

ТЕПЛОЙ КОНТРОЛЬ И ДИАГНОСТИКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ПЛОСКИХ НАГРЕВАТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В РЕАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ С ОЦЕНКОЙ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА

Баранов С.В., Будадин О.Н., Лебедев О.В., Слитков М.Н.

Для поддержания оптимального температурного режима функционирования электронного оборудования и комфортных условий для человека в различных климатических условиях на ряде ответственных объектов широко применяются плоские нагревательные элементы (НЭСТ). По отношению к другим устройствам аналогичного назначения они обладают рядом преимуществ: малый объем при большой теплоотдаче, простота управления, низкие напряжения эксплуатации, простота технологии изготовления (относительно низкие цены) и т.п., что и определило их широкое применение.

Изношенность оборудования производства, снижение качества сырья и другие аналогичные причины в последние годы постоянно приводят к снижению качества изготавливаемой продукции в т.ч. и НЭСТ.

Поэтому, несмотря на достаточно высокую эксплуатационную надежность, в последние годы неоднократно имели место случаи выхода из строя (в ряде случаев – с возгоранием) плоских нагревательных элементов в процессе эксплуатации в различных ответственных объектах. Это, в ряде случаев, создавало реальную угрозу безопасности как для обслуживающего персонала, так и для весьма сложного и дорогостоящего оборудования.

Таким образом, создание и применение достоверного метода контроля НЭСТ как в стадии производства, так и в реальных условиях их эксплуатации, с определением реального технического состояния и оценкой остаточного ресурса является своевременной и актуальной задачей.

Как показали исследования, основным признаком дефектности (неудовлетворительного технического состояния) плоских нагревательных элементов (нагревателей) является критическое превышение температуры любого участка поверхности заданной температуры техническими условиями. Причиной этому является, как правило, изменение электрического сопротивления, обусловленное указанными выше причинами. Поэтому целесообразно создание технологии контроля качества и технического состояния НЭСТ, основанной на анализе температурных полей поверхности.

Попытки применения теплового (тепловизионного) метода контроля, позволяли качественно определять текущее состояние теплового поля поверхности, но не решали главных задач определения реального технического состояния НЭСТ: идентификацию дефектов, вызывающих локальные изменения температурного поля поверхности, оценку остаточного ресурса контролируемого – времени функционирования НЭСТ до выхода его из строя, оперативное управление и корректировка технологических параметров производства НЭСТ.

Принципиально качественный скачок в развитии метода диагностики объектов по температурным полям произошел в последнее десятилетие. Это связано,

во-первых, с появлением современной портативной тепловизионной техники, а во-вторых, с созданием современного математического аппарата [1,2], позволяющего решать обратные задачи нестационарной теплопередачи, что дало возможность перехода от дефектоскопии (обнаружения дефектов) к дефектометрии (распознавания внутренних дефектов, определения их характеристик и оценки остаточного ресурса изделий).

Таким образом, появилась реальная возможность решения актуальных для практики задач диагностики технического состояния нагревательных элементов по анализу их температурных полей и оценки их остаточного ресурса:

- оперативный контроль технического состояния нагревательных элементов в условиях производства и в реальных условиях эксплуатации в т.ч. в условиях штатной нагрузки с оценкой их остаточного ресурса;
- определение причин нештатного функционирования нагревательных элементов в т.ч. наличие дефектных участков (участков, не соответствующих нормативным документам), разработка рекомендаций для изменения технологии производства или эксплуатации.

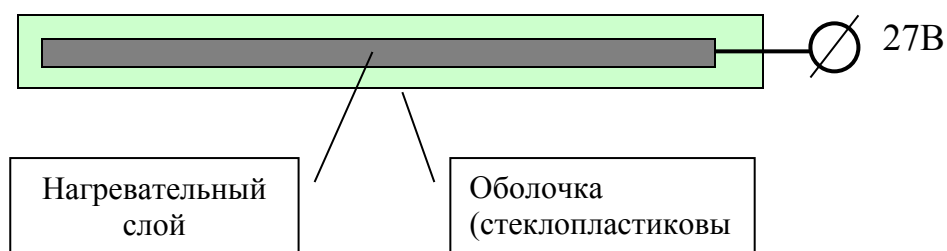


Рис. 1. Типовой эскиз НЭСТ

Стеклопластиковый тонкослойный электронагреватель (рис. 1) представляет собой получаемый прессованием трехслойный «сэндвич», внешними слоями которого являются электроизоляционные слои, а внутренним - электропроводящий слой.

Электропроводящий слой представляет собой полимерную композицию, состоящую из стеклоткани, пропитанной связующим с электропроводящими добавками, например, мелкодисперсной угольной сажой. Подвод питания к греющему слою осуществляется специальными медными токоведущими шинами. Концентрация графита, плотность, температура пропитки и т.п. определяются требованием получения необходимого электрического сопротивления R для выделения соответствующего количества энергии. Основной характеристикой, определяющей параметры температурного поля, является «плотность» и распределение по площади электрического сопротивления греющего слоя. Таким образом, можно определить дефект греющего слоя как участок с координатами контура $S(x,y)$, имеющий электрическое сопротивление R_d , отличное от номинального $R_{ном}$. На надежность НЭСТ наиболее сильно влияют дефектные участки с пониженным сопротивлением $R_d < R_{ном}$, так как на них происходит наиболее сильное выделение энергии,

$$q_{Wi} = \lim_{\Delta F \rightarrow 0} \frac{\Delta P}{\Delta S}$$

Где ΔP – плотность мощности, ΔS – элементарная площадь.

Это ведет к прогару стеклопластикового слоя, выходу НЭСТ из строя и, если не принять соответствующих мер, к возгоранию НЭСТ.

Проведенные исследования позволили сформулировать требования к тепловой дефектометрии НЭСТ и реализовать ее. Основная задача тепловой дефектометрии – идентифицировать дефекты, вызывающие температурные аномалии и определить их характеристики, для чего необходимо с минимальной погрешностью определить теплофизические характеристики объекта и коэффициенты теплоотдачи α_i , на его поверхностях. Дефектометрия, в общем случае, основана на решении обратной задачи в многослойной области, которая в общем случае сводится к минимизации функционала, где под R понимается электрическое сопротивление:

$$(R, \alpha) = \min \sum_i^{i_{max}} \left\{ T_{iv} \left[S_d(x,y) \right] - T_r(\alpha_i, R_i(x,y) \ x,y) \right\} \Bigg|$$

$$\alpha_i = \alpha_{min} \dots \alpha_{max}$$

$$R_i(x,y) = R(x,y)_{min} \dots R(x,y)_{max}$$

$T_r(x,y)$ – расчетное модельное значение температурного поля при различных $R(x,y)$ и α :

$$T_r(x,y) = T_{out}(x,y) + U^2(t_i) / (R(x,y) \cdot \alpha) \cdot S_d(x,y),$$

$T_{iv}(S_d(x,y))$ – измеренное значение температурного поля при напряжении питания $U(t_i)$,

$T_{out}(x,y)$ – температура окружающей среды,

α – коэффициент теплоотдачи.

Для повышения достоверности решения обратной задачи под многослойным объектом принимается совокупность материалов границ замкнутого объема, в котором функционирует НЭСТ, воздушной прослойки и непосредственно слой нагревательного элемента. Из общего сопротивления теплопередаче многослойного объекта вычленяется сопротивление теплопередаче НЭСТ и определяется распределение электрического сопротивления по его поверхности.

В рамках описываемого алгоритма предполагается, что температуры поверхностей задаются в последовательные моменты времени, интервал между которыми одинаков и равен некоторой величине dt . Если это условие не выполняется, то предварительно проводится интерполяция температурных историй на временную сетку $t_n = (n-1)dt$ (считается, что измерения начались в момент времени $t = 0$). Для исключения изменений температуры, характерный период которых равен $\delta\tau$ проводится быстрое Фурье-преобразование:

$$X_{(in,out)n}^{surf} = \frac{1}{N} \mathbf{e}^{\sum_{k=1}^N T_{(in,out)}^{surf}(t_k)} \exp \left\{ \frac{2i\pi (n-1)(k-1)}{N} \right\}$$

Затем зануляются все гармоники X_n с номерами:

$$n = (k+1) \dots N+1-k, \quad k = 1 + \text{round} \left\{ \frac{Ndt}{\delta\tau} \right\}$$

На конечном этапе проводится обратное Фурье преобразование:

$$\bar{T}_{(in,out)}^{surf}(t_n) = \text{Re} \left\{ \mathbf{e}^{\sum_{k=1}^N \tilde{X}_{(in,out)k}^{surf}} \exp \left\{ -\frac{2i\pi (n-1)(k-1)}{N} \right\} \right\}$$

где функция $\text{Re}(\dots)$ выделяет вещественную часть числа. Аналогично преобразуются температурные серии внутреннего и внешнего воздуха.

Далее задается некоторый набор значений теплофизических параметров слоев объекта $\{\theta_j\}$ и рассчитываются плотности тепловых потоков через внешнюю $I^{(out)}(t_n, \{\theta_j\})$ и внутреннюю $I^{(in)}(t_n, \{\theta_j\})$ поверхности способом, описанным ранее, и вводятся рассчитанные температурные серии внутреннего \tilde{T}_{in}^{air} и внешнего воздуха \tilde{T}_{out}^{air} определяемые следующими соотношениями:

$$\tilde{T}_l^a(t_i, \{\theta_j\}, \alpha^{(l)}) = T_l^{surf}(t_i) + I^{(l)}(t_i, \{\theta_j\}) / \alpha_l$$

$$\tilde{T}_r^a(t_i, \{\theta_j\}) = T_r^{surf}(t_i) - I^{(r)}(t_i, \{\theta_j\}, \alpha^{(r)}) / \alpha_r$$

При истинных значениях теплофизических характеристик слоев объекта измеренные и рассчитанные температурные серии максимально близки. Причем кривые должны быть близки также на любом подынтервале температурной серии. Степень близости кривых удобно рассчитывать в смысле нормы среднеквадратичной невязки.

Пусть вся температурная история разбита на N_i подынтервалов. Границы i -ого временного подынтервала обозначим как $\tau_i \ddot{\tau}_{i+1}$. Вводятся следующие функционалы:

$$D_i^{(l,r)}(\{\theta_j\}, \alpha_i) = \frac{\Delta t}{\tau_{i+1} - \tau_i} \mathbf{e}^{\tau_{i+1}} (\tilde{T}_{l,r}^a(t_i, \alpha_{l,r}, \{\theta_j\}) - T_{l,r}^a(t_i))^2$$

Функционалы $D_i^{(in,out)}(\{\theta_j\}, \alpha^{(in,out)})$ называются функционалами правдоподобия из-за того, что при подстановке в них истинных значений параметров $\{\theta_j\}$ их значения минимальны. Вследствие влияния шумов, минимумы различных функционалов правдоподобия могут, вообще говоря, не совпадать. При этом истинные значения параметров находятся как математическое ожидание всей выборки реализуемых минимумов.

Произведя математические преобразования запишем выражение для функционала правдоподобия (для краткости не указывается индекс i):

$$D^{(l)}(\{\theta_j\}, \alpha^{(l)}) = I_1 - 2 \frac{I_2(\{\theta_j\})}{\alpha^{(l)}} + \frac{I_3(\{\theta_j\})}{(\alpha^{(l)})^2} \quad (7)$$

$$S_1 = \frac{\Delta t}{\tau_{i+1} - \tau_i} \mathbf{e}^{\tau_{i+1}} (T_c^a(t_i) - T_m^{surf}(t_i))^2$$

$$S_2(\{\theta_j\}) = \frac{\Delta t}{\tau_{i+1} - \tau_i} \mathbf{e}^{\tau_{i+1}} (T^a(t_i) - T^{surf}(t_i)) * I(\lambda, t)$$

$$S_3(\{\theta_j\}) = \frac{\Delta t}{\tau_{i+1} - \tau_i} \mathbf{e}^{\sum_{i=1}^N} I^{(l)}(t_i, \{\theta_j\})$$

Выражение для коэффициента теплоотдачи, реализующего минимум:

$$\alpha^{(l)} = \frac{I_3(\{\theta_j\})}{I_2(\{\theta_j\})} \quad (8)$$

В результате функционал правдоподобия (1) сводится к функции, зависящей только от теплофизических характеристик слоев:

$$D^{(in)}(\{\theta_j\}) = S_1 - \frac{S_2^2(\{\theta_j\})}{S_3(\{\theta_j\})} \quad (9)$$

Рассмотрим влияние ошибок входных данных (результатов измерений и исходных данных для расчетов) на результаты решения обратной задачи. Данная проблема особенно актуальна при проведении работ в полевых условиях, где случайные погрешности измерений могут быть достаточно большими.

Решение обратной задачи в рамках описываемого алгоритма можно описать следующей формулой:

$$L_0 = L\left(\{\theta_j\}, T_{in}^{air}(\{t_n\}), T_{in}^{wall}(\{t_n\}), T_{out}^{wall}(\{t_n\}), T_{out}^{air}(\{t_n\})\right), \quad (10)$$

где $\{\theta_j\}$ -совокупность теплофизических характеристик слоев объекта, за исключением величины коэффициента теплопроводности НЭСТ; $L(\dots)$ - некоторая сложная функция.

Из (10) следует, что в величину погрешности вносят вклад ошибки 3-х типов:

- ошибки, связанные с погрешностью задания всех геометрических и теплофизических параметров слоев объекта, за исключением параметров НЭСТ,
- ошибки, связанные с шумами аппаратуры,
- ошибки, обусловленные факторами, неучтенными используемой моделью в квазиодномерном объекте.

Выражение (10) представляет собой функцию набора случайных величин, так как каждый из аргументов этой функции является измеряемой величиной, а поэтому задается с некоторой погрешностью. Согласно теории статистики, дисперсия функции (10) определяется следующим соотношением

$$\Delta^2 L_0 = \Delta_x^2 L_0 + \mathbf{e}_j \left| \frac{\partial L}{\partial \theta_j} \Delta \theta_j \right|^2 + \Delta_s^2 L_0 + \Delta_n^2 L_0 \quad (11)$$

Здесь $\Delta_x^2 L_0$ - составляющая дисперсии, связанная с влиянием не учитываемых факторов; $\Delta_s^2 L_0$ - составляющая дисперсии, связанная с систематической пог-

решностью аппаратуры; $\Delta_n^2 L_0$ - составляющая дисперсии, связанная с шумами аппаратуры.

Для расчета погрешности, связанной с аппаратурой получено явное выражение величин плотностей тепловых потоков через значения температур на поверхностях объекта:

$$I_n^{(in,out)} \in I^{(in)}(t_n) = \frac{1}{N} \mathbf{e} \sum_{k=1}^N K_{n-k}^{11} T_k^{(in)} + K_{n-k}^{12} T_k^{(out)}, \quad (12)$$

$$I_n^{(out)} = \frac{1}{N} \mathbf{e} \sum_{k=1}^N K_{n-k}^{21} T_k^{(in)} + K_{n-k}^{22} T_k^{(out)}, \quad (13)$$

где $T_k^{(in,out)}$ - температура внутренней (внешней) поверхности объекта в момент времени. Функции отклика K_{n-k}^{ij} определяются следующими соотношениями:

$$K_{n-k}^{ij} = \mathbf{e} \sum_{m=1}^N \chi_m^{ij} F_m \exp \left\{ - \frac{2\pi i(n-k)(m-1)}{N} \right\} \quad (14)$$

где функция F_m осуществляет сглаживание температурной истории.

Рассчитаем погрешность определения искомой величины с помощью функционала правдоподобия, рассчитанного для внутренней поверхности объекта на интервале температурной истории $[t_{n_1} \ddot{e} t_{n_2}]$.

При подстановке (12) и (13) в (7) получаем следующие соотношения:

$$S_1 = \bar{S}_1 + 2\Gamma \left(\xi_{in}^a - \xi_{in}^w \right) + \left(\xi_{in}^a - \xi_{in}^w \right)^2, \quad \Gamma = \frac{\mathbf{e} \sum_{n=n_1}^{n_2} \left(T_{in}^{air}(t_n) - T_{in}^{wall}(t_n) \right)}{n_2 - n_1 + 1}$$

$$S_2 = \bar{S}_2 + \Omega \left(\xi_{in}^a - \xi_{in}^w \right) + \Gamma \frac{\xi_{in}^w - \xi_{out}^w}{R} + \frac{\left(\xi_{in}^w - \xi_{out}^w \right) \left(\xi_{in}^a - \xi_{out}^w \right)}{R}, \quad \Omega = \frac{\mathbf{e} \sum_{n=n_1}^{n_2} I_n^{(in)}}{n_2 - n_1 + 1}, \quad R = \mathbf{e} \sum_{n=1}^{N_i} \frac{L_n}{\lambda_n} \quad (15)$$

$$S_3 = \bar{S}_3 + 2\Omega \frac{\xi_{in}^w - \xi_{out}^w}{R} + \frac{\left(\xi_{in}^w - \xi_{out}^w \right)^2}{R^2}$$

Величины \bar{S}_j представляют собой истинные значения интегралов, т.е. значения рассчитанные в отсутствие систематической ошибки.

С учетом упрощений функционал правдоподобия можно представить в следующем виде:

$$D^{in}(\lambda) = \bar{S}_1 - \frac{\bar{S}_2^2}{\bar{S}_3} + F_1(\lambda) \left(\xi_{in}^a - \xi_{in}^w \right) + F_2(\lambda) \left(\xi_{in}^a - \xi_{in}^w \right)^2 \quad (16)$$

$$F_1(\lambda) = 2\Gamma - 2 \frac{\bar{S}_2(\lambda) \Omega(\lambda)}{\bar{S}_3(\lambda)}, \quad F_2(\lambda) = 1 - \frac{\Omega^2(\lambda)}{\bar{S}_3(\lambda)}$$

После подстановки (15) в (8) выражение для расчета погрешности принимают вид

$$\delta \alpha = \frac{\bar{S}_3}{\bar{S}_2 + \Omega \left(\xi_{in}^a - \xi_{in}^w \right)} - \frac{\bar{S}_3}{\bar{S}_2} + \frac{\bar{S}_3 \bar{S}_2 - \bar{S}_2 \bar{S}_3}{\bar{S}_2^2} \delta \lambda_m \quad (17)$$

Определим погрешность, связанную с шумами аппаратуры.

При наличии только случайных погрешностей измерений температуры выражения для интегралов, входящих в (7), приобретают следующий вид:

$$\begin{aligned}
S_1 &= \bar{S}_1 + \frac{2}{\Delta N} \mathbf{e}^{n_2} \left(\xi_{in}^a(t_n) - \xi_{in}^w(t_n) \right) \Delta T_n + \frac{1}{\Delta N} \mathbf{e}^{n_2} \left(\xi_{in}^a(t_n) - \xi_{in}^w(t_n) \right)^2 \\
\Delta N &= n_2 - n_1 + 1, \quad \Delta T_n = T_{in}^{air}(t_n) - T_{in}^{wall}(t_n) \\
S_2 &= \bar{S}_2 + \frac{1}{\Delta N} \mathbf{e}^{n_2} \left(\xi_{in}^a(t_n) - \xi_{in}^w(t_n) \right) I_n^{(in)} + \frac{1}{N \Delta N} \mathbf{e}^{n_2} \mathbf{e}^N \left(K_{n-k}^{11} \xi_{in}^w(t_k) + K_{n-k}^{12} \xi_{out}^w(t_k) \right) \Delta T_n + \\
&+ \frac{1}{N \Delta N} \mathbf{e}^{n_2} \mathbf{e}^N \left(K_{n-k}^{11} \xi_{in}^w(t_k) + K_{n-k}^{12} \xi_{out}^w(t_k) \right) \left(\xi_{in}^a(t_n) - \xi_{in}^w(t_n) \right) \\
S_3 &= \bar{S}_3 + \frac{2}{N \Delta N} \mathbf{e}^{n_2} \mathbf{e}^N I_n^{(in)} \left(K_{n-k}^{11} \xi_{in}^w(t_k) + K_{n-k}^{12} \xi_{out}^w(t_k) \right) + \\
&+ \frac{1}{N^2 \Delta N} \mathbf{e}^{n_2} \left(\mathbf{e}^N K_{n-k}^{11} \xi_{in}^w(t_k) + K_{n-k}^{12} \xi_{out}^w(t_k) \right)^2
\end{aligned} \tag{18}$$

После введения обозначений $v_{1n} = \xi_{in}^a(t_n)$ и $v_{2n} = \xi_{in}^w(t_n)$ и несложных математических образований выражения (18) приобретают следующий вид

$$\begin{aligned}
S_1 &= \bar{S}_1 + \frac{2}{\Delta N} \mathbf{e}^{n_2} (v_{1n} - v_{2n}) \Delta T_n + \frac{1}{\Delta N} \mathbf{e}^{n_2} (v_{1n} - v_{2n})^2 \\
S_2 &= \bar{S}_2 + \frac{1}{\Delta N} \mathbf{e}^{n_2} (v_{1n} - v_{2n}) I_n^{(in)} + \frac{1}{N \Delta N} \mathbf{e}^{n_2} \mathbf{e}^N K_{n-k}^{11} v_{2k} \Delta T_n + \\
&+ \frac{1}{N \Delta N} \mathbf{e}^{n_2} \mathbf{e}^N (v_{1n} - v_{2n}) K_{n-k}^{11} v_{2k} \\
S_3 &= \bar{S}_3 + \frac{2}{N \Delta N} \mathbf{e}^{n_2} \mathbf{e}^N I_n^{(in)} K_{n-k}^{11} v_{2k} + \frac{1}{N^2 \Delta N} \mathbf{e}^{n_2} \mathbf{e}^N K_{n-k}^{11} K_{n-m}^{11} v_{2k} v_{2m}
\end{aligned} \tag{19}$$

Проведя математические преобразования, получим следующее значение для величины погрешности:

$$(\delta \alpha) = \frac{\bar{S}_3 \bar{S}_2 - \bar{S}_2 \bar{S}_3}{\bar{S}_2^2} \delta \lambda_m - v_1^2 \frac{1}{\kappa} \frac{1}{\bar{S}_2} \frac{1}{N} \mathbf{e}^N \chi_n^{(11)} F_n \frac{1}{\Delta N} \mathbf{e}^{n_2} \Delta T_n + \frac{\bar{S}_3}{\bar{S}_2^2} \frac{1}{N} \mathbf{e}^N \left| \chi_n^{(11)} F_n \right|_{\text{б}}^2 \frac{\text{ш}}{\text{б}} \tag{20}$$

Таким образом, разработан метод определения реального технического состояния НЭСТ в реальных условиях их эксплуатации.

Разработанный метод позволил создать методику оценки остаточного ресурса НЭСТ. Она заключается в следующем.

С помощью тепловизионной системы производят замеры температурных полей НЭСТ в моменты времени: $t_0, t_1, t_2, \dots, t_n$.

$$t_i = t_0 + \Delta t_{min} \times i; \quad i = 0, 1, 2, \dots, n,$$

t_0 - начальный момент измерения температурного поля.

При этом интервал времени Δt_k на k -ом элементе (потенциально критически опасном дефекте) и минимальный интервал времени Δt_{min} , определяют по p критически опасным дефектам, как результат решения системы уравнений:

$$\left\{ \right.$$

$$\Delta t_k = \{T_{maxk}(t_i + \Delta t) - T_{maxk}(t_i) \geq \Delta T_{dev}(\sigma)\},$$

$$\Delta t_{min} = \min\{\Delta t_k\}, k=1,2,\dots,p,$$

где

p - количество одновременно обследуемых дефектов,

T_{maxk} – максимальная температура на k -ом обследуемом дефекте,

ΔT_{dev} – погрешность измерения температуры техническими средствами (теповизионной системой),

σ – коэффициент, определяемый случайными шумами и помехами при проведении измерений (как правило, $\sigma = 1 \dots 3$) см. [1].

Далее приводят измеренные температуры $T_{maxk}(t_i)$ к единым условиям измерений – электрических режимов работы и параметров окружающей среды, например, следующим образом:

$$T_{max}(t_{1i}) = T_{max}(t_i) + (T_{окр}(t_1) - T_{окр}(t_i)) + (1/S_{нов}) (q_1/\alpha_1 - q(t_i)/\alpha(t_i)),$$

где

$T_{окр}(t_1)$ – температура окружающей среды в момент проведения измерения,

$S_{нов}$ - эффективная площадь поверхности НЭСТ,

$$q = U^2/R,$$

U - напряжение нагрузки в момент проведения измерения температуры,

R – электрическое сопротивление НЭСТ,

α – коэффициент теплоотдачи поверхности НЭСТ в момент проведения измерения,

Посредством описанного выше метода определяется электрические сопротивления соответствующего участка $R_{max}(t_{1i})$ и коэффициент теплоотдачи α .

Экстраполируют зависимость $T_{max}(t_{1i})$ по времени t ,

и по выполнению условия

$R_{max}(t_{1i}) \geq R_{крит}$ определяют остаточный ресурс – время выхода элемента из строя - t_{max} .

Экстраполяция осуществляется, например, одним из статистических методов построения преобразования и оценки парных зависимостей по экспериментальным данным или методами построения многомерных эмпирических зависимостей, см., например, [3]. Промежуток времени экстраполяции должен превышать предполагаемое время остаточного ресурса. Тот момент времени (t_{max}), когда будет выполнено условие $T_{max}(t_{1i}) = T_{крит}$ и будет временем остаточного ресурса, т.е. временем работоспособности НЭСТ. После этого времени с большой вероятностью исследуемый НЭСТ подлежит замене.

На рис. 1, в качестве примера, приведены зависимости, иллюстрирующие разработанный метод оценки остаточного ресурса НЭСТ.

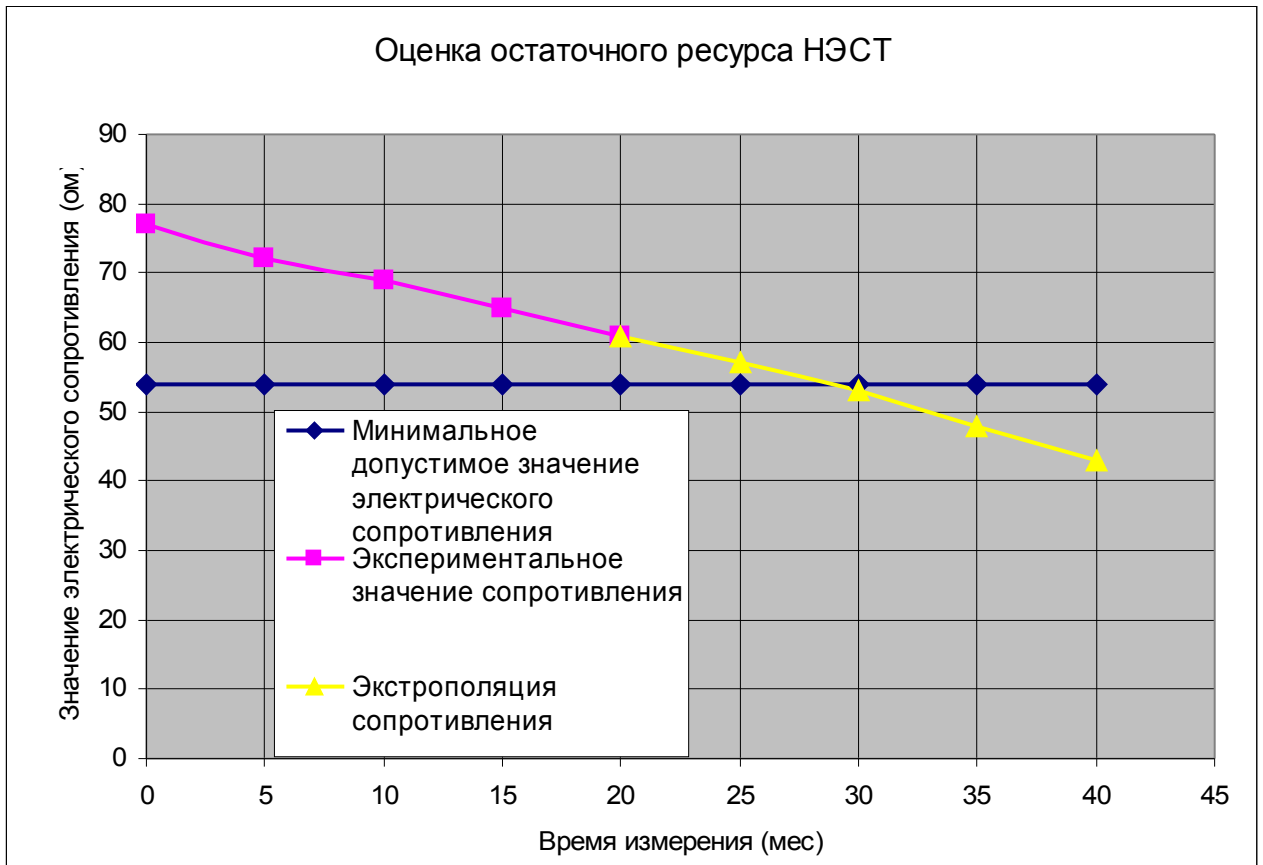


Рис. 1.

Ниже приведены результаты экспериментальных исследований разработанного метода.

Цель экспериментального исследования – подтверждение разработанного метода обнаружения и идентификации дефектов – локального изменения электрического сопротивления греющего слоя.

Программа экспериментальных исследований заключалась в следующем:

- проводились измерения реальных значений электрического сопротивления по поверхности греющего слоя,
- с помощью тепловизионной системы и вспомогательной аппаратуры регистрировалось температурное поле и другие характеристики поверхности при заданных напряжениях питания,
- на основе результатов измерений определялось распределение электрического сопротивления и погрешность значений электрического сопротивления,
- сравнивая значения электрического сопротивления измеренного и рассчитанного определялась реальная погрешность разработанного метода,

Экспериментальные исследования проводились на рабочей поверхности греющего слоя НЭСТ.

Для анализа результатов исследований использовалась методика, описанная в [1].

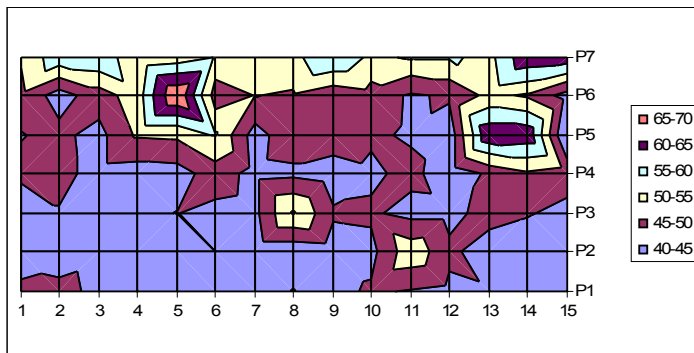
Некоторые результаты исследований в виде графиков приведены на рис. 2-5.



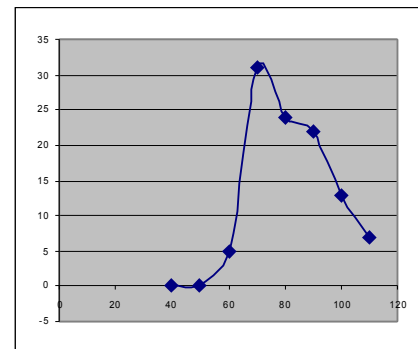
Рис. 2



Рис. 3



а.



б.

Рис. 4. Распределение электрического сопротивления по площади поверхности греющего слоя (а- распределение по площади, б-гистограмма).

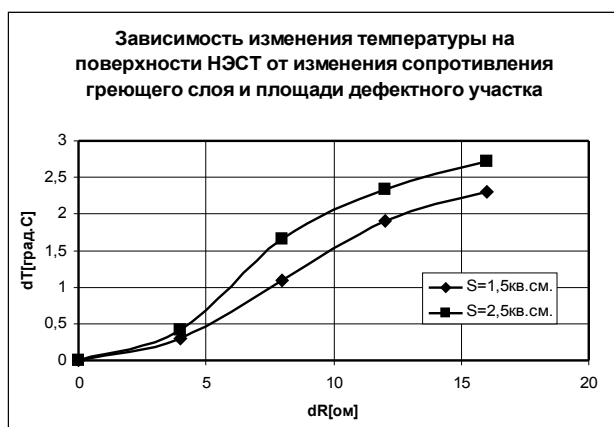


Рис. 5.

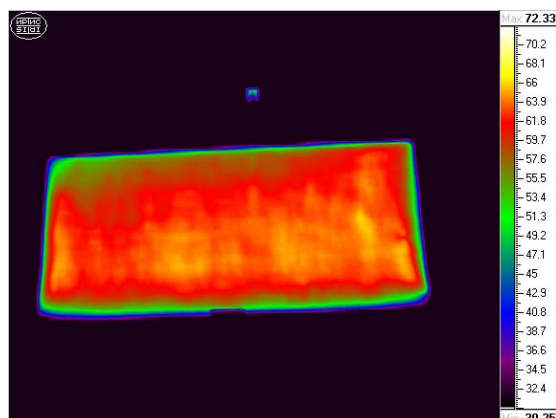


Рис. 6. Термограмма поверхности НЭСТ

Рассчитанный коэффициент корреляции между температурным полем поверхности НЭСТ и распределением электрического сопротивления [3] не ниже 0,83, что позволяет тесноту связи считать хорошей и подтверждает достоверность проведенных измерений и результатов экспериментов.

В таблицах 1,2 приведены распределения значений электрического сопротивления по поверхности НЭСТ – измеренного (таблица 1) и рассчитанного согласно описанного выше метода (таблица 2). Корреляция между ними не менее 0,91.

Определены значения погрешностей электрического сопротивления на различных участках НЭСТ:

а. Погрешность определения электрического сопротивления по предложенному методу не превышает 10%, что вполне приемлемо для исследований в полевых условиях.

б. Ошибка в погрешности реальной и определенной в соответствии с предложенными методами не превышает 14%, что делает возможным применять разработанный метод для определения погрешности измерений.

Таблица 1.

Результаты измерений электрического сопротивления по поверхности НЭСТ.

№№ строк	Результаты замеров (Ом)														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	50,3	50,3	50,4	50	52	55,1	50,6	50,6	51,3	50,6	52,6	51,3	52	55,7	51,5
2	53,1	51,5	46,5	45,1	42,6	44,5	50	47,5	45,4	45	46,6	48,5	59,1	59,4	40,5
3	44	48,3	45,9	47,6	41,8	43	43,6	45,1	49,2	41,8	46,4	43,4	42,9	42,5	42,4
4	41,6	48,2	38,1	40,6	40,1	40,4	39,6	39,6	50,2	39,9	40,3	42,8	40,1	40,3	38,2
5	41,7	47,4	55,5	50,9	39	39,9	42,4	40,5	48,8	44,4	42,4	43,7	40,4	43	42,8
6	37,7	48,2	45,4	42,3	40,8	43,3	44,2	41,3	41,4	41,5	42,8	42,9	42,2	40,5	42,6
7	41,2	45,5	46	44,6	48,2	52,7	47,7	48,4	51,4	54,2	63,3	45,1	49,4	48,3	45

Таблица 2.

Результаты определения электрического сопротивления по поверхности НЭСТ в соответствии с разработанным методом

№№ строк	Результаты замеров (Ом)														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	51,1	59,4	82,5	62,8	67,1	62,1	63,4	63,4	63	65,1	60,4	64,5	68,5	84,1	58,6
2	52,8	58,5	55,4	58,6	53,4	54	54,4	55,7	56,3	53,4	56,8	60	58,8	55,1	49
3	53,4	49	54,4	51,2	54	51,9	54	53,5	54,1	54,1	54,1	64,1	54,6	62,4	49,2
4	45,5	52,2	50	53,1	49,9	49,8	48,4	48,3	50,1	52,4	51,1	50,5	50	50,2	47,2
5	40,3	47,5	48,6	53,3	47,1	48,4	48,8	49	49,3	51,1	47,1	55,6	54,4	54,1	47,2
6	40,3	47,5	50,5	50,5	52,8	44,2	48,4	58,3	50,4	54,2	50,7	49,2	58,8	52,7	56,2
7	45,5	59,6	55	57	58	55,4	55,5	70,9	58,4	56,9	56,5	55	81,3	56,2	56,7

На базе проведенных теоретических и экспериментальных исследований для оперативной диагностики технического состояния НЭСТ разработаны программно-аппаратные средства и технология теплового контроля, включающая регистрацию температурного поля поверхности нагревателя, измерение дополнительных данных о температурном поле (тепловой поток, условия эксплуатации и т.п.) и компьютерную обработку данных по специальной программе.

ВЫВОДЫ

1. Разработан метод теплового контроля технического состояния плоских нагревательных элементов с оценкой их остаточного ресурса, основанный на решении обратной некорректной задачи нестационарной теплопроводности.

2. На основе созданного метода разработаны технология и программно-аппаратные средства теплового контроля НЭСТ. Экспериментальные исследования созданных технических и программных средств показали возможность его применения на практике в реальных полевых условиях эксплуатации.

Литература

1. Будадин О.Н., Потапов А.И., Колганов В.И., Т.Е. Троицкий-Марков, Е.В.Абрамова. Тепловой неразрушающий контроль изделий.- М.: Наука, 2002 476 с.
2. Будадин О.Н., Лебедев О.В., Абрамова Е.В., Авраменко В.Г., Киржанов Д.В. разработка метода тепловой дефектометрии на основе решения обратных задач нестационарной теплопроводности. – 17-я Российская научно-техническая конференция, 5-11 сентября 2005, г. Екатеринбург.
3. Львовский Е.Н. Статистические методы построения эмпирических формул. -М.: высшая школа, 1988, 239С.