

## МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ТЕПЛОВИЗИОННЫХ ОБСЛЕДОВАНИЙ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

О. АЛЬ-АОМАРИ, Ю.В. ВАНЬКОВ, Е.Е. КОСТЫЛЕВА, Р.Н. ВАЛИЕВ

Казанский государственный энергетический университет

*В работе исследуются термограммы высоковольтного энергетического оборудования. Для ухода от субъективности при анализе термограмм, во время проведения тепловизионных исследований силового оборудования объектов энергетики, предложено использовать термографические информационные функции. Метод анализа реализован средствами математической среды MathCad. В качестве критерия оценки технического состояния силового оборудования используется коэффициент дефектности.*

*Ключевые слова: термограмма, матрица температуры, методика анализа, неразрушающий контроль, коэффициент дефектности.*

Современные тенденции в развитии промышленности и производства диктуют необходимость высоких требований к надежности оборудования. В России более 40 % силового оборудования, эксплуатируемого на объектах энергетики, выработали свой ресурс. Только слаженная и взаимоувязанная работа всех элементов единого энергетического комплекса обеспечивает безопасность работы энергетических объектов [1]. В связи с этим все более актуальными становятся вопросы, связанные с надежностью работы силовых энергетических объектов (Федеральный закон от 21.07.1997 N 116-ФЗ (ред. от 13.07.2015) "О промышленной безопасности опасных производственных объектов") [2,3]. Необходимый уровень эксплуатационной надежности силового оборудования можно поддерживать, применяя методы и средства неразрушающего контроля [4].

На сегодняшний день одним из перспективных направлений развития высокоэффективной системы технической диагностики в энергетике является внедрение приборов инфракрасной техники. Своевременное проведение тепловизионного обследования силового энергетического оборудования позволяет на ранних стадиях выявить возникающие в нем дефекты, прогнозировать их развитие [5,6]. Однако существует проблема, когда на анализ результатов тепловизионного обследования оборудования влияют субъективные факторы [7].

Все элементы работающего энергетического оборудования имеют определенную температуру. Элементы оборудования, имеющие дефекты, отличаются по температуре от нормально функционирующих элементов. Тепловизионное исследование позволяет видеть тепловое излучение и получать тепловое изображение (термограмму) объекта, где определенному значению температуры соответствует определенный цвет.

Для ухода от субъективности при анализе термограмм, полученных во время проведения тепловизионного исследования различных силовых объектов энергетики, предложено разработать методику компьютерного анализа термограмм. Предложено использовать методику анализа термографических информационных функций (ТИФ).

Анализ термограмм ведется в математической среде *MathCAD*. Средствами *MathCAD* рисунок превращается в матрицу [8], состоящую из чисел от 0 до 255. Числу 0 соответствует пиксель с минимальной, а числу 255 – с максимальной яркостью.

Поскольку на термограмме видно распределение температурного поля исследуемого объекта, то было установлено соответствие между значениями полученной матрицы и температуры в соответствующей точке исследуемого объекта. То есть, выполнено преобразование матрицы яркости термограммы со значениями от 0 до 255 в матрицу распределения температур по поверхности объекта со значениями от  $t_{\min}$  до  $t_{\max}$ .

Анализу были подвергнуты три термограммы одного объекта (рис.1), полученные в разное время проведения регламентных работ.

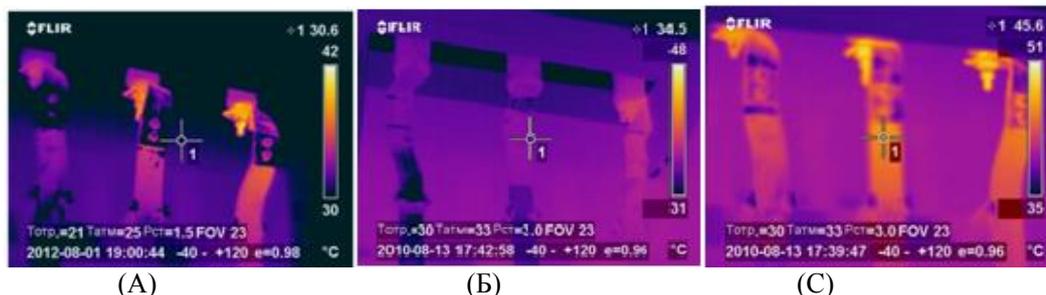


Рис. 1. Термограммы объекта: (А) – первая; (Б) - вторая; (С) – третья

Документ обработки первой термограммы (А) в программном продукте *MathCAD* представлен ниже.

ORIGIN = 1 – устанавливаем отсчет индексов от 1 (по умолчанию от 0) A = READGB (Рис.1(А)) – чтение цветного изображения из файла.

Получаем матрицу A:

$$m = \text{rows}(A) = 356 \text{ число строк матрицы } A$$

$$n = \text{cols}(A) = 1728 \text{ число столбцов матрицы } A$$

$$A_{\min} = \min(A) = 0 \quad A_{\max} = \max(A) = 255$$

$$N1 = A_{\max} - A_{\min} + 1 = 256$$

Преобразование матрицы яркости (со значениями от 0 до 255) в матрицу температур (со значениями от  $t_{\min}$  до  $t_{\max}$ ):

$$t1_{\max} = 42, \quad t1_{\min} = 30, \quad h1 = \frac{t1_{\max} - t1_{\min}}{N1} = 0.047 \text{ K1} = 1..N1+1$$

$$t1_{k1} = t1_{\min} + h1 \cdot (k1 - 1)$$

$$i = 1..N1 + 1, \quad x_i = i - 1$$

$$At(m, n, M) = \text{for } i \in 1..m$$

$$\text{for } j \in 1..n$$

$$\text{for } k \in 1..N1+1$$

$$s \leftarrow k-1$$

$$A1_{ij} \leftarrow t1_k \text{ if } M_{ij} = s.$$

Статистическая обработка матриц температуры дала возможность получить функцию распределения температуры (ТИФ) [9].

Определяем оптимальное число интервалов изменения температуры:  $N = \text{round}(1 + 3,323 \cdot \ln(m \cdot n)) = 45$ .

$$nA_{\text{red}} = \frac{\text{hist}(x, A_{\text{red}})}{m \cdot n} \text{ – относительная частота значений } x \text{ в матрицы } A_{\text{red}}$$

(рис. 2).

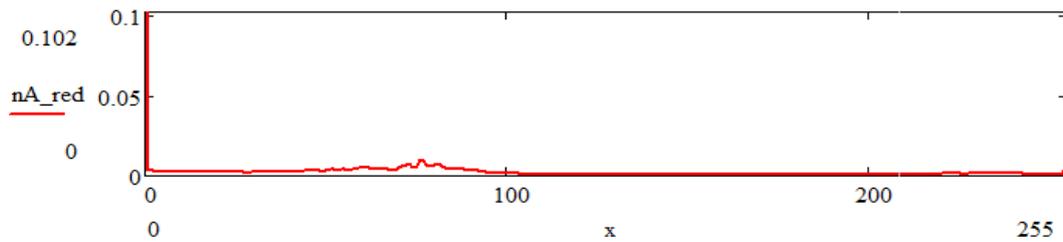


Рис. 2. ТИФ красного цвета

$nA\_green = \frac{\text{hist}(x, A\_green)}{m.n}$  - относительная частота значений  $x$  в матрицы  $A\_green$  (рис. 3).

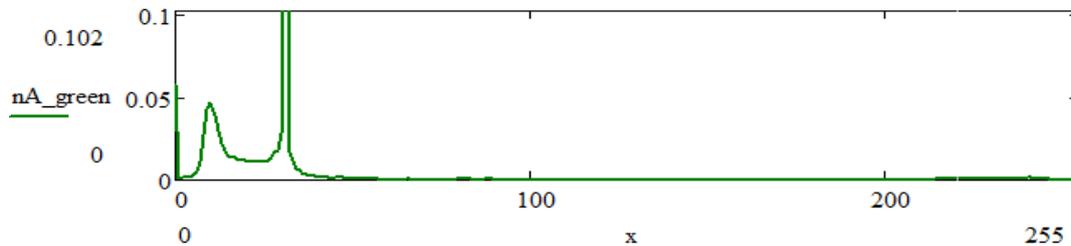


Рис. 3. ТИФ зеленого цвета

$nA\_blue = \frac{\text{hist}(x, A\_blue)}{m.n}$  - относительная частота значений  $x$  в матрице  $A\_blue$  (рис. 4).

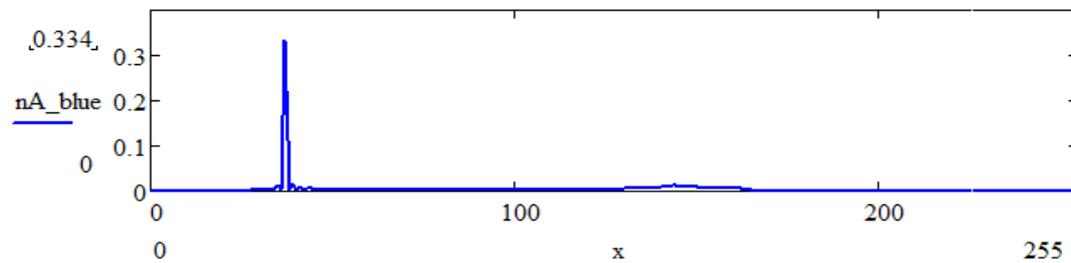


Рис. 4. ТИФ синего цвета

$nA\_ob = \frac{\text{hist}(x, A)}{m.n}$  - относительная частота значений  $x$  в матрице  $A$  (рис. 5).

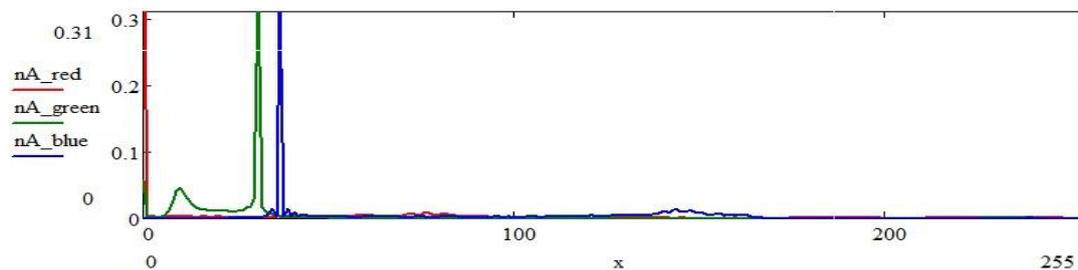


Рис. 5. Общая ТИФ обследуемого объекта (термограмма А)

Следующие две термограммы обработаны по этой же схеме. Результаты обработки представлены на рис. 6 и 7.

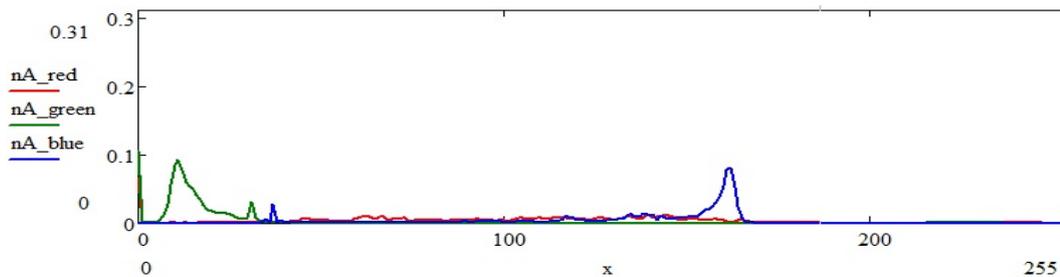


Рис. 6. Общая ТИФ обследуемого объекта (термограмма В)

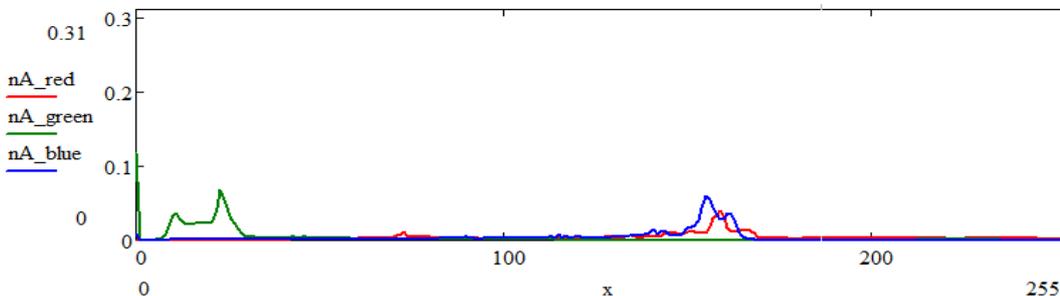


Рис. 7. Общая ТИФ обследуемого объекта (термограмма С)

На графиках показано распределение относительной частоты регистрации различных температур на термограмме исследуемого объекта.

При недостатке статистических данных за «эталонную» ТИФ принимается ТИФ объекта с минимальным тепловыделением из нескольких (не менее двух) объектов в тождественных условиях.

В качестве иллюстрации на рис. 8 показано смещение графиков ТИФ трех теплограмм в сторону более высокой температуры. Оценка степени развитости локального дефекта производится в соответствии с табл.1

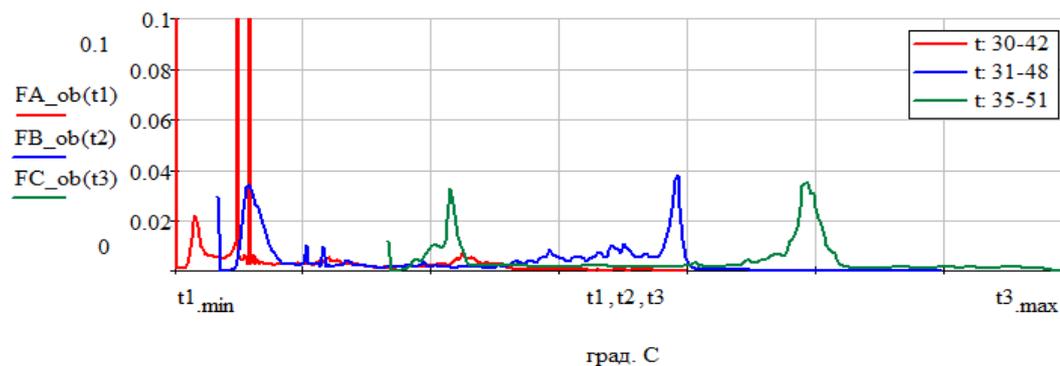


Рис. 8. Смещение графиков ТИФ трех теплограмм

Таблица 1

Оценка технического состояния объекта

Оценка технического состояния	Норма	Норма с отклонениями	Норма со значительными отклонениями	Ухудшенное	Предаварийное
$K_{дис}$	До 1,2	1,2-1,4	1,4-1,6	1,6-2	Более 2

В качестве критерия для оценки мощности диссипационных явлений в энергетическом оборудовании используем коэффициент дефектности [10], определяемый соотношением

$$K_{\text{дис}} = \frac{P_2 - P_1}{P_1}, \quad (1)$$

где  $P_i$  – уровни мощности диссипации.

Вычислялась мощность диссипации для каждого цвета всех трех теплограмм по соотношению:

$$P_1 = \int_{t_1}^{t_2} F_1(t).tdt; \quad P_2 = \int_{t_1}^{t_2} F_2(t).tdt.$$

В среде *MathCAD* этот расчет выглядит так:

вычисление коэффициентов дефектности - Красный цвет:

$$P1 = \int_{t_{1\min}}^{t_{1\max}} FA\_red(t).tdt = 1,126$$

$$P2 = \int_{t_{2\min}}^{t_{2\max}} FA\_red(t).tdt = 2,442$$

$$P3 = \int_{t_{3\min}}^{t_{3\max}} FA\_red(t).tdt = 2,836$$

$$K12\_red = \frac{P2 - P1}{P1} = 1,169, \quad K13\_red = \frac{P3 - P1}{P1} = 1,519, \quad K23\_red = \frac{P3 - P2}{P2} = 0,162.$$

Вычисление коэффициентов дефектности - Зеленый цвет:

$$P1 = \int_{t_{1\min}}^{t_{1\max}} FA\_green(t).tdt = 1,453$$

$$P2 = \int_{t_{2\min}}^{t_{2\max}} FA\_green(t).tdt = 2,092$$

$$P3 = \int_{t_{3\min}}^{t_{3\max}} FA\_green(t).tdt = 2,299$$

$$K12\_green = \frac{P2 - P1}{P1} = 0,44,$$

$$K13\_red = \frac{P3 - P1}{P1} = 0,583,$$

$$K23\_red = \frac{P3 - P2}{P2} = 0,099.$$

Вычисление коэффициентов дефектности - Синий цвет:

$$P1 = \int_{t_{1\min}}^{t_{1\max}} FA\_blue(t).tdt = 1,601$$

$$P2 = \int_{t_{2\min}}^{t_{2\max}} FA\_blue(t).tdt = 2,691$$

$$P3 = \int_{t_{3\min}}^{t_{3\max}} FA\_blue(t).tdt = 2,697$$

$$K_{12\_blue} = \frac{P_2 - P_1}{P_1} = 0,681,$$

$$K_{13\_red} = \frac{P_3 - P_1}{P_1} = 0,685,$$

$$K_{23\_red} = \frac{P_3 - P_2}{P_2} = 2,327.$$

Вычисление общего коэффициента дефектности:

$$P_1 = \int_{t_{1\min}}^{t_{1\max}} FA_{ob}(t).tdt = 1,393$$

$$P_2 = \int_{t_{2\min}}^{t_{2\max}} FA_{ob}(t).tdt = 2,408$$

$$P_3 = \int_{t_{3\min}}^{t_{3\max}} FA_{ob}(t).tdt = 2,611.$$

$$K_{12\_blue} = \frac{P_2 - P_1}{P_1} = 0,729,$$

$$K_{13\_red} = \frac{P_3 - P_1}{P_1} = 0,874,$$

$$K_{23\_red} = \frac{P_3 - P_2}{P_2} = 0,084.$$

Оценка технического состояния по тепловым условиям производится по уровню коэффициента  $K_{\text{дис}}$  в соответствии с табл. 1.

Коэффициент дефектности  $K_{13\_red}=1,532$  соответствует норме со значительными отклонениями, коэффициент дефектности  $K_{23\_red}= 2,327$  соответствует предаварийному состоянию. Все остальные коэффициенты в норме.

### Заключение

Распределение температур по поверхности объектов несет информацию следующего характера: о наличии распределенных источников тепловыделения, эффективности системы охлаждения, наличии локальных температурных аномалий, которые обусловлены скрытым дефектом термического характера.

Для ухода от субъективности при анализе термограмм, полученных во время проведения тепловизионного исследования различных силовых объектов энергетики, предложено разработать методику компьютерного анализа термограмм. Предложено использовать методику анализа термографических информационных функций. Метод анализа реализован средствами математической среды MathCad. Проведена апробация метода при анализе термограмм реальных объектов энергетики.

В качестве критерия оценки технического состояния трансформатора используется коэффициент дефектности.

### Summary

*The conducted researches allowed to reveal shortcomings of the existing techniques of thermo vision control of an assessment of a condition of transformers one of which is low extent of automation of the analysis of thermo grams.*

*Keywords: Power transformer, thermo grams, Mathcad programs, thermo graphic functions, analysis of pictures.*

### Литература

1. Аль-Аомари О.М. Результаты тепловизионного обследования силовых трансформаторов ОАО «ТАТНЕФТЬ» // Научному прогрессу – творчество молодых: материалы X международной молодежной научной конференции по естественным и

техническим дисциплинам. (Йошкар-Ола, 17-18 апреля 2015г.): в 2 ч. / редкол.: Д.В. Иванов [и др.]. Йошкар-Ола: Поволжский государственный технолгический университет, 2015. Ч.1. С.225.

2. Ванин Б.В., Львов Ю.Н., Львов М.Ю. и др. О повреждении силовых трансформаторов напряжением 110-500 кВ в эксплуатации // Электрические станции. Ежемесячный производственно-технический журнал. 2001. № 9. С.53-58.

3. Лиля В.Б., Костюков А.В. Экспертная система диагностики силовых трансформаторов // «Инженерный вестник Дона». 2013. №1. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2013/1504](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2013/1504).

4. Долин А.П., Першина Н.Ф., Смекалов В.В. Опыт проведения комплексных обследований силовых трансформаторов // Электрические станции. Ежемесячный производственно-технический журнал. 2000. №6. С. 46-52.

5. РАО ЕЭС РФ «Основные положения методики инфракрасной диагностики электрооборудования и ВЛ». РД153-34.0-20.363-99. М.: Изд-во НЦ «ЭНАС», 2004. 85 с.

6. Объем и нормы испытаний электрооборудования. РД 34.45-51.300-97. М.: Изд-во НЦ «ЭНАС», 2000. 256 с.

7. Вавилов В.П. Инфракрасная термография и тепловой контроль. М.: Изд-во Спектр, 2009. 562 с.

8. Аль-Аомари О., Ваньков Ю.В., Костылева Е.Е., Валиев Р.Н. Методика обработки термограмм силовых объектов энергетики // Инженерный вестник Дона. 2015. №3. URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2015/3261>.

9. Yuri,V,Vankov and Osamah, M, Al-aomari. Technique of Processing of Thermo grams of Power Transformers // International Journal of Engineering Science and Innovative Technology (IJESIT) Volume 4, Issue 5, September 2015. pp.134-138.

10. Козлов В.К., Гарифуллин М.Ш., Валиуллина Д.М. Перспективы использования спектральных методов при диагностике состояния маслонеполненных трансформаторов // Энергетика Татарстана. 2005. №2. С. 36–40.

*Поступила в редакцию*

*14 декабря 2015 г.*

**Осама Аль-Аомари** – аспирант кафедры «Промышленная теплоэнергетика и системы теплоснабжения» (ПТЭ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). Тел: 8(927)248-22-61. E-mail: [al\\_aomari2010@mail.ru](mailto:al_aomari2010@mail.ru).

**Ваньков Юрий Витальевич** – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Промышленная теплоэнергетика и системы теплоснабжения» (ПТЭ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). Тел: 8(903)305-62-51. E-mail: [yvankov@mail.ru](mailto:yvankov@mail.ru).

**Костылева Елена Евгеньевна** – канд. техн. наук, доцент кафедры «Промышленная теплоэнергетика и системы теплоснабжения» (ПТЭ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). Тел: 8(919)699-43-90. E-mail: [dunysha@bk.ru](mailto:dunysha@bk.ru).

**Валиев Радик Нурттинович** - канд. техн. наук, доцент кафедры «Промышленная теплоэнергетика и системы теплоснабжения» (ПТЭ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). Тел: 8(903)306-57-63. E-mail: [valievkgeu@mail.ru](mailto:valievkgeu@mail.ru).