работы по ремонту, опираясь не только на нормативы, но и использовать результаты тепловизионного обследования, которые отражают реальную картину технического состояния оборудования.

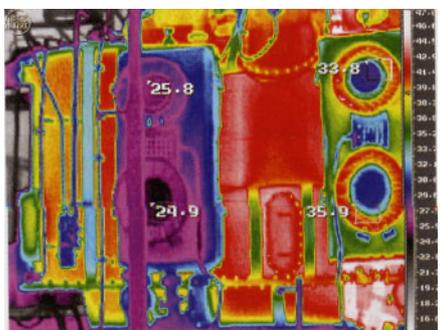


Тепловизионное обследование маслonaполненных трансформаторов тока (ТТ) позволяет оценить состояние внутренних и внешних контактных соединений. С учетом специфики работы измерительных и релейных ТТ на предварительном этапе подготовки, к обследованию следует обратить внимание на количество токов КС, протекающих по обмоткам, и их величину, а также на результаты измерения характеристик изоляции обмоток.

Необходимо производить по-фазное сравнение температур, измеренных в одинаковых зонах поверхности крышек ТТ. Разность температур не должна превышать 0,3°C. Нагрев контактов внутреннего переключающего устройства на термограмме проявляется в виде температурной аномалии на поверхности расширителя. Превышение температуры более чем на 10—15°C

свидетельствует об аварийном состоянии переключателя.

Маслonaполненные трансформаторы напряжения (ТН) серия НКФ работают в режиме насыщения, поэтому при тепловизионном обследовании это проявляется на термограмме в виде повышенной температуры на фарфоровой покрывке. Повышенный нагрев ТН может быть обусловлен потерями в стали магнитопровода из-за ее дефектов, витковыми замыканиями в обмотках или из-за увлажнения и загрязнения



При тепловизионном обследовании выключателей оценка состояния внешних контактов и КС, находящихся на воздухе, оценивается по превышению температуры по методике, описанной выше для КС. Оценку контактов дугогасительных камер рекомендуется проводить по характеру распределения температуры фаз. Сравнивая между собой измеренные температуры разных фаз, по значению избыточной температуры производят дефектацию дугогасительной камеры.

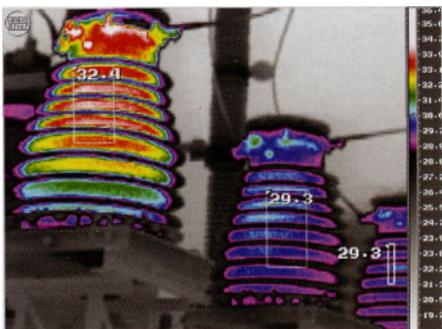
Аналогичным образом при тепловизионном обследовании оценивается тепловое состояние разъединителей и отделителей.

Объем тепловизионного обследования электродвигателей зависит от их мощности и конструктивного исполнения. Основными объектами обследования являются: корпус статора, коллектор, подшипники, коробка выводов и система охлаждения.

Аномальные зоны на корпусе статора свидетельствуют о появлении витковых замыканий в катушках обмотки или о закупорке вентиляционных каналов. Проверка коробки выводов дает информацию о состоянии КС. Температура нагрева подшипников электродвигателя не должна превышать значений, указанных в нормативной литературе или в инструкции завода-изготовителя.

Технологическим институтом энергетических обследований, диагностики и неразрушающего контроля «ВЕМО» разработана и аттестована «Методика тепловизионной неразрушающей диагностики электрооборудования».

На рисунках в качестве примера представлены термограммы результатов теплового контроля некоторых, наиболее распространенных объектов электрооборудования, на которых зафиксированы



Тепловизионное обследование является достаточно известным и перспективным методом контроля воздушных линий электропередач (ВЛ). Их надежность во многом зависит от состояния КС проводов. Дефекты сварки, опрессовки соединителей, повреждение проводов распорками, разрывы проводов и шлейфов обнаруживаются на термограммах в виде локальных зон нагрева. Степень неисправности КС воздушных линий оценивается по методике, приведенной выше.

Необходимым условием при тепловизионном обследовании является наличие токовой нагрузки ВЛ не менее 50% от номинальной. Тепловизионный метод является одним из методов при комплексном контроле состояния ВЛ, производимом обычно с использованием вертолетов. Это предъявляет более жесткие требования к характеристикам тепловизора, способу установки аппаратуры на борту, методикам тепловизионной съемки в процессе полета и к привязке координат вертолета к местности и инспектируемой ВЛ.

#### Выводы

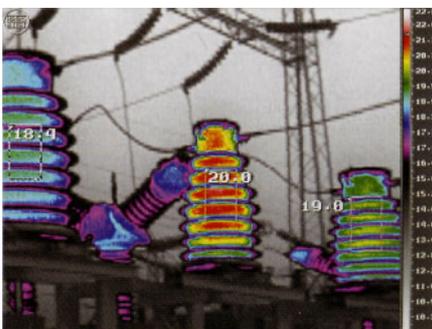
1. Тепловизионный метод имеет целый ряд неоспоримых преимуществ (дистанционность, наглядность, объективность, высокая производительность, оперативность и т.п.) по сравнению с традиционными методами диагностики электрооборудования, что делает его незаменимым при обследовании большой группы разнородных объектов электрооборудования в пределах одного предприятия.

2. Тепловизионные обследования электрооборудования проводятся в процессе его эксплуатации без отключения нагрузки, поэтому при периодическом обследовании имеется возможность оперативно обнаруживать дефекты на ранней стадии их развития.

О.Н. БУДАДИН., С.А. БАЖАНОВ,  
В. И. ЗУЕВ, О. С. КРУТОРОГОВ,  
Р.Т. ТРОИЦКИЙ-МАРКОВ,  
М.И. ЩЕРБАКОВ

#### Литература

1. Объем и нормы испытаний электрооборудования. РД 34.45-51.300-97, 6-е изд.
2. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей (ПТЭЭП), 2003.
3. Будадин О.Н., Потапов А.И., Колганов В.И., Троицкий—Марков Т.Е., Абрамова Е.В., Тепловой неразрушающий контроль изделий, ~ М.: Наука, 2002.
4. Технологический регламент по теплотехническим обследованиям, неразрушающему контролю и диагностике технического состояния тепловыделяющих объектов автоматизированным бесконтактным тепловизионным методом, ВЕМО 03.00.00.000 ДМ, 2001.
5. Методика проведения сбора и съема информации для определения теплотехнических характеристик наружных ограждающих конструкций объекта, ВЕМО 07.00.00.000 ДМ, 2003.
6. Бажанов С.А., ИК-диагностика электрооборудования распределительных устройств. Библиотечка электротехника, вып. 4(16), - М., 2000.
7. Озерницкий И.М. и др., Новые решения в тепловизионных системах диагностики промышленного оборудования, - Энергетик, 2000, №11.
8. Дикой В.П. и др., Аппаратура для диагностики линий электропередачи при облетах,- Энергетик, 2000, №2.
9. Тепловизионный контроль при организации ремонтов электротехнического оборудования по его состоянию, Электрические станции, 2000, №6.
- Ю. Методика тепловизионной неразрушающей диагностики электрооборудования (основные положения), ВЕМО



По вопросам приобретения методических материалов, измерительной аппаратуры и проведения тепловизионной диагностики можно обращаться в организации:

\* Технологический институт энергетических обследований, диагностики и неразрушающего контроля «ВЕМО», г.Москва, тел. (095)237-7288, факс (095)237-6457, E-mail: tigris@tsr.ru,

\* Зеленоградская энергосберегающая компания «ВЕМО», г. Зеленоград, тел. (095)536-4071, факс (095)944-7050, E-mail: info@zelwemo.ru,

\* «Эско-Электросталь», г. Электросталь, МО, тел. (257)700-74, факс (916)274-1778,

\* «Компьютерная термография «Иртис», г. Москва, тел./факс (095)924-2351, E-mail: info@irtis.ru.