

МЕТОД ОБРАБОТКИ И АНАЛИЗА ТЕРМОГРАММ И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ В ТЕХНИКЕ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ДЕЙСТВУЮЩЕГО ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ



ЗАВИДЕЙ Виктор Иванович
Д-р техн. наук, главный научный
сотрудник ВЭИ, Москва



МИЛКИН Евгений Александрович
Заместитель директора ВЭИ –
начальник отделения № 312, Москва



ЛАРИН Василий Серафимович
Д-р. техн. наук,
начальник отдела ВЭИ, Москва

Всероссийский электротехнический институт (ВЭИ) – филиал Федерального государственного унитарного предприятия «Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики им. акад. Е. И. Забабахина» (ФГУП «РФЯЦ–ВНИИТФ им. акад. Е. И. Забабахина»)

Рассмотрены особенности применения усовершенствованного метода обработки данных тепловизионного контроля для обнаружения дефектов электротехнического оборудования. Продемонстрирована практическая возможность применения метода для обнаружения дефектов мощных силовых трансформаторов и измерительных трансформаторов тока наружной установки, а также возможность диагностирования измерительных трансформаторов тока. Отмечено, что развитый метод анализа термограмм нечувствителен к внешним изменениям температуры, мощности нагрузки, что важно для практического применения при контроле широкого спектра электрического оборудования внутренней и наружной установки.

Тепловизионные методы занимают важное место в контроле электрооборудования под рабочим напряжением. В настоящее время тепловизионные методы широко применяются в области контроля наружных контактов и контактных соединений электрических машин и аппаратов. Существенным преимуществом телевизионного контроля высоковольтного оборудования в работе является возможность безопасного доступа оператора к действующему объекту, наряду с этим достоинством бесконтактные тепловизионные методы имеют и ряд недостатков, что ограничивает их использование. Многолетний опыт применения тепловизионных

методов в энергетике позволяет сформулировать ряд технических проблем, возникающих в практической деятельности при контроле электрического оборудования, а также наметить возможные пути их решения. Рассматриваемые проблемы можно разделить на несколько категорий.

Корректная оценка технического состояния сложных объектов, в частности силовых трансформаторов, шунтирующих реакторов и другого электрического оборудования, требует их отключения, применения контактных методов контроля, таких как определение сопротивления изоляции, обмоток, оценка технического состояния магнитной си-

стемы, а часто и разборка объекта, для доступа к внутренним повреждаемым элементам.

При тепловизионном контроле возникает необходимость определения уровня температур многочисленных внешних по отношению к основной конструкции объекта элементов с различным уровнем тепловыделения и, соответственно, температуры. К ним могут быть отнесены высоковольтные вводы, термосифонные фильтры, уровень температур которых связан не только с тепловыделением корпуса силового трансформатора, где доминирующими источниками тепловыделения выступают обмотки, магнитопровод, изоляция и другие тепловые источники, обусловленные протеканием тока в проводниках и изоляции обмоток, а также поглощения и рассеяния магнитного поля. Достаточно распространенным видом внутренних неисправностей являются дефекты, связанные с изменением переходных сопротивлений контактных соединений, которые также ведут к дополнительному тепловыделению и изменению температуры объектов контроля.

Особое влияние на точность измерений и возможность выявления скрытых дефектов оказывают загрязнение поверхности, ржавчина, ребра фарфоровых покрышек изоляторов, которые изменяют излучательную способность и уровень измеряемой температуры поверхности объекта контроля [1–4].

Другой тип проблем возникает при построении временных зависимостей изменения температуры объектов от мощности нагрузки и воздействия изменяющейся температуры окружающей среды и операции сопоставления температурных полей, полученных в разное время съемок при различных внешних температурных условиях.

Цель настоящей работы заключается в иллюстрации возможности практического применения усовершенствованного метода обработки и анализа тепловизионных данных для определения технического состояния электротехнического оборудования в работе или в процессе испытаний вводимого в работу оборудования после проведения ремонта и своевременного вывода его из эксплуатации до повреждения. Другой целью является иллюстрация возможности развиваемого дистанционного оперативного метода диагностики электрического оборудования, а также снижения вероятности его взрывного повреждения в процессе его осмотра обслуживающим персоналом. Отдельные подходы в развитии метода дистанционного контроля и обработки тепловизионной информации рассматривались в ряде работ [5, 6].

В основу метода и анализа температурного поля объекта положено формирование одномерной функции, являющейся сверткой термограммы по координатам. Введенная подобным образом функ-

ция, как и исходная термограмма, несет информацию о тепловом состоянии объекта контроля, наличии внутренних источников тепловыделения, характере взаимодействия объекта с окружающей средой, статистических параметрах излучаемой поверхности и представляет собой гистограмму распределения температур объекта или его фрагмента. При этом двумерный массив данных по температуре преобразуется в функцию, аргументом которой является температура, а функцией площадь или количество элементов поверхности объекта с данной температурой. Введенную подобным образом функцию будем именовать тепловым образом контролируемой поверхности объекта.

Особенность предлагаемого метода обработки и анализа термографических данных заключается в преобразовании распределения температуры по поверхности объекта в одномерную функцию и ее последующем анализе. Подобная функция позволяет определить наиболее вероятное значение температуры выделенного фрагмента объекта контроля, который сдвигается по температурной оси при изменении температуры окружающей среды и внутреннего тепловыделения, оставаясь по форме неизменной до тех пор, пока внутри объекта контроля не возникнут тепловые источники, обусловленные образовавшимися дефектами. Кроме того, введенная функция инвариантна к осевым поворотам и трансляции тепловизионной системы, что важно для задач практической диагностики, когда каждый новый подход и положение камеры по отношению к объекту отличается от предыдущего.

Более подробное описание процесса обработки термограмм приведено в работах [7, 8], где показан результат обработки термограммы однородной по температуре поверхности со случайными вариациями излучательной способности. В опытах использовалась модель абсолютно черного тела (эталонный температурный источник, применяемый для градуировки и поверки тепловизионных измерительных систем). Эталонный температурный источник позволяет задавать уровень истинной температуры его поверхности, при этом уровень неоднородности излучательной способности поверхности определяется вариациями температуры частичной радиации по полю зрения.

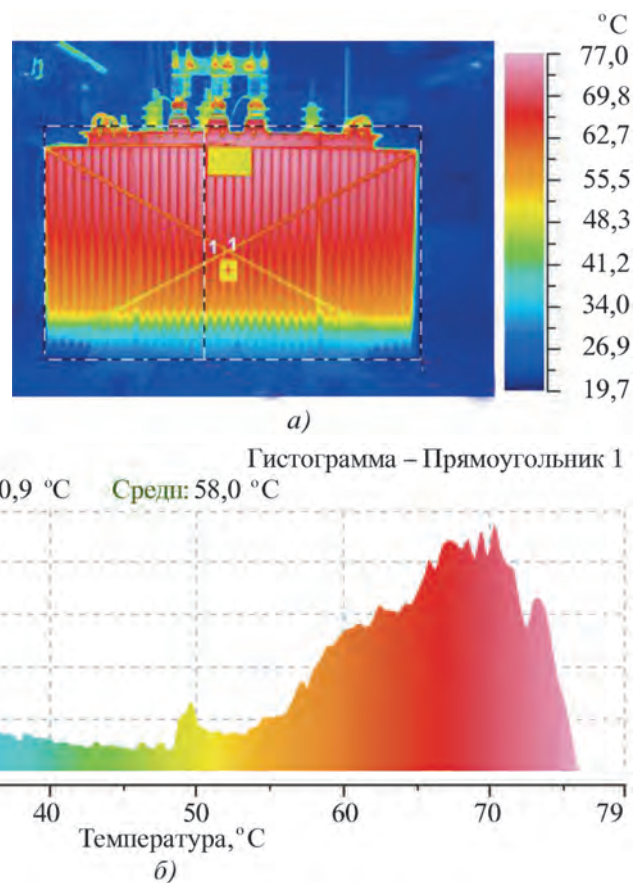
Так, например, преобразование температурного поля объекта с однородной фиксированной температурой и нормальным распределением излучательной способности по поверхности представляет собой функцию Гаусса, в которой максимум будет соответствовать наиболее вероятному значению температуры анализируемой поверхности. Для сложных объектов с изменяющейся по поверхности температурой элементарные функции суммируются, а термограмма объекта или выделенного

его фрагмента пре-
вращается в тепло-
вой образ поверхно-
сти объекта. Полу-
ченная в результате
преобразований
функция обладает
рядом положитель-
ных свойств при
проведении тепло-
вого анализа слож-
ного объекта в экс-
плуатации. Установ-
лено, что изменение
внешней окружаю-
щей температуры
приводит к смеще-
нию функции по
температуре в на-
правлении измене-
ния внешней по от-
ношению к объекту
температуры, при
этом вид функции
остаётся неизмен-
ным.

Появление внут-
ри объекта контроля
дополнительного
источника тепловыделения изменяет вид исходной
функции. Для количественной оценки тепловых
изменений или степени развития дефекта исполь-
зуется метод расчета коэффициента парной корреля-
ции двух функций. Иначе говоря, сопоставляют-
ся функции преобразованных в образы термограмм
поверхности разнесенных во времени измерений.
Эти особенности делают предложенный метод об-
работки и анализа данных тепловизионного кон-
троля исключительно привлекательным в практике
оперативного контроля объекта и оценки возмож-
ного изменения его технического состояния.
То есть данные предыдущих измерений являются
эталоном сравнения, в которых учтено влияние
изменений условий нагрузки и окружающей среды.
Подобный подход позволяет в режиме реального
времени оценить развивающийся дефект, степень
его опасности и в значительной степени обезопа-
сить обслуживающий персонал, занятый работами
на данном действующем оборудовании. Для боль-
шей ясности описания предложенного метода рас-
смотрим влияние внешних температурных усло-
вий, а также изменений нагрузки при обнаружении
потенциальных тепловых дефектов.

В опытах использовались новые силовые транс-
форматоры типа ТМГТ-1600/10, ТМБГ-1000/10,
ТМГ-1250/10 при проведении их тепловых и прие-

Рис. 1. Термограмма силового трансформатора ТМГТ-1600-10/0,4 в процессе тепловых испытаний (а) и преобразованный фрагмент по выделенной пунктиром области поверхности трансформатора из термограммы в гистограмму температурного распределения (б)



мо-сдаточных испытаний на заводе-изготовителе. В измерениях применялись распространенные тепловизионные системы зарубежных компаний NEC (Японии) и FLIR (США).

Термограмма боковой поверхности силового трансформатора ТМГТ-1600/10, полученная в процессе его тепловых испытаний, показана на рис. 1, а, а результат преобразования термограммы выделенной пунктиром области трансформатора в ее гистограмму (образ) – на рис. 1, б. На рисунке видно, что в выделенную пунктиром область (см. рис. 1, а) частично попадают фрагменты элементов помещения с температурой ≈ 20 °C, в котором размещен трансформатор. На преобразованной термограмме (гистограмме) эти изменения температуры отражены функцией в интервале от ≈ 21 до 26 °C (см. рис. 1, б).

Нижняя часть бака трансформатора, в которой отсутствуют источники тепловыделения, занимает температурный интервал от 26 до ≈ 48 °C, а зона размещения основания, на котором размещена активная часть трансформатора, находит свое отражение на гистограмме локальным экстремумом при температуре ≈ 50 °C. Температура верхних слоев масла достигает 76 °C, а область глобально-го максимума приходится на температурный интервал 67–71 °C. Как видно из рис. 1, термограм-

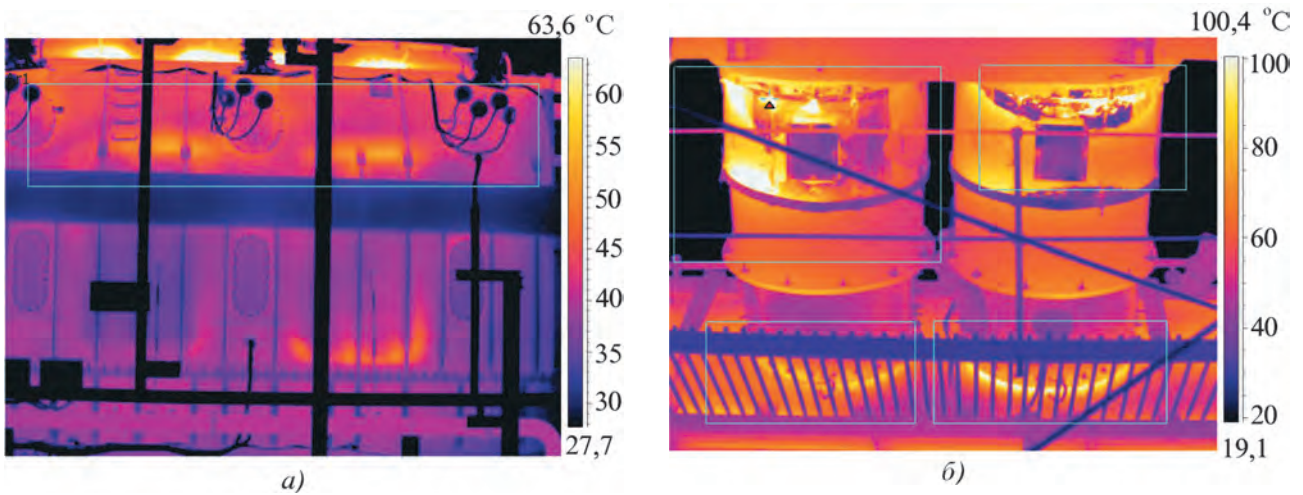


Рис. 2. Термограммы поверхности силового трансформатора с экранирующими элементами (а) и значительными температурными неоднородностями (б)

ма и преобразованная в гистограмму термограмма функционально связаны друг с другом и представляют собой некий тепловой образ термограммы.

На практике действующее оборудование может быть окружено другими элементами, частично экранирующими объект контроля (рис. 2).

Это могут быть трубопроводы системы охлаждения силового трансформатора с горячим или холодным теплоносителем (вода, масло), экранированные токопроводы или поддерживающие металлоконструкции с температурой, близкой к температуре окружающей среды. Подобные объекты влияют на результаты обработки термограмм и преобразование их в гистограммы – образы, и их следует исключать тем или иным образом из поля зрения измерительной системы. Для этого в электронном формате термограммы выбираются и вы-

деляются фрагменты поверхности объекта в виде прямоугольников. В дальнейшем при анализе тепловых условий функционирования объекта контроля проводят преобразование этих фрагментов термограмм и сопоставление наиболее вероятных значений температуры по выделенным областям во времени.

Экспертную оценку теплового состояния объекта можно выполнить по сопоставлению наиболее вероятных значений уровней температур его фрагментов, однако наиболее оперативный и качественный результат можно получить, проводя сравнение степени схожести образов термограмм, используя метод вычисления функции взаимной корреляции или в упрощенном виде коэффициента парной корреляции между ними. Фактически коэффициент парной корреляции дает численное представление о степени подобия тепловых обра-

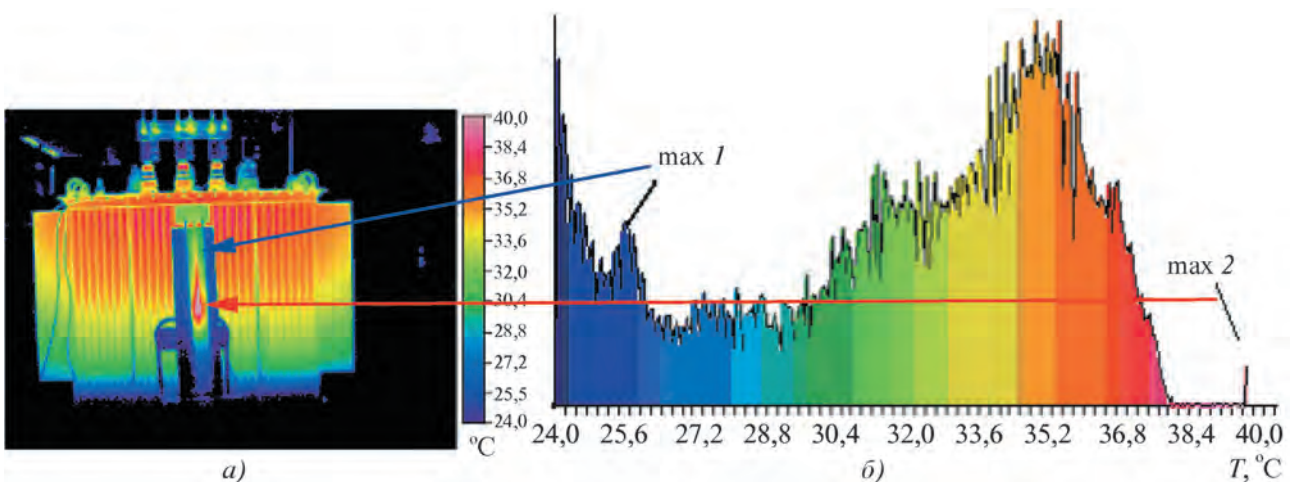


Рис. 3. Термограмма поверхности трансформатора с искусственным тепловым дефектом ~ 39 °C (а) и его тепловой образ (б)

зов термограмм, по которым можно судить о наличии и степени развития дефекта или о техническом состоянии объекта контроля.

Для проведения корреляционного анализа термограмм трансформатора в процессе тепловых испытаний использовали гистограммы температурных распределений, полученные из термограмм при разных режимах нагрузки. Значительное количество экспериментов показало, что характер и форма образа термограммы зависят в основном от появления тепловых аномалий в объекте контроля.

В том случае когда в интервале времени между контрольными операциями в исследуемом объекте не появляются новые дефекты, значение коэффициента парной корреляции будет близко к единице, а если тепловые образы объекта в тождественных условиях полностью различны, значение коэффициента парной корреляции будет существенно меньше единицы. Изменение внешних тепловых условий приводит к сдвигу образа термограммы по температурной оси при сохранении ее формы. Для объектов с неоднородной температурой образ термограммы будет представлять собой суперпозицию элементарных преобразований поверхности объекта, разбитого на небольшие участки, в пределах которых температура может считаться постоянной. Результирующая функция преобразования для неоднородных по температуре поверхности объектов может иметь достаточно сложный вид.

На рис. 3 приведены термограмма и ее образ, соответствующие силовому трансформатору с неизменным внутренним тепловыделением и искусственным искажением температурного поля бака трансформатора. При искусственном искажении (моделировании дефекта) температурного поля бака трансформатора со средней температурой $\sim 25,6$ °С, экраном и локальным участком поверхности с температурой ~ 40 °С (см. рис. 3) получим образ термограммы трансформатора с экстремумами при $25,6$ °С и вблизи 40 °С. Участок образа термограммы (см. рис. 3, а) в области температур $38 - 40$ °С из-за малой относительно бака трансформатора площади разрешается слабо (см. рис. 3, б), однако его можно специально выделить и привести к виду, удобному для расчета коэффициента корреляции.

Размещение на поверхности бака трансформатора температурного экрана с относительно низким по отношению к корпусу трансформатора уровнем температуры $\approx 25,6$ °С и пятна с уровнем температуры ≈ 39 °С приводит к искажению формы гистограммы и появлению экстремума при этом значении температуры. Наличие в тепловом экране участков с различным уровнем

температуры и экранировкой поверхности корпуса трансформатора со своим температурным распределением искажает форму первоначальной гистограммы. В окрестности указанных температурных интервалов появляются два экстремума, при этом происходит уменьшение амплитуды гистограммы из-за экранировки фрагмента поверхности трансформатора в интервале температур $31 - 34$ °С. В этой связи в процессе контроля теплового режима объекта следует избегать экранировки поверхности другими объектами в области контроля.

По результатам применения предложенного теплового метода контроля проведена оценка технического состояния силовых трансформаторов типа ТМБГ-1000/10, ТМГ-1250/10, ТМГ-1600/10 в процессе испытаний согласно ГОСТ и установлено, что:

- изменение температуры окружающей среды приводит к сдвигу функции образа термограммы на пропорциональный уровень по температурной оси при неизменном характере его распределения;
- значения коэффициентов парной корреляции для объектов, в которых отсутствуют тепловые аномалии, при изменении внешних температурных условий в диапазоне $20 - 70$ °С находятся в интервале $0,93 - 0,98$ (табл. 1).

Таблица 1. Значения коэффициентов парной корреляции K_1-K_3 при различных уровнях нагрузки в процентном отношении от номинальной мощности трансформатора

Параметр	Уровни нагрузки, %		
	33 и 66	66 и 100	33 и 100
Коэффициент парной корреляции	$K_1 = 0,98$	$K_2 = 0,95$	$K_3 = 0,93$

Испытания одного из трансформаторов серии ТМБГ-1000 с измененной конструкцией системы внутреннего масляного охлаждения показали отклонения в тепловом режиме работы трансформатора и наличие заметного экстремума в тепловых образах начиная с 50 % номинальной мощности нагрузки (рис. 4). В образах термограмм этого трансформатора начиная с нагрузки ~ 40 % от номинальной мощности являлся ярко выраженный экстремум при температуре ~ 50 °С, который при увеличении нагрузки трансформатора до 100 % смешался по температуре до 72 °С (рис. 4).

Анализ термограмм (рис. 5) этого трансформатора не показал значимых неоднородностей температурного поля по поверхности при изменении мощности.

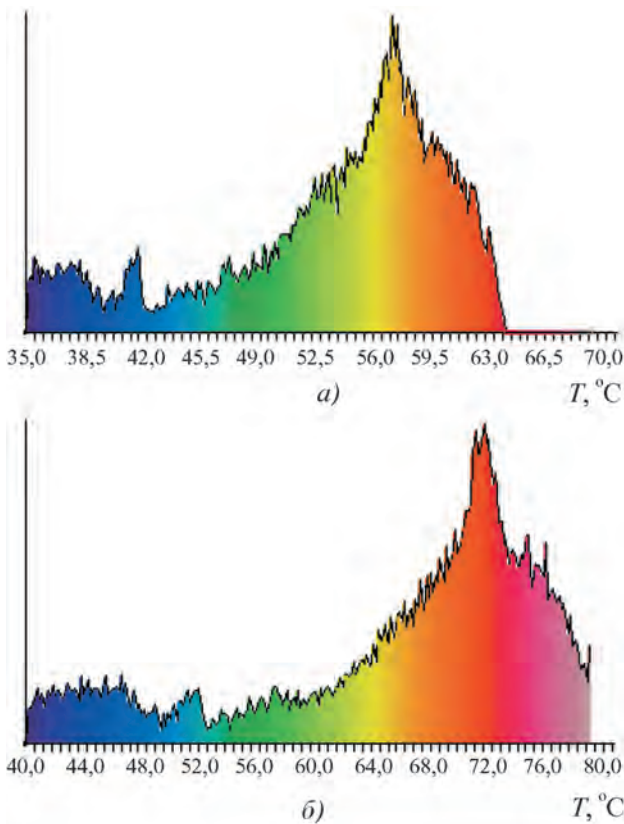


Рис. 4. Образы термограмм силового трансформатора ТМГБ-1000 при нагрузке 66 % (а) и 100 % (б) от номинальной мощности в процессе испытаний с явно выраженным экстремумом

Вместе с тем, по данным измерений сопротивления обмоток, данный трансформатор не соответствовал нормативным требованиям, что подтверждено протоколом измерений электрических параметров обмоток. Значения коэффициентов корреляции в задаваемом диапазоне мощностей нагрузки для трансформатора ТМГБ-1000/10 с признаком теплового дефекта находились в диапазоне 0,71 – 0,77 (табл. 2).

Таблица 2. Коэффициенты парной корреляции функции образов термограмм при различных значениях мощности тепловыделения в обмотках трансформатора ТМГБ-1000/10

Параметр	Уровни нагрузки, %		
	33 и 66	66 и 100	33 и 100
Коэффициент парной корреляции	$K_1 = 0,7075$	$K_2 = 0,7182$	$K_3 = 0,7654$

Анализ наблюдаемых явлений и взаимодействие с конструкторским подразделением позволили сделать вывод, что в данный трансформатор были внесены изменения в конструкцию системы

охлаждения, и это привело к ухудшению функционирования внутренней системы охлаждения масла и появлению застойных зон с ухудшенными условиями теплообмена, что и обусловило искажение температурного поля поверхности трансформатора. Следует сказать, что на термограммах этого трансформатора (см. рис. 5) каких-либо температурных аномалий не фиксировалось.

Пример, иллюстрирующий применение предложенного метода при определении технического состояния объектов с малым тепловыделением, приведен на рис. 6, где изображены термограммы и образы двух фаз трансформаторов тока типа ТФКН-220 наружной установки с естественным характером охлаждения и фарфоровой ребристой поверхностью корпуса. За эталонный объект сравнения принимали трансформатор тока с минимальной (наиболее вероятной) температурой корпуса 14,8 °С.

В сравнении с образцом сравнения (рис. 6, а) максимум функции распределения контролируемого трансформатора тока (рис. 6, б) несколько смещен в область высоких температур 15,4 °С и ис-

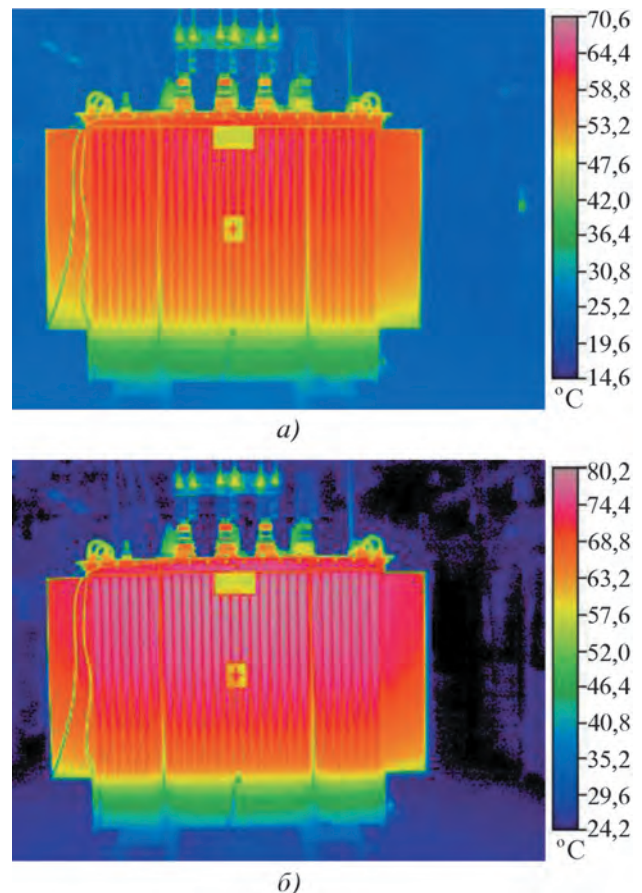


Рис. 5. Температурное поле по поверхности бака при нагрузке 66% (а) и 100% (б) от номинальной мощности

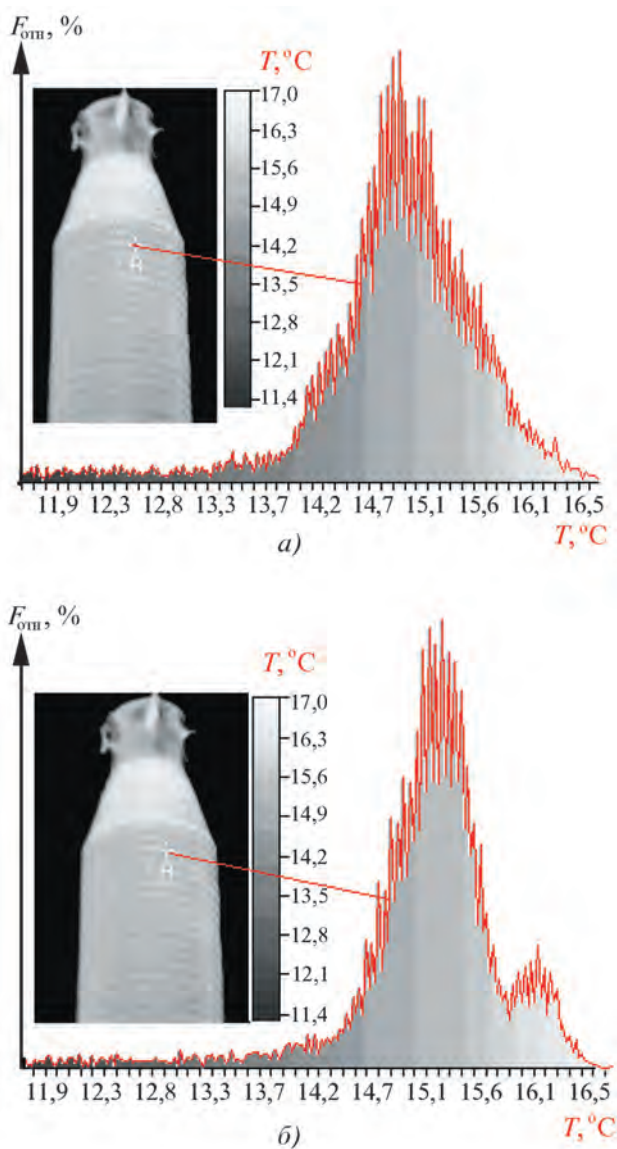


Рис. 6. Термограмма трансформатора тока, принятого за образец сравнения, и его тепловой образ (а) и термограмма дефектного аппарата и его тепловой образ (б)

кажен. В области температур 16,0 – 16,5 °С наблюдается вторичный максимум, связанный с дополнительным источником внутреннего тепловыделения в анализируемом трансформаторе тока.

Расчеты коэффициента дефектности по уровню тепловыделения показывают, что имеет место более чем двукратное повышение тангенса диэлектрических потерь изоляции в сравнении с объектом, принятым за эталон, что и привело к повышенному нагреву изоляции и корпуса трансформатора тока. По данному критерию контролируемый трансформатор тока следует вывести из эксплуатации из-за повышенного риска возможного взрывного повреждения.

Отметим, что анализ образов термограмм весьма эффективен для измерительных трансформаторов тока и напряжения различного конструктивного исполнения, ограничителей перенапряжений, проходных изоляторов и другого оборудования наружной установки. Эти объекты имеют простую цилиндрическую геометрию, их поверхность доступна для оптических наблюдений и безопасна из-за удаленности оператора от потенциально опасного в работе объекта контроля. Кроме того, описанный метод анализа термограмм дает результат оценки технического состояния объекта в процессе выполнения контрольной операции.

Важное применение рассматриваемый метод контроля технического состояния электрических аппаратов будет иметь для обнаружения и контроля дефектов в аппаратах комплектных распределительных устройств (КРУ), системы питания собственных нужд атомных электростанций и других ответственных энергетических объектов. Данный метод контроля прошел экспериментальную проверку, получен патент на изобретение [9].

Описанный метод обработки тепловизионной информации может быть использован на любом энергетическом оборудовании в работе и при решении других задач, связанных с контролем и анализом температурных полей.

Заключение

1. Предложен метод обработки и анализа данных термографических измерений электрических аппаратов, позволяющий проводить сопоставление тепловых условий в работе и по совокупности измеряемых характеристик принимать обоснованные технические решения о необходимости своевременного проведения ремонта.
2. При анализе образов термограмм было выявлено, что возникновение аномалий, явно не видимых на термограмме, приводит к изменению формы ее образа, появлению дополнительных экстремумов. Степень отклонения полученного образа от эталонного по значению коэффициента парной корреляции характеризует меру развития дефекта.
3. Изучена возможность применения предложенного метода обработки термографических данных по определению наиболее вероятных значений температуры поверхности объекта или его фрагментов, когда объект контроля частично экранирован или имеет ярко выраженные неоднородные излучательные характеристики.
4. Предложенный метод рекомендуется использовать при контроле трансформаторов и другого оборудования в процессе эксплуатации без снятия напряжения. Помимо этого, метод контроля дает информацию персоналу о возможности без-

опасного выполнения работ, требующих непосредственного контакта с действующим оборудованием.

Библиографический список

1. Распоряжение Правительства РФ от 03.04.2013 № 511-р (ред. от 29.11.2017) «Об утверждении Стратегии развития электросетевого комплекса Российской Федерации». М.: Кодекс, 2017.
2. РД 153-34.0-20.363-99. Основные положения методики инфракрасной диагностики электрооборудования и ВЛ. М.: РАО «ЕЭС РФ», 1999.
3. РД 34.45-51.300-97. Объем и нормы испытаний электрооборудования. Утв. РАО ЕЭС России 08.05.1997. М.: ЭНАС, 2003.
4. Завидей В.И., Крупенин Н.В., Вихров М.А., Голубев А.В. Электронно-оптическое оборудование при контроле технического состояния элементов сетей и подстанций на рабочем напряжении // Сб. науч. тр. к 85-летию ВЭИ / под ред. В.Д. Ковалева. М.: ВЭИ, 2006. С. 59–64.
5. Аксенов Ю.П., Голубев А.В., Завидей В.И. Новые подходы к контролю технического состояния трансформаторов тока типа ТФРМ на рабочем напряжении // Энергетик. 2004. № 3, 4.
6. Завидей В.И., Вихров М.А., Крупенин Н.В., Голубев А.В. Ранняя диагностика энергообъектов, новейшие технологии и приборы // Энергетика и промышленность России. 2006. № 2. С. 23.
7. Завидей В.И., Крупенин Н.В., Ваньков С.М. и др. Критерий Колмогорова–Смирнова и возможности его применения в диагностике электрооборудования методами ИК-термографии // Вестник РАЭН. 2012. № 2.
8. Завидей В.И. Основы оптической радиометрии энергетических установок и процессов. М.: Изд-во РФЯЦ – ВНИИТФ, 2020. 222 с.
9. Пат. RU 2788327 C1. МПК G01R 31/00. Способ контроля технического состояния элементов распределительных устройств в эксплуатации / В.И. Завидей, Е.А. Милкин. Опубл. 17.01.2023.



КОНСТАНТА

Константа ФБ

Прибор для измерения блеска
и коэффициента яркости

Госреестр СИ РФ № 86095-22

