

**А. А. Морозов** – студент кафедры электротехники и технической диагностики

**В. Д. Косулин** (канд. техн. наук, доц.) – научный руководитель

### КОМПЛЕКС ТЕПЛОВИЗИОННОЙ ДИАГНОСТИКИ ОБОРУДОВАНИЯ ТРАНСФОРМАТОРНЫХ ПОДСТАНЦИЙ

В настоящее время во многих структурах электроэнергетики наблюдается тенденция перехода от плановых ремонтов оборудования к ремонтам по фактическому состоянию оборудования. Такой подход предполагает внедрение и развитие различных методов диагностики состояния электрооборудования, одним из которых является метод тепловизионной диагностики. Эффективность тепловизионного контроля, являющегося одним из методов неразрушающего контроля за состоянием оборудования, заключается в том, что аномалии в тепловых полях энергетического оборудования носят опережающий характер по отношению к аварийному развитию аномалий в электрических процессах. В связи с этим актуальной представляется задача создания комплекса тепловизионной диагностики, позволяющего осуществлять оперативный контроль за состоянием электроэнергетического оборудования, и в частности, оборудования трансформаторных подстанций. При этом обследование оборудования возможно проводить без отключения, т.е. в рабочем состоянии [1].

Тепловизионная диагностика основана на регистрации интенсивности инфракрасного излучения (ИК), поскольку температура является универсальным «отражением» состояния оборудования. Практически любые дефекты или поломки токоведущих и связанных с ними частей электрооборудования влекут за собой изменения температуры дефектных элементов. Поэтому изменение рабочей температуры того или иного узла свидетельствует о снижении надежности соответствующих узлов, и как следствие - преждевременном выходе их из строя. Упрощенная схема термографирования оптически непрозрачного объекта показана на рис. 1.

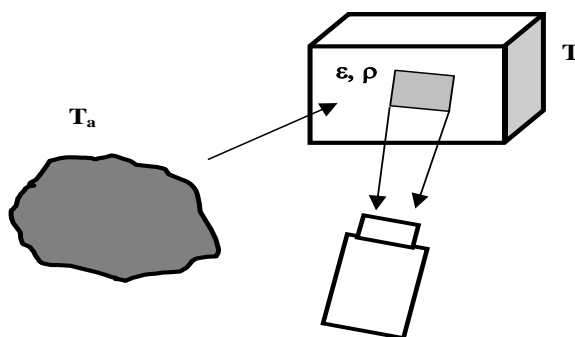


Рис.1 Схема термографирования непрозрачного объекта

Поток регистрируемого излучения  $\Phi$  складывается из потока собственного излучения  $\Phi_{\text{соб}}$  и потока  $\Phi_{\text{отр}}$  излучения окружающей среды и посторонних объектов, отраженного от поверхности объекта контроля:

$$\Phi = \Phi_{\text{соб}} + \Phi_{\text{отр}} = \Gamma_1 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varepsilon_{\lambda} R_{\lambda}^{\text{АЧТ}}(T) + \Gamma_2 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \rho_{\lambda} \varepsilon_{\lambda a} R_{\lambda}^{\text{АЧТ}}(T_a), \quad (1)$$

где  $\varepsilon_{\lambda}$  – коэффициент излучения;  $\rho_{\lambda}$  – коэффициент отражения;  $T$  – температура тела;  $R_{\lambda}^{\text{АЧТ}}$  – спектральная плотность мощности собственного теплового излучения абсолютно черного тела (АЧТ);  $\Gamma_1, \Gamma_2$  – геометрические факторы, описывающие ослабление потоков излучения от объекта контроля и окружающей среды в зависимости от геометрии эксперимента, а индекс «а» относится к окружающей среде (ambient). Без потери общности можно считать, что окружающая среда излучает как АЧТ, тогда уравнение (1) можно записать в виде

$$\Phi = \Gamma_1 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varepsilon_{\lambda} R_{\lambda}^{AQT}(T) + \Gamma_2 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} (1 - \varepsilon_{\lambda}) R_{\lambda}^{AQT}(T_a).$$

Рассмотрим связь приращений  $\Delta T$  и  $\Delta \varepsilon$ , которая вытекает из законов теплового излучения. Для серых тел из закона Стефана-Больцмана следует, что

$$\frac{\Delta T}{T} = \frac{1}{4} \frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon}.$$

Например, если на поверхности объекта контроля со средней излучательной способностью  $\varepsilon = 0.9$  имеют место локальные вариации данного параметра с амплитудой  $\Delta \varepsilon = \pm 0.02$ , что часто наблюдается на практике, то при термографировании объекта с комнатной температурой ( $T = 300 \text{ K}$ ) эквивалентные шумовые флуктуации температуры будут  $\Delta T = \pm 1.7 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , что значительно превышает объявленную паспортную чувствительность современных тепловизоров (до  $0.03 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

Обнаружение дефектов в контролируемых объектах, определение их параметров и теплотехнических характеристик самого объекта производится путем измерения температуры по контролируемой поверхности и параметров окружающей среды с последующей компьютерной обработкой изображений тепловых полей и расчетом искомых характеристик с использованием программно-аппартного комплекса, включающего: тепловизор (инфракрасный сканер), набор приборов для определения параметров окружающей среды и объекта контроля, компьютерную систему и пакет прикладных программ обработки изображений и расчета характеристик контролируемого объекта и обнаруженных дефектов.

При создании комплекса тепловизионной диагностики в качестве основной модели принят тепловизор Testo 882, который обеспечивает сохранение изображений в виде полноформатных радиометрических изображений в формате bmt. Эти изображения совместно с результатами измерений, текстовыми комментариями сохраняются на съемной компактной флэш-карте 2 гб, откуда легко осуществить передачу изображений на ПК при использовании программных средств, которые входят в комплект стандартной поставки.

Поскольку существуют элементы электрооборудования, недоступные для тепловизоров, а также для повышения точности измерения температуры целесообразно в составе комплекса тепловизионной диагностики использовать интеллектуальную систему на базе ZETsensor [2].

ZETSensor – семейство устройств с различным назначением: интеллектуальные датчики, измерительные модули и управляющие модули с различными интерфейсами, модули синхронизации и передачи данных, преобразователи интерфейсов, индикаторы.

На базе интеллектуальных устройств ZETSensor возможно построение:

- систем измерения различных параметров;
- распределенных систем;
- систем управления;
- систем мониторинга;
- автоматизированных систем.

Использование интеллектуальных датчиков очень удобно при построении распределенных измерительных сетей. Оцифровка данных с первичных преобразователей осуществляется в месте крепления датчика, что значительно снижает помехи и сокращает потери связанные с передачей данных, обеспечивая тем самым высокую точность измерений.

На базе интеллектуальных датчиков строятся распределенные измерительные сети (рис.2). Для подключения измерительной сети к системам ZETLab и ZETView используется преобразователь интерфейсов ZET 7070. Количество датчиков, подключаемых к модулю ZET 7070 при использовании внутреннего блока питания ZET 7070, не более 3; при использовании внешнего блока питания - не более 30. Программное обеспечение ZETLab поддерживает подключение до 200 датчиков к одному компьютеру. Измерительные сети также могут подключаться к любой системе, использующей протокол Modbus по интерфейсу RS-485.

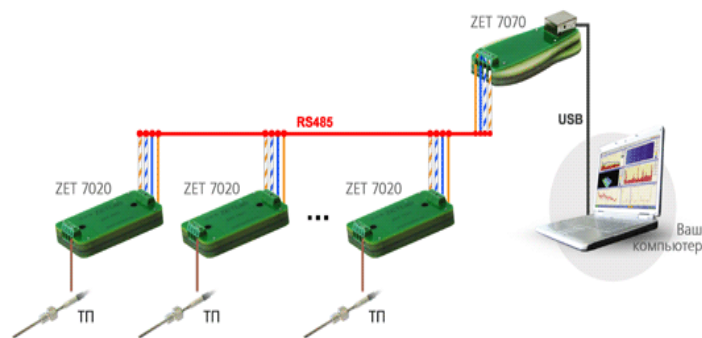


Рис. 2. Схема измерительной сети: измерение температуры с помощью термомпар и модулей ZET 7020

Комплекс тепловизионной диагностики (рис. 3) реализован на основе использования контактных и бесконтактных методов теплового контроля: тепловизора и набора датчиков температур, объединенных в единую систему измерения и регистрации. В его составе: тепловизор Testo 882 – 1, компьютер MSI Wind U180-030 – 2, преобразователь интерфейсов ZET 7070 – 3 измерительные модули ZET 7020 TermoTC-485-4, датчики температуры – 5.

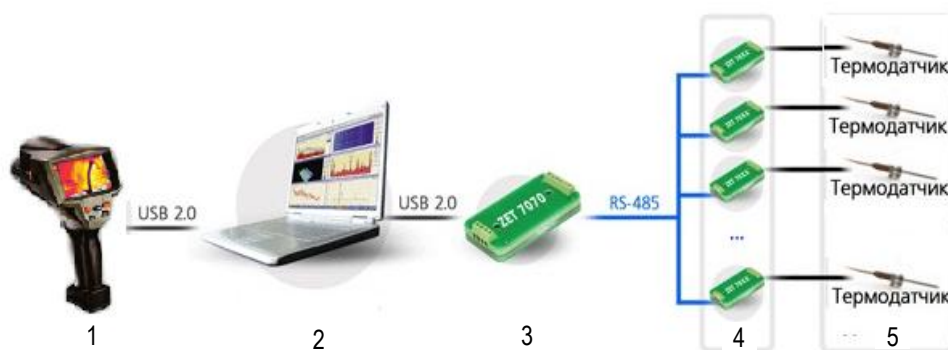


Рис.3. Состав тепловизионного комплекса:  
1 – тепловизор; 2 – компьютер; 3 – преобразователь интерфейсов;  
4 – измерительные модули; 5 – датчики температуры

Основными элементами трансформаторной подстанции, термография которых даст картину работоспособности оборудования и уровень его надежности, являются следующие [3]:

- обмотки трансформаторов;
- поверхности маслозаполненных баков;
- контактные соединения и силовые шины;
- контакты силовых отключающих аппаратов;
- изоляторы выводов силового трансформатора.

Тепловой расчет оборудования трансформаторной подстанции дает значения перегрева отдельных напряженных в температурном отношении элементов, которые являются основными ориентирами для заключения о состоянии оборудования по результатам тепловизионного контроля. Так, например, трансформатор мощностью 6300 кВА в номинальном режиме имеет превышение средней температуры масла в верхних слоях маслозаполненного бака над температурой воздуха 53°С при превышении средней температуры обмоток над температурой воздуха 63,9°С, что лежит в пределах допустимого нагрева по ГОСТ-11677-85. В случае превышения указанных величин по результатам тепловизионного исследования принимается решение либо о проведении внеочередного контроля, либо о ремонте или замене соответствующих объектов.

Результаты тепловизионного исследования представляются в виде термограмм в форме, подобной приведенной на рис. 4.

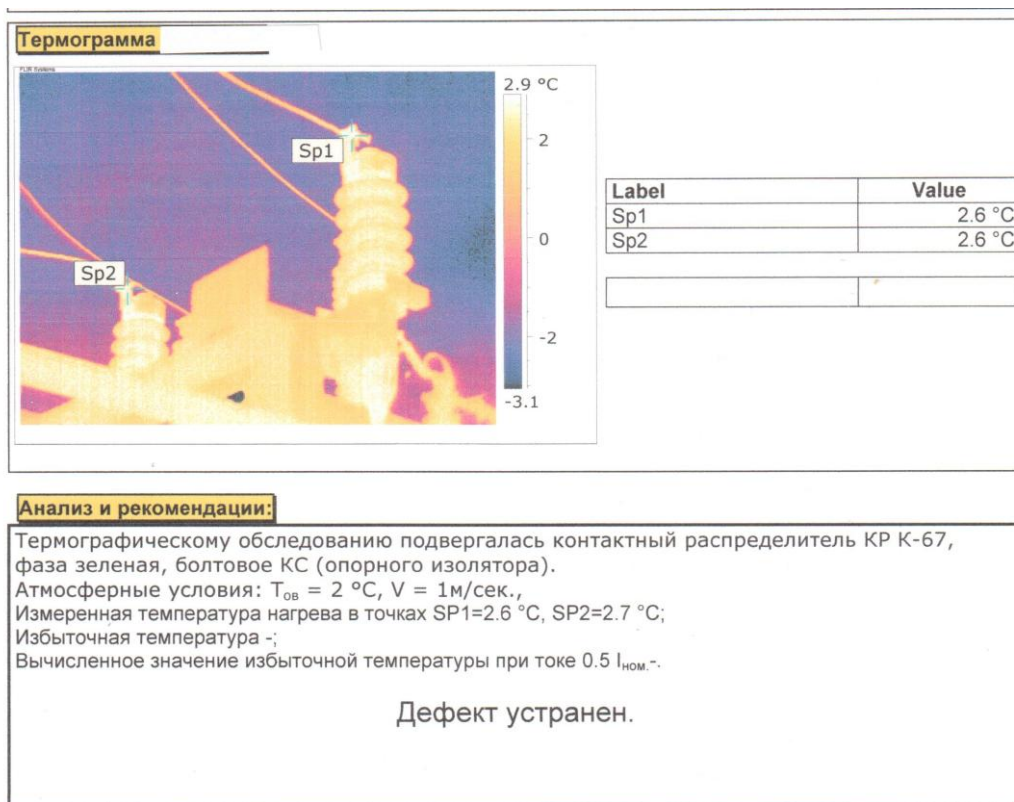


Рис.4 Заполненная форма с термограммой по результатам термографического исследования

Представленный комплекс тепловизионной диагностики является достаточно универсальным и позволяет проводить диагностику широкого спектра электро- и теплового оборудования. Так, его использование весьма эффективно при обследовании узлов электрооборудования, к которым прямой доступ без отключения невозможен.

#### Библиографический список

1. Белоусов, Ю.И. Выбор периодичности термографического обследования энергетического оборудования / Ю.И.Белоусов // Сб. науч. тр. Вып. 17 / Методы и средства оценки состояния энергетического оборудования. СПб ПЭИПК, 2002. С. 51-56.
2. <http://www.zetlab.ru>
3. Афонин, А.В. Инфракрасная термография в энергетике/ А.В.Афонин, Р.К.Нюпорт, В.С.Поляков и др.// Том 1. ПЭИПК, Академия Инфракрасной термографии (Канада) Санкт-Петербург 2000 .