

**Т. И. Чернышова,
В. Н. Чернышов**

**МЕТОДЫ И СРЕДСТВА
НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ
ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ**

МОСКВА •ИЗДАТЕЛЬСТВО "МАШИНОСТРОЕНИЕ"• 2001
"ИЗДАТЕЛЬСТВО МАШИНОСТРОЕНИЕ-1"

ВВЕДЕНИЕ

Сложность и большой объем экспериментальных исследований по определению качества, долговечности и надежности как традиционных, так и вновь синтезированных конструкционных, электро- и теплоизоляционных материалов и изделий из них требуют как совершенствования известных, так и создания новых эффективных методов и средств контроля. Среди них особое место занимают тепловые методы неразрушающего контроля (ТМНК) и диагностики, которые позволяют определять качество исследуемых материалов и изделий по их теплофизическим характеристикам (ТФХ), к числу которых относятся теплоемкость, тепло- и температуропроводность, обладают высокой оперативностью и информативностью, широкими функциональными возможностями, обусловленными способностью проведения контроля на всех стадиях производства и эксплуатации как материалов, так и готовых изделий из них.

Согласно ГОСТ 23483-79 методы теплового контроля основаны на взаимодействии теплового поля исследуемого объекта с термометрическими чувствительными элементами (термопарами, терморезисторами, фотоприемниками, жидкокристаллическими индикаторами и т.д.), преобразовании параметров поля (температурного градиента, теплового потока, лучистости и т.д.) чаще всего в электрический или другой вид сигнала с последующей регистрацией, обработкой и представлением в удобной для исследователей форме. Известно, что теплофизические измерения отличаются сложностью и трудоемкостью проведения измерительного эксперимента. Проведение ТМНК усложняется еще и тем, что тепловое воздействие и получение измерительной информации в ходе эксперимента возможно осуществлять только на ограниченном участке поверхности исследуемого объекта. Поэтому наиболее сложной и важной задачей при создании ТМНК является разработка физико-математических моделей, адекватно описывающих теплофизические процессы в объектах контроля, а также взаимоувязанных моделей измерительных процедур и процедур идентификации свойств материалов и изделий. Формирование общих методов описания и верификации этих моделей позволяет сформировать математическое измерительное обеспечение для ТМНК. Кроме того, наличие корректного математического описания объектов и условий измерений, измерительных процедур и средств измерений создает предпосылки для метрологического анализа результатов измерений в ТМНК.

Поскольку в промышленности все больший удельный вес приобретают синтезированные материалы, которые по своим технологическим и эксплуатационным параметрам часто имеют значительные преимущества перед естественными материалами, то задача создания методов и средств ТМНК становится еще более актуальной, так как ее решение позволяет оперативно и с необходимой точностью определить весь комплекс качественных характеристик, в том числе и ТФХ, как на стадии технологического контроля в процессе производства этих материалов, так и прогнозировать качество готовых изделий при различных режимах их эксплуатации. Учитывая же то обстоятельство, что в наиболее важных ответственных отраслях техники (ракетостроение, космическое аппаратостроение, атомная энергетика, теплотехника и т.д.) тепловые режимы в объектах контроля строго регламентируются, получение оперативной информации о теплофизических параметрах становятся уже необходимым условием применения и эксплуатации этих изделий.

Все методы и реализующие их измерительные средства можно разделить на две большие группы: контактные и бесконтактные. Отличительной особенностью контактных методов неразрушающего контроля ТФХ материалов и изделий является непосредственный контакт источника тепловой энергии и термоприемников с участком поверхности исследуемого объекта для определения температурного поля в зоне теплового воздействия.

При этом подготовка ограниченного плоского участка поверхности изделия, тепловое воздействие и получение измерительной информации в эксперименте не должны вызывать каких-либо изменений, исключая или ограничивающих целевое назначение исследуемых объектов. Удельный вес контактных методов и средств в общей массе НК ТФХ превалирует над бесконтактными, так как они появились раньше в экспериментальной теплофизике. Однако в последнее время отмечается бурный рост бесконтактных методов и измерительных средств, что объясняется высокой производительностью измерений, дистанционностью и широкими функциональными возможностями их применения по диапазонам и классам исследуемых материалов, меньшей зависимостью результатов контроля от состояния поверхности по сравнению с другими видами НК, возможностью поточного контроля и управления технологическими процессами, а также расширением номенклатуры, объема выпуска и усовершенствованием серийной инфракрасной измерительной и теплофизической аппаратуры.

Настоящая книга посвящена решению проблем, связанных с созданием теоретических основ для неразрушающего контроля ТФХ материалов на базе математических моделей тепловых процессов в исследуемых физических объектах при различных видах теплового воздействия и условиях проведения теплофизического эксперимента, с разработкой и исследованием на основе этих моделей новых методов и средств измерения ТФХ и толщины защитных покрытий (ТЗП) материалов и изделий без нарушения их целостности и эксплуатационных характеристик.

Особое внимание в книге уделено созданию базового математического и алгоритмического измерительного обеспечения для разработанных методов и средств ТМНК. В основу измерительного обеспечения положено математическое описание измерительных процедур и цепей в виде последовательности измерительных преобразований (уравнений измерений) в методах неразрушающего контроля ТФХ и ТЗП материалов и типизация этих уравнений, а также алгоритмы и аналитические соотношения для оценки погрешностей и их характеристик при метрологическом анализе результатов измерения. Исследование и метрологический анализ типовых процедур измерения, выполняемых при проведении неразрушающего теплового контроля, позволили не только создать универсальное измерительное обеспечение для разработанных ТМНК, но и синтезировать измерительные процедуры, алгоритмы и реализующие их средства с требуемыми свойствами.

Большое внимание в книге уделено анализу метрологической надежности разработанных методов и средств ТМНК. Предложен подход к прогнозированию изменения во времени состояния метрологических характеристик (МХ) основных блоков измерительных цепей, разработанных методов НК ТФХ материалов и изделий, приведены основные положения универсальной методики оценки и прогнозирования состояния МХ аналоговых и аналого-цифровых блоков средств контроля как на стадии их проектирования, так и эксплуатации, даны критерии эффективности проводимого прогнозирования.

Все предложенные в книге методы и средства НК ТФХ и ТЗП материалов и изделий обладают научной новизной, так как защищены авторскими свидетельствами и патентами на изобретения, многие результаты излагаемого материала носят оригинальный, достаточно общий характер и могут быть использованы для решения широкого круга задач как при совершенствовании известных, так и при создании новых высокоэффективных методов и средств ТМНК.

Книга предназначена для инженеров, научных сотрудников, аспирантов и студентов, занимающихся вопросами разработки измерительных средств экспресс-контроля качества материалов и готовых изделий из них, а также полезна всем специалистам, интересующимся проблемами теплофизических измерений, их надежности и эффективности.

Г л а в а 1

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ИССЛЕДУЕМЫХ ФИЗИЧЕСКИХ ОБЪЕКТАХ

Математическое описание измерительных процедур и цепей для неразрушающего контроля ТФХ и ТЗП материалов и изделий требует разработки математических моделей, адекватно описывающих тепловые процессы в этих физических объектах при проведении теплофизического эксперимента.

Наиболее полную измерительную информацию о тепловых процессах в исследуемых материалах и изделиях содержит температурное поле (ТП), определяемое из решения краевых задач теплопроводности для соответствующих тепловых воздействий и условий проведения теплофизического эксперимента. Поэтому для создания математических моделей тепловых процессов в физических объектах необходимо определение ТП в объекте при различных видах теплового воздействия на участок его поверхности. При этом вид и режим теплового воздействия, форму нагревателя и условия проведения эксперимента выбирают такими, чтобы с помощью несложных математических моделей адекватно описать физику процессов.

1.1 МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ В ИССЛЕДУЕМЫХ ОБЪЕКТАХ ПРИ КОНТАКТНОМ ТЕПЛОВОМ ВОЗДЕЙСТВИИ ОТ ЛИНЕЙНОГО ИМПУЛЬСНОГО ИСТОЧНИКА ТЕПЛА

Из теории теплофизических измерений известно [1 - 8], что наиболее перспективными с точки зрения оперативности, полноты получаемой информации об объектах исследования и простоты реализации являются нестационарные методы, основанные на импульсной теории теплопроводности. При этом предпочтение следует отдавать методам, основанным на импульсно-динамическом тепловом воздействии на исследуемые объекты от линейного или плоского источника тепла [9 - 18], поскольку в этом случае появляется возможность получить экспресс-информацию о всем комплексе ТФХ материалов за один измерительный эксперимент и не требуются сложные расчеты для определения искомым теплофизических характеристик.

Для получения математического описания тепловых процессов в исследуемых объектах при импульсном тепловом воздействии от линейного источника тепла рассмотрим следующую физическую модель [19, 20].

Имеются два полуограниченных в тепловом отношении тела, в плоскости контакта которых действует линейный импульсный источник тепла мощностью q (рис. 1.1). Полуограниченное тело 1 ($-\infty < x < +\infty$, $-\infty < y < +\infty$, $0 < z < +\infty$) имеет известные теплопроводность λ_1 и температуропроводность a_1 (эталонный материал), а исследуемое полуограниченное в тепловом отношении тело 2

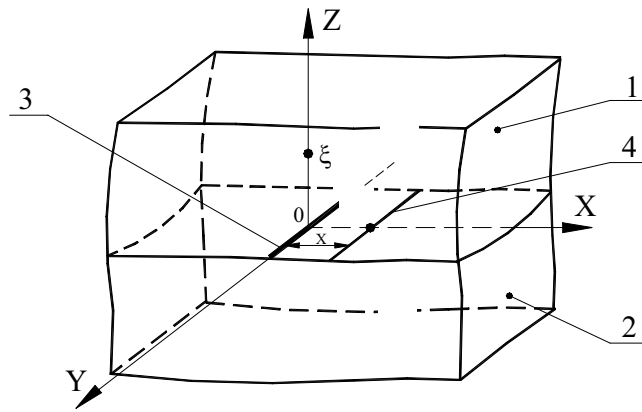


Рис. 1.1 Тепловая физическая модель для определения ТП в системе двух тел, в плоскости контакта которых действует линейный импульсный источник тепла

$(-\infty < x < +\infty, -\infty < y < +\infty, -\infty < z < 0)$ имеет неизвестные теплопроводность λ_2 и температуропроводность a_2 . На расстоянии x от линейного источника 3 расположен термодатчик 4.

При составлении математической модели теплового процесса в рассматриваемой системе тел предполагаем, что поверхность контакта исследуемого тела и эталонного тела - идеальная плоскость; мощность линейного источника выделяется мгновенно; в плоскости контакта отсутствует термосопротивление; материалы эталонного и исследуемого тел таковы, что в них тепло распространяется по закону Фурье; время измерения температуры и геометрические размеры тел таковы, что их можно считать полубесконечными в тепловом отношении.

С учетом этих предположений процесс распространения тепла в неограниченной системе двух тел сводится к двумерной задаче распространения тепла в бесконечной области с кусочнопостоянными коэффициентами теплопроводности λ и температуропроводности a . Это распределение описывается уравнением

$$\frac{\partial T}{\partial \delta} = a(z) \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + q \delta(x, z, \tau), \quad (1.1)$$

где $T = T(x, z, \tau)$ - температура в точке с координатами (x, z) в момент времени $\delta \in [0, T']$,

$$a(z) = \begin{cases} a_1, & \text{если } z \geq 0; \\ a_2, & \text{если } z < 0; \end{cases} \quad \lambda(z) = \begin{cases} \lambda_1, & \text{если } z \geq 0; \\ \lambda_2, & \text{если } z < 0; \end{cases}$$

$\delta(x, z, \tau)$ - дельта-функция Дирака.

Уравнение (1.1) эквивалентно системе:

$$\frac{\partial T_1}{\partial \delta} = a_1 \left(\frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_1}{\partial z^2} \right) + q \delta(x, z, \tau), \quad z \geq 0; \quad (1.2)$$

$$\frac{\partial T_2}{\partial \delta} = a_2 \left(\frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_2}{\partial z^2} \right), \quad z < 0,$$

с начальными и граничными условиями:

$$T_1(x, z, 0) = T_2(x, z, 0) = 0; \quad T_1(x, 0, \tau) = T_2(x, 0, \tau);$$

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1(x, 0, \tau)}{\partial z} = \lambda_2 \frac{\partial T_2(x, 0, \tau)}{\partial z};$$

$$\frac{\partial T_1(0, z, \tau)}{\partial x} = \frac{\partial T_2(0, z, \tau)}{\partial x}, \quad T_1, T_2 \rightarrow 0 \text{ при } |z| \rightarrow \infty \text{ и } |x| \rightarrow \infty.$$

Рассмотрим более общую задачу, когда мгновенный точечный источник тепла расположен в точке с координатами $(0, \xi)$, где ξ - заданное расстояние от плоскости контакта тел. В этом более общем случае температурное поле описывается системой:

$$\frac{\partial T_1}{\partial \tau} = a_1 \left(\frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_1}{\partial z^2} \right) + q \delta(z - \xi) \delta(x) \delta(\tau), \quad z \geq 0; \quad (1.3)$$

$$\frac{\partial T_2}{\partial \tau} = a_2 \left(\frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_2}{\partial z^2} \right), \quad z < 0; \quad (1.4)$$

$$T_1(x, z, 0) = T_2(x, z, 0) = 0; \quad (1.5)$$

$$T_1(x, 0, \tau) = T_2(x, 0, \tau); \quad (1.6)$$

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1(x, 0, \tau)}{\partial z} = \lambda_2 \frac{\partial T_2(x, 0, \tau)}{\partial z}; \quad (1.7)$$

$$\frac{\partial T_1(0, z, \tau)}{\partial x} = \frac{\partial T_2(0, z, \tau)}{\partial x} = 0; \quad (1.8)$$

$$T_1, T_2 \rightarrow 0 \text{ при } |z|, |x| \rightarrow \infty. \quad (1.9)$$

Взятые в системах (1.2) и (1.3 - 1.9) нулевые начальные условия не нарушают общности решения. В самом деле, если начальное распределение температуры в неограниченной системе двух тел равно $T_H = \text{const}$, то распределение температуры в некоторый момент времени будет задаваться следующим образом

$$\theta(x, z, \tau) = T(x, z, \tau) + T_H,$$

где $T(x, z, \tau)$ - решение системы (1.2).

К системе (1.3 - 1.9) применим преобразование Лапласа по переменной τ и косинус-преобразование Фурье по переменной x

$$\bar{T}(x, z, p) = \int_0^{\infty} e^{-p\tau} T(x, z, \tau) d\tau; \quad \bar{T}(S, z, p) = \int_0^{\infty} \tilde{T}(x, z, \tau) \cos(Sx) dx.$$

Система уравнений при этом преобразуется к виду:

$$\frac{d^2 \bar{T}_1}{dz^2} - \left(\frac{p}{a_1} + S^2 \right) \bar{T}_1 = \frac{q}{2a_1} \delta(z - \xi), \quad z \geq 0; \quad (1.10)$$

$$\frac{d^2 \bar{T}_2}{dz^2} - \left(\frac{p}{a_2} + S^2 \right) \bar{T}_2 = 0, \quad z < 0; \quad (1.11)$$

$$\bar{T}_1(S, 0, p) = \bar{T}_2(S, 0, p); \quad (1.12)$$

$$\lambda_1 \frac{\partial \bar{T}_1(S, 0, p)}{\partial z} = \lambda_2 \frac{\partial \bar{T}_2(S, 0, p)}{\partial z}; \quad (1.13)$$

$$\bar{T}_1 \rightarrow 0, \quad \bar{T}_2 \rightarrow 0 \quad \text{при } |z| \rightarrow \infty. \quad (1.14)$$

Решение системы (1.10 - 1.14) имеет вид:

$$\bar{T}_1 = A \exp(-k_1 z) + B \exp(k_1 z) + \bar{T}_r, \quad z \geq 0; \quad (1.15)$$

$$\bar{T}_2 = C \exp(-k_2 z) + D \exp(k_2 z), \quad z < 0,$$

где $k_1^2 = \frac{p}{a_1} + S^2$; $k_2^2 = \frac{p}{a_2} + S^2$; \bar{T}_r - частное решение уравнения (1.10).

Используя интегральное представление [21]

$$\delta(z - \xi) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} \cos \eta (z - \xi) d\eta,$$

решение \bar{T}_r будем искать в виде

$$\bar{T}_r = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} \hat{T}(\eta) \cos \eta (z - \xi) d\eta.$$

Подставляя \bar{T}_r в уравнение (1.10), находим:

$$\bar{T}(\eta) = \frac{q}{2a_1} \frac{1}{\eta^2 + \left(\frac{p}{a_1} + S^2 \right)};$$

$$\bar{T}_r = \frac{q}{2\pi a_1} \int_0^{\infty} \frac{\cos \eta (z - \xi)}{\eta^2 + k_1^2} d\eta = \frac{q}{2\pi a_1} \int_0^{\infty} \frac{\cos \eta |z - \xi| \eta}{\eta^2 + k_1^2} d\eta =$$

$$= \frac{q}{4a_1k_1} \exp(-|z - \xi|k_1).$$

Коэффициенты A, B, C, D в (1.15) находим, используя (1.12 - 1.14):

$$C = B = 0; \quad D = \frac{q\lambda_1 \exp(-k_1, \xi)}{2a_1 \lambda_1k_1 + \lambda_2k_2};$$

$$A = \frac{q}{2a_1k_1} \frac{\lambda_1k_1 - \lambda_2k_2}{\lambda_1k_1 + \lambda_2k_2} \exp(-k_1\xi).$$

Операторное решение (1.15) системы (1.3 - 1.9) принимает вид

$$\bar{T}_1 = \frac{q}{4a_1k_1} \frac{\lambda_1k_1 - \lambda_2k_2}{\lambda_1k_1 + \lambda_2k_2} \exp(-(z + \xi)k_1) + \frac{q}{4a_1k_1} \exp(-|z - \xi|k_1); \quad (1.16)$$

$$\bar{T}_2 = \frac{q\lambda_1 \exp(-k_2z - k_1\xi)}{2a_1 \lambda_1k_1 + \lambda_2k_2}.$$

Нас интересует распределение температуры вдоль границы, т.е. в плоскости контакта двух тел, когда точечный источник тепла помещен в начало координат. В (1.16) устремим $\xi \rightarrow 0, z \rightarrow 0$ и получим

$$\bar{T}_1 = \frac{q\lambda_1}{2a_1} \frac{1}{\lambda_1k_1 + \lambda_2k_2}. \quad (1.17)$$

Применяя к (1.17) обратное преобразование Лапласа и обратное косинус-преобразование Фурье [22], получаем для $\lambda_1 \neq \lambda_2$ и $a_1 \neq a_2$ функцию распределения температуры в плоскости контакта двух тел

$$T(x, 0, \tau) = \frac{Q}{2\pi\tau(\lambda_1^2 - \lambda_2^2)} \left\{ \lambda_1 \exp\left(-\frac{x^2}{4a_1\tau}\right) - \lambda_2 \exp\left(-\frac{x^2}{4a_2\tau}\right) + \sqrt{\pi} \frac{rx}{\sqrt{\tau}} \exp\left(-\frac{x^2}{4k\tau}\right) \left[\operatorname{erf}\left(\frac{rx}{\sqrt{\tau}\lambda_1}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{rx}{\sqrt{\tau}\lambda_2}\right) \right] \right\}, \quad (1.18)$$

где $r = \frac{\lambda_1\lambda_2}{2\sqrt{a_1a_2}} \sqrt{\frac{a_1 - a_2}{\lambda_1^2 - \lambda_2^2}}$; $k = \frac{\lambda_1^2 - \lambda_2^2}{\frac{\lambda_1^2}{a_1} - \frac{\lambda_2^2}{a_2}}$; $\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-x^2} dx$; $Q = \frac{q\lambda_1}{a_1}$ - напряженность источника

тепла.

При $a_1 = a_2 = a$ и $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda$ из (1.18) получаем

$$T(x, 0, \tau) = \frac{Q}{4\pi\lambda\tau} \exp\left(-\frac{x^2}{4a\tau}\right)$$

функцию влияния мгновенного источника тепла для однородного неограниченного двумерного тела ($z = 0$).

В случае $a_1 \neq a_2$ и $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda$ (1.18) имеет вид

$$\begin{aligned} T(x, 0, \tau) &= \frac{Q}{\pi\lambda\left(\frac{1}{a_1} - \frac{1}{a_2}\right)x^2} \left[\exp\left(-\frac{x^2}{4a_2\tau}\right) - \exp\left(-\frac{x^2}{4a_1\tau}\right) \right] = \\ &= \frac{Q}{4\pi\lambda\tau} \left[1 - \sum_{k=2}^{\infty} \frac{a_2^k - a_1^k}{a_2 - a_1} \left(-\frac{x^2}{4a_1a_2\tau}\right)^{k-1} \right]. \end{aligned}$$

Для $a_1 = a_2 = a$ и $\lambda_1 \neq \lambda_2$ из (1.18) получаем

$$T(x, 0, \tau) = \frac{Q}{2\pi\tau(\lambda_1 + \lambda_2)} \exp\left(-\frac{x^2}{4a\tau}\right).$$

Используя теорему о среднем, для второго слагаемого в (1.18) получаем оценку

$$\begin{aligned} \left| \sqrt{\pi} \frac{rx}{\sqrt{\tau}} \exp\left(-\frac{x^2}{4k\tau}\right) \left[\operatorname{erf}\left(\frac{rx}{\sqrt{\tau}\lambda_1}\right) - \operatorname{erf}\left(-\frac{rx}{\sqrt{\tau}\lambda_2}\right) \right] \right| \leq \\ \leq \frac{x^2}{2\tau} \frac{\lambda_1\lambda_2}{a_1a_2} \frac{|a_2 - a_1|}{\lambda_1 + \lambda_2} \max \left[\exp\left(-\frac{x^2}{4a_1\tau}\right), \exp\left(-\frac{x^2}{4a_2\tau}\right) \right]. \quad (1.19) \end{aligned}$$

С помощью (1.19) оцениваем (1.18)

$$\min(T_1^*, T_2^*) \leq T(x, 0, \tau) \leq \max(T_1^*, T_2^*), \quad (1.20)$$

где

$$T_2^* = \frac{Q}{2\pi\tau(\lambda_1^2 - \lambda_2^2)} \left[\lambda_1 \exp\left(-\frac{x^2}{4a_1\tau}\right) - \lambda_2 \left(1 - \frac{x^2}{2\tau} \frac{\lambda_1 a_2 - a_1}{a_1 a_2 \lambda_1 + \lambda_2}\right) \exp\left(-\frac{x^2}{4a_2\tau}\right) \right].$$

Поскольку мгновенный источник тепла практически реализовать сложно из-за тепловой инерционности нагревателя, то выделение теплоты Q источником может быть представлено суммой

$$Q = \sum_{i=1}^n Q_i,$$

где Q_i - количество теплоты, выделенное источником мгновенно в момент времени τ_i . Распределение температуры на границе зонда и исследуемого образца может быть получено на основании (1.18)

$$T_{\Sigma}(x, \tau) = \frac{1}{2\pi(\lambda_1^2 - \lambda_2^2)} \sum_{i=1}^n \frac{Q_i}{(\tau - \tau_i)} \exp\left\{ \lambda_1 \exp\left(-\frac{x^2}{4a_1(\tau - \tau_i)}\right) - \lambda_2 \exp\left(-\frac{x^2}{4a_2(\tau - \tau_i)}\right) + \frac{\sqrt{\pi} r x}{\sqrt{\tau - \tau_i}} \exp\left(-\frac{x^2}{4k(\tau - \tau_i)}\right) - \left[\operatorname{erf}\left(\frac{r x}{\lambda_1 \sqrt{\tau - \tau_i}}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{r x}{\lambda_2 \sqrt{\tau - \tau_i}}\right) \right] \right\}. \quad (1.21)$$

В случае выделения источником тепла в виде прямоугольного импульса длительностью τ_0 , распределение температуры в плоскости контакта зонда и исследуемого образца будет описываться функцией

$$T_{\text{см}} = \frac{Q}{2\pi(\lambda_1^2 - \lambda_2^2)} \left\{ \lambda_1 \int_0^{\tau_0} \frac{\exp\left(-\frac{x^2}{4a_1(t - \tau)}\right)}{t} dt - \lambda_2 \int_0^{\tau_0} \frac{\exp\left(-\frac{x^2}{4a_2(t - \tau)}\right)}{t} dt + \sqrt{\pi} r x \int_0^{\tau_0} \frac{\exp\left(-\frac{x^2}{4k(t - \tau)}\right)}{t} \left[\operatorname{erf}\left(\frac{r x}{\lambda_1 \sqrt{t - \tau}}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{r x}{\lambda_2 \sqrt{t - \tau}}\right) \right] dt \right\}. \quad (1.22)$$

Если ТФХ эталонного и исследуемого материалов близки, то температурный градиент на границе двух тел практически отсутствует и распределение температуры в первом и втором теле достаточно точно можно описать известными функциями

$$T_1(x, z, \tau) = \frac{Q}{4\pi\lambda_1\tau} \exp\left(-\frac{x^2 + z^2}{4a_1\tau}\right); \quad T_2(x, z, \tau) = \frac{Q}{4\pi\lambda_2\tau} \exp\left(-\frac{x^2 + z^2}{4a_2\tau}\right),$$

где T_1, T_2 - распределения температур соответственно в полуплоскостях $z > 0$ и $z < 0$ при условии, что

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1(x, 0, \tau)}{\partial z} = \lambda_2 \frac{\partial T_2(x, 0, \tau)}{\partial z} \approx 0.$$

Нас интересует температура в плоскости контакта двух тел, поэтому рассмотрим

$$T_1(x, 0, \tau) = \frac{Q_1}{2\pi\lambda_1\tau} \exp\left(-\frac{x^2}{4a_1\tau}\right); \quad T_2(x, 0, \tau) = \frac{Q_2}{2\pi\lambda_2\tau} \exp\left(-\frac{x^2}{4a_2\tau}\right). \quad (1.23)$$

Из условия равенства температур в плоскости контакта, имеем

$$T_1 = T_2 = T_r, \quad (1.24)$$

если Q - теплота, выделенная мгновенным источником, что очевидно, то

$$Q = Q_1 + Q_2. \quad (1.25)$$

Подставив (1.23) в (1.24) и используя (1.25), находим распределение температуры на границе двух тел

$$T_r = \frac{Q}{2\pi\tau} \left[\lambda_1 \exp\left(\frac{x^2}{4a_1\tau}\right) + \lambda_2 \exp\left(\frac{x^2}{4a_2\tau}\right) \right]^{-1}. \quad (1.26)$$

Несмотря на сложный вид, из соотношения (1.18) можно получить, в частном случае, простое выражение для λ_2 . Если измерение температуры ведется в точке $x=0$, то легко получить зависимость

$$\lambda_2 = \frac{Q}{2\pi\tau T(0, 0, \tau)} - \lambda_1.$$

Для близких по ТФХ материалам из формулы (1.26) можно получить выражения для a_2 и λ_2

$$a_2 = \frac{x^2(\tau_2 - \tau_1)}{4\tau_1\tau_2} \left\{ \ln \left[\frac{\tau_2 T_1 \left(\frac{Q - 2\pi\tau_1\lambda_1 T_1 \exp\left(\frac{x^2}{4a_1\tau_1}\right)}{\tau_1 T_2 \left(\frac{Q - 2\pi\tau_2\lambda_2 T_2 \exp\left(\frac{x^2}{4a_1\tau_2}\right)}{\tau_1 T_2} \right)} \right)}{\tau_1 T_2 \left(\frac{Q - 2\pi\tau_2\lambda_2 T_2 \exp\left(\frac{x^2}{4a_1\tau_2}\right)}{\tau_1 T_2} \right)} \right] \right\}^{-1},$$

где T_1 и T_2 - значения температуры в точке x в момент времени τ_1 и τ_2 соответственно. Используя полученное значение a_2 , легко находится λ_2

$$\lambda_2 = \exp\left(\frac{x^2}{4a_2\tau}\right) \left[\frac{Q}{2\pi\tau_1 T_1} - \lambda_1 \exp\left(\frac{x^2}{4a_1\tau}\right) \right].$$

Таким образом, изложенные в данном разделе математические модели могут быть положены в основу создания математического описания объектов измерения, измерительных процедур и цепей в методах неразрушающего контроля комплекса ТФХ и ТЗП материалов и изделий, использующих импульсно-динамическое тепловое воздействие на объект измерения, что будет показано во второй главе книги.

1.2 МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ОБЪЕКТАХ С ПЛЕНОЧНЫМ ТЕПЛОЗАЩИТНЫМ ПОКРЫТИЕМ ПРИ ИМПУЛЬСНОМ КОНТАКТНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ ОТ ПЛОСКОГО ИСТОЧНИКА

К проблеме оперативного неразрушающего контроля ТФХ материалов и изделий по своей физической сути очень тесно примыкает задача измерения ТЗП изделий, так как именно этот параметр очень часто определяет надежность и работоспособность готовых изделий в наиболее важных и ответственных отраслях техники (ракетостроение, космическое аппаратостроение и авиация, атомная энергетика и т.д.), поскольку здесь тепловые режимы в объектах контроля строго регламентируются, и получение оперативной информации о теплозащитных параметрах становится уже необходимым условием применения и эксплуатации этих изделий. Рассмотрим математическую модель тепловых процессов в исследуемых изделиях при импульсном тепловом воздействии от плоского источника, позволяющую найти зависимость искомой толщины покрытия от температурного поля в системе контактирующих тел [23, 24].

На рис. 1.2 показана схема теплофизической системы для определения толщины покрытия 1, нанесенного на материал изделия 2. В качестве эталона 5 используется тело, изготовленное из материала, теплофизические характеристики которого идентичны с

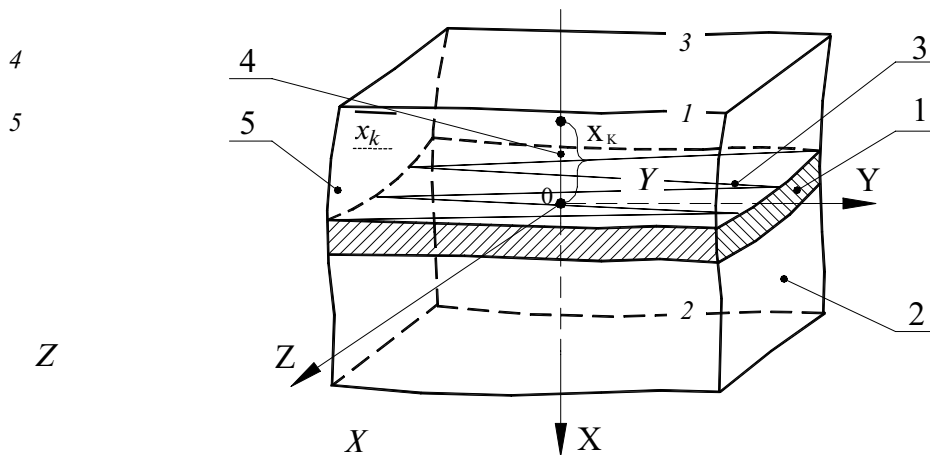


Рис. 1.2 Физическая модель определения ТЗП при воздействии от плоского источника тепла

ТФХ материала изделия, на которое нанесено покрытие. В плоскости контакта эталонного тела и покрытия расположен плоский нагреватель 3, который в начальный момент времени мгновенно выделяет тепло, причем термореприемник 4 расположен в эталонном теле на расстоянии x_k от нагревателя 3.

При составлении математической модели теплового процесса в рассматриваемой системе тел предполагаем, что поверхности контакта тел - идеальные плоскости; мощность линейного источника выделяется мгновенно; в плоскостях контакта отсутствует термосопротивление; материалы эталонного тела, покрытия и изделия таковы, что тепло в них распространяется по закону Фурье; момент измерения температуры в эталонном теле, геометрические размеры изделия и эталонного тела позволяют считать их полубесконечными в тепловом отношении; толщина нагревателя пренебрежительно мала.

С учетом этих предположений, процесс распространения тепла в рассматриваемой системе при импульсном тепловом воздействии от плоского нагревателя описывается с помощью системы дифференциальных уравнений и граничных условий четвертого рода:

$$\frac{\partial T(x, \tau)}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 T(x, \tau)}{\partial x^2} + b\delta(x, \tau), \quad x \leq 0; \quad (1.27)$$

$$\frac{\partial T_n(x, \tau)}{\partial \tau} = a_n \frac{\partial^2 T_n(x, \tau)}{\partial x^2}, \quad 0 < x < l; \quad (1.28)$$

$$\frac{\partial T_1(x, \tau)}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 T_1(x, \tau)}{\partial x^2}, \quad x > l; \quad (1.29)$$

$$T(x, 0) = T_n(x, 0) = T_1(x, 0); \quad (1.30)$$

$$T(0, \tau) = T_n(0, \tau); \quad \lambda \frac{\partial T(0, \tau)}{\partial x} = \lambda_n \frac{\partial T_n(0, \tau)}{\partial x}; \quad (1.31)$$

$$T_n(l, \tau) = T_1(l, \tau); \quad \lambda_n \frac{\partial T_n(l, \tau)}{\partial x} = \lambda \frac{\partial T_1(l, \tau)}{\partial x}; \quad (1.32)$$

$$T; T_1 \rightarrow 0 \text{ при } |x| \rightarrow \infty, \quad (1.33)$$

где T , T_n , T_1 - соответственно, температура эталонного тела, покрытия и материала изделия; λ_n , λ , a_n , a - коэффициенты тепло- и температуропроводности покрытия и материала изделия, соответственно; l - толщина покрытия; b - напряжение теплового воздействия, К·м; $\delta(x, \tau)$ - дельта-функция Дирака.

В общем случае, когда мгновенный плоский источник тепла располагается в эталонном теле на расстоянии ξ от покрытия изделия, уравнение (1.27) системы (1.27) - (1.33) принимает вид

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + b \delta(x + \xi, \tau), \quad x \leq 0. \quad (1.34)$$

Применив к системе уравнений (1.34), (1.28) - (1.33) преобразование Лапласа по переменной τ , получим систему обыкновенных дифференциальных уравнений

$$d^2 \bar{T}(x, z) - \frac{z}{a} \bar{T}(x, z) = -\frac{b}{a} \delta(x + \xi), \quad x \leq 0; \quad (1.35)$$

$$\frac{d^2 \bar{T}_n(x, z)}{dx^2} - \frac{z_1}{a_n} \bar{T}_n(x, z) = 0, \quad 0 < x < l; \quad (1.36)$$

$$\frac{d^2 \bar{T}_1(x, z)}{dx^2} - \frac{z}{a} \bar{T}_1(x, z) = 0, \quad x \geq l; \quad (1.37)$$

$$\bar{T}(0, z) = \bar{T}_n(0, z); \quad \lambda \frac{d\bar{T}(0, z)}{dx} = \lambda_n \frac{d\bar{T}_n(0, z)}{dx}; \quad (1.38)$$

$$\bar{T}_n(l, z) = \bar{T}_1(l, z); \quad \lambda \frac{d\bar{T}_n(l, z)}{dx} = \lambda_n \frac{d\bar{T}_1(l, z)}{dx}; \quad (1.39)$$

$$\bar{T}_1; \bar{T} \rightarrow 0 \text{ при } |x| \rightarrow \infty.$$

Здесь z - параметр преобразования Лапласа; \bar{T} - изображение функции T .

Решение системы (1.35) - (1.39) имеет следующий вид:

$$\bar{T} = A \exp\left(\sqrt{\frac{z}{a}} x\right) + \bar{T}_*, \quad x \leq 0;$$

$$\bar{T}_n = B \exp\left(-\sqrt{\frac{z}{a_n}} x\right) + C \exp\left(-\sqrt{\frac{z}{a_n}} x\right), \quad 0 < x < l; \quad (1.40)$$

$$\bar{T}_1 = D \exp\left(-\sqrt{\frac{z}{a}} x\right), \quad x > l;$$

$$\bar{T}_* = \frac{b \exp(-|x + \xi| \sqrt{z/a})}{2a \sqrt{z/a}},$$

где \bar{T}_* - частное решение уравнения (1.35) [21].

Нас интересует распределение температуры внутри эталонного тела при импульсном тепловом воздействии от плоского нагревателя, поэтому для $x < -\xi$ с помощью граничных условий (1.38), (1.39) получаем операторное решение уравнения (1.34)

$$\begin{aligned} \bar{T}(x, z) = & \frac{b}{4a \sqrt{z/a}} \left[\exp(-|x + \xi| \sqrt{z/a}) + \right. \\ & \left. + \frac{\left(\frac{\lambda \sqrt{a_n}}{\lambda_n \sqrt{a}} - \frac{\lambda_n \sqrt{a}}{\lambda \sqrt{a_n}} \operatorname{sh} \sqrt{\frac{z}{a_n}} l \right)}{2 \operatorname{ch} \sqrt{\frac{z}{a_n}} l + \left(\frac{\lambda \sqrt{a_n}}{\lambda_n \sqrt{a}} + \frac{\lambda_n \sqrt{a}}{\lambda \sqrt{a_n}} \right) \operatorname{sh} \sqrt{\frac{z}{a_n}} l} \exp \left((-x - \xi) \sqrt{\frac{z}{a}} \right) \right]. \end{aligned}$$

Устремив $\xi \rightarrow 0$, найдем операторное решение исходного уравнения (1.27) для $\forall x < 0$

$$\bar{T}(x, z) = \frac{b \exp \left(\sqrt{\frac{z}{a}} x \right)}{4 \sqrt{az}} \left[1 + \frac{\left(\frac{\lambda \sqrt{a_n}}{\lambda_n \sqrt{a}} - \frac{\lambda_n \sqrt{a}}{\lambda \sqrt{a_n}} \operatorname{sh} \sqrt{\frac{z}{a_n}} l \right)}{2 \operatorname{ch} \sqrt{\frac{z}{a_n}} l + \left(\frac{\lambda \sqrt{a_n}}{\lambda_n \sqrt{a}} + \frac{\lambda_n \sqrt{a}}{\lambda \sqrt{a_n}} \right) \operatorname{sh} \sqrt{\frac{z}{a_n}} l} \right]. \quad (1.41)$$

Для определения оригинала функции $T(x, z)$ преобразуем (1.41) к виду

$$\begin{aligned} \bar{T}(x, z) = & \frac{(h+1)b \exp \left(\sqrt{\frac{z}{a}} x \right)}{4 \sqrt{az}} \left[\sum_{n=0}^{\infty} h^{2n} \exp \left(-2 \sqrt{\frac{z}{a_n}} l n \right) - \right. \\ & \left. - h \left(-2 \sqrt{\frac{z}{a_n}} l \right) \sum_{n=0}^{\infty} h^{2n} \exp \left(-2 \ln \sqrt{\frac{z}{a_n}} \right) \right], \quad (1.42) \end{aligned}$$

где $h = \frac{\lambda \sqrt{a_n} - \lambda_n \sqrt{a}}{\lambda \sqrt{a_n} + \lambda_n \sqrt{a}}$.

Переходя в равенстве (1.42) от изображения к оригиналу [3], получим решение системы (1.27) - (1.33), описывающее распределение температуры в эталонном теле, в виде

$$T(x, \tau) = T_2(x, \tau) + T_3(x, \tau), \quad (1.43)$$

где

$$T_2(x, \tau) = \frac{b(h+1)}{2\sqrt{\pi a \tau}} \left[\exp\left(-\frac{x^2}{4a\tau}\right) + h(h-1) \exp\left(-\frac{(2l\sqrt{a} - x\sqrt{a_n})^2}{4aa_n\tau}\right) \right]; \quad (1.44)$$

$$T_3(x, \tau) = \frac{b(h^2+1)}{2h\sqrt{\pi a \tau}} \sum_{n=2}^{\infty} h^{2n} \exp\left(-\frac{(2nl\sqrt{a} - x\sqrt{a_n})^2}{4aa_n\tau}\right). \quad (1.45)$$

Решение (1.43) устанавливает зависимость температуры в момент времени τ в точке контроля x , расположенной внутри эталонного тела, от толщины l покрытия изделия и теплофизических характеристик материалов. Непосредственно из (1.43) получить в явном виде зависимость толщины l не представляется возможным. Поэтому, с целью упрощения решения, произведем оценку второго слагаемого (1.45), учитывая, что $|h| < 1$, в результате получаем

$$\begin{aligned} |T_3(x, \tau)| &\leq \frac{b|h^2-1|}{2/h\sqrt{\pi a \tau}} \exp\left(-\frac{(4l\sqrt{a} - x\sqrt{a_n})^2}{4aa_n\tau}\right) \sum_{n=2}^{\infty} h^{2n} = \\ &= \frac{b|h|^3}{2\sqrt{\pi a \tau}} \exp\left(-\frac{(4l\sqrt{a} - x\sqrt{a_n})^2}{4aa_n\tau}\right). \end{aligned} \quad (1.46)$$

Вторым слагаемым в (1.43) можно пренебречь, если правая часть неравенства (1.46) меньше абсолютной погрешности ΔT измерения температуры, т.е.

$$\frac{b|h|^3}{2\sqrt{\pi a \tau}} \exp\left(-\frac{(4l\sqrt{a} - x\sqrt{a_n})^2}{4aa_n\tau}\right) \leq \Delta T. \quad (1.47)$$

Выполнения неравенства (1.47) можно добиться двумя путями. Во-первых, при фиксированном расстоянии x_k от покрытия до точки контроля температуры в эталонном теле, выбрать величину напряжения в источнике тепла в соответствии с условием, полученным из (1.47),

$$b \leq 2\sqrt{\pi a \tau} |h|^3 \Delta T \exp\left(-\frac{(4l_{\min}\sqrt{a} - x_k\sqrt{a_n})^2}{4aa_n}\right), \quad (1.48)$$

где l_{\min} - величина минимальной толщины покрытия, в пределе возможно $l_{\min} = 0$.

Во-вторых, расположить датчик контроля температуры в эталонном теле на расстоянии x_k , удовлетворяющем неравенству, которое получено на основании (1.47)

$$x_k \geq 2 \left[a\tau \ln \frac{0,8b_k |h|^3}{2\sqrt{2a\tau\Delta T}} \right]^{1/2} - 4l_{\min} \sqrt{\frac{a}{a_{\text{п}}}}. \quad (1.49)$$

Здесь b_k - заданное напряжение теплового воздействия, не превышающее значение, при котором разрушается покрытие.

Таким образом, при выполнении одного из условий (1.48), (1.49) получаем $|T_3(x, \tau)| < \Delta T$. Следовательно, вторым слагаемым в (1.43) можно пренебречь и оно приводится к виду

$$T(x, t) = T_2(x, t).$$

Это соотношение позволяет получить формулу для расчета толщины

$$l = \left\{ a_{\text{п}} \tau \ln \left[\frac{b(h^2 - 1)h}{2T(x_k, \tau)\sqrt{\pi a \tau} - b(h+1) \exp\left(-\frac{x_k^2}{4a\tau}\right)} \right] \right\}^{1/2} - \frac{x_k}{2} \sqrt{\frac{a_{\text{п}}}{a}}. \quad (1.50)$$

Формула (1.50), соотношения (1.48), (1.49) положены в основу метода теплового неразрушающего контроля [23] толщины покрытия, который осуществляется следующим образом. Эталонное тело из материала с ТФХ, идентичными ТФХ изделия, приводится в контакт с покрытием и производится тепловое воздействие на образовавшуюся систему от плоского нагревателя, расположенного в плоскости контакта. В момент времени τ в точке контроля x_k измеряется $T(x_k, \tau)$ и по формуле (1.50) вычисляется толщина покрытия. При этом датчик контроля температуры располагается в соответствии с условием (1.49), либо напряжение теплового воздействия задается с учетом (1.48).

1.3 МОДЕЛЬ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ В ОБЪЕКТЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРИ БЕСКОНТАКТНОМ ТЕПЛОВОМ ВОЗДЕЙСТВИИ НА НЕГО ОТ ПОДВИЖНОГО ИСТОЧНИКА ТЕПЛА

В основу теории большинства тепловых методов бесконтактного неразрушающего контроля ТФХ твердых материалов положено явление собственного теплового излучения с поверхности исследуемых материалов и изделий, пропорционального четвертой степени абсолютной температуре [25 - 28]. Наибольшее распространение в методах и средствах НК ТФХ и ТЗП материалов и изделий получили методы активного теплового контроля качества исследуемых объектов, основанные на нагреве их поверхности подвижным непрерывным точечным источником тепла с регистрацией температуры нагреваемой поверхности одним

или несколькими термоприемниками, движущимися вслед за источником тепла с той же скоростью.

Найдем распределение температуры в полуграниченном в тепловом отношении теле при действии на его поверхность точечного источника тепла мощностью q , при этом тело движется с скоростью V равномерно относительно источника и неподвижной системы координат в направлении оси X (рис. 1.3) [29 - 33]. Источник тепла сфокусирован в начало координат и выделяет в единицу времени количество теплоты q_0 . Определим температуру в фиксированной точке (x, y, z) в момент времени τ . В начале координат за элементарный промежуток времени $d\tau'$ в момент τ' выделяется количество теплоты $q_0 d\tau'$. Кроме того, точка подвижной среды (тела), имеющая в момент времени τ координаты (x, y, z) в момент времени τ' имеет координаты $[x - V(\tau - \tau'), y, z]$. Известно, что распределение температуры в неограниченном теле в любой момент времени, вызванное действием мгновенного источника

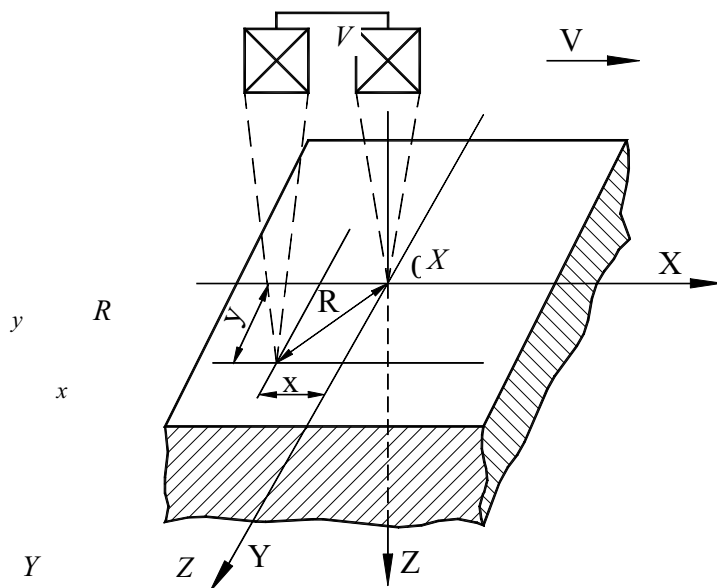


Рис. 1.3 Физическая модель определения ТП в объекте измерения при бесконтактном тепловом воздействии от подвижного источника

теплоты напряжением $b = q_0/c\rho$ в точке с координатами (x_1, y_1, z_1) , определяется соотношением [2]

$$T(x, y, z, x_1, y_1, z_1, \tau) = \frac{q_0}{8c\rho(\pi a \tau)^{3/2}} \times \exp\left[-\frac{(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 + (z-z_1)^2}{4a\tau}\right], \quad (1.51)$$

где a, c, ρ - соответственно теплопроводность, удельная теплоемкость и плотность тела.

Учитывая, что источник теплоты действует в начале координат, т.е. $(x_1, y_1, z_1) = (0, 0, 0)$, температура в точке (x, y, z) в момент времени τ , обусловленная выделением в момент времени τ' количества тепла $q_0 d\tau'$, будет равна

$$T(x, y, z, \tau) = \frac{q_0 d\tau'}{8c\rho[\pi a(\tau - \tau')]^{3/2}} \exp\left\{-\frac{[x - V(\tau - \tau')]^2 + y^2 + z^2}{4a(\tau - \tau')}\right\}. \quad (1.52)$$

Температура в момент времени τ , обусловленная выделением того же количества теплоты в начале координат за время от 0 до τ , равна

$$T(x, y, z, \tau) = \frac{q_0}{8c\rho(\pi a)^{3/2}} \int_0^\tau \exp\left\{-\frac{[x - V(\tau - \tau')]^2 + y^2 + z^2}{4a(\tau - \tau')}\right\} \frac{d\tau'}{(\tau - \tau')^{3/2}}. \quad (1.53)$$

Интеграл в выражении (1.53) можно преобразовать следующим образом

$$\begin{aligned} & \int_0^\tau \exp\left[-\frac{x^2 - 2V(\tau - \tau')x + V^2(\tau - \tau')^2 + y^2 + z^2}{4a(\tau - \tau')}\right] \frac{d\tau'}{(\tau - \tau')^{3/2}} = \\ & = \int_0^\tau \exp\left[-\frac{R^2}{4a(\tau - \tau')} + \frac{V(\tau - \tau')x}{2a(\tau - \tau')} - \frac{V^2(\tau - \tau')^2}{4a(\tau - \tau')}\right] \frac{d\tau'}{(\tau - \tau')^{3/2}} = \\ & = \exp\frac{Vx}{2a} \int_0^\tau \exp\left[-\frac{R^2}{4a(\tau - \tau')} - \frac{V^2(\tau - \tau')^2}{4a}\right] \frac{d\tau'}{(\tau - \tau')^{3/2}}, \end{aligned} \quad (1.54)$$

где $R^2 = x^2 + y^2 + z^2$.

Произведем замену переменных и пределов интегрирования в выражении (1.54) следующим образом:

$$\omega = \frac{R}{2\sqrt{a(\tau - \tau')}}; \quad \omega^2 = \frac{R^2}{4a(\tau - \tau')}; \quad d\omega = \frac{R}{2\sqrt{a}} \frac{1}{2} \frac{d\tau'}{(\tau - \tau')^{3/2}}, \quad (1.55)$$

нижний предел при $\tau' = 0$ будет равен $R/2\sqrt{a\tau}$, верхний предел при $\tau' = \tau$ равен ∞ . Подставив выражения (1.55) в интеграл соотношения (1.54), получим

$$\exp\left(\frac{Vx}{2a}\right) \frac{4\sqrt{a}}{R} \int_{R/2\sqrt{a\tau}}^\infty \exp\left[-\omega^2 - \frac{V^2 R^2}{16a^2 \omega^2}\right] d\omega. \quad (1.56)$$

Далее подставим выражение (1.56) в (1.53)

$$T(R, \tau) = \frac{q_0}{2\lambda R \pi^{3/2}} \exp\left(\frac{Vx}{2a}\right) \int_{R/2\sqrt{a\tau}}^{\infty} \exp\left(-\omega^2 - \frac{V^2 R^2}{16a^2 \omega^2}\right) d\omega, \quad (1.57)$$

где $\lambda = a c \rho$.

Полученное соотношение (1.57) служит решением для случая выделения теплоты в течение конечного промежутка времени τ . Для установившегося стационарного теплового режима, когда тепло выделяется источником в течение времени $\tau \rightarrow \infty$, интеграл в выражении (1.57) будет иметь в соответствии с [34] вид

$$\int_0^{\infty} \exp\left(-\omega^2 - \frac{V^2 R^2}{16a^2 \omega^2}\right) d\omega = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \exp\left(-\frac{VR}{2a}\right). \quad (1.58)$$

Подставив (1.58) в соотношение (1.57), получим распределение температуры в неограниченном теле при действии подвижного точечного источника теплоты в следующем виде

$$T(R, x) = \frac{q_0}{4\pi R \lambda} \exp\left[-\frac{V(R-x)}{2a}\right]. \quad (1.59)$$

В полуограниченном теле, теплоизолированном по ограничивающей плоскости, любая точка (x, y, z) при тепловом воздействии той же мощностью P_0 получит в два раза больше тепловой энергии, вследствие чего температура в любой точке полуограниченного тела будет в 2 раза выше, чем в неограниченном теле. Отсюда следует, что выражение распределения температуры для полуограниченного тела будет иметь вид

$$T(R, x) = \frac{q_0}{2\pi \lambda R} \exp\left[-\frac{V(R-x)}{2a}\right], \quad (1.60)$$

где $T(R, x)$ - избыточная температура нагреваемой поверхности полубесконечного тела в точке, перемещающейся вслед за источником теплоты по линии, параллельной линии его движения; q_0 - мощность источника теплоты; λ - коэффициент теплопроводности; x - расстояние между центром пятна нагрева поверхности исследуемого тела точечным источником теплоты и проекцией точки измерения температуры на линию движения источника теплоты; a - коэффициент температуропроводности тела; R - расстояние между центром пятна нагрева и точкой измерения температуры; V - скорость перемещения источника теплоты и термометра относительно исследуемого тела.

При проведении теплофизического эксперимента в реальных условиях в процессе бесконтактного теплового воздействия на поверхность исследуемого объекта от подвижного источника тепла из-за невозможности теплоизоляции поверхности с нее в окружающую среду происходят тепловые потери, оказывающие существенное влияние на температурное поле исследуемых объектов при указанном виде теплового воздействия. Эти потери обусловлены неполным поглощением тепловой энергии источником тепла поверхностью исследуемого объекта, а также вследствие конвективного и лучистого теплообмена поверхности исследуемого тела с окружающей средой. Кроме того, часть тепла поглощается окружающей средой при прохождении через нее излучения от источника тепла до объекта исследования в результате молекулярного поглощения и рассеяния на частицах пыли и воды, содержащихся в окружающей среде (атмосфере).

С учетом вышесказанного можно записать следующее условие теплового баланса

$$q_{\text{ит}} = q_{\text{па}} + q_{\text{отр}} + q_{\text{к}} + q_{\text{л}} + q, \quad (1.61)$$

где $q_{\text{ит}}$ - мощность точечного источника тепла; $q_{\text{па}}$ - потери тепловой мощности из-за поглощения окружающей средой части энергии излучения источника тепла; $q_{\text{отр}}$ - потери тепловой мощности из-за частичного отражения энергии излучения источника тепла поверхностью исследуемого объекта вследствие того, что исследуемый материал имеет коэффициент отражения, отличающийся от нуля; $q_{\text{к}}$ - потери тепловой мощности в окружающую среду за счет конвективного теплообмена; $q_{\text{л}}$ - потери тепловой мощности в окружающую среду за счет лучистого теплообмена; q - мощность, распространяемая в исследуемом теле за счет кондуктивной теплопроводности.

Распишем подробнее составляющие уравнения (1.61).

Потери тепловой мощности из-за поглощения окружающей средой части энергии излучения источника тепла определяются выражением [35, 36]

$$q_{\text{па}} = q_{\text{ит}} [1 - \exp(-\gamma l)] = q_{\text{ит}} [1 - \beta], \quad (1.62)$$

где γ - показатель ослабления окружающей среды, $1/\text{м}$; l - расстояние между источником тепла и исследуемым объектом, м ; β - коэффициент прозрачности окружающей среды.

Потери тепловой мощности из-за неполного поглощения энергии лазерного луча поверхностью исследуемого непрозрачного тела с учетом потерь $q_{\text{па}}$ [37, 38]

$$q_{\text{отр}} = \beta r q_{\text{ит}} = \beta (1 - \alpha) q_{\text{ит}}, \quad (1.63)$$

где r - коэффициент отражения; α - коэффициент поглощения.

Известно [39], что при заданной температуре коэффициент излучения ε тела равен его коэффициенту поглощения α , т.е. $\varepsilon = \alpha$. С учетом этого выражение (1.63) можно записать в следующем виде

$$q_{\text{отр}} = \beta (1 - \varepsilon) q_{\text{ит}}. \quad (1.64)$$

Потери тепловой мощности в окружающую среду за счет конвективного теплообмена, исходя из теории теплопроводности [40, 41], определяются выражением

$$q_{\text{к}} = \alpha_{\text{к}} (T - T_{\text{с}}) S, \quad (1.65)$$

где α_k - коэффициент конвективного теплообмена, Вт/м²·К; T - температура поверхности нагретого тела, К; T_c - температура окружающей среды, К; S - площадь теплоотдающей поверхности, м².

Потери тепловой мощности в окружающую среду за счет лучистого теплообмена определяются выражением

$$q_{л} = \alpha_{л}(T - T_c)S, \quad (1.66)$$

где $\alpha_{л} = \varepsilon C_0 \left[\left(\frac{T}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_c}{100} \right)^4 \right] / (T - T_c)$ - коэффициент лучистого теплообмена, Вт/м²·К; T - температура поверхности нагретого тела, К; T_c - температура окружающей среды, К; ε - коэффициент излучения поверхности нагретого тела; $C_0 = 5,67$ - постоянная Стефана-Больцмана, Вт/м²·К⁴; S - площадь теплоотдающей поверхности.

Мощность q , распространяемая в исследуемом теле за счет кондуктивной теплопроводности при бесконтактном тепловом воздействии на него от подвижного точечного источника тепла, согласно выражению (1.60) определяется следующим уравнением

$$q = 2\pi\lambda R [T(R, x) - T_c] \exp\left(\frac{V(R-x)}{2a}\right). \quad (1.67)$$

Используя соотношения (1.62) - (1.67) для каждого из слагаемых выражения (1.61), можно после математических преобразований получить распределение температуры в полубесконечном в тепловом отношении теле при действии на него подвижного точечного источника теплоты с учетом тепловых потерь с поверхности тела в окружающую среду в следующем виде

$$T(R, x) = \frac{\varepsilon\beta q_{ит}}{2\pi\lambda R \exp\left(\frac{V(R-x)}{2a}\right) + (\alpha_k + \alpha_{л})S} + T_c. \quad (1.68)$$

Как видно из выражения (1.68), появившиеся в математической модели параметры (ε , β , α_k , $\alpha_{л}$, S) в той или иной степени влияют на температурное поле поверхности полубесконечного в тепловом отношении тела при действии на него подвижного точечного источника тепла. Особенно большое влияние на значение температурного поля оказывает коэффициент излучения тела ε , так как для большинства твердых непрозрачных материалов $0,2 < \varepsilon < 0,9$. На температурное поле материалов с малыми значениями коэффициента теплопроводности λ сильно влияют площадь теплоотдающей поверхности S и коэффициенты конвективного α_k и лучистого $\alpha_{л}$ теплообмена. В большинстве задач теплового контроля эффект поглощения окружающей средой части энергии излучения источника тепла (параметр β) несущественен ввиду малого расстояния до объекта. Однако при технологических измерениях на реальных промышленных объектах существенное

влияние на результаты теплового контроля оказывает атмосфера горячих, влажных, запыленных или загрязненных помещений.

Кроме того, такие параметры как коэффициент излучения тела ε , коэффициенты конвективного α_k и лучистого α_l теплообмена, зависят также и от температуры.

Так как эти параметры весьма трудно измерить с требуемой для теплофизического эксперимента точностью, то основной задачей при разработке бесконтактных методов НК ТФС материалов является уменьшение и, если возможно, устранение влияния этих параметров на результаты измерений при определении искомых свойств.

Адекватность как модели (1.60), так и модели (1.68) зависит от правильного выбора диапазонов изменения следующих основных ее параметров: расстояние R от пятна источника тепла до рассматриваемой точки тела, скорость перемещения V и радиус r_0 пятна точечного источника тепла. Первый параметр определяет выбор точки контроля, а остальные два параметра - степень теплового воздействия на исследуемый объект.

Экспериментальные исследования показывают, что расчетные значения температур, определяемые по выражению (1.68) на расстояниях R , близких по значению к радиусу r_0 пятна точечного источника тепла, имеют большие расхождения с реальными значениями температур даже при малых тепловых потерях. Их расхождения достигают иногда 40 %. Это объясняется тем, что при таких расстояниях R источник тепла нельзя рассматривать как точечный источник. В этой области значения температур получаются при решении уравнения теплопроводности уже в рамках модели кругового источника тепла. При увеличении расстояния R до величины, равной восьмикратно значению диаметра пятна точечного источника, расхождение между реальными и расчетными значениями температур, определяемых по выражению (1.68), составляет не более 5 %. Таким образом, выражение (1.68) справедливо на расстоянии R от пятна источника тепла до рассматриваемой точки тела, большем, чем десятикратное значение диаметра пятна точечного источника.

Кроме того, большое влияние на температурное поле оказывают значения скорости V , радиуса r_0 пятна точечного источника тепла и коэффициента температуропроводности a исследуемого тела. Распределение температуры квазистационарного состояния процесса распространения теплоты определяется в основном только соотношением времени, необходимого для теплонасыщения материала при нагревании через круговую площадку (это время порядка r_0^2/a), и времени прохождения точечным источником расстояния, равного радиусу r_0 пятна точечного источника (r_0/V). Если время теплонасыщения оказывается меньше, чем время прохождения точечным источником пути, равного своему радиусу, т.е. $Vr_0/a < 1$, то источник тепла можно считать медленно движущимся, а его температурное поле определяется по выражению (1.68). С увеличением скорости перемещения источника нагрева тепловой эффект воздействия излучения ослабевает, и максимум температуры сдвигается противоположно направлению перемещению этого источника. В этом случае при переходе к мощному быстро движущемуся источнику, когда $Vr_0/a \gg 1$, уравнение распределения температуры в полубесконечном в тепловом отношении теле имеет следующий вид [42, 43]

$$T(y_0, z_0, t) = \frac{q}{2\pi\lambda V t} \exp\left(-\frac{y_0^2 + z_0^2}{4at}\right) + T_c, \quad (1.69)$$

где t - время, отсчитываемое от момента, когда источник пересекает плоскость y_0Oz_0 , проведенную перпендикулярно оси движения источника через рассматриваемую точку A (рис. 1.4); y_0, z_0 - неподвижные координаты точки A , связанные с телом, не отличающиеся от подвижных координат y и z .

Уравнение (1.69) показывает, что тепловые потоки в направлении, параллельном оси Ox , незначительны по сравнению с тепловыми потоками в направлениях, параллельных осям Oy

и Oz . При больших значениях параметра Vr_0/a изотермы на поверхности xOy вытянуты вдоль оси Ox . Сопоставление этого температурного

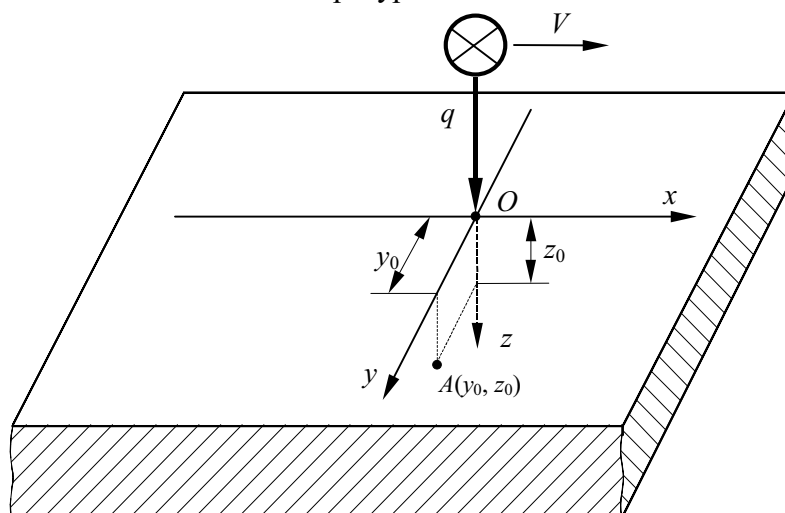


Рис. 1.4 Схема теплового воздействия движущимся точечным источником на поверхность полубесконечного тела

поля с температурным полем, вычисленным по формуле (1.68), показывает, что значения температур в области остывания практически одинаковы, а в центре и вокруг пятна нагрева отличаются. Таким образом, это уравнение не желательно использовать при разработке бесконтактных методов неразрушающего контроля ТФС материалов.

С учетом вышесказанного математическую модель (1.68) можно записать в следующем виде

$$\left\{ \begin{array}{l} T(R, x) = \frac{\varepsilon \beta q_{\text{пт}}}{2\pi\lambda R \exp\left(\frac{V(R-x)}{2a}\right) + (\alpha_k + \alpha_l)S} + T_c; \\ R \geq 20r_0; \\ Vr_0/a < 1. \end{array} \right. \quad (1.70)$$

Полученные ограничения на параметры модели (1.68) учитываются непосредственно при реализации разрабатываемых бесконтактных методов неразрушающего контроля ТФС материалов. При этом необходимо задаваться такими диапазонами параметров полученной модели, чтобы в условиях недостаточной априорной информации о ТФС материалов модель была адекватна, и не происходило разрушение исследуемых материалов.

А именно, расстояние R от пятна источника тепла до точки контроля на поверхности исследуемого тела выбирается так, чтобы его значение было больше десятикратного значения диаметра пятна точечного источника. Кроме того, для выполнения соотношения медленно движущего источника тепла необходимо задаваться наименьшими возможными значениями скорости перемещения V и радиуса r_0 пятна точечного источника тепла, выбирая при этом для их расчета материал с наименьшим значением коэффициента температуропроводности a . Таким образом, в условиях недостаточной априорной информации о ТФС испытываемых материалов обеспечивается увеличение их перечня.

МЕТОДЫ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ КОМПЛЕКСА ТФХ И ТЗП МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ С БАЗОВЫМ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫМ ОБЕСПЕЧЕНИЕМ

2.1 КОНТАКТНЫЕ МЕТОДЫ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ТФХ И ТЗП МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ

Отличительной особенностью контактных методов неразрушающего контроля ТФХ материалов и изделий является непосредственный контакт источника тепловой энергии и термоприемников с участком поверхности исследуемого объекта измерения для определения температурного поля в зоне теплового воздействия [5, 13, 14]. При этом подготовка ограниченного плоского участка поверхности изделия, тепловое воздействие и получение измерительной информации в эксперименте не должны вызывать каких-либо изменений, исключающих или ограничивающих целевое назначение исследуемых объектов.

В данном разделе книги рассматриваются контактные методы НК ТФХ материалов и их базовое измерительное обеспечение, содержащее алгоритмы измерений, структуры измерительных цепей и модели измерительных процедур (уравнения измерений), т.е. математическое измерительное обеспечение разработанных методов НК ТФХ при импульсно-динамическом тепловом воздействии на объекты исследования. При этом для разработки как самих методов НК ТФХ материалов, так и их базового измерительного обеспечения используются физико-математические модели тепловых процессов в объектах исследования, изложенные в первой главе книги.

Проблемы, связанные с особенностями контактных методов измерения температуры на поверхности исследуемых объектов, достаточно глубоко и детально проработаны и представлены в работах многих авторов [44 - 46] и здесь не рассматриваются.

2.1.1 АЛГОРИТМЫ, СТРУКТУРЫ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ЦЕПЕЙ И УРАВНЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ ТФХ ПРИ ОДНОИМПУЛЬСНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ ОТ ЛИНЕЙНОГО ИЛИ ПЛОСКОГО ИСТОЧНИКА ТЕПЛА

Информационный обзор и сравнительный анализ контактных методов и средств НК ТФХ материалов и изделий показал, что наиболее перспективным с точки зрения оперативности, полноты получаемой информации о ТФХ, точности и простоты реализации являются нестационарные методы, основанные на мгновенном или импульсном тепловом воздействии на исследуемый образец. При этом предпочтение следует отдавать варианту с использованием линейного или плоского импульсных источников заданной мощности. В этом случае появляется возможность получить экспресс-информацию о всем комплексе ТФХ материалов за один эксперимент, повышается адекватность моделей для определения искомых характеристик, так как тепловые процессы в исследуемых физических системах описываются одномерными задачами теплопроводности, а также упрощается реализация разработанных методов НК ТФХ на базе микропроцессорной техники.

Рассмотрим несколько экспресс-методов НК ТФХ материалов, в основу которых положено использование в качестве источников энергии линейных или плоских импульсных источников тепла, воздействующих на поверхность исследуемых объектов.

В начале рассмотрим разработанный новый контактный метод НК ТФХ материалов и варианты его модернизации при импульсном воздействии от линейного источника тепла заданной мощности, суть которого заключается в следующем [13, 14].

На поверхности исследуемого тела, теплоизолированного от окружающей среды, помещаются линейный импульсный источник тепла и на заданном расстоянии от него рабочие концы термопреобразователей (термопар) (рис. 2.1). После подачи теплового импульса заданной мощности от источника тепла измеряется момент времени τ_1 , когда соотношение между избыточными температурами в двух разноотстоящих от линейного

источника тепла точках поверхности исследуемого тела достигнет определенного, наперед заданного значения, согласно зависимости

$$T(x_1, \tau_1) = nT(x_2, \tau_1), \quad (2.1)$$

где $T(x_1, \tau_1)$ и $T(x_2, \tau_1)$ - соответственно температура в точках x_1 и x_2 поверхности тела в момент времени τ_1 ; n - постоянный коэффициент ($n > 1$).

При установлении соотношения (2.1) измеряется температура $T(x_1, \tau_1)$ в точке x_1 и фиксируется мощность источника тепла.

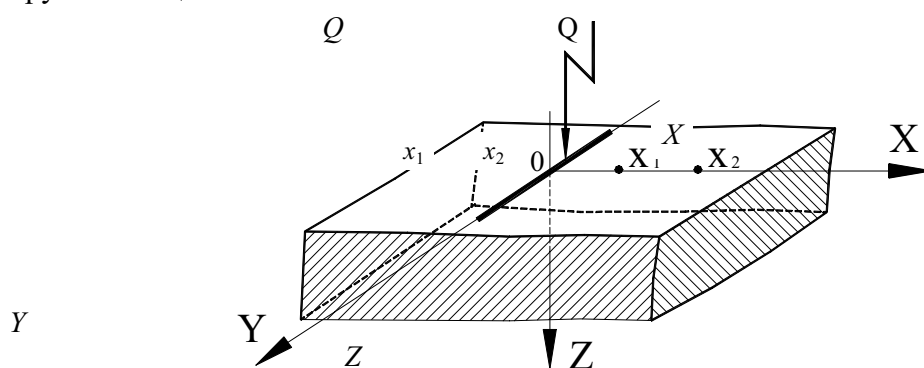


Рис. 2.1 Физическая модель объекта исследования при тепловом воздействии от линейного источника

Определение времени τ_1 осуществляется путем непрерывного сравнения термо-э.д.с. E_{T_1} термопары, расположенной в точке x_1 , и усиленной в n раз термо-э.д.с. E_{T_2} от термопары в точке x_2 , а момент времени τ_1 наступает при достижении равенства $E_{T_1} = nE_{T_2}$ (нулевой метод).

Из графика (рис. 2.2) видно, что момент времени, соответствующий условию $E_{T_1} = nE_{T_2}$, наступает значительно раньше момента появления экстремума термограммы нагрева, вследствие чего повышается оперативность и уменьшаются неучтенные тепловые потери, что способствует повышению точности предложенного метода НК ТФХ.

Произведя математические преобразования выражений ТП поверхности тела (1.23) с использованием соотношения (2.1), получим расчетные формулы для вычисления комплекса ТФХ исследуемого материала в виде:

$$a = \frac{x_2^2 - x_1^2}{4\tau_1 \ln n}; \quad (2.2)$$

$$\lambda = \frac{p_0}{2\pi T(x_1, \tau_1) \tau_1} \exp\left(-\frac{x_1^2}{4a\tau_1}\right); \quad (2.3)$$

$$c\gamma = \lambda/a. \quad (2.4)$$

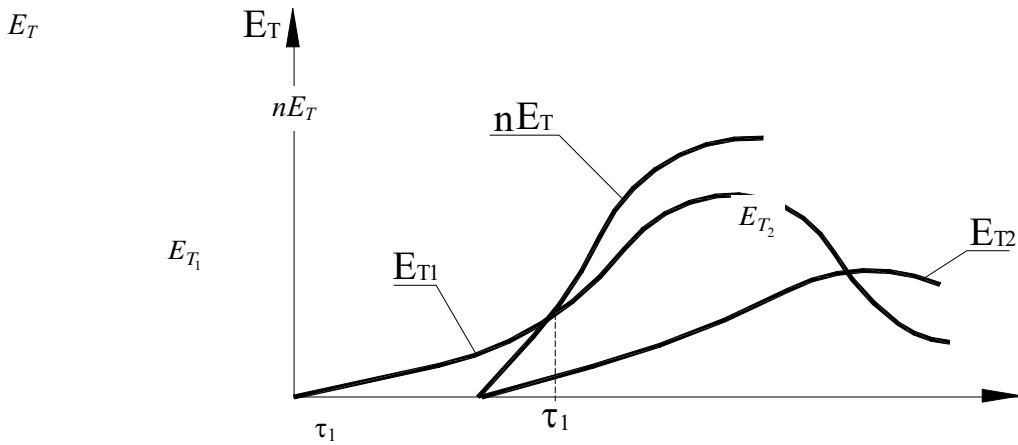


Рис. 2.2 Термограммы нагрева, соответствующие условию выполнения соотношения $E_{T_1} = nE_{T_2}$ при $n = 2$

Таким образом, предлагаемый метод позволяет определить весь комплекс ТФХ исследуемого тела в течение одного опыта без нарушения структуры материала.

Разработанный метод НК ТФХ выгодно отличается от известных методов быстродействием, которое увеличивается с увеличением n , сравнительно небольшой погрешностью определения искомых ТФХ, вследствие уменьшения тепловых потерь в эксперименте. Кроме того, данный метод позволяет легко автоматизировать теплофизический эксперимент и поэтому является перспективным для использования в ИИС неразрушающего контроля ТФХ материалов.

Для устранения процедуры непрерывного сравнения между собой низких по уровню сигналов двух преобразователей при определении момента времени τ_1 следует внести изменение в алгоритм измерения, состоящее в том, что в заданный момент времени τ_1 измеряют температуры в точках поверхности тела x_1 и x_2 . Это обстоятельство существенно упрощает реализацию метода НК ТФХ и способствует снижению погрешности результатов измерения, так как момент времени τ_1 в этом случае может быть задан с высокой степенью точности.

$$T(R, \tau) = \frac{q_0}{2\lambda R\pi^{3/2}} \exp\left(\frac{Vx}{2a}\right) \int_{R/2\sqrt{a\tau}}^{\infty} \exp\left(-\omega^2 - \frac{V^2 R^2}{16a^2 \omega^2}\right) d\omega, \quad (1.57)$$

где $\lambda = a\sigma$.

Полученное соотношение (1.57) служит решением для случая выделения теплоты в течение конечного промежутка времени τ . Для установившегося стационарного теплового режима, когда тепло выделяется источником в течение времени $\tau \rightarrow \infty$, интеграл в выражении (1.57) будет иметь в соответствии с [34] вид

$$\int_0^{\infty} \exp\left(-\omega^2 - \frac{V^2 R^2}{16a^2 \omega^2}\right) d\omega = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \exp\left(-\frac{VR}{2a}\right). \quad (1.58)$$

Подставив (1.58) в соотношение (1.57), получим распределение температуры в неограниченном теле при действии подвижного точечного источника теплоты в следующем виде

$$T(R, x) = \frac{q_0}{4\pi R\lambda} \exp\left[-\frac{V(R-x)}{2a}\right]. \quad (1.59)$$

В полуограниченном теле, теплоизолированном по ограничивающей плоскости, любая точка (x, y, z) при тепловом воздействии той же мощностью P_0 получит в два раза больше тепловой энергии, вследствие чего температура в любой точке полуограниченного тела будет в 2 раза выше, чем в неограниченном теле. Отсюда следует, что выражение распределения температуры для полуограниченного тела будет иметь вид

$$T(R, x) = \frac{q_0}{2\pi\lambda R} \exp\left[-\frac{V(R-x)}{2a}\right], \quad (1.60)$$

где $T(R, x)$ - избыточная температура нагреваемой поверхности полубесконечного тела в точке, перемещающейся вслед за источником теплоты по линии, параллельной линии его движения; q_0 - мощность источника теплоты; λ - коэффициент теплопроводности; x - расстояние между центром пятна нагрева поверхности исследуемого тела точечным источником теплоты и проекцией точки измерения температуры на линию движения источника теплоты; a - коэффициент температуропроводности тела; R - расстояние между центром пятна нагрева и точкой измерения температуры; V - скорость перемещения источника теплоты и термометра относительно исследуемого тела.

При проведении теплофизического эксперимента в реальных условиях в процессе бесконтактного теплового воздействия на поверхность исследуемого объекта от подвижного источника тепла из-за невозможности теплоизоляции поверхности с нее в окружающую среду происходят тепловые потери, оказывающие существенное влияние на температурное поле исследуемых объектов при указанном виде теплового воздействия. Эти потери обусловлены неполным поглощением тепловой энергии источником тепла поверхностью исследуемого объекта, а также вследствие конвективного и лучистого теплообмена поверхности исследуемого тела с окружающей средой. Кроме того, часть тепла поглощается окружающей средой при прохождении через нее излучения от источника тепла до объекта исследования в результате молекулярного поглощения и рассеяния на частицах пыли и воды, содержащихся в окружающей среде (атмосфере).

С учетом вышесказанного можно записать следующее условие теплового баланса

$$q_{ит} = q_{па} + q_{отр} + q_k + q_l + q, \quad (1.61)$$

где $q_{ит}$ - мощность точечного источника тепла; $q_{па}$ - потери тепловой мощности из-за поглощения окружающей средой части энергии излучения источника тепла; $q_{отр}$ - потери тепловой мощности из-за частичного отражения энергии излучения источника тепла

поверхностью исследуемого объекта вследствие того, что исследуемый материал имеет коэффициент отражения, отличающийся от нуля; q_k - потери тепловой мощности в окружающую среду за счет конвективного теплообмена; q_l - потери тепловой мощности в окружающую среду за счет лучистого теплообмена; q - мощность, распространяемая в исследуемом теле за счет кондуктивной теплопроводности.

Распишем подробнее составляющие уравнения (1.61).

Потери тепловой мощности из-за поглощения окружающей средой части энергии излучения источника тепла определяются выражением [35, 36]

$$q_{\text{па}} = q_{\text{ит}} [1 - \exp(-\gamma l)] = q_{\text{ит}} [1 - \beta], \quad (1.62)$$

где γ - показатель ослабления окружающей среды, 1/м; l - расстояние между источником тепла и исследуемым объектом, м; β - коэффициент прозрачности окружающей среды.

Потери тепловой мощности из-за неполного поглощения энергии лазерного луча поверхностью исследуемого непрозрачного тела с учетом потерь $q_{\text{па}}$ [37, 38]

$$q_{\text{отр}} = \beta r q_{\text{ит}} = \beta(1 - \alpha) q_{\text{ит}}, \quad (1.63)$$

где r - коэффициент отражения; α - коэффициент поглощения.

Известно [39], что при заданной температуре коэффициент излучения ε тела равен его коэффициенту поглощения α , т.е. $\varepsilon = \alpha$. С учетом этого выражение (1.63) можно записать в следующем виде

$$q_{\text{отр}} = \beta(1 - \varepsilon) q_{\text{ит}}. \quad (1.64)$$

Потери тепловой мощности в окружающую среду за счет конвективного теплообмена, исходя из теории теплопроводности [40, 41], определяются выражением

$$q_k = \alpha_k (T - T_c) S, \quad (1.65)$$

где α_k - коэффициент конвективного теплообмена, Вт/м²·К; T - температура поверхности нагретого тела, К; T_c - температура окружающей среды, К; S - площадь теплоотдающей поверхности, м².

Потери тепловой мощности в окружающую среду за счет лучистого теплообмена определяются выражением

$$q_l = \alpha_l (T - T_c) S, \quad (1.66)$$

где $\alpha_l = \varepsilon C_0 \left[\left(\frac{T}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_c}{100} \right)^4 \right] / (T - T_c)$ - коэффициент лучистого теплообмена, Вт/м²·К; T - температура поверхности нагретого тела, К; T_c - температура окружающей среды, К; ε -

коэффициент излучения поверхности нагретого тела; $C_0 = 5,67$ - постоянная Стефана-Больцмана, Вт/м²·К⁴; S - площадь теплоотдающей поверхности.

Мощность q , распространяемая в исследуемом теле за счет кондуктивной теплопроводности при бесконтактном тепловом воздействии на него от подвижного точечного источника тепла, согласно выражению (1.60) определяется следующим уравнением

$$q = 2\pi\lambda R [T(R, x) - T_c] \exp\left(\frac{V(R-x)}{2a}\right). \quad (1.67)$$

Используя соотношения (1.62) - (1.67) для каждого из слагаемых выражения (1.61), можно после математических преобразований получить распределение температуры в полубесконечном в тепловом отношении теле при действии на него подвижного точечного источника теплоты с учетом тепловых потерь с поверхности тела в окружающую среду в следующем виде

$$T(R, x) = \frac{\varepsilon\beta q_{ит}}{2\pi\lambda R \exp\left(\frac{V(R-x)}{2a}\right) + (\alpha_k + \alpha_l)S} + T_c. \quad (1.68)$$

Как видно из выражения (1.68), появившиеся в математической модели параметры (ε , β , α_k , α_l , S) в той или иной степени влияют на температурное поле поверхности полубесконечного в тепловом отношении тела при действии на него подвижного точечного источника тепла. Особенно большое влияние на значение температурного поля оказывает коэффициент излучения тела ε , так как для большинства твердых непрозрачных материалов $0,2 < \varepsilon < 0,9$. На температурное поле материалов с малыми значениями коэффициента теплопроводности λ сильно влияют площадь теплоотдающей поверхности S и коэффициенты конвективного α_k и лучистого α_l теплообмена. В большинстве задач теплового контроля эффект поглощения окружающей средой части энергии излучения источника тепла (параметр β) несущественен ввиду малого расстояния до объекта. Однако при технологических измерениях на реальных промышленных объектах существенное влияние на результаты теплового контроля оказывает атмосфера горячих, влажных, запыленных или загрязненных помещений.

Кроме того, такие параметры как коэффициент излучения тела ε , коэффициенты конвективного α_k и лучистого α_l теплообмена, зависят также и от температуры.

Так как эти параметры весьма трудно измерить с требуемой для теплофизического эксперимента точностью, то основной задачей при разработке бесконтактных методов НК ТФС материалов является уменьшение и, если возможно, устранение влияния этих параметров на результаты измерений при определении искомых свойств.

Адекватность как модели (1.60), так и модели (1.68) зависит от правильного выбора диапазонов изменения следующих основных ее параметров: расстояние R от пятна источника тепла до рассматриваемой точки тела, скорость перемещения V и радиус r_0 пятна точечного источника тепла. Первый параметр определяет выбор точки контроля, а остальные два параметра - степень теплового воздействия на исследуемый объект.

Экспериментальные исследования показывают, что расчетные значения температур, определяемые по выражению (1.68) на расстояниях R , близких по значению к радиусу r_0 пятна точечного источника тепла, имеют большие расхождения с реальными значениями температур даже при малых тепловых потерях. Их расхождения достигают иногда 40 %. Это объясняется тем, что при таких расстояниях R источник тепла нельзя рассматривать как

точечный источник. В этой области значения температур получаются при решении уравнения теплопроводности уже в рамках модели кругового источника тепла. При увеличении расстояния R до величины, равной восьмикратно значению диаметра пятна точечного источника, расхождение между реальными и расчетными значениями температур, определяемых по выражению (1.68), составляет не более 5 %. Таким образом, выражение (1.68) справедливо на расстоянии R от пятна источника тепла до рассматриваемой точки тела, большем, чем десятикратное значение диаметра пятна точечного источника.

Кроме того, большое влияние на температурное поле оказывают значения скорости V , радиуса r_0 пятна точечного источника тепла и коэффициента температуропроводности a исследуемого тела. Распределение температуры квазистационарного состояния процесса распространения теплоты определяется в основном только соотношением времени, необходимого для теплонасыщения материала при нагревании через круговую площадку (это время порядка r_0^2/a), и времени прохождения точечным источником расстояния, равного радиусу r_0 пятна точечного источника (r_0/V). Если время теплонасыщения оказывается меньше, чем время прохождения точечным источником пути, равного своему радиусу, т.е. $Vr_0/a < 1$, то источник тепла можно считать медленно движущимся, а его температурное поле определяется по выражению (1.68). С увеличением скорости перемещения источника нагрева тепловой эффект воздействия излучения ослабевает, и максимум температуры сдвигается противоположно направлению перемещению этого источника. В этом случае при переходе к мощному быстро движущемуся источнику, когда $Vr_0/a \gg 1$, уравнение распределения температуры в полубесконечном в тепловом отношении теле имеет следующий вид [42, 43]

$$T(y_0, z_0, t) = \frac{q}{2\pi\lambda V t} \exp\left(-\frac{y_0^2 + z_0^2}{4at}\right) + T_c, \quad (1.69)$$

где t - время, отсчитываемое от момента, когда источник пересекает плоскость y_0Oz_0 , проведенную перпендикулярно оси движения источника через рассматриваемую точку A (рис. 1.4); y_0, z_0 - неподвижные координаты точки A , связанные с телом, не отличающиеся от подвижных координат y и z .

Уравнение (1.69) показывает, что тепловые потоки в направлении, параллельном оси Ox , незначительны по сравнению с тепловыми потоками в направлениях, параллельных осям Oy и Oz . При больших значениях параметра Vr_0/a изотермы на поверхности xOy вытянуты вдоль оси Ox . Сопоставление этого температурного

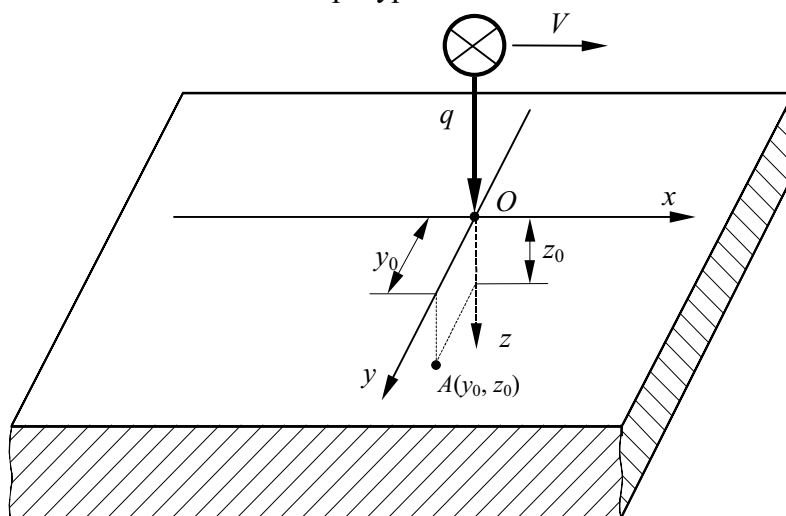


Рис. 1.4 Схема теплового воздействия движущимся

точечным источником на поверхность полубесконечного тела

поля с температурным полем, вычисленным по формуле (1.68), показывает, что значения температур в области остывания практически одинаковы, а в центре и вокруг пятна нагрева отличаются. Таким образом, это уравнение не желательно использовать при разработке бесконтактных методов неразрушающего контроля ТФС материалов.

С учетом вышесказанного математическую модель (1.68) можно записать в следующем виде

$$\left\{ \begin{array}{l} T(R, x) = \frac{\varepsilon \beta q_{\text{итт}}}{2\pi\lambda R \exp\left(\frac{V(R-x)}{2a}\right) + (\alpha_k + \alpha_l)S} + T_c; \\ R \geq 20r_0; \\ Vr_0/a < 1. \end{array} \right. \quad (1.70)$$

Полученные ограничения на параметры модели (1.68) учитываются непосредственно при реализации разрабатываемых бесконтактных методов неразрушающего контроля ТФС материалов. При этом необходимо задаваться такими диапазонами параметров полученной модели, чтобы в условиях недостаточной априорной информации о ТФС материалов модель была адекватна, и не происходило разрушение исследуемых материалов.

А именно, расстояние R от пятна источника тепла до точки контроля на поверхности исследуемого тела выбирается так, чтобы его значение было больше десятикратного значения диаметра пятна точечного источника. Кроме того, для выполнения соотношения медленно движущего источника тепла необходимо задаваться наименьшими возможными значениями скорости перемещения V и радиуса r_0 пятна точечного источника тепла, выбирая при этом для их расчета материал с наименьшим значением коэффициента температуропроводности a . Таким образом, в условиях недостаточной априорной информации о ТФС испытываемых материалов обеспечивается увеличение их перечня.

Глава 2

МЕТОДЫ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ КОМПЛЕКСА ТФХ И ТЗП МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ С БАЗОВЫМ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫМ ОБЕСПЕЧЕНИЕМ

2.1 КОНТАКТНЫЕ МЕТОДЫ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ТФХ И ТЗП МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ

Отличительной особенностью контактных методов неразрушающего контроля ТФХ материалов и изделий является непосредственный контакт источника тепловой энергии и термоприемников с участком поверхности исследуемого объекта измерения для определения температурного поля в зоне теплового воздействия [5, 13, 14]. При этом подготовка ограниченного плоского участка поверхности изделия, тепловое воздействие и получение измерительной информации в эксперименте не должны вызывать каких-либо изменений, исключающих или ограничивающих целевое назначение исследуемых объектов.

В данном разделе книги рассматриваются контактные методы НК ТФХ материалов и их базовое измерительное обеспечение, содержащее алгоритмы измерений, структуры измерительных цепей и модели измерительных процедур (уравнения измерений), т.е. математическое измерительное обеспечение разработанных методов НК ТФХ при

импульсно-динамическом тепловом воздействии на объекты исследования. При этом для разработки как самих методов НК ТФХ материалов, так и их базового измерительного обеспечения используются физико-математические модели тепловых процессов в объектах исследования, изложенные в первой главе книги.

Проблемы, связанные с особенностями контактных методов измерения температуры на поверхности исследуемых объектов, достаточно глубоко и детально проработаны и представлены в работах многих авторов [44 - 46] и здесь не рассматриваются.

2.1.1 АЛГОРИТМЫ, СТРУКТУРЫ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ЦЕПЕЙ И УРАВНЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ ТФХ ПРИ ОДНОИМПУЛЬСНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ ОТ ЛИНЕЙНОГО ИЛИ ПЛОСКОГО ИСТОЧНИКА ТЕПЛА

Информационный обзор и сравнительный анализ контактных методов и средств НК ТФХ материалов и изделий показал, что наиболее перспективным с точки зрения оперативности, полноты получаемой информации о ТФХ, точности и простоты реализации являются нестационарные методы, основанные на мгновенном или импульсном тепловом воздействии на исследуемый образец. При этом предпочтение следует отдавать варианту с использованием линейного или плоского импульсных источников заданной мощности. В этом случае появляется возможность получить экспресс-информацию о всем комплексе ТФХ материалов за один эксперимент, повышается адекватность моделей для определения искомых характеристик, так как тепловые процессы в исследуемых физических системах описываются одномерными задачами теплопроводности, а также упрощается реализация разработанных методов НК ТФХ на базе микропроцессорной техники.

Рассмотрим несколько экспресс-методов НК ТФХ материалов, в основу которых положено использование в качестве источников энергии линейных или плоских импульсных источников тепла, воздействующих на поверхность исследуемых объектов.

В начале рассмотрим разработанный новый контактный метод НК ТФХ материалов и варианты его модернизации при импульсном воздействии от линейного источника тепла заданной мощности, суть которого заключается в следующем [13, 14].

На поверхности исследуемого тела, теплоизолированного от окружающей среды, помещаются линейный импульсный источник тепла и на заданном расстоянии от него рабочие концы термопреобразователей (термопар) (рис. 2.1). После подачи теплового импульса заданной мощности от источника тепла измеряется момент времени τ_1 , когда соотношение между избыточными температурами в двух разноотстоящих от линейного источника тепла точках поверхности исследуемого тела достигнет определенного, наперед заданного значения, согласно зависимости

$$T(x_1, \tau_1) = nT(x_2, \tau_1), \quad (2.1)$$

где $T(x_1, \tau_1)$ и $T(x_2, \tau_1)$ - соответственно температура в точках x_1 и x_2 поверхности тела в момент времени τ_1 ; n - постоянный коэффициент ($n > 1$).

При установлении соотношения (2.1) измеряется температура $T(x_1, \tau_1)$ в точке x_1 и фиксируется мощность источника тепла.

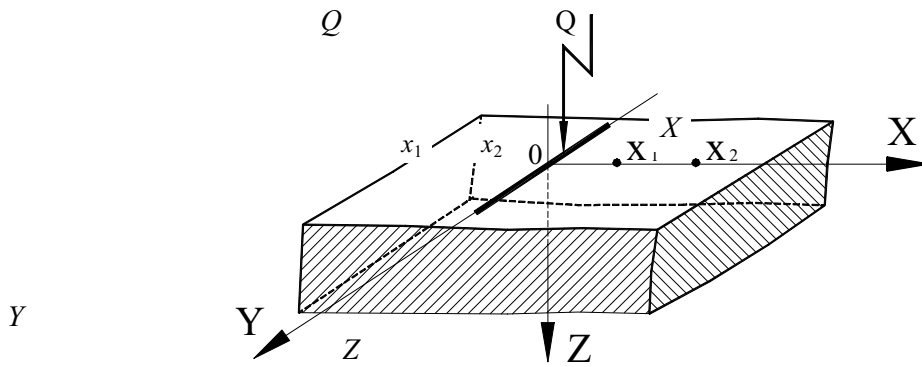


Рис. 2.1 Физическая модель объекта исследования при тепловом воздействии от линейного источника

Определение времени τ_1 осуществляется путем непрерывного сравнения термо-э.д.с. E_{T_1} термопары, расположенной в точке x_1 , и усиленной в n раз термо-э.д.с. E_{T_2} от термопары в точке x_2 , а момент времени τ_1 наступает при достижении равенства $E_{T_1} = nE_{T_2}$ (нулевой метод).

Из графика (рис. 2.2) видно, что момент времени, соответствующий условию $E_{T_1} = nE_{T_2}$, наступает значительно раньше момента появления экстремума термограммы нагрева, вследствие чего повышается оперативность и уменьшаются неучтенные тепловые потери, что способствует повышению точности предложенного метода НК ТФХ.

Произведя математические преобразования выражений ТП поверхности тела (1.23) с использованием соотношения (2.1), получим расчетные формулы для вычисления комплекса ТФХ исследуемого материала в виде:

$$a = \frac{x_2^2 - x_1^2}{4\tau_1 \ln n}; \quad (2.2)$$

$$\lambda = \frac{P_0}{2\pi T(x_1, \tau_1)\tau_1} \exp\left(-\frac{x_1^2}{4a\tau_1}\right); \quad (2.3)$$

$$c\gamma = \lambda/a. \quad (2.4)$$

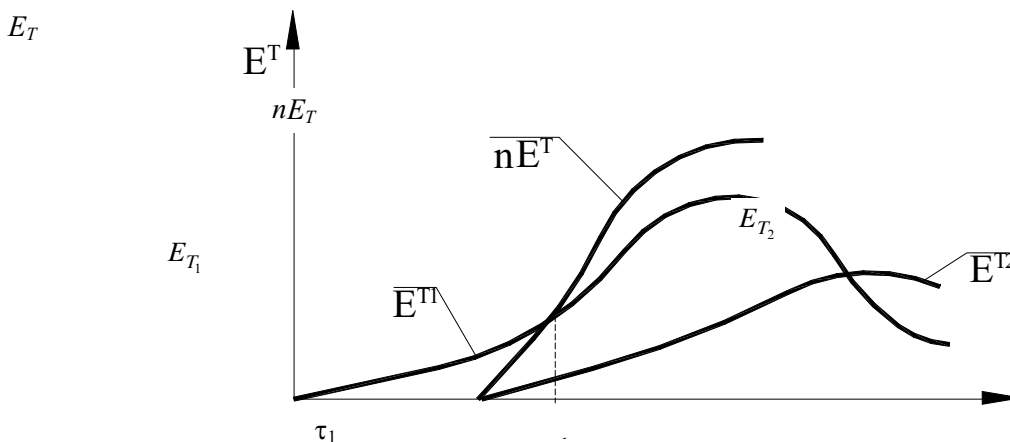


Рис. 2.2 Термограммы нагрева, соответствующие условию

выполнения соотношения $E_{T_1} = nE_{T_2}$ при $n = 2$

Таким образом, предлагаемый метод позволяет определить весь комплекс ТФХ исследуемого тела в течение одного опыта без нарушения структуры материала.

Разработанный метод НК ТФХ выгодно отличается от известных методов быстродействием, которое увеличивается с увеличением n , сравнительно небольшой погрешностью определения искомым ТФХ, вследствие уменьшения тепловых потерь в эксперименте. Кроме того, данный метод позволяет легко автоматизировать теплофизический эксперимент и поэтому является перспективным для использования в ИИС неразрушающего контроля ТФХ материалов.

Для устранения процедуры непрерывного сравнения между собой низких по уровню сигналов двух преобразователей при определении момента времени τ_1 следует внести изменение в алгоритм измерения, состоящее в том, что в заданный момент времени τ_1 измеряют температуры в точках поверхности тела x_1 и x_2 . Это обстоятельство существенно упрощает реализацию метода НК ТФХ и способствует снижению погрешности результатов измерения, так как момент времени τ_1 в этом случае может быть задан с высокой степенью точности.

где $\alpha = \frac{\sqrt{a_n} \lambda_{эт} - \sqrt{a_{эт}} \lambda_n}{\sqrt{a_n} \lambda_{эт} + \sqrt{a_{эт}} \lambda_n}$; Φ - функция ошибок Гаусса.

Используя выражение (2.35), после несложных математических преобразований можно записать

$$\lambda_n c_n \gamma_n = \frac{\lambda_{эт}^2}{a_{эт}} \left[\frac{1-k}{1+k} \right]^2, \quad (2.36)$$

$$\text{где } k = 0,5 \left(1 - \frac{q(-R, \tau) \sqrt{\pi \tau a_{эт}}}{T_c \lambda_{эт}} \right) \exp \left(\frac{R^2}{a_{эт} \tau} \right).$$

Таким образом, измерив в заданный момент времени τ_1 величину теплового потока на поверхности пластины из эталонного материала по формуле (2.36), можно определить искомые коэффициенты, причем τ_1 - заданный момент времени; $q(-R_1, \tau_1)$ - тепловой поток на внешней поверхности пластины в момент τ_1 .

Схема измерительной цепи для представленного выше алгоритма измерения изображена на рис. 2.9.

В схеме рис. 2.9 D_1, D_2 - датчики теплового потока и температуры; $U_1(q), U_2(T)$ - соответственно, градуировочные характеристики, устанавливающие связь выходного сигнала u с тепловым потоком и температурой; b_1, b_2 - характеристики преобразования, выполняемые ИП₁ и ИП₂ при нормализации сигналов; r_{τ_1} - идентификатор управляющей команды на считывание информации с АЦП₁ и АЦП₂ в заданный момент τ_1 .

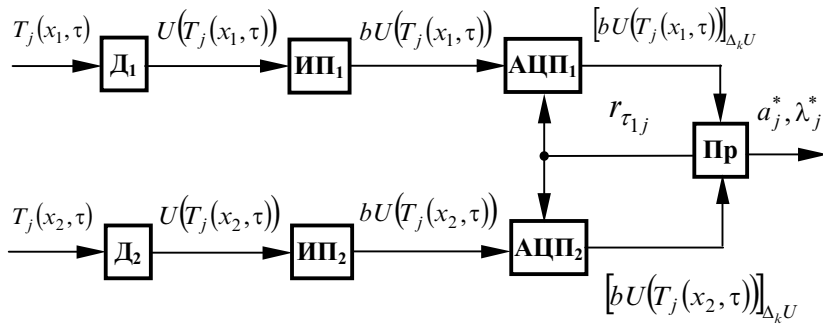


Рис. 2.9 Схема измерительной цепи для алгоритма измерения ТФХ с плоским источником тепла

Уравнение измерения для этого метода НК ТФХ в соответствии с (2.36) имеет вид:

$$R_j^* = \left\langle \left\langle \frac{\langle (\lambda_{эТ})^2 \rangle}{\langle a_{эТ} \rangle} \right\rangle_{q_{1j}} \right\rangle_{q_{2j}} \left\langle \left\langle \frac{\langle 1 - \Phi_j^* \rangle}{\langle 1 + \Phi_j^* \rangle} \right\rangle_{q_{3j}} \right\rangle_{q_{5j}}^2 \left\langle \right\rangle_{q_{6j}} \left\langle \right\rangle_{q_{7j}} \quad (2.37)$$

$$\Phi_j^* = \frac{1}{2} \left\langle \left\langle 1 - \frac{\langle p_j^*(R, \tau) \rangle \langle (\pi \langle \tau_1 \rangle \langle a_{эТ} \rangle)^{1/2} \rangle}{\langle T_c \rangle \langle \lambda_{эТ} \rangle} \right\rangle_{q_{2j}} \right\rangle_{q_{3j}} \left\langle \right\rangle_{q_{4j}}$$

$$\left\langle \exp \left\langle \frac{\langle (R) \rangle^2}{\langle a_{эТ} \rangle \langle \tau_1 \rangle} \right\rangle_{q_{5j}} \right\rangle_{q_{7j}} \left\langle \right\rangle_{q_{8j}} \left\langle \right\rangle_{q_{9j}} ; \quad (2.38)$$

$$p_j^*(R, \tau) = p \left(\left\langle \left\langle [kU(p_j(R, \tau))]_{\Delta_k U} \right\rangle_{q_{1j}} \right\rangle_{q_{2j}} \left\langle \right\rangle_{q_{3j}} \right) \left\langle \right\rangle_{q_{4j}} ;$$

$$m_p = \frac{\Delta_k p}{p_1 b_H},$$

где b_H - номинальное значение коэффициента нормализации; $U(p(R, \tau))$ - градуировочная характеристика датчика теплового потока; $p(U)$ - преобразование, обратное градуировочной характеристике; b - характеристика преобразования ИП₁ при нормализации сигнала.

Разработан также метод НК ТФХ материалов с использованием плоского импульсного источника тепла [50], сущность которого заключается в следующем.

Полубесконечные в тепловом отношении эталонное и исследуемое тела приводят в тепловой контакт по ограничивающей поверхности и термостатируют при постоянной начальной температуре. Затем подают тепловой импульс от источника тепла, предварительно помещенного в эталонное тело на заданном расстоянии R от контактной плоскости тел, и в заранее заданные два момента времени фиксируют температуру в одном из сечений эталонного и исследуемого тел, а искомые теплофизические коэффициенты рассчитывают по формулам, полученным на основании следующих рассуждений.

Температурные поля в эталонном и исследуемом телах при действии плоского мгновенного источника тепла, помещенного на расстоянии R от плоскости контакта тел в эталонном образце, при равномерном распределении температур в начальный момент времени в обоих телах, описываются математическими зависимостями:

$$T_3(x, \tau) = \frac{p}{2\sqrt{\pi a_{\text{эт}} \tau}} \left\{ \exp \left[-\frac{(x-R)^2}{4a_{\text{эт}} \tau} \right] + \frac{\lambda_{\text{эт}} \sqrt{a} - \lambda \sqrt{a_{\text{эт}}}}{\lambda_{\text{эт}} \sqrt{a} + \lambda \sqrt{a_{\text{эт}}}} \exp \left[-\frac{(x+R)^2}{4a_{\text{эт}} \tau} \right] \right\}; \quad (2.39)$$

$$T(x, \tau) = \frac{p \lambda_{\text{эт}} \sqrt{\frac{a}{a_{\text{эт}}}}}{\sqrt{\pi \tau} (\lambda_{\text{эт}} \sqrt{a} + \lambda \sqrt{a_{\text{эт}}})} \exp \left[-\frac{\left(x - \sqrt{\frac{a}{a_{\text{эт}}}} R \right)^2}{4a\tau} \right]. \quad (2.40)$$

Из уравнения (2.39) для моментов времени $\tau = \tau_1$, $\tau = \tau_2$ и $x = R$ получим выражения:

$$T_{\text{эт}}(R_1, \tau_1) = \frac{p}{2\sqrt{\pi a_{\text{эт}} \tau_1}} \left\{ \exp \left[-\frac{(x-R)^2}{4a_{\text{эт}} \tau_1} \right] + \frac{\lambda_{\text{эт}} \sqrt{a} - \lambda \sqrt{a_{\text{эт}}}}{\lambda_{\text{эт}} \sqrt{a} + \lambda \sqrt{a_{\text{эт}}}} \exp \left[-\frac{(x+R)^2}{4a_{\text{эт}} \tau_1} \right] \right\}; \quad (2.41)$$

$$T_{\text{эт}}(R_1, \tau_2) = \frac{p}{2\sqrt{\pi a_{\text{эт}} \tau_2}} \left[1 + \frac{\lambda_{\text{эт}} \sqrt{a} - \lambda \sqrt{a_{\text{эт}}}}{\lambda_{\text{эт}} \sqrt{a} + \lambda \sqrt{a_{\text{эт}}}} \exp \left(-\frac{R^2}{a_{\text{эт}} \tau_2} \right) \right]. \quad (2.42)$$

Из соотношения (2.41) и (2.42) после несложных математических преобразований получим формулу

$$\frac{\lambda}{\sqrt{a}} = \frac{\lambda_{\text{эт}}}{\sqrt{a_{\text{эт}}}} \frac{1-k}{1+k}, \quad (2.43)$$

$$\text{где } k = \frac{T_{\text{эт}}(R_1, \tau_1) \sqrt{\tau_1} - T_{\text{эт}}(R_1, \tau_2) \sqrt{\tau_2}}{T_{\text{эт}}(R_1, \tau_2) \sqrt{\tau_2} \exp \left(-\frac{R^2}{a_{\text{эт}} \tau_1} \right) - T_{\text{эт}}(R_1, \tau_1) \sqrt{\tau_1} \exp \left(-\frac{R^2}{a_{\text{эт}} \tau_2} \right)}.$$

Записав уравнение (2.40) для моментов времени τ_1 и τ_2 и координаты $x = -x_1$, и, взяв отношение полученных уравнений, получаем формулу для расчета коэффициента температуропроводности исследуемого тела

$$a = \frac{x_1^2}{\left(R \sqrt{a_{\text{эт}}} + \sqrt{z} \right)^2}, \quad (2.44)$$

$$\text{где } z = \frac{\tau_2 - \tau_1}{\tau_2 \tau_1} \ln \left[\frac{T(-x_1, \tau_1) \sqrt{\tau_1}}{T(-x_1, \tau_2) \sqrt{\tau_2}} \right].$$

Структура измерительной цепи для определения искомым ТФХ материалов в этом случае идентична схеме, изображенной на рис. 2.6, а уравнения измерений для этого алгоритма имеют вид:

$$\frac{\lambda_j^*}{\sqrt{a_j^*}} = \frac{\langle \lambda_{эТ} \rangle}{\langle \langle a_{эТ} \rangle \rangle^{1/2}} \rangle_{q_{1j}} \rangle_{q_{2j}} \langle \frac{\langle 1 - \varphi_j^* \rangle_{q_{3j}}}{\langle 1 + \varphi_j^* \rangle_{q_{4j}}} \rangle_{q_{5j}} \rangle_{q_{6j}}, \quad (2.45)$$

где

$$\varphi_j^* = \frac{\langle \langle T_{jэТ1}^* \langle \langle \tau_1 \rangle \rangle^{1/2} \rangle_{q_{1j}} \rangle_{q_{2j}} - \langle T_{jэТ2}^* \langle \langle \tau_2 \rangle \rangle^{1/2} \rangle_{q_{3j}} \rangle_{q_{4j}} \rangle}{\langle \langle T_{jэТ2}^* \langle \langle \tau_2 \rangle \rangle^{1/2} \rangle_{q_{6j}} \rangle_{q_{7j}} \langle \exp \langle -\frac{\langle \langle R \rangle \rangle^2 \rangle_{q_{8j}}}{\langle \langle a_{эТ} \rangle \langle \tau_1 \rangle \rangle_{q_{9j}}} \rangle_{q_{10j}} \rangle_{q_{11j}} \rangle_{q_{12j}} - \langle T_{jэТ1}^* \langle \langle \tau_1 \rangle \rangle^{1/2} \rangle_{q_{13j}} \langle \exp \langle \frac{\langle \langle R \rangle \rangle^2 \rangle_{q_{15j}}}{\langle \langle a_{эТ} \rangle \langle \tau_1 \rangle \rangle_{q_{16j}}} \rangle_{q_{17j}} \rangle_{q_{18j}} \rangle_{q_{19j}} \rangle_{q_{20j}} ;$$

$$T_{jэТi}^* = \langle T \left(\langle \langle [bU(T_{jэТi}(x, \tau))]_{\Delta_k U} \rangle_{q_{1j}} \langle m_T \rangle \rangle_{q_{2j}} \rangle_{q_{3j}} \right) \rangle_{q_{4j}}, \quad (i=1,2)$$

$$a_j^* = \langle \left(\frac{\langle \langle x_1 \rangle \rangle^2 \rangle_{q_{1j}}}{\langle \langle \langle R \rangle \langle \langle a_{эТ} \rangle \rangle^{1/2} \rangle_{q_{2j}} + \langle \langle \langle z_j^* \rangle \rangle^{1/2} \rangle_{q_{3j}}} \right)^2 \rangle_{q_{4j}} \rangle_{q_{5j}}, \quad (2.46)$$

$$\text{где } z_j^* = \left\langle \left\langle \frac{\tau_2}{\tau_1} \right\rangle - \left\langle \tau_1 \right\rangle \right\rangle_{q_{1j}} >_{q_{3j}} < \ln \left\langle \frac{T_{j1}^* \left\langle (\tau_1) \right\rangle^{1/2} >_{q_{4j}} >_{q_{5j}}}{T_{j2}^* \left\langle (\tau_2) \right\rangle^{1/2} >_{q_{6j}} >_{q_{7j}}} \right\rangle >_{q_{8j}} >_{q_{9j}} >_{q_{10j}}.$$

Разработан метод неразрушающего контроля толщины защитного покрытия изделия для теплового воздействия при ограниченных условиях первого рода, когда на поверхность исследуемого объекта помещают измерительный зонд, контактная поверхность которого имеет постоянную заданную температуру, на 20 - 30 % ниже температуры термодеструкции исследуемого пленочного покрытия [24].

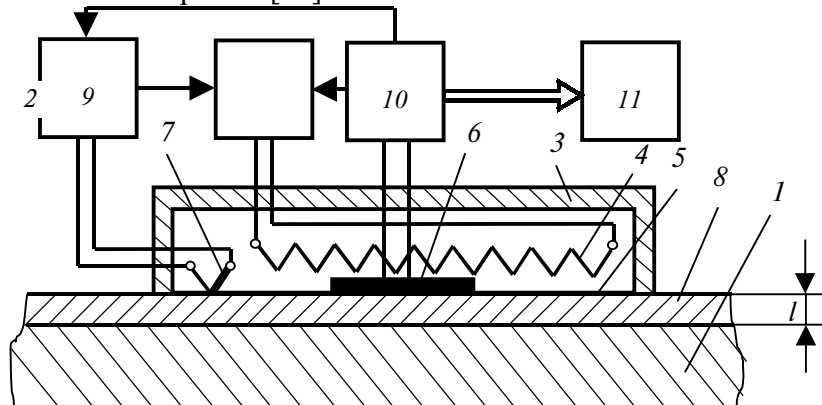


Рис. 2.10 Схема устройства, реализующего метод НК ТЗП изделий

На рис. 2.10 приведена схема устройства, реализующего предлагаемый способ. Схема содержит деталь 1, блок 2 питания, корпус 3 измерительного зонда, встроенный нагреватель 4, крышку 5 зонда, датчик 6 теплового потока, микротермопару 7, измеряемое пленочное покрытие 8, регулятор 9, блок 10 регистрации теплового потока и блок 11 регистрации времени.

Метод осуществляют следующим образом.

Стабилизируют и контролируют начальную температуру T_1 детали 1. Включением блока 2 питания предварительно прогревают измерительный зонд, выполненный в виде теплоизолированного корпуса 3 со встроенным нагревателем 4 и контактной крышкой 5, на внешней поверхности которой смонтированы датчик 6 теплового потока и микротермопара 7. Прогрев зонда осуществляют, не касаясь им контролируемой детали, до достижения и стабилизации на внешней поверхности крышки 5 температуры T_2 , максимально допустимой для детали 1 с пленочным покрытием 8. Подготовленный таким образом зонд вводят в контакт с поверхностью детали, как показано на чертеже, и нагревают деталь, автоматически поддерживая температуру T_2 внешней поверхности крышки 5 регулировкой питания нагревателя 4 с помощью системы обратной связи: микротермопара 7 - регулятор 9 - блок 2 питания. В течение всего времени нагрева изделия фиксируют показания датчика 6 теплового потока с помощью блока 10. Таким образом, нагревают изделие до достижения установившегося значения теплового потока q в системе зонд - изделие. Длительность τ нагрева детали от момента контакта зонда с поверхностью детали до стабилизации теплового потока автоматически измеряют с помощью блока 11, вход которого связан с выходом блока 10. Связь между блоками 2 и 10 обеспечивает автоматическое выключение напряжения питания нагревателя 4 в момент стабилизации теплового потока q . Если в качестве блока 10 используют микропроцессор, то благодаря связи его с регулятором 9

оператор может непосредственно с клавиатуры блока 10 задавать уровень температуры T_2 для различных деталей. По измеренным значениям T_2 , q и τ с учетом начальной температуры T_1 , и теплофизических свойств материалов детали 1 и покрытия 8 определяют толщину l покрытия по следующей зависимости

$$l = \sqrt{a_{\text{п}} \tau \left[\ln \frac{\lambda_{\text{п}} \sqrt{a_{\text{т}}} - \lambda_{\text{т}} \sqrt{a_{\text{п}}}}{\lambda_{\text{п}} \sqrt{a_{\text{т}}} + \lambda_{\text{т}} \sqrt{a_{\text{п}}}} - \ln \left(0,5 - \frac{q \sqrt{\pi \tau a_{\text{п}}}}{2 \Delta T \lambda_{\text{п}}} \right) \right]}$$

где $\Delta T = T_2 - T_1$; $\lambda_{\text{т}}$ и $\lambda_{\text{п}}$ - коэффициенты теплопроводности соответственно детали и покрытия; $a_{\text{т}}$ и $a_{\text{п}}$ - коэффициенты температуропроводности соответственно детали и покрытия.

Предлагаемым методом, не требующим наличия эталонной детали-свидетеля и легко поддающимся автоматизации, обеспечивается высокая точность определения толщины покрытия благодаря снижению относительной погрешности температурно-временных измерений при достаточно длительном процессе до регуляризации теплового потока, т.е. благодаря увеличенному количеству подводимой суммарной тепловой энергии.

Уравнение измерений для разработанного метода НК ТЗП имеет вид

$$l_j^* = \left\langle \left\langle a_{\text{п}} \right\rangle_{q_{1j}} \left\langle \tau \right\rangle_{q_{2j}} \left\langle \left\langle \ln \left\langle \frac{\langle \langle \lambda_{\text{п}} \rangle_{q_{3j}} \langle \sqrt{a_{\text{т}}} \rangle_{q_{4j}} \rangle_{q_{5j}}}{\langle \langle \lambda_{\text{п}} \rangle_{q_{10j}} \langle \sqrt{a_{\text{т}}} \rangle_{q_{11j}} \rangle_{q_{12j}}} \right\rangle \right\rangle \right\rangle \left\langle \frac{- \langle \langle \lambda_{\text{т}} \rangle_{q_{6j}} \langle \sqrt{a_{\text{п}}} \rangle_{q_{7j}} \rangle_{q_{8j}} \rangle_{q_{9j}}}{- \langle \langle \lambda_{\text{т}} \rangle_{q_{13j}} \langle \sqrt{a_{\text{п}}} \rangle_{q_{14j}} \rangle_{q_{15j}} \rangle_{q_{16}}} \right\rangle_{q_{17j}} \rangle_{q_{18j}} \left. \right\rangle \left\langle \left\langle 0,5 - \frac{\langle q \rangle}{2} \left\langle \frac{\langle \sqrt{\pi \tau} \rangle_{q_{18j}} \langle a_{\text{п}} \rangle_{q_{20j}} \rangle_{q_{21j}}}{\langle \langle \Delta T_j^* \rangle_{q_{22j}} \langle \lambda_{\text{п}} \rangle_{q_{23j}} \rangle_{q_{24j}}} \right\rangle \right\rangle_{q_{25j}} \rangle_{q_{26j}} \rangle_{q_{27j}} \right\rangle_{q_{28j}} \rangle_{q_{29j}} \left. \right\rangle_{q_{30j}} \left. \right\rangle^{1/2}.$$

Разработан также метод неразрушающего контроля толщины пленочного покрытия изделия, который осуществляется следующим образом [51].

На поверхность изделия без покрытия помещают плоский источник тепловой энергии постоянной мощности прямоугольной формы и теплоизолируют его от внешней среды. Осуществляют нагрев поверхности изделия и измеряют избыточную температуру в центре площадки контакта поверхности с источником. При установившемся тепловом режиме эта температура становится постоянной, т.е. $T_1 = \text{const}$. Затем помещают источник на поверхность

изделия с покрытием, теплоизолируют его, осуществляют нагрев поверхности и измеряют значение избыточной температуры $T_2 = \text{const}$ при установившемся режиме в центре площадки контакта.

Искомую толщину покрытия $h_{\text{п}}$ определяют по формуле, полученной из анализа соответствующей математической модели

$$h_{\text{п}} = \Delta T \lambda_{\text{п}} l b / q, \quad (2.47)$$

где $\Delta T = T_2 - T_1$; $\lambda_{\text{п}}$ - теплопроводность материала покрытия; q - мощность установившегося теплового потока от источника к исследуемому изделию; l и b - размеры источника.

Чтобы избежать погрешностей, вносимых в определение толщины покрытия неточностью значений $\lambda_{\text{п}}$ и q , изготавливают эталонный образец, идентичный изделию с покрытием известной толщины, которая может быть найдена, например, с помощью разрушающих методов. Осуществляют нагрев поверхности эталонного образца без покрытия и с покрытием с помощью одного и того же источника тепловой энергии, измеряют значения избыточных температур при установившемся тепловом режиме в центре площадок контакта поверхности с источником и на основе выражения (2.47) искомую толщину покрытия изделия определяют по формуле

$$h_{\text{п}} = h_{\text{эт}} \Delta T / \Delta T_{\text{эт}},$$

где $h_{\text{эт}}$ - толщина покрытия на эталонном образце; ΔT , $\Delta T_{\text{эт}}$ - соответственно, разность установившихся избыточных температур изделия и эталонного образца с покрытием и без покрытия.

Способ может быть использован в системах автоматического неразрушающего контроля толщины пленочных покрытий изделий в различных отраслях промышленности.

Уравнение измерений для разработанного метода НК ТЗП имеет вид

$$h_{\text{п}}^* = \frac{\langle \langle \Delta T_j^* \rangle_{q_{1j}} \langle \lambda_n \rangle_{q_{2j}} \langle l \rangle \langle b \rangle \rangle_{q_{3j}}}{\langle Q \rangle_{q_{4j}}} \rangle_{q_{5j}}.$$

2.1.3 АЛГОРИТМЫ, СТРУКТУРЫ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ЦЕПЕЙ И УРАВНЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ ТФХ ПРИ ЧАСТОТНО-ИМПУЛЬСНОМ ТЕПЛОВОМ ВОЗДЕЙСТВИИ НА ИССЛЕДУЕМЫЕ ОБЪЕКТЫ

В данном разделе рассмотрим ряд алгоритмов НК ТФХ, в которых тепловое воздействие на объект измерения осуществляется от источника в виде нагретой нити (линейного источника).

При этом тепловая энергия от источника подается на исследуемый объект в виде импульсов различной частоты, скважности и амплитуды. В экспериментальной теплофизике такое воздействие часто называют частотно-импульсным или же импульсно-динамическим.

Отличительной особенностью импульсно-динамических методов измерения ТФХ материалов является то, что измерительная информация в ходе теплофизического эксперимента регистрируется в дискретной форме (число или частота тепловых импульсов), что позволяет легко преобразовать измерительную информацию в цифровую форму, облегчает реализацию методов измерения на базе процессорных устройств.

Разработан метод НК ТФХ материалов и готовых изделий, сущность которого заключается в следующем [11].

На теплоизолированную от внешней среды поверхность исследуемого тела помещают линейный источник тепла заданной мощности и осуществляют тепловое воздействие на тело импульсами с заданной скважностью (для материалов с λ от 0,05 до 5 Вт/м·К интервал между импульсами следует задавать в диапазоне от 0,1 до 60 с). Затем фиксируют число импульсов, нанесенных на поверхность тела от начала теплового воздействия до момента установления неизменного значения температуры в точке контроля, расположенной на заданном ближнем расстоянии x_1 от линии действия источника. После этого фиксируют число импульсов от начала теплового воздействия до момента, когда температура во второй точке, удаленной на большее расстояние x_2 от источника теплового воздействия, достигнет установившегося значения. Установившееся значение температуры в точке контроля x_1 и x_2 наступает тогда, когда очередной тепловой импульс из серии импульсов теплового воздействия не изменяет температуры, соответственно, в начале в точке x_1 , затем в точке x_2 . Зная значения этих температур и число тепловых импульсов до насыщения (наступления теплового баланса) в первой и второй точке контроля, искомые теплофизические характеристики определяют по формулам, полученным на основании следующих рассуждений.

Температурное поле в результате действия n импульсов соответственно в точках x_1 и x_2 на основании (1.23) описывается зависимостями:

$$T_{\text{уст}1}(x_1, \tau) = \frac{Q}{2\pi\lambda} \sum_{i=1}^{n_1} \frac{1}{\tau - \tau_i} \exp\left[-\frac{x_1^2}{4a(\tau - \tau_i)}\right]; \quad (2.48)$$

$$T_{\text{уст}2}(x_2, \tau) = \frac{Q}{2\pi\lambda} \sum_{i=1}^{n_2} \frac{1}{\tau - \tau_i} \exp\left[-\frac{x_2^2}{4a(\tau - \tau_i)}\right]. \quad (2.49)$$

После несложных математических преобразований (2.48) и (2.49), используя соотношение $\tau_i = i\Delta\tau$, где $\Delta\tau$ - интервал времени между передними фронтами тепловых импульсов, а i - натуральный ряд чисел, получим следующие формулы для расчета искомых теплофизических характеристик:

$$a = \frac{\left(\frac{x_2^2}{n_2} - \frac{x_1^2}{n_1} \right)}{4\Delta\tau \ln(n_1/n_2)}; \quad (2.50)$$

$$\lambda = \frac{Q}{2\pi T_{\text{уст1}}(x_1, \tau)} \sum_{i=1}^{n_1} \frac{1}{\tau_i} \exp\left(-\frac{x_1^2}{4a\tau_i}\right), \quad (2.51)$$

где x_1, x_2 - соответственно, расстояние от линии действия тепла до точек контроля температуры; n_1 - число импульсов, нанесенных на поверхность исследуемого тела от источника тепла до момента времени, когда температура в точке x_1 достигает установившегося значения, равного $T_{\text{уст1}}(x_1)$; n_2 - число импульсов, поданных на тело от источника тепла до момента времени, когда температура в точке x_2 достигает установившегося значения; Q - мощность линейного импульсного источника тепла.

Таким образом, определив число импульсов теплового воздействия n_1 и n_2 и, зная значение установившейся температуры в точке x_1 и мощность одного теплового импульса, по формулам (2.50) и (2.51) можно рассчитать значения коэффициентов тепло- и теплопроводности исследуемых тел.

Определение числа нанесенных импульсов n_1 и n_2 на поверхность тела источником тепла от начала теплового воздействия до момента, когда температура в точке контроля достигнет неизменного значения, обеспечивает требуемую точность и помехозащищенность при определении теплофизических характеристик.

Схема измерительной цепи для представленного выше алгоритма измерения приведена на рис. 2.11.

В этой схеме: ИТ - импульсный источник тепла, осуществляющий воздействие на объект измерения ОИ импульсами n_i с интервалом $\Delta\tau$; ДУ₁, ДУ₂ - дифференцирующие устройства, определяющие момент наступления установившегося значения термограммы нагрева, соответственно, в точках x_1 и x_2 ; r_{n_1} и r_{n_2} - идентификаторы управляющих команд, по которым информация в первом случае со счетчика СЧ и АЦП₁, а во втором случае - только со счетчика через АЦП₂ поступает в оперативную память процессора Пр.

Уравнения измерений для этого случая в соответствии с формулами (2.50) и (2.51) имеют следующий вид

$$a_j^* = \frac{\left\langle \left(\langle x_2 \rangle \right)^2 \right\rangle_{q_{1j}} \left\langle \frac{1}{n_{1j}^*} \right\rangle_{q_{2j}} - \left\langle \left(\langle x_1 \rangle \right)^2 \right\rangle_{q_{3j}} \left\langle \frac{1}{n_{2j}^*} \right\rangle_{q_{4j}} \right\rangle_{q_{5j}}}{\left\langle 4 \Delta\tau \ln \left\langle \frac{1}{n_{1j}^*} \right\rangle_{q_{6j}} \left\langle \frac{1}{n_{2j}^*} \right\rangle_{q_{7j}} \right\rangle_{q_{8j}}}} \right\rangle_{q_{9j}},$$

$$\lambda_j^* = \left\langle \left\langle \frac{p_0}{2\pi T_{\text{уст1}}} \right\rangle_{q_{1j}} \left\langle \sum_{i=1}^{n_1} \frac{1}{\tau_i} \exp \left\langle -\frac{\langle x_1 \rangle^2}{4a_j^* \tau_i} \right\rangle_{q_{3j}} \right\rangle_{q_{5j}} \right\rangle_{q_{6j}} \left\langle \frac{1}{n_{1j}^*} \right\rangle_{q_{7j}} \left\langle \frac{1}{n_{2j}^*} \right\rangle_{q_{8j}} \right\rangle_{q_{9j}}.$$

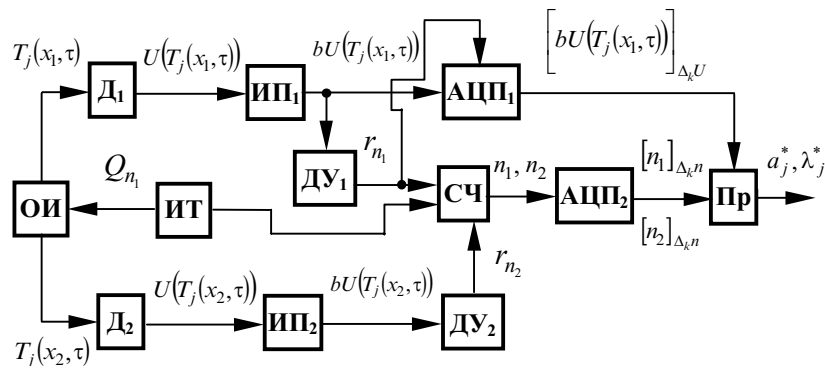


Рис. 2.11 Структура процессорного измерителя для определения ТФХ при импульсном тепловом воздействии на исследуемый образец

где $\alpha = \frac{\sqrt{a_n} \lambda_{эГ} - \sqrt{a_{эГ}} \lambda_n}{\sqrt{a_n} \lambda_{эГ} + \sqrt{a_{эГ}} \lambda_n}$; Φ - функция ошибок Гаусса.

Используя выражение (2.35), после несложных математических преобразований можно записать

$$\lambda_n c_n \gamma_n = \frac{\lambda_{эГ}^2}{a_{эГ}} \left[\frac{1-k}{1+k} \right]^2, \quad (2.36)$$

где $k = 0,5 \left(1 - \frac{q(-R, \tau) \sqrt{\pi \tau a_{эГ}}}{T_c \lambda_{эГ}} \right) \exp \left(\frac{R^2}{a_{эГ} \tau} \right)$.

Таким образом, измерив в заданный момент времени τ_1 величину теплового потока на поверхности пластины из эталонного материала по формуле (2.36), можно определить искомые коэффициенты, причем τ_1 - заданный момент времени; $q(-R_1, \tau_1)$ - тепловой поток на внешней поверхности пластины в момент τ_1 .

Схема измерительной цепи для представленного выше алгоритма измерения изображена на рис. 2.9.

В схеме рис. 2.9 D_1, D_2 - датчики теплового потока и температуры; $U_1(q), U_2(T)$ - соответственно, градуировочные характеристики, устанавливающие связь выходного сигнала u с тепловым потоком и температурой; b_1, b_2 - характеристики преобразования, выполняемые ИП₁ и ИП₂ при нормализации сигналов; r_{τ_1} - идентификатор управляющей команды на считывание информации с АЦП₁ и АЦП₂ в заданный момент τ_1 .

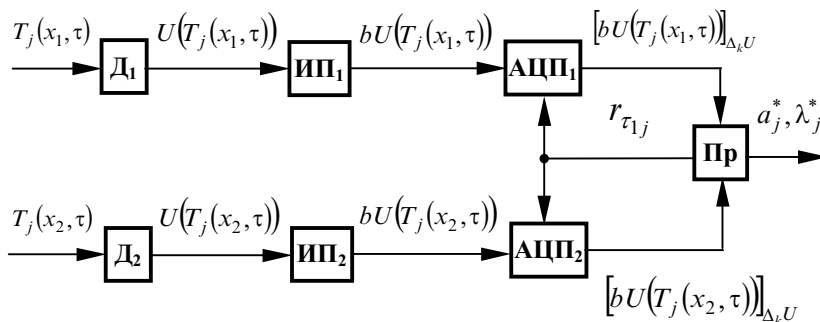


Рис. 2.9 Схема измерительной цепи для алгоритма измерения ТФХ с плоским источником тепла

Уравнение измерения для этого метода НК ТФХ в соответствии с (2.36) имеет вид:

$$R_j^* = \left\langle \left\langle \frac{(\langle \lambda_{эТ} \rangle)^2}{\langle a_{эТ} \rangle} \right\rangle_{q_{1j}} \right\rangle_{q_{2j}} \left\langle \left\langle \frac{\langle 1 - \varphi_j^* \rangle_{q_{3j}}}{\langle 1 + \varphi_j^* \rangle_{q_{4j}}} \right\rangle_{q_{5j}} \right\rangle_{q_{6j}}^2 \right\rangle_{q_{7j}} \quad (2.37)$$

$$\varphi_j^* = \frac{1}{2} \left\langle \left\langle 1 - \frac{\langle p_j^*(R, \tau) \rangle \langle (\pi \langle \tau_1 \rangle \langle a_{эТ} \rangle)^{1/2} \rangle_{q_{1j}}}{\langle \langle T_c \rangle \langle \lambda_{эТ} \rangle \rangle_{q_{2j}}} \right\rangle_{q_{3j}} \right\rangle_{q_{4j}}$$

$$\left\langle \exp \left\langle \frac{\langle \langle R \rangle \rangle_{q_{5j}}}{\langle \langle a_{эТ} \rangle \langle \tau_1 \rangle \rangle_{q_{6j}}} \right\rangle_{q_{7j}} \right\rangle_{q_{8j}} \right\rangle_{q_{9j}} ; \quad (2.38)$$

$$p_j^*(R, \tau) = \left\langle p \left(\left\langle [kU(p_j(R, \tau))]_{\Delta_k U}^h \right\rangle_{q_{1j}} \langle m_p \rangle_{q_{2j}} \right) \right\rangle_{q_{3j}} \right\rangle_{q_{4j}} ;$$

$$m_p = \frac{\Delta_k p}{p_1 b_H},$$

где b_H - номинальное значение коэффициента нормализации; $U(p(R, \tau))$ - градуировочная характеристика датчика теплового потока; $p(U)$ - преобразование, обратное градуировочной характеристике; b - характеристика преобразования ИП₁ при нормализации сигнала.

Разработан также метод НК ТФХ материалов с использованием плоского импульсного источника тепла [50], сущность которого заключается в следующем.

Полубесконечные в тепловом отношении эталонное и исследуемое тела приводят в тепловой контакт по ограничивающей поверхности и термостатируют при постоянной начальной температуре. Затем подают тепловой импульс от источника тепла, предварительно помещенного в эталонное тело на заданном расстоянии R от контактной плоскости тел, и в заранее заданные два момента времени фиксируют температуру в одном из сечений эталонного и исследуемого тел, а искомые теплофизические коэффициенты рассчитывают по формулам, полученным на основании следующих рассуждений.

Температурные поля в эталонном и исследуемом телах при действии плоского мгновенного источника тепла, помещенного на расстоянии R от плоскости контакта тел в эталонном образце, при равномерном распределении температур в начальный момент времени в обоих телах, описываются математическими зависимостями:

$$T_3(x, \tau) = \frac{p}{2\sqrt{\pi a_{эТ} \tau}} \left\{ \exp \left[-\frac{(x-R)^2}{4a_{эТ} \tau} \right] + \frac{\lambda_{эТ} \sqrt{a} - \lambda \sqrt{a_{эТ}}}{\lambda_{эТ} \sqrt{a} + \lambda \sqrt{a_{эТ}}} \exp \left[-\frac{(x+R)^2}{4a_{эТ} \tau} \right] \right\}; \quad (2.39)$$

$$T(x, \tau) = \frac{p\lambda_{\text{эГ}}\sqrt{\frac{a}{a_{\text{эГ}}}}}{\sqrt{\pi\tau}(\lambda_{\text{эГ}}\sqrt{a} + \lambda_{\text{эГ}}\sqrt{a_{\text{эГ}}})} \exp\left[-\frac{\left(x - \sqrt{\frac{a}{a_{\text{эГ}}}}R\right)^2}{4a\tau}\right]. \quad (2.40)$$

Из уравнения (2.39) для моментов времени $\tau = \tau_1$, $\tau = \tau_2$ и $x = R$ получим выражения:

$$T_{\text{эГ}}(R_1, \tau_1) = \frac{p}{2\sqrt{\pi a_{\text{эГ}}\tau_1}} \left\{ \exp\left[-\frac{(x-R)^2}{4a_{\text{эГ}}\tau_1}\right] + \frac{\lambda_{\text{эГ}}\sqrt{a} - \lambda_{\text{эГ}}\sqrt{a_{\text{эГ}}}}{\lambda_{\text{эГ}}\sqrt{a} + \lambda_{\text{эГ}}\sqrt{a_{\text{эГ}}}} \exp\left[-\frac{(x+R)^2}{4a_{\text{эГ}}\tau_1}\right] \right\}; \quad (2.41)$$

$$T_{\text{эГ}}(R_1, \tau_2) = \frac{p}{2\sqrt{\pi a_{\text{эГ}}\tau_2}} \left[1 + \frac{\lambda_{\text{эГ}}\sqrt{a} - \lambda_{\text{эГ}}\sqrt{a_{\text{эГ}}}}{\lambda_{\text{эГ}}\sqrt{a} + \lambda_{\text{эГ}}\sqrt{a_{\text{эГ}}}} \exp\left(-\frac{R^2}{a_{\text{эГ}}\tau_2}\right) \right]. \quad (2.42)$$

Из соотношения (2.41) и (2.42) после несложных математических преобразований получим формулу

$$\frac{\lambda}{\sqrt{a}} = \frac{\lambda_{\text{эГ}}}{\sqrt{a_{\text{эГ}}}} \frac{1-k}{1+k}, \quad (2.43)$$

$$\text{где } k = \frac{T_{\text{эГ}}(R_1, \tau_1)\sqrt{\tau_1} - T_{\text{эГ}}(R_1, \tau_2)\sqrt{\tau_2}}{T_{\text{эГ}}(R_1, \tau_2)\sqrt{\tau_2} \exp\left(-\frac{R^2}{a_{\text{эГ}}\tau_1}\right) - T_{\text{эГ}}(R_1, \tau_1)\sqrt{\tau_1} \exp\left(-\frac{R^2}{a_{\text{эГ}}\tau_2}\right)}.$$

Записав уравнение (2.40) для моментов времени τ_1 и τ_2 и координаты $x = -x_1$, и, взяв отношение полученных уравнений, получаем формулу для расчета коэффициента температуропроводности исследуемого тела

$$a = \frac{x_1^2}{\left(R\sqrt{a_{\text{эГ}}} + \sqrt{z}\right)^2}, \quad (2.44)$$

$$\text{где } z = \frac{\tau_2 - \tau_1}{\tau_2\tau_1} \ln\left[\frac{T(-x_1, \tau_1)\sqrt{\tau_1}}{T(-x_1, \tau_2)\sqrt{\tau_2}}\right].$$

Структура измерительной цепи для определения искомых ТФХ материалов в этом случае идентична схеме, изображенной на рис. 2.6, а уравнения измерений для этого алгоритма имеют вид:

$$\frac{\lambda_j^*}{\sqrt{a_j^*}} = \frac{\langle \lambda_{эТ} \rangle}{\langle \langle a_{эТ} \rangle \rangle^{1/2}} \rangle_{q_{1j}} \rangle_{q_{2j}} \langle \frac{\langle 1 - \varphi_j^* \rangle_{q_{3j}}}{\langle 1 + \varphi_j^* \rangle_{q_{4j}}} \rangle_{q_{5j}} \rangle_{q_{6j}}, \quad (2.45)$$

где

$$\begin{aligned} \varphi_j^* = & \frac{\langle \langle T_{jэТ1}^* \langle \langle \tau_1 \rangle \rangle^{1/2} \rangle_{q_{1j}} \rangle_{q_{2j}} - \langle T_{jэТ2}^* \langle \langle \tau_2 \rangle \rangle^{1/2} \rangle_{q_{3j}} \rangle_{q_{4j}} \rangle}{\langle \langle T_{jэТ2}^* \langle \langle \tau_2 \rangle \rangle^{1/2} \rangle_{q_{6j}} \rangle_{q_{7j}} \langle \exp \langle -\frac{\langle \langle R \rangle \rangle^2 \rangle_{q_{8j}}}{\langle \langle a_{эТ} \rangle \langle \tau_1 \rangle \rangle_{q_{9j}}} \rangle_{q_{10j}} \rangle_{q_{11j}} \rangle_{q_{12j}} - \langle T_{jэТ1}^* \langle \langle \tau_1 \rangle \rangle^{1/2} \rangle_{q_{13j}} \langle \exp \langle \frac{\langle \langle R \rangle \rangle^2 \rangle_{q_{15j}}}{\langle \langle a_{эТ} \rangle \langle \tau_1 \rangle \rangle_{q_{16j}}} \rangle_{q_{17j}} \rangle_{q_{18j}} \rangle_{q_{19j}} \rangle_{q_{20j}} ; \\ & \left. - \frac{\langle \langle R \rangle \rangle^2 \rangle_{q_{15j}}}{\langle \langle a_{эТ} \rangle \langle \tau_1 \rangle \rangle_{q_{16j}}} \rangle_{q_{17j}} \rangle_{q_{18j}} \right) \rangle_{q_{19j}} \end{aligned}$$

$$T_{jэТi}^* = T \left(\langle \langle [bU(T_{jэТi}(x, \tau))]_{\Delta_k U}^h \rangle_{q_{1j}} \langle m_T \rangle \rangle_{q_{2j}} \rangle_{q_{3j}} \right) \rangle_{q_{4j}}.$$

$$a_j^* = \langle \frac{\langle \langle x_1 \rangle \rangle^2 \rangle_{q_{1j}}}{\langle \langle \langle R \rangle \langle a_{эТ} \rangle \rangle^{1/2} \rangle_{q_{2j}} + \langle \langle z_j^* \rangle \rangle^{1/2} \rangle_{q_{3j}}} \rangle_{q_{4j}} \rangle_{q_{5j}}, \quad (2.46)$$

$$\begin{aligned} \text{где } z_j^* = & \langle \frac{\langle \langle \tau_2 \rangle - \langle \tau_1 \rangle \rangle_{q_{1j}}}{\langle \langle \tau_2 \rangle \langle \tau_1 \rangle \rangle_{q_{2j}}} \rangle_{q_{3j}} \langle \ln \langle \frac{\langle T_{j1}^* \langle \langle \tau_1 \rangle \rangle^{1/2} \rangle_{q_{4j}} \rangle_{q_{5j}}}{\langle T_{j2}^* \langle \langle \tau_2 \rangle \rangle^{1/2} \rangle_{q_{6j}} \rangle_{q_{7j}}} \rangle_{q_{8j}} \rangle_{q_{9j}} \rangle_{q_{10j}}. \end{aligned}$$

Разработан метод неразрушающего контроля толщины защитного покрытия изделия для

теплового воздействия при ограниченных условиях первого рода, когда на поверхность исследуемого объекта помещают измерительный зонд, контактная поверхность которого имеет постоянную заданную температуру, на 20 - 30 % ниже температуры термодеструкции исследуемого пленочного покрытия [24].

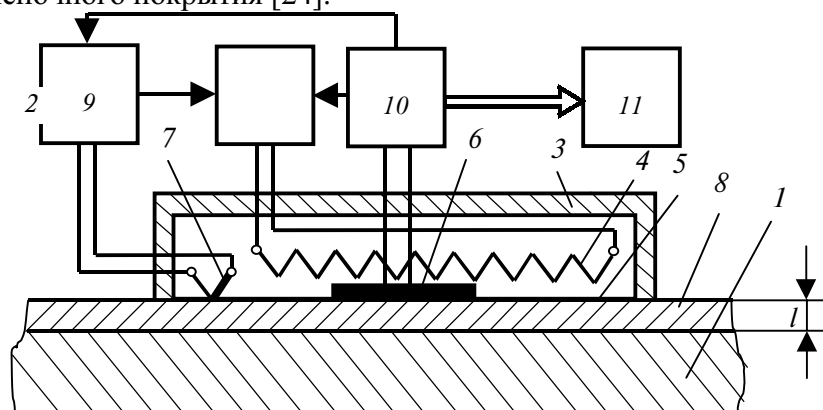


Рис. 2.10 Схема устройства, реализующего метод НК ТЗП изделий

На рис. 2.10 приведена схема устройства, реализующего предлагаемый способ. Схема содержит деталь 1 , блок 2 питания, корпус 3 измерительного зонда, встроенный нагреватель 4 , крышку 5 зонда, датчик 6 теплового потока, микротермопару 7 , измеряемое пленочное покрытие 8 , регулятор 9 , блок 10 регистрации теплового потока и блок 11 регистрации времени.

Метод осуществляют следующим образом.

Стабилизируют и контролируют начальную температуру T_1 детали 1 . Включением блока 2 питания предварительно прогревают измерительный зонд, выполненный в виде теплоизолированного корпуса 3 со встроенным нагревателем 4 и контактной крышкой 5 , на внешней поверхности которой смонтированы датчик 6 теплового потока и микротермопара 7 . Прогрев зонда осуществляют, не касаясь им контролируемой детали, до достижения и стабилизации на внешней поверхности крышки 5 температуры T_2 , максимально допустимой для детали 1 с пленочным покрытием 8 . Подготовленный таким образом зонд вводят в контакт с поверхностью детали, как показано на чертеже, и нагревают деталь, автоматически поддерживая температуру T_2 внешней поверхности крышки 5 регулировкой питания нагревателя 4 с помощью системы обратной связи: микротермопара 7 - регулятор 9 - блок 2 питания. В течение всего времени нагрева изделия фиксируют показания датчика 6 теплового потока с помощью блока 10 . Таким образом, нагревают изделие до достижения установившегося значения теплового потока q в системе зонд - изделие. Длительность τ нагрева детали от момента контакта зонда с поверхностью детали до стабилизации теплового потока автоматически измеряют с помощью блока 11 , вход которого связан с выходом блока 10 . Связь между блоками 2 и 10 обеспечивает автоматическое выключение напряжения питания нагревателя 4 в момент стабилизации теплового потока q . Если в качестве блока 10 используют микропроцессор, то благодаря связи его с регулятором 9 оператор может непосредственно с клавиатуры блока 10 задавать уровень температуры T_2 для различных деталей. По измеренным значениям T_2 , q и τ с учетом начальной температуры T_1 , и теплофизических свойств материалов детали 1 и покрытия 8 определяют толщину l покрытия по следующей зависимости

$$l = \sqrt{a_{\text{п}} \tau \left[\ln \frac{\lambda_{\text{п}} \sqrt{a_{\text{т}}} - \lambda_{\text{т}} \sqrt{a_{\text{п}}}}{\lambda_{\text{п}} \sqrt{a_{\text{т}}} + \lambda_{\text{т}} \sqrt{a_{\text{п}}}} - \ln \left(0,5 - \frac{q \sqrt{\pi \tau a_{\text{п}}}}{2 \Delta T \lambda_{\text{п}}} \right) \right]}$$

где $\Delta T = T_2 - T_1$; $\lambda_{\text{т}}$ и $\lambda_{\text{п}}$ - коэффициенты теплопроводности соответственно детали и покрытия; $a_{\text{т}}$ и $a_{\text{п}}$ - коэффициенты температуропроводности соответственно детали и покрытия.

Предлагаемым методом, не требующим наличия эталонной детали-свидетеля и легко поддающимся автоматизации, обеспечивается высокая точность определения толщины покрытия благодаря снижению относительной погрешности температурно-временных измерений при достаточно длительном процессе до регуляризации теплового потока, т.е. благодаря увеличенному количеству подводимой суммарной тепловой энергии.

Уравнение измерений для разработанного метода НК ТЗП имеет вид

$$l_j^* = \left\{ \left\langle a_{\text{п}} \right\rangle_{q_{1j}} \left\langle \tau \right\rangle_{q_{2j}} \left\langle \ln \left\langle \frac{\langle \langle \lambda_{\text{п}} \rangle_{q_{3j}} \langle \sqrt{a_{\text{т}}} \rangle_{q_{4j}} \langle q_{5j} \rangle - \langle \langle \lambda_{\text{п}} \rangle_{q_{10j}} \langle \sqrt{a_{\text{т}}} \rangle_{q_{11j}} \langle q_{12j} \rangle - \langle \langle \lambda_{\text{т}} \rangle_{q_{6j}} \langle \sqrt{a_{\text{п}}} \rangle_{q_{7j}} \langle q_{8j} \rangle \langle q_{9j} \rangle_{q_{17j}} \langle q_{18j} \rangle - \langle \langle \lambda_{\text{т}} \rangle_{q_{13j}} \langle \sqrt{a_{\text{п}}} \rangle_{q_{14j}} \langle q_{15j} \rangle \langle q_{16} \rangle}{2} \right\rangle \frac{\langle \sqrt{\pi \tau} \rangle_{q_{18j}} \langle q_{19j} \rangle \langle a_{\text{п}} \rangle_{q_{20j}} \langle q_{21j} \rangle}{\langle \Delta T_j^* \rangle_{q_{22j}} \langle \lambda_{\text{п}} \rangle_{q_{23j}} \langle q_{24j} \rangle} \right\rangle \right\}^{\frac{1}{2}}$$

Разработан также метод неразрушающего контроля толщины пленочного покрытия изделия, который осуществляется следующим образом [51].

На поверхность изделия без покрытия помещают плоский источник тепловой энергии постоянной мощности прямоугольной формы и теплоизолируют его от внешней среды. Осуществляют нагрев поверхности изделия и измеряют избыточную температуру в центре площадки контакта поверхности с источником. При установившемся тепловом режиме эта температура становится постоянной, т.е. $T_1 = \text{const}$. Затем помещают источник на поверхность изделия с покрытием, теплоизолируют его, осуществляют нагрев поверхности и измеряют значение избыточной температуры $T_2 = \text{const}$ при установившемся режиме в центре площадки контакта.

Искомую толщину покрытия $h_{\text{п}}$ определяют по формуле, полученной из анализа соответствующей математической модели

$$h_{\pi} = \Delta T \lambda_{\pi} l b / q, \quad (2.47)$$

где $\Delta T = T_2 - T_1$; λ_{π} - теплопроводность материала покрытия; q - мощность установившегося теплового потока от источника к исследуемому изделию; l и b - размеры источника.

Чтобы избежать погрешностей, вносимых в определение толщины покрытия неточностью значений λ_{π} и q , изготавливают эталонный образец, идентичный изделию с покрытием известной толщины, которая может быть найдена, например, с помощью разрушающих методов. Осуществляют нагрев поверхности эталонного образца без покрытия и с покрытием с помощью одного и того же источника тепловой энергии, измеряют значения избыточных температур при установившемся тепловом режиме в центре площадок контакта поверхности с источником и на основе выражения (2.47) искомую толщину покрытия изделия определяют по формуле

$$h_{\pi} = h_{\text{эт}} \Delta T / \Delta T_{\text{эт}},$$

где $h_{\text{эт}}$ - толщина покрытия на эталонном образце; ΔT , $\Delta T_{\text{эт}}$ - соответственно, разность установившихся избыточных температур изделия и эталонного образца с покрытием и без покрытия.

Способ может быть использован в системах автоматического неразрушающего контроля толщины пленочных покрытий изделий в различных отраслях промышленности.

Уравнение измерений для разработанного метода НК ТЗП имеет вид

$$h_{nj}^* = \frac{\langle \langle \Delta T_j^* \rangle_{q_{1j}} \langle \lambda_n \rangle_{q_{2j}} \langle l \rangle \langle b \rangle \rangle_{q_{3j}}}{\langle Q \rangle_{q_{4j}}} \rangle_{q_{5j}}.$$

2.1.3 АЛГОРИТМЫ, СТРУКТУРЫ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ЦЕПЕЙ И УРАВНЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ ТФХ ПРИ ЧАСТОТНО-ИМПУЛЬСНОМ ТЕПЛОМ ВОЗДЕЙСТВИИ НА ИССЛЕДУЕМЫЕ ОБЪЕКТЫ

В данном разделе рассмотрим ряд алгоритмов НК ТФХ, в которых тепловое воздействие на объект измерения осуществляется от источника в виде нагретой нити (линейного источника).

При этом тепловая энергия от источника подается на исследуемый объект в виде импульсов различной частоты, скважности и амплитуды. В экспериментальной теплофизике такое воздействие часто называют частотно-импульсным или же импульсно-динамическим.

Отличительной особенностью импульсно-динамических методов измерения ТФХ материалов является то, что измерительная информация в ходе теплофизического

эксперимента регистрируется в дискретной форме (число или частота тепловых импульсов), что позволяет легко преобразовать измерительную информацию в цифровую форму, облегчает реализацию методов измерения на базе процессорных устройств.

Разработан метод НК ТФХ материалов и готовых изделий, сущность которого заключается в следующем [11].

На теплоизолированную от внешней среды поверхность исследуемого тела помещают линейный источник тепла заданной мощности и осуществляют тепловое воздействие на тело импульсами с заданной скважностью (для материалов с λ от 0,05 до 5 Вт/м·К интервал между импульсами следует задавать в диапазоне от 0,1 до 60 с). Затем фиксируют число импульсов, нанесенных на поверхность тела от начала теплового воздействия до момента установления неизменного значения температуры в точке контроля, расположенной на заданном ближнем расстоянии x_1 от линии действия источника. После этого фиксируют число импульсов от начала теплового воздействия до момента, когда температура во второй точке, удаленной на большее расстояние x_2 от источника теплового воздействия, достигнет установившегося значения. Установившееся значение температуры в точке контроля x_1 и x_2 наступает тогда, когда очередной тепловой импульс из серии импульсов теплового воздействия не изменяет температуры, соответственно, в начале в точке x_1 , затем в точке x_2 . Зная значения этих температур и число тепловых импульсов до насыщения (наступления теплового баланса) в первой и второй точке контроля, искомые теплофизические характеристики определяют по формулам, полученным на основании следующих рассуждений.

Температурное поле в результате действия n импульсов соответственно в точках x_1 и x_2 на основании (1.23) описывается зависимостями:

$$T_{\text{уст}1}(x_1, \tau) = \frac{Q}{2\pi\lambda} \sum_{i=1}^{n_1} \frac{1}{\tau - \tau_i} \exp\left[-\frac{x_1^2}{4a(\tau - \tau_i)}\right]; \quad (2.48)$$

$$T_{\text{уст}2}(x_2, \tau) = \frac{Q}{2\pi\lambda} \sum_{i=1}^{n_2} \frac{1}{\tau - \tau_i} \exp\left[-\frac{x_2^2}{4a(\tau - \tau_i)}\right]. \quad (2.49)$$

После несложных математических преобразований (2.48) и (2.49), используя соотношение $\tau_i = i\Delta\tau$, где $\Delta\tau$ - интервал времени между передними фронтами тепловых импульсов, а i - натуральный ряд чисел, получим следующие формулы для расчета искомых теплофизических характеристик:

$$a = \frac{\left(\frac{x_2^2}{n_2} - \frac{x_1^2}{n_1}\right)}{4\Delta\tau \ln(n_1/n_2)}; \quad (2.50)$$

$$\lambda = \frac{Q}{2\pi T_{\text{уст}1}(x_1, \tau)} \sum_{i=1}^{n_1} \frac{1}{\tau_i} \exp\left(-\frac{x_1^2}{4a\tau_i}\right), \quad (2.51)$$

где x_1, x_2 - соответственно, расстояние от линии действия тепла до точек контроля температуры; n_1 - число импульсов, нанесенных на поверхность исследуемого тела от источника тепла до момента времени, когда температура в точке x_1 достигает установившегося значения, равного $T_{уст1}(x_1)$; n_2 - число импульсов, поданных на тело от источника тепла до момента времени, когда температура в точке x_2 достигает установившегося значения; Q - мощность линейного импульсного источника тепла.

Таким образом, определив число импульсов теплового воздействия n_1 и n_2 и, зная значение установившейся температуры в точке x_1 и мощность одного теплового импульса, по формулам (2.50) и (2.51) можно рассчитать значения коэффициентов тепло- и температуропроводности исследуемых тел.

Определение числа нанесенных импульсов n_1 и n_2 на поверхность тела источником тепла от начала теплового воздействия до момента, когда температура в точке контроля достигнет неизменного значения, обеспечивает требуемую точность и помехозащищенность при определении теплофизических характеристик.

Схема измерительной цепи для представленного выше алгоритма измерения приведена на рис. 2.11.

В этой схеме: ИТ - импульсный источник тепла, осуществляющий воздействие на объект измерения ОИ импульсами n_i с интервалом $\Delta\tau$; ДУ₁, ДУ₂ - дифференцирующие устройства, определяющие момент наступления установившегося значения термограммы нагрева, соответственно, в точках x_1 и x_2 ; r_{n_1} и r_{n_2} - идентификаторы управляющих команд, по которым информация в первом случае со счетчика СЧ и АЦП₁, а во втором случае - только со счетчика через АЦП₂ поступает в оперативную память процессора Пр.

Уравнения измерений для этого случая в соответствии с формулами (2.50) и (2.51) имеют следующий вид

$$a_j^* = \frac{\left\langle \frac{\langle (x_2)^2 \rangle_{q_{1j}}}{n_{1j}^*} \right\rangle_{q_{2j}} - \left\langle \frac{\langle (x_1)^2 \rangle_{q_{3j}}}{n_{2j}^*} \right\rangle_{q_{4j} > q_{5j}}}{\left\langle 4 \Delta\tau \right\rangle_{q_6j} \left\langle \ln \frac{\langle n_{1j}^* \rangle}{\langle n_{2j}^* \rangle} \right\rangle_{q_{6j} > q_{7j} > q_{8j}} >_{q_{9j}},$$

$$\lambda_j^* = \left\langle \frac{\langle p_0 \rangle}{2\pi T_{уст1}} \right\rangle_{q_{1j}} \left\langle \sum_{i=1}^{n_2} \frac{1}{\langle \tau_i \rangle} \exp \left[-\frac{\langle (x_1)^2 \rangle_{q_{3j}}}{4a_j^* \langle \tau_i \rangle} \right] \right\rangle_{q_{4j} > q_{5j}} >_{q_{6j} > q_{7j} > q_{8j} > q_{9j}}.$$

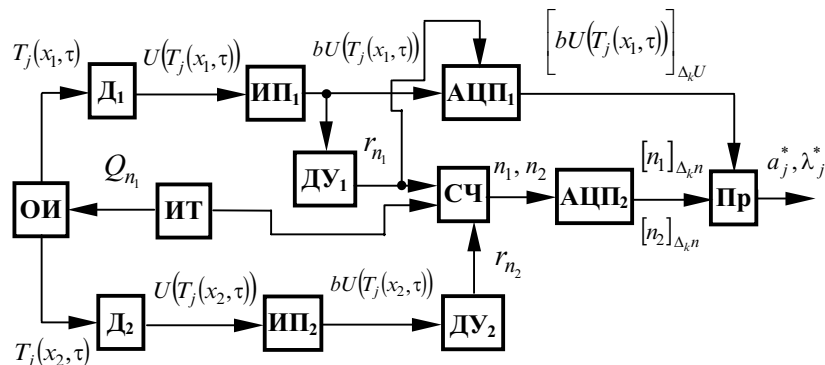


Рис. 2.11 Структура процессорного измерителя для определения ТФХ при импульсном тепловом воздействии на исследуемый образец

$$a = \frac{VR_1}{2\ln(T_1/2T_2)}; \quad (2.72)$$

$$\lambda = \frac{T_3}{\pi T_2^2 R_1} \exp\left[-\frac{V}{2a}(R_2 - x)\right]. \quad (2.73)$$

Таким образом, измерив значения предельных избыточных температур T_1 , T_2 и T_3 и зная расстояния R_1 и R_2 , по формулам (2.72) и (2.73) определяют искомые коэффициенты a и λ .

Предложенный алгоритм измерения позволяет существенно снизить влияние тепловых потерь в окружающую среду за счет конвективного теплообмена, потерь тепла за счет поглощения части энергии промежуточной средой и т.д., так как в расчетных формулах исключено влияние погрешности мощности p источника тепла на конечный результат.

Для исключения влияния на результаты измерений погрешности определения мощности теплового воздействия p на исследуемый объект разработан также следующий алгоритм измерения. Точечный источник тепловой энергии 2 и термодатчик 3 перемещают с постоянной скоростью V над поверхностью эталонного материала, причем термодатчик движется по линии перемещения точечного источника с фиксированной задержкой относительно источника, равной R_1 . При этом термодатчик будет контролировать избыточную предельную температуру, величина которой определяется выражением

$$T_{\text{эт}} = \frac{p}{2\pi\lambda_{\text{эт}}R_1}. \quad (2.74)$$

Тогда мощность источника определяется как:

$$p = 2\pi\lambda_{\text{эт}}T_{\text{эт}}R_1. \quad (2.75)$$

Подставив выражение (2.75) в (2.69), получим

$$\lambda = \frac{T_{\text{эт}}\lambda_{\text{эт}}}{T_1} \left[-\frac{V}{2a}(R_1 - x)\right]. \quad (2.76)$$

Если же перемещать источник энергии и термодатчик по исследуемому телу так же как и по эталону, то для определения теплопроводности можно использовать формулу в виде

$$\lambda = \frac{T_{\text{эт}}\lambda_{\text{эт}}}{T_1}. \quad (2.77)$$

Структура измерительной цепи для изложенного выше бесконтактного алгоритма приведена на рис. 2.16.

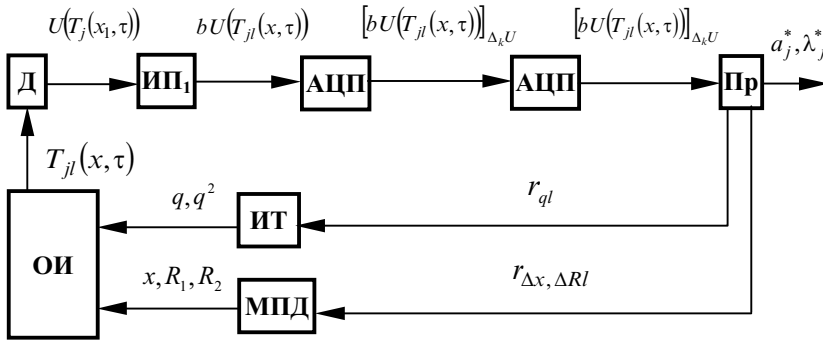


Рис. 2.16 Схема измерительной цепи бесконтактного измерения ТФХ материалов

В схеме на рис. 2.16 через МПД обозначен механизм перемещения датчика относительно термоприемника; $r_{\Delta x, \Delta Rl}$ - идентификатор команды, по которой датчик меняет свое положение относительно источника тепла ИТ, причем на первом цикле при $l=1$ измеряется температура $T_1(\tau)$ на линии движения A ; при $l=2$ измеряется температура на линии B , а при $l=3$ измеряется температура на линии B при мощности p^2 , при этом в идентификаторе r_{qi} $l=2$.

Уравнения измерений, в соответствии с формулами (2.72) и (2.73), имеют вид:

$$a_j^* = \left\langle \frac{\langle\langle V \rangle\rangle_{q_{1j}} \langle R_1 \rangle_{q_{1j}}}{2 \langle \ln \langle T_{1j}^* / T_{2j}^* \rangle_{q_{2j}} \langle q_{3j} \rangle_{q_{4j}}} \right\rangle_{q_{5j}} ; \quad (2.78)$$

$$\lambda_j^* = \left\langle \left\langle \frac{T_{3j}^*}{2\pi \langle (T_{2j}^*)^2 \rangle_{q_{1j}} \langle R_1 \rangle_{q_{2j}}} \right\rangle_{q_{3j}} \exp \left\langle \frac{\langle\langle V \rangle\rangle_{q_{4j}} \langle R_1 - x \rangle_{q_{4j}}}{2 \langle a_j^* \rangle_{q_{6j}}} \right\rangle_{q_{7j}} \right\rangle_{q_{8j}}$$

$$\rightarrow \left\langle \frac{\langle q_{4j} \rangle_{q_{5j}}}{q_{7j} \langle q_{8j} \rangle_{q_{9j}}} \right\rangle_{q_{9j}} . \quad (2.79)$$

При использовании эталона уравнение измерения для этого изложенного метода имеет вид

$$\lambda_j^* = \left\langle \left\langle \frac{\langle\langle T_{j\text{эт}}^* \rangle\rangle_{q_{1j}} \langle \lambda_{\text{эт}} \rangle_{q_{1j}}}{\langle T_{j1}^* \rangle} \right\rangle_{q_{2j}} \left\langle \frac{\langle\langle V \rangle\rangle_{q_{3j}} \langle R_1 - x \rangle_{q_{4j}}}{2 a_j^*} \right\rangle_{q_{5j}} \right\rangle_{q_{6j}}$$

$$q_{6j} > q_{7j} > q_{8j} \quad (2.80)$$

Рассмотрим далее бесконтактный метод НК ТФХ материалов [26], который основан также на тепловом воздействии от подвижного точечного источника тепла на объект измерения. На рис. 2.17 приведена схема расположения источника тепла и термоприемника относительно исследуемого образца в процессе измерения.

Схема содержит точечный источник тепла постоянной мощности I , термоприемник 2 , регистрирующий температуру нагретой поверхности по ее электромагнитному излучению, перемещаемые с постоянной скоростью V относительно исследуемого образца 3 . Выход термоприемника 2 подключен к первому входу вычитающего устройства 4 , на второй вход которого подается с блока 5 задания температур напряжение, соответствующее заданной температуре T . Разностный сигнал с выхода вычитающего устройства 4 через усилитель мощности 6 поступает на реверсивный двигатель 7 , вал которого кинематически соединен с механизмом перемещения тер-

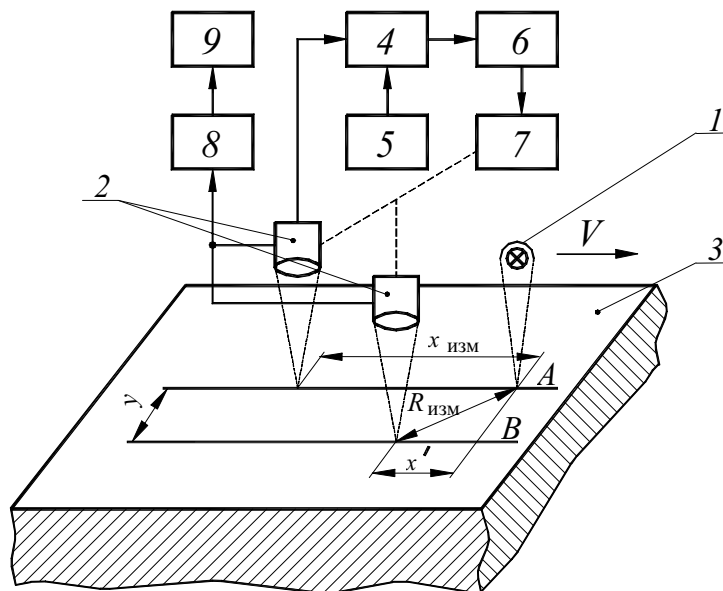


Рис. 2.17 Схема реализации алгоритма бесконтактного измерения ТФХ материалов

моприемника 2 относительно источника тепла 1 . Кроме того, термоприемник 2 соединен с преобразователем 8 расстояния перемещения в напряжение постоянного тока, выход которого подключен к информационному входу микропроцессора 9 .

На чертеже обозначены также: A - линия движения источника тепла; B - параллельная ей линия на расстоянии y от нее; x - расстояние между точкой подвода тепла и точкой регистрации избыточной температуры на линии A ; R - расстояние между точкой подвода тепла и точкой регистрации избыточной температуры на линии B ; x' - расстояние по линии A между точкой подвода тепла и проекцией на эту линию точки измерения температуры при ее движении по линии B .

Алгоритм измерения осуществляют следующим образом. Включают источник 1 тепла и начинают его перемещение и термоприемника 2 над исследуемым образцом 3 с постоянной скоростью V . Термоприемник 2 , движущийся при этом на линии перемещения пятна нагрева источника теплоты с некоторым отставанием от него, зафиксирует избыточную температуру нагреваемой поверхности, соответствующую установившемуся квазистационарному режиму

нагрева. Затем постепенно изменяют расстояние отставания точки контроля избыточной установившейся температуры от точки подвода теплоты в соответствии с зависимостью $x = x_0 + \Delta x$, где x_0 - начальное расстояние между точкой измерения избыточной температуры и точкой подвода тепла; $\Delta = k[T_3 - T(x)] = k \Delta T(x)$, где T_3 - заданное значение избыточной температуры, величина которой устанавливается таким образом, чтобы с помощью используемой контрольно-измерительной аппаратуры ее можно было бы измерить с заданной погрешностью; $T(x)$ - избыточная температура в точке контроля; k - коэффициент пропорциональности. Разностный сигнал $\Delta T(x)$ с выхода вычитающего устройства через усилитель мощности 6 поступает на реверсивный двигатель 7, который в зависимости от знака и величины рассогласования перемещает в ту или иную сторону (в сторону уменьшения или увеличения расстояния между термодатчиком и источником) термодатчик 2 относительно источника тепла 1.

Изменение расстояния (перемещение термодатчика) между точкой измерения температуры и точкой подвода теплоты осуществляют до тех пор, пока измеряемая избыточная температура поверхности исследуемого образца станет равной заданному значению T_3 , т.е. $T_3 = T(x)$, $\Delta T(x) = 0$, а разностный сигнал на выходе вычитающего устройства 4 отсутствует. При этом датчик расстояния 8 преобразует установившееся расстояние между точкой подвода теплоты x в напряжение постоянного тока, значение которого заносится в оперативную память микропроцессора. Затем перемещают термодатчик 2 на вторую линию движения (линия B на чертеже), параллельную линии движения A источника и смещенную от нее на расстояние y и повторяют вышеописанные измерительные процедуры.

При этом информация об установившемся расстоянии R между точкой измерения температуры и точкой подвода теплоты преобразуется блоком 8 в электрический сигнал и заносится в оперативную память микропроцессора 9. Затем по команде оператора на основе полученной измерительной информации x и R осуществляется расчет теплофизических характеристик по алгоритму, построенному в соответствии с формулами, которые получены на основании следующих рассуждений. Известно [27], что при нагреве поверхности полубесконечного в тепловом отношении тела подвижным точечным источником энергии избыточная предельная температура поверхности этого тела в точке, перемещающейся вслед за источником по линии его движения со скоростью, равной скорости перемещения источника, определяется формулой

$$T(x) = \frac{P}{2\pi\lambda x}. \quad (2.81)$$

Поскольку расстояние между точкой контроля температуры и центром пятна нагрева адаптивно изменяется до момента наступления равенства $T(x) = T_3$, то в соответствии с формулой (2.81) коэффициент теплопроводности определяется зависимостью

$$\lambda = \frac{P}{2\pi T_3 x_{\text{изм}}}. \quad (2.82)$$

Известно также, что при нагреве поверхности полубесконечного тела подвижным точечным источником энергии избыточная предельная температура поверхности этого тела в точке, перемещающейся вслед за источником со скоростью источника по линии, параллельной линии движения источника, определяется формулой [20]

$$T(R) = \frac{p}{2\pi\lambda R} \exp\left[-\frac{V}{2a}(R-x)\right], \quad (2.83)$$

где R - расстояние от точки измерения температуры исследуемого тела до пятна нагрева поверхности тела сосредоточенным источником энергии, причем $R = \sqrt{x^2 + y^2}$.

Поскольку расстояние R адаптивно изменяется до момента наступления равенства $T(R) = T_3$, используя формулу (2.83), после несложных математических преобразований, получим следующую формулу для определения коэффициента температуропроводности исследуемого материала

$$a = \frac{V \left(R_{\text{изм}} - \sqrt{R_{\text{изм}}^2 - y^2} \right)}{\ln(R_{\text{изм}}/x_{\text{изм}})}, \quad (2.84)$$

где $R_{\text{изм}}$ - установившееся расстояние между точкой контроля избыточной температуры и центром пятна нагрева источника энергии (см. рис. 2.17).

Для определения температуропроводности можно использовать формулу в виде

$$a = \frac{V(R_{\text{изм}} - x')}{\ln(R_{\text{изм}}/x_{\text{изм}})},$$

где x' - расстояние между проекцией точки измерения температуры на линию движения источника тепла (линия A) и центром пятна нагрева. При предварительном проведении эксперимента, в соответствии с предлагаемым методом на эталонном образце, расчетные формулы для определения искомых теплофизических характеристик будут выглядеть следующим образом:

$$\lambda = \lambda_{\text{эт}} \frac{x_{\text{изм.эт}}}{x_{\text{изм}}};$$

$$a = a_{\text{эт}} \frac{R_{\text{изм}} - \sqrt{R_{\text{изм}}^2 - y^2}}{R_{\text{изм.эт}} - \sqrt{R_{\text{изм.эт}}^2 - y^2} - \frac{2a_{\text{эт}}}{V} \ln\left(\frac{R_{\text{изм.эт}}}{R_{\text{изм}}}\right)},$$

где $\lambda_{\text{эт}}$, $a_{\text{эт}}$ - соответственно, коэффициенты тепло- и температуропроводности эталонного материала; $x_{\text{изм.эт}}$ и $R_{\text{изм.эт}}$ - соответственно, установившиеся расстояния между точкой контроля избыточной температуры и центром пятна нагревателя при движении

термоприемника над эталоном по линии источника и параллельной ей линии при условии, что величина контролируемой избыточной температуры равна заданному значению $T_{зад}$.

Представленный алгоритм измерения обеспечивает возможность регистрации избыточных температур, выбранных исходя из метрологических характеристик используемой аппаратуры и с учетом теплофизических свойств объектов исследований. Адаптивный поиск координат измерения температуры, соответствующих оптимальным приращениям температур, позволяет, по сравнению с известными техническими решениями, увеличивать точность измерений, расширить функциональные возможности метода, в частности, за счет расширения класса испытываемых материалов.

Наиболее полное использование положительного эффекта метода, обусловленного адаптационным поиском оптимального значения регистрируемой величины, достигается при выборе значений избыточных температур, регистрируемых на линии движения и на параллельной ей линии, равными между собой. Этим обеспечивается возможность выбора на оптимальном уровне избыточных температур на двух линиях их регистрации.

Структура процессорного измерения ТФХ имеет при этом вид, представленный на рис. 2.18.

В схеме рис. 2.18 D_2 - датчик расстояния между термоприемником и источником тепла; при $l=1$ в первом цикле измеряется расстояние x_j при движении датчика и термоприемника по линии A ; во втором цикле при $l=2$ измеряется расстояние R_j при движении по линии B ; $r_{ji\Delta T}$ - идентификатор команд на нахождение разности ΔT в i -ом цикле; $r_{jei\Delta x, \Delta R}$ - идентификатор команд на изменение расстояния Δx ($l=1$), либо ΔR ($l=2$) в i -ом цикле.

Уравнения измерений в этом случае, в соответствии с формулами (2.82) и (2.84), имеют вид:

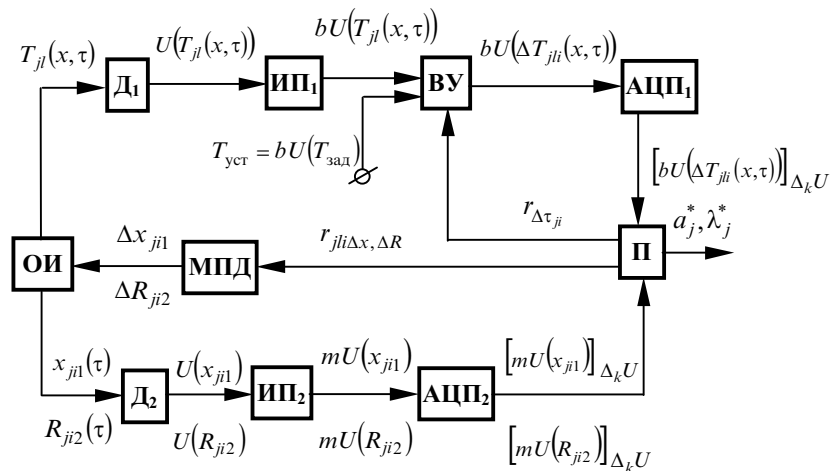


Рис. 2.18 Структура измерительной цепи бесконтактного контроля ТФХ материалов и изделий

$$\lambda_j^* = \left\langle \frac{\langle Q_0 \rangle}{2\pi \langle T_{зад} \rangle x_j^*} \right\rangle_{q_{2j}};$$

$$a_j^* = \left\langle \frac{\langle \langle V \rangle \left(\langle R_j^* \rangle_{q_{1j}} - \left[\langle R_j^{*2} \rangle \right]_{q_{2j}} - \langle (y) \rangle^2 \right)^{1/2}}{\langle \ln \left(\frac{R_j^*}{x_j^*} \right) \rangle_{q_{6j}}} \right\rangle_{q_{7j}}$$

$$\rightarrow \frac{\langle \dots \rangle_{q_{4j}} \rangle_{q_{5j}}}{\langle \dots \rangle_{q_{8j}}},$$

где $x_j^* = \langle X(\langle \langle [nU(x_j, \tau)]_{\Delta_k U}^h \rangle_{q_{1j}} \langle m_x \rangle_{q_{2j}} \rangle_{q_{3j}}) \rangle_{q_{4j}}$; $m_x = \frac{\Delta_k x}{x_1 n_H}$ - коэффициент масштабирования;
 n - коэффициент нормализации с номинальным значением n_H ;

$$R_j^* = \langle R(\langle \langle [nU(R_j, \tau)]_{\Delta_k U}^h \rangle_{q_{1j}} \langle m_R \rangle_{q_{2j}} \rangle_{q_{3j}}) \rangle_{q_{4j}}.$$

Далее рассмотрим метод бесконтактного контроля ТФХ материалов, сущность которого заключается в следующем [16].

Над исследуемым изделием помещают точечный источник тепловой энергии и термоприемник, сфокусированный в точку поверхности, подверженной тепловому воздействию. Включают источник энергии и начинают перемещение его и термоприемника над исследуемым изделием с постоянной скоростью. Затем постепенно смещают точку контроля предельной избыточной температуры от пятна нагрева по линии движения источника в сторону отставания до достижения заданного расстояния R_1 между источником и термоприемником, измеряя при этом интегральное по расстоянию значение избыточной температуры $S_1(R)$ на отрезке линии движения от пятна нагрева до точки контроля. Осуществляют измерение избыточной предельной температуры в точке R_1 . Далее, переместив точку контроля температуры в центр пятна нагрева, удаляют постепенно точки контроля избыточной температуры от пятна нагрева в сторону отставания от источника по произвольной выбранной прямой линии до тех пор, пока контролируемое интегральное по расстоянию перемещения значение избыточной температуры станет равным значению $S_1(R_{x_1})$ (рис. 2.19), т.е. $S_1(R) = S_2(R_{x_1})$. Измеряют найденное значение расстояния R_{x_1} и значение избыточной температуры $T_2(R_{x_1})$ при этом расстоянии. Затем, переместив точку контроля температуры в центр пятна нагрева и изменив мощность источника на определенную величину, смещают точку контроля избыточной температуры от пятна нагрева по линии движения источника в сторону отставания от него до тех пор, пока контролируемое интегральное по расстоянию перемещения значение температуры станет равным интегральным значениям $S_1(R_1)$ или $S_1(R_{x_1})$ (рис. 2.19), т.е. $S_1(R_1) = S_2(R_{x_2})$. Измеряют найденное значение расстояния R_{x_2} и значение избыточной температуры при этом расстоянии точки контроля от центра пятна нагрева, а искомые теплофизические характеристики определяют по зависимостям, полученным на основании следующих рассуждений.

Известно, что при нагреве поверхности полубесконечного в тепловом отношении тела подвижным источником точечной энергии избыточная предельная температура поверхности этого тела в точках, перемещающихся вслед за источником по линии его движения со скоростью, равной скорости перемещения источника энергии, определяется зависимостью

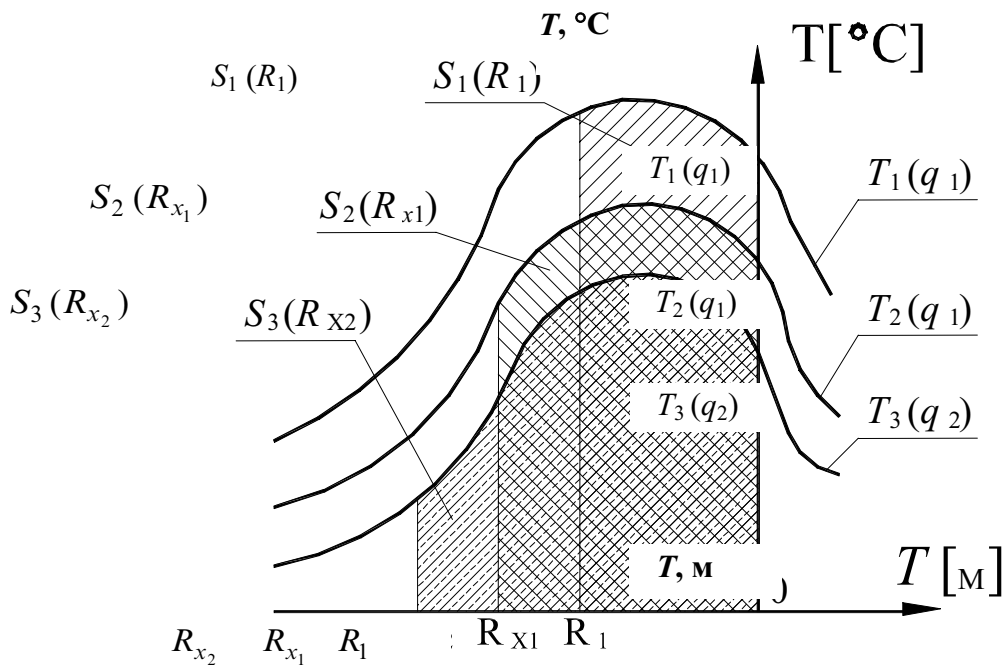


Рис. 2.19 Интегральные значения температур в контролируемом объекте

$$T_T(R) = \frac{q}{2\pi\lambda R},$$

где q - мощность источника; λ - коэффициент теплопроводности изделия; R - расстояние между центром пятна нагрева и точкой измерения температуры.

Поскольку поверхность исследуемого изделия в процессе эксперимента не теплоизолирована от окружающей среды, то после нанесения теплового воздействия часть тепла от нагретой поверхности изделия будет отводиться за счет конвективного и лучистого теплообмена в окружающую среду. Поэтому значение избыточной предельной температуры в точке, перемещающейся вслед за источником по линии его движения и отстающей от него на расстояние R_1 , будет определяться зависимостью

$$T_1(R_1) = \frac{q - \Delta q_{\text{пот}}}{2\pi\lambda R_1}, \quad (2.85)$$

где $\Delta q_{\text{пот}}$ - потери тепловой мощности в окружающую среду за счет конвективного и лучистого теплообмена.

Из теории теплопроводности известно [3], что тепловой поток при конвективном и лучистом теплообмене между поверхностью нагретого тела и окружающей средой определяется выражением

$$q = \alpha [T_T(R) - T_c],$$

где $\alpha = \alpha_k + \alpha_{\text{луч}}$ - суммарный коэффициент теплообмена, Вт/м²·К; α_k - коэффициент конвективного теплообмена; $\alpha_{\text{луч}}$ - коэффициент лучистого теплообмена; T_c - температура окружающей среды.

Потери тепловой энергии в окружающую среду при прохождении точки контроля температуры расстояния от пятна нагрева до точки с координатой R_1 при помощи q_1 будут определяться выражением

$$\Delta q_1 = \alpha \int_0^{R_1} [T_1(R) - T_c] dR = S_1(R_1). \quad (2.86)$$

Чтобы потери энергии в окружающую среду при мощности источника q_1 были равны потерям Δq_1 , экспериментально находят такое расстояние R_{x_1} между точкой контроля избыточной температуры и пятном нагрева, при котором

$$\Delta q_2 = \alpha \int_0^{R_{x_1}} [T_2(R) - T_c] dR = S_2(R_{x_1}) = S_1(R_1). \quad (2.87)$$

При нагреве поверхности исследуемого тела подвижным точечным источником энергии избыточная предельная температура в точке, перемещающейся вслед за источником со скоростью источника и на расстояния R_{x_1} от него, определяется зависимостью

$$T_2(R) = \frac{q_1 - \Delta q_2^{\text{пот}}}{2\pi\lambda R_{x_1}} \exp\left[-\frac{V}{2a}(R_{x_1} - x')\right], \quad (2.88)$$

где V - скорость движения источника и термоприемника; a - коэффициент температуропроводности исследуемого материала; x' - расстояние между центром пятна нагрева и проекцией точки R_x на линии движения источника тепла.

Поскольку из (2.86) и (2.87) следует, что $\Delta q_1^{\text{пот}} = \Delta q_2^{\text{пот}}$, то после несложных математических преобразований выражений (2.85) и (2.88), получим формулу для расчета температуропроводности в виде

$$a = \frac{V(R_{x_1} - x')}{2 \ln \left[\frac{T_1(R_1)R_1}{T_2(R_{x_1})R_{x_1}} \right]}. \quad (2.89)$$

Чтобы тепловые потери в окружающую среду от конвективного и лучистого теплообмена при измененной мощности источника q_2 были бы равны потерям $\Delta q_1^{\text{пот}}$, экспериментально определяют такое расстояние R_{x_2} по линии движения источника между точкой контроля температуры и пятном нагрева, при котором

$$\Delta q_3^{\text{пот}} = \alpha \int_0^{R_{x_2}} [T_3(R) - T_c] dR = S_3(R_{x_2}) = S_1(R_1).$$

При этом значение контролируемой температуры будет определяться выражением

$$T_3(R) = \frac{q_2 - \Delta q_3^{\text{пот}}}{2\pi\lambda R_{x_2}}. \quad (2.90)$$

Так как из условия эксперимента $\Delta q_1^{\text{пот}} = \Delta q_3^{\text{пот}}$, то после несложных математических преобразований выражений (2.85) и (2.90) получим формулу для расчета теплопроводности в следующем виде

$$\lambda = \frac{q_1 - q_2}{2\pi [T_1(R_1)R_1 - T_3(R_{x_2})R_{x_2}]}. \quad (2.91)$$

Таким образом, определив расстояния R_{x_1} и R_{x_2} , при которых тепловые потери в окружающую среду с поверхности исследуемого тела будут равны потерям при движении термоприемника на заданное расстояние R_1 от источника тепла, а также измерив соответствующие этим трем расстояниям значения предельных избыточных температур, зная мощность источника и скорость его движения над поверхностью тела, по полученным формулам можно определить искомые теплофизические характеристики.

Уравнения измерений для данного метода бесконтактного контроля имеют вид:

$$a_j^* = \frac{\langle\langle V \rangle\rangle \langle\langle R_{x1j}^* \rangle_{q_{1j}} - \langle\langle x_j^* \rangle_{q_{2j}} \rangle_{q_{3j}} \rangle_{q_{4j}}}{2 \ln \left[\frac{T_{1j}^*(R_1) \rangle_{q_{5j}} \langle\langle R_1 \rangle\rangle_{q_{6j}}}{\langle\langle T_{2j}^*(R_{x1}) \rangle_{q_{7j}} \langle\langle R_{x1j}^* \rangle_{q_{8j}} \rangle_{q_{9j}}} \right] \rangle_{q_{10j}} \rangle_{q_{11j}}};$$

$$\lambda_j^* = \frac{\langle\langle Q_1 \rangle - \langle\langle Q_2 \rangle\rangle_{q_{1j}}}{2\pi \left[\left(\langle\langle T_{1j}^* \rangle_{q_{2j}} \langle\langle R_1 \rangle\rangle_{q_{3j}} - \langle\langle T_{3j}^*(R_{x2}) \rangle_{q_{4j}} \langle\langle R_{x2j}^* \rangle_{q_{5j}} \right) \right] \rangle_{q_{6j}} \rangle_{q_{7j}} \rangle_{q_{8j}} \rangle_{q_{9j}}};$$

Предложенный метод позволяет учесть в результатах измерения искомых теплофизических характеристик потери тепла в окружающую среду, что существенно повышает метрологические качества разработанного способа. Большим преимуществом предложенного способа является то, что он позволяет в отсутствии информации о температуре окружающей среды, о коэффициенте теплообмена α , который определить с большой точностью невозможно и на практике его значение берут, как правило, приближенно, а также при отсутствии информации о состоянии поверхности контролируемых изделий, определить потери в окружающую среду и внести соответственно

поправку в результаты измерения, что в итоге повышает точность информации об искомых коэффициентах тепло- и температуропроводности.

Разработан новый метод бесконтактного неразрушающего контроля ТФС материалов и готовых изделий, отличающийся высокой производительностью измерений и точностью, обусловленной существенным уменьшением влияния на результаты измерений тепловых потерь с поверхности исследуемых объектов в окружающую среду.

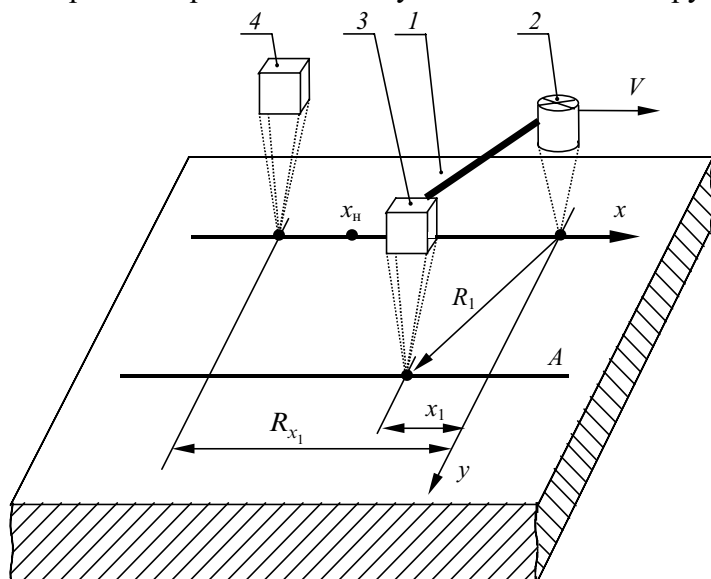


Рис. 2.20 Схема расположения и движения точечного источника энергии и термоприемников относительно исследуемого образца

Сущность разработанного метода заключается в следующем [55]. На рис. 2.20 приведена схема расположения и движения точечного источника тепловой энергии и двух термоприемников относительно исследуемого образца в процессе измерения. Над исследуемым изделием 1 помещают точечный источник тепла 2 (лазер) и термоприемники 3 и 4, сфокусированные в точках поверхности, подверженной тепловому воздействию. Причем, источник энергии 2 и термоприемник 3 жестко связаны друг с другом и представляют собой измерительную головку. Термоприемник 3 установлен от источника 2 на расстоянии R_1 , при котором отсутствует прямое влияние источника энергии на результаты измерений температуры вследствие прямого воздействия на термоприемник частично отраженного от поверхности объекта лазерного луча. Термоприемник 4 фокусируют в точку на линии движения источника тепла на расстоянии $x_n = R_1$ от центра пятна нагрева. Включают источник энергии и начинают перемещение его и термоприемников над исследуемым изделием с постоянной скоростью V . Затем постепенно смещают термоприемник 4 из точки x_n по линии движения источника в сторону отставания, увеличивая отставание на расстояние $\Delta x = k[T_1(x) - T_2]$, где T_2 - значение избыточной температуры, измеряемое термоприемником 3, $T_1(x)$ - значение избыточной температуры, измеряемое термоприемником 4; k - коэффициент пропорциональности. Изменение расстояния (перемещение) между точкой измерения температуры термоприемником 4 и точкой подвода теплоты осуществляют до тех пор, пока измеряемая избыточная температура $T_1(x)$ станет равной значению измеряемой температуры T_2 , т.е. $T_1(x) = T_2$. При этом измеряют значение расстояния R_{x_1} между термоприемником 4 и точкой подвода теплоты. Затем, увеличив мощность источника в два раза, повторяют вышеописанные процедуры измерения, сравнивая измеряемую термоприемником 4

избыточную температуру $T_1^*(x)$ с избыточной температурой $T_1(x)$, измеренной им при первоначальной мощности. При этом первоначальное значение мощности источника задают из тех условий, чтобы при увеличении ее в два раза, максимальная избыточная температура нагрева поверхности исследуемого образца была бы не выше 0,8 - 0,9 температуры термодеструкции исследуемого материала. В результате измеряют значение расстояния R_{x_2} , при котором выполняется равенство контролируемых избыточных температур $T_1(x)$ и $T_1^*(x)$, а искомые теплофизические свойства определяют по зависимостям, полученным на основании следующих рассуждений.

На основании выражения (1.68) при нагреве поверхности полубесконечного в тепловом отношении тела подвижным точечным источником тепловой энергии избыточная предельная температура поверхности этого тела в точках, перемещающихся вслед за источником по линии его движения со скоростью, равной скорости перемещения источника энергии, определяется следующей зависимостью

$$T_1(x) = \frac{\varepsilon \exp(-\gamma l) q_{\text{ит}}}{2\pi\lambda R_{x_1} + (\alpha_{к1} + \alpha_{л1})S_1}, \quad (2.92)$$

где ε - коэффициент излучения поверхности нагретого тела; γ - показатель ослабления окружающей среды, $1/\text{м}$; l - расстояние между источником тепла и исследуемым объектом, м ; $q_{\text{ит}}$ - мощность источника тепла (лазера), Вт ; λ - коэффициент теплопроводности материала, $\text{Вт}/\text{м}\cdot\text{К}$; R_{x_1} - расстояние между центром пятна нагрева и точкой измерения температуры, м ; $\alpha_{к1}$ - коэффициент конвективного теплообмена при мощности источника тепла $q_{\text{ит}}$, $\text{Вт}/\text{м}^2\cdot\text{К}$; $\alpha_{л1}$ - коэффициент лучистого теплообмена при мощности источника тепла $q_{\text{ит}}$, $\text{Вт}/\text{м}^2\cdot\text{К}$; S_1 - площадь теплоотдающей поверхности при мощности источника тепла $q_{\text{ит}}$, м^2 .

При нагреве поверхности исследуемого тела подвижным точечным источником энергии избыточная предельная температура в точке, перемещающейся со скоростью источника V и находящейся на расстоянии R_1 от него, определяется зависимостью

$$T_2(R_1, x_1) = \frac{\varepsilon \exp(-\gamma l) q_{\text{ит}}}{2\pi\lambda R_1 \exp\left(\frac{V(R_1 - x_1)}{2a}\right) + (\alpha_{к1} + \alpha_{л1})S_1}, \quad (2.93)$$

где x_1 - расстояние между центром пятна нагрева и проекцией точки, расположенной на расстоянии R_1 от него, на линию движения источника тепла, м ; a - коэффициент температуропроводности исследуемого материала.

Так как из условия эксперимента $T_1(x) = T_2$, то после математических преобразований выражений (2.92) и (2.93), получим формулу для расчета температуропроводности в следующем виде

$$a = \frac{V(R_1 - x_1)}{2 \ln \left[\frac{R_{x_1}}{R_1} \right]}. \quad (2.94)$$

Чтобы тепловые потери в окружающую среду при измененной мощности источника $2q_{ит}$ были бы равны потерям при $q_{ит}$, экспериментально определяют такое расстояние R_{x_2} по линии движения источника между точкой контроля температуры и пятном нагрева, при котором $T_1(x) = T_1^*(x)$.

При этом значение контролируемой температуры будет определяться выражением

$$T_1^*(x) = \frac{2\varepsilon \exp(-\gamma l) q_{ит}}{2\pi\lambda R_{x_2} + (\alpha_{к2} + \alpha_{л2}) S_2}, \quad (2.95)$$

где $\alpha_{к2}$ - коэффициент конвективного теплообмена при мощности источника тепла $2q_{ит}$, Вт/м²·К; $\alpha_{л2}$ - коэффициент лучистого теплообмена при мощности источника тепла $2q_{ит}$, Вт/м²·К; S_2 - площадь теплоотдающей поверхности при мощности источника тепла $2q_{ит}$, м². Так как из условия эксперимента $T_1(x) = T_1^*(x)$, то после математических преобразований выражений (2.92) и (2.95) получим формулу для расчета теплопроводности в следующем виде

$$\lambda = \frac{q_{ит}}{2\pi T_1^*(x) [R_{x_2} - R_{x_1}]}. \quad (2.96)$$

Таким образом, определив расстояния R_{x_1} и R_{x_2} , при которых тепловые потери в окружающую среду с поверхности исследуемого тела будут равны, зная мощность источника и скорость его движения над поверхностью тела, по формулам (2.94) и (2.96) можно определить искомые теплофизические свойства.

Уравнения измерений для данного метода бесконтактного контроля ТФХ имеет вид:

$$a_j^* = \frac{\langle\langle V \rangle\rangle \langle\langle R_1 \rangle_{q_{1j}} - \langle x_{1j} \rangle_{q_{2j}} \rangle_{q_{3j}} \rangle_{q_{4j}}}{\langle 2 \ln \langle \frac{\langle R_{x_{1j}}^* \rangle_{q_{5j}}}{\langle R_1 \rangle_{q_{6j}}} \rangle_{q_{7j}} \rangle_{q_{8j}}};$$

$$\lambda_j^* = \frac{\langle Q_{ит} \rangle_{q_{1j}}}{\langle 2\pi \langle T_{1j}^*(x) \rangle_{q_{2j}} \langle \left(\langle R_{x_{2j}}^* \rangle_{q_{3j}} - \langle R_{x_{1j}}^* \rangle_{q_{4j}} \right) \rangle_{q_{5j}} \rangle_{q_{6j}} \rangle_{q_{7j}} \rangle_{q_{8j}}}.$$

Предложенный метод позволяет значительно уменьшить влияние потерь тепловой мощности в окружающую среду на результаты измерений искомых теплофизических свойств, что существенно повышает метрологический уровень разработанного метода. Коэффициент излучения ε оказывает большое влияние как на результаты измерения температуры, так и на результаты определения искомых теплофизических свойств. Предложенный метод позволяет

значительно уменьшить влияние коэффициента излучения ϵ на результаты измерений, так как в нем используется отношение сигналов с двух термоприемников и по условиям измерений $T_1(x) = T_2$, т.е. на результаты измерений практически не влияет значение коэффициента излучения ϵ и его зависимость от температуры [56].

Так как в предложенном методе время измерения незначительно и среда практически остается неизменной, а $T_1(x) = T_2$, то предложенный алгоритм позволяет почти полностью устранить влияние на результаты измерений потерь тепловой мощности в окружающую среду за счет поглощения части энергии промежуточной средой.

Погрешность измерения температуры в большей степени влияет на вычисление температуропроводности a , чем погрешность измерения расстояния R_x , так как значение этого расстояния на три порядка меньше значения измеряемых температур, кроме того в предложенном методе $T_1(x)/T_2 = 1$, и значение коэффициента температуропроводности a практически не зависит от погрешности термоприемников, что также уменьшает погрешность его определения.

Так как термоприемник 2 жестко зафиксирован с подвижным точечным источником тепловой энергии 3, а значение расстояния R_1 на порядок меньше значений R_x , то это также позволяет уменьшить погрешность измерений.

Большим преимуществом предложенного метода является то, что он позволяет учесть потери в окружающую среду в отсутствии информации о свойствах окружающей среды (влажности, запыленности и т.д.), о коэффициентах теплообмена α_k и α_n , о коэффициенте излучения ϵ и состоянии поверхности контролируемых изделий, что в итоге повышает достоверность и точность информации об искомых коэффициентах тепло- и температуропроводности.

Использование измерительной головки (второго термоприемника), в сравнении с известными методами, позволяет сократить число проводимых измерительных процедур, что приводит к уменьшению времени определения теплофизических свойств материалов.

Достоверность и точность результатов измерения при применении бесконтактных методов и средств в большой степени зависит также и от выбора точек контроля избыточных температур на поверхности исследуемых объектов в процессе проведения температурно-пространственных измерений, а гарантия сохранения целостности зависит от задания тепловых режимов при проведении теплофизического эксперимента. В описанном в предыдущем разделе бесконтактном методе оперативного НК ТФС материалов нет рекомендаций по выбору точек контроля избыточных температур и по заданию тепловых режимов теплофизического эксперимента, что в условиях недостаточной априорной информации о ТФС объектов измерения уменьшает точность этого метода и может привести к разрушению исследуемых объектов.

Предлагаемый бесконтактный адаптивный метод неразрушающего контроля ТФС материалов позволяет устранить эти недостатки за счет адаптивного выбора мощности теплового воздействия на исследуемый объект и адаптивного поиска оптимальных в метрологическом отношении точек контроля температуры, так как в процессе проведения измерений контролируются максимальные температуры, что уменьшает относительную погрешность измерений, а следовательно, повышает точность разработанного метода.

Сущность метода заключается в следующем [57]. Над исследуемым изделием 1 помещают точечный источник тепловой энергии 2 (лазер) и термоприемник 3, сфокусированный на поверхность, подверженной тепловому воздействию, и регистрирующий температуру этой поверхности по ее электромагнитному излучению (рис. 2.21). Термоприемник, установленный на высоте z от поверхности исследуемого образца, жестко связан с экраном 4, расположенного с зазором от поверхности образца на высоте z_0 . Фокусируют термоприемник 4 в центр пятна нагрева. Включают источник энергии с начальной минимальной мощностью q_{\min} , при которой в центре пятна нагрева появляется избыточная

температура T_1 , уровень которой выше чувствительности термopриемной аппаратуры. Измерение избыточной температуры в центре пятна нагрева производят в моменты времени, когда окно термopриемника открыто, а

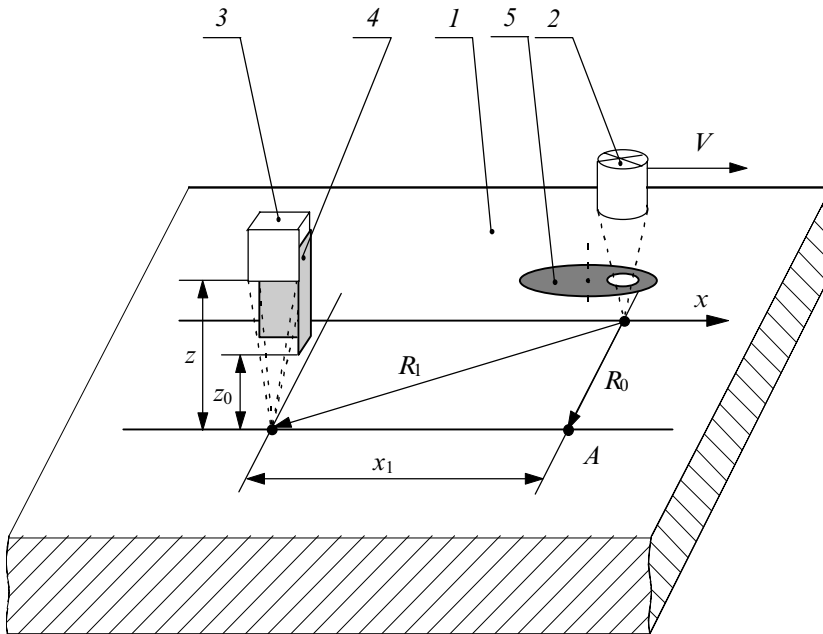


Рис. 2.21 Схема расположения и движения точечного источника энергии и термopриемника относительно исследуемого образца

лазерный луч перекрыт обтюратором 5. Использование обтюратора позволяет исключить влияние источника энергии на результаты измерений температуры из-за прямого воздействия на термopриемник частично отраженного от поверхности объекта лазерного луча. Постепенно увеличивают мощность источника тепла и синхронно с перекрытием лазерного луча измеряют избыточную температуру в центре пятна нагрева. Увеличение мощности источника энергии осуществляют до тех пор, пока измеряемая температура в центре пятна нагрева станет равной 0,8 - 0,9 температуры термодеструкции $T_{\text{терм}}$ исследуемого материала. При этом фиксируют значение мощности источника q_0 .

Далее фокусируют термopриемник в точку поверхности исследуемого объекта на линии, перпендикулярной линии движения источника тепла и проходящей через центр пятна нагрева на расстоянии R_0 от него (рис. 2.21), и начинают перемещение источника энергии и термopриемника над исследуемым изделием с начальной скоростью V_0 . Значение расстояния R_0 берется таким, чтобы при расположении термopриемника на высоте z от поверхности исследуемого образца, а экрана - на высоте z_0 , отсутствовало влияние источника энергии на результаты измерений температуры вследствие прямого воздействия на термopриемник частично отраженного от поверхности объекта лазерного луча. Затем постепенно смещают термopриемник из начальной точки контроля R_0 по линии, параллельной линии движения источника энергии, в сторону отставания до тех пор, пока контролируемая избыточная температура в точке ее регистрации достигнет максимального значения.

Поиск максимального значения контролируемой избыточной температуры осуществляется следующим образом. Перемещают термopриемник относительно источника энергии, изменяя отставание термopриемника на расстояние $\Delta x = k_1 [T(R_i) - T(R_{i-1})] / [x_i - x_{i-1}]$, где $T(R_i)$, $T(R_{i-1})$ - значения избыточных температур, измеряемых термopриемником в точках, расположенных, соответственно, на расстояниях R_i и R_{i-1} от центра пятна нагрева при скорости V_0 ; x_i , x_{i-1} - расстояния между центром пятна нагрева и проекцией точек, расположенных,

соответственно, на расстояниях R_i и R_{i-1} от него, на линию движения источника тепла; k_1 - коэффициент пропорциональности. Изменение расстояния (перемещение) между точкой измерения температуры термодатчиком и точкой подвода теплоты осуществляют до тех пор, пока контролируемая температура в точке ее регистрации достигнет максимального значения, т.е. $T(R_i) - T(R_{i-1}) \leq \varepsilon$, где ε - чувствительность измерительной аппаратуры. Это будет соответствовать экстремуму функции $T(x)$ при скорости V_0 (рис. 2.22). При этом измеряют значение расстояния x_1 между центром пятна нагрева и проекцией точки контроля температуры на линию движения источника тепла и определяют значение расстояния R_1 между точкой подвода теплоты и точкой контроля температуры: $R_1 = \sqrt{x_1^2 + R_0^2}$.

Далее постепенно увеличивают мощность источника энергии q на величину $\Delta q = k_2 [T_{\text{зад1}} - T(R_1)]$, где $T_{\text{зад1}}$ - заданное значение избыточной температуры, величина которой задается в диапазоне 20 - 30 % от температуры термодеструкции $T_{\text{терм}}$ исследуемого материала; $T(R_1)$ - значение избыточной температуры в точке контроля, расположенной на расстоянии R_1 от центра пятна нагрева; k_2 - коэффициент пропорциональности. Изменение мощности источника

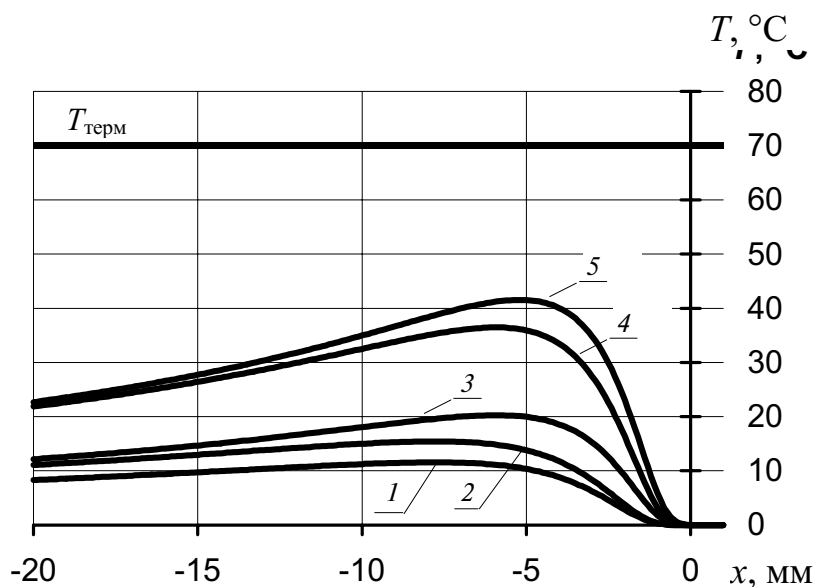


Рис. 2.22 Термограммы нагрева при движении точечного источника тепла по поверхности полубесконечного тела:

1 - q_0, V_0 ; 2 - q_1, V_0 ; 3 - q_1, V_1 ; 4 - q_2, V_1 ; 5 - q_2, V_2 ;

$q_0 < q_1 < q_2$; $V_0 > V_1 > V_2$

энергии q осуществляют до тех пор, пока измеряемая избыточная температура $T(R_1)$ не окажется в пределах заданного диапазона от температуры $T_{\text{зад1}}$ (например, от $0,8T_{\text{зад1}}$ до $T_{\text{зад1}}$). При этом измеряют значение мощности источника энергии q_1 .

Затем плавно изменяют скорость движения V термодатчика и источника энергии в соответствии с зависимостью $V_{i+1} = V_i - \Delta V$, где $\Delta V = k_3 [T_{\text{зад1}} - T(V_i)] + k_4 [T_{\text{зад1}} - T(V_i)] [V_{i-1} - V_i] + k_5 [T_{\text{зад1}} - T(V_i)] / [V_{i-1} - V_i]$, k_3, k_4, k_5 - коэффициенты пропорциональности. Изменение скорости движения V осуществляют до тех пор, пока измеряемая в точке контроля R_1 избыточная температура $T(V_i)$ станет равной заданному значению температуры $T_{\text{зад1}}$. При этом измеряют значение скорости движения V_1 .

Увеличив заданное значение избыточной температуры $T_{\text{зад1}}$ в два раза ($T_{\text{зад2}} = 2T_{\text{зад1}}$), повторяют вышеописанные процедуры измерения.

В результате определяют значения параметров q_2 и V_2 , при которых выполняется вышеуказанное соотношение контролируемых избыточных температур, а искомые теплофизические свойства определяют по зависимостям, полученным на основании следующих рассуждений.

На основании выражения (1.68) при нагреве поверхности полубесконечного в тепловом отношении тела подвижным точечным источником тепловой энергии избыточная предельная температура поверхности этого тела в точках, перемещающейся вслед за источником соответственно со скоростями V_1 и V_2 и находящейся на расстоянии R_1 от него, определяется зависимостями:

$$T_1(R_1) = \frac{\varepsilon \exp(-\gamma l) q_1}{2\pi\lambda R_1 \exp\left(\frac{V_1(R_1 - x_1)}{2a}\right) + (\alpha_k + \alpha_l)S}; \quad (2.97)$$

$$T_2(R_1) = \frac{\varepsilon \exp(-\gamma l) q_2}{2\pi\lambda R_1 \exp\left(\frac{V_2(R_1 - x_1)}{2a}\right) + (\alpha_k + \alpha_l)S}, \quad (2.98)$$

где ε - коэффициент излучения поверхности нагретого тела; γ - показатель ослабления окружающей среды, 1/м; l - расстояние между источником тепла и исследуемым объектом, м; λ - коэффициент теплопроводности изделия, Вт/м·К; R_1 - расстояние между центром пятна нагрева и точкой измерения температуры, м; x_1 - расстояние между центром пятна нагрева и проекцией точки, расположенной на расстоянии R_1 от него, на линию движения источника тепла, м; a - коэффициент температуропроводности исследуемого материала; α_k - коэффициент конвективного теплообмена, Вт/м²·К; α_l - коэффициент лучистого теплообмена, Вт/м²·К; S - площадь теплоотдающей поверхности, м². После математических преобразований выражений (2.97) и (2.98) с учетом того, что $T_2(R_1) = 2T_1(R_1) = T_{\text{зад2}}$, получаем формулу для расчета температуропроводности в виде

$$a = \frac{(V_1 - V_2)(R_1 - x_1)}{2 \ln \left[\frac{2q_1}{q_2} \right]}. \quad (2.99)$$

Теплопроводность определяют по формуле, полученной при подстановке выражения (2.99) в (2.98) и имеющей вид

$$\lambda = \frac{q_2}{2\pi T_{\text{зад2}} R_1} \exp \left[-\frac{V_2 \ln(2q_1/q_2)}{V_1 - V_2} \right]. \quad (2.100)$$

Таким образом, определив расстояние R_1 , мощности источника энергии q_1 и q_2 , скорости движения источника энергии над поверхностью тела V_1 и V_2 , по формулам (2.99) и (2.100) можно определить искомые теплофизические свойства.

Уравнения измерений для данного метода бесконтактного контроля ТФХ имеет вид:

$$a_j^* = \frac{\langle \langle V_{1j}^* \rangle_{q_{1j}} - \langle V_{2j}^* \rangle_{q_{2j}} \rangle_{q_{3j}} \langle \langle R_1 \rangle_{q_{4j}} - \langle x_{j1}^* \rangle_{q_{5j}} \rangle_{q_{6j}} \rangle_{q_{7j}}}{\langle 2 \ln \frac{\langle Q_1 \rangle_{q_{8j}}}{\langle Q_2 \rangle_{q_{9j}}} \rangle_{q_{10j}} \rangle_{q_{11j}}} \rangle_{q_{12j}};$$

$$\lambda_j^* = \frac{\langle Q_2 \rangle_{q_{1j}}}{\langle \langle 2\pi \langle T_{\text{зад}2} \rangle_{q_{2j}} \rangle_{q_{3j}} \langle R_1 \rangle_{q_{4j}} \rangle_{q_{5j}}} \rangle_{q_{6j}} \times$$

$$\times \exp \left\langle - \frac{\langle \langle V_2 \rangle_{q_{7j}} \langle \ln \frac{\langle 2Q_1 \rangle_{q_{8j}}}{\langle Q_2 \rangle_{q_{9j}}} \rangle_{q_{10j}} \rangle_{q_{11j}} \rangle_{q_{12j}}}{\langle \langle V_{1j}^* \rangle_{q_{13j}} - \langle V_{2j}^* \rangle_{q_{14j}} \rangle_{q_{15j}}} \rangle_{q_{16j}} \rangle_{q_{17j}} \rangle_{q_{18j}} \right\}.$$

Предложенный метод в соответствии с алгоритмом измерений позволяет проводить адаптивный поиск оптимальных в метрологическом отношении расстояния от источника энергии до точки контроля температуры, так как в процессе проведения измерений производится поиск самых теплонагруженных точек на поверхности исследуемых объектов и контролируются в этих точках максимальные по уровню температуры, что уменьшает относительную погрешность измерений, а следовательно, повышает точность разработанного метода.

Представленный здесь бесконтактный метод позволяет адаптивно выбрать такую мощность теплового воздействия на исследуемый объект, при которой избыточная температура в самых теплонагруженных точках не превышает температуру термодеструкции исследуемого материала, что полностью исключает возможность разрушения исследуемых изделий в процессе измерений.

Адаптивный поиск как координат измерения температуры, так и мощности источника энергии и скорости движения источника с термоприемником относительно исследуемого изделия в условиях недостаточной априорной информации о его теплофизических свойствах, позволяет также расширить функциональные возможности предложенного метода, в частности, за счет увеличения перечня испытываемых материалов и диапазона определяемых теплофизических свойств.

В предложенном методе тепловая система более плавно и за меньший интервал времени выводится на заданный тепловой режим, так как изменением мощности источника тепла система оперативно выводится на первый температурный подуровень $T = (0,8T_{\text{зад}1} \div T_{\text{зад}1})$, а затем, за счет адаптивного изменения скорости, система плавно выводится на заранее заданный температурный уровень $T_{\text{зад}1}$, на котором и снимается измерительная информация для расчета искомых теплофизических свойств.

То, что влияние изменения мощности на термограмму нагрева значительно выше, чем влияние изменения скорости легко доказать, определив функции влияния на контролируемую избыточную температуру изменения параметров V и q в выражении (2.97).

Так функция чувствительности от влияния изменения мощности q определяется как

$S_q = \frac{q}{T} \frac{\partial T}{\partial q} = 1$, где T - температура. Функция чувствительности от влияния скорости V будет равна

$$S_V = \frac{V}{T} \frac{\partial T}{\partial V} = -\frac{V(R-x)}{2a}.$$

Поскольку практически для всех исследуемых в теплофизике твердых материалов коэффициент температуропроводности a находится в диапазоне от 10^{-7} м²/с до 10^{-6} м²/с, а при реализации заявленного метода скорость движения V источника и термоприемника изменяется в диапазоне от 1 до 10 мм/с и разность $(R-x)$ не выходит за пределы от 0,01 до 0,5 мм, то всегда функция чувствительности $S_V < 1$, т.е. $S_q > S_V$. Отсюда следует, что изменение скорости оказывает меньшее, чем мощность, влияние на изменение избыточной температуры в точке контроля, что обеспечивает плавный вывод системы с предуровня на заданный температурный режим.

Таким образом, в разработанном методе предложенная последовательность операций позволяет минимизировать время выхода контролируемой избыточной температуры на заданный уровень, в результате чего значительно увеличивается оперативность теплофизического эксперимента, а следовательно, и точность определения искомым теплофизических свойств за счет уменьшения влияния неучтенных тепловых потерь.

2.2.2 АЛГОРИТМЫ, СТРУКТУРЫ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ЦЕПЕЙ И УРАВНЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ ПРИ БЕСКОНТАКТНОМ КОНТРОЛЕ ТЗП ИЗДЕЛИЙ

Рассмотрим метод неразрушающего контроля толщины защитных покрытий при импульсно-динамическом тепловом воздействии, алгоритм измерения которого состоит в следующем [58]. Над исследуемым изделием без покрытия помещают источник инфракрасного излучения, сфокусированный на поверхность изделия в виде пятна диаметром d не менее 20 мм, чтобы тепловому воздействию был подвергнут достаточный для получения достоверных результатов объем изделия. Кроме того, над поверхностью исследуемого изделия размещают термоприемник, сфокусированный на центр круга теплового воздействия. Затем осуществляют тепловое воздействие импульсами заданной мощности, длительности и частоты следования. Фиксируют момент времени τ_1 , когда температура в центре пятна нагрева достигает первого заданного значения T_1 , величина которого берется равной 20 - 30 % от начальной температуры исследуемого изделия. Затем выделяют число тепловых импульсов n_1 , которое наносится источником тела на поверхность изделия от момента времени τ_1 до момента τ_2 , когда избыточная температура в центре пятна нагрева достигает второго заданного значения температуры T_2 , величина которого задается обычно на 15 - 20 % ниже температуры термодеструкции материала покрытия (рис. 2.23). Далее аналогичные операции производят над изделием с покрытием и определяют число тепловых импульсов n_2 , поданных импульсным источником тепла в интервале времени от момента, когда избыточная контролируемая температура в центре пятна нагрева стала равной первому заданному значению T_1 , до момента равенства контролируемой температуры второму значению T_2 . Затем определяют

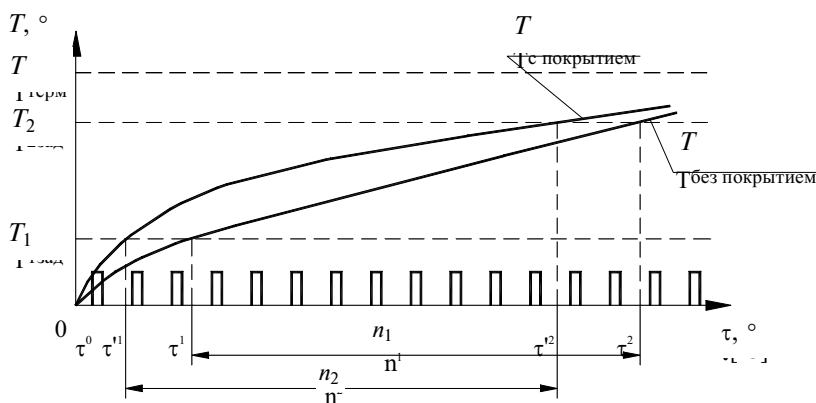


Рис. 2.23 Термограммы нагрева в точке контроля на изделии с покрытием и без покрытия

разность тепловых импульсов $\Delta n = |n_1 - n_2|$, а искомую толщину пленочного покрытия определяют по формуле, полученной на основании следующих рассуждений. Аккумулированное в исследуемом изделии без покрытия тепло при действии n_1 тепловых импульсов определяется соотношением

$$Q_1 = n_1 p_0 = C_T \rho_T V_T (T_2 - T_1) = C_{Tv} \Delta T, \quad (2.101)$$

где p_0 - количество тепла, поглощаемое участком изделия, при действии одного теплового импульса; C_T , ρ_T - соответственно, удельная теплоемкость и плотность изделия; C_{Tv} - объемная теплоемкость исследуемого участка изделия; $\Delta T = T_2 - T_1$ - температурный интервал, в котором осуществляется нагрев исследуемого участка изделия; V_T - объем изделия, подвергнутого тепловому воздействию.

При нагреве исследуемого участка изделия с покрытием от температуры T_1 до T_2 , аккумулированное в изделии тепло определяется соотношением

$$Q_2 = n_2 p_0 = (C_{Tv} + C_{пв}) \Delta T, \quad (2.102)$$

где $C_{пв}$ - объемная теплоемкость пленочного покрытия на исследуемом участке изделия.

Вычитая из выражения (2.102) выражение (2.101), получим

$$(n_2 - n_1) p_0 = C_{пв} \Delta T \quad \text{или} \quad \Delta n p_0 = C_{пв} \rho_{пв} V_{пв} \Delta T, \quad (2.103)$$

Поскольку $V_{пв} = h_{пв} S_{пв}$, где $S_{пв}$ - площадь покрытия, подверженная воздействию, то из (2.103) получим формулу для определения искомой толщины пленочного покрытия

$$h_{пв} = \frac{\Delta n q_0}{C_{пв} \rho_{пв} S_{пв} \Delta T}.$$

Искомую толщину покрытия можно рассчитать и по формуле, которая получается следующим образом. Взяв отношение выражения (2.101) к (2.102) и, произведя ряд несложных математических преобразований, получим выражение

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{h_T}{h_T + h_{\Pi}} \frac{C_T \rho_T}{C_{\Pi} \rho_{\Pi}}.$$

Из последнего соотношения получим формулу для определения искомой толщины

$$h_{\Pi} = \frac{h_T (n_2 C_T \rho_T - n_1 C_{\Pi} \rho_{\Pi})}{n_1 C_{\Pi} \rho_{\Pi}}, \quad (2.104)$$

где h_T - глубина прогрева исследуемого изделия при нагреве поверхности изделия до температуры T_2 .

Входящие в расчетные формулы параметры h_T и S_T можно определить экспериментально или расчетным путем. В первом случае параметр h_T определяют путем удаления сфокусированного на поверхность изделия без покрытия термоприемника от пятна нагрева до тех пор, пока значение контролируемой избыточной температуры не станет равной величине чувствительности ε контрольно-измерительной аппаратуры. Найденное расстояние x равно величине глубины прогрева исследуемого тела h_T . Аналогично на изделии с покрытием определяется расстояние x , а параметр площади S_{Π} рассчитывается по формуле $S_{\Pi} = \pi x^2 / 4$.

Имея информацию о теплофизических свойствах (λ и a) изделия или покрытия, а также о мощности теплового воздействия, параметр h_T можно определить расчетным путем, используя выражение для температурного поля в исследуемом полубесконечном в тепловом отношении теле при импульсном тепловом воздействии, которое для рассматриваемого алгоритма измерения будет иметь вид

$$T(x, \tau) = \sum_{n=0}^{n_1} \frac{q}{4 \rho_T C_T (\pi a)^{3/2}} \exp\left(-\frac{x^2}{4a\tau}\right). \quad (2.105)$$

Приравняв выражение (2.105) величине ε , численным методом находят значение расстояния x , которое и будет равно глубине прогрева тела изделия h_T . Аналогично можно рассчитать и параметр S_{Π} .

Таким образом, определив экспериментально количество тепловых импульсов n_1 и n_2 , зная мощность тепловых импульсов, теплофизические свойства материалов изделия и покрытия, рассчитав параметры, характеризующие геометрические размеры участка изделия, подверженного тепловому воздействию, по формуле (2.102) или (2.104) можно определить искомую величину толщины пленочного покрытия.

Структура измерительной цепи для изложенного выше алгоритма бесконтактного измерения ТЗП представлена на рис. 2.24.

Уравнение измерения, в соответствии с формулой (2.104), имеет вид

$$h_{nj}^* = \frac{\langle\langle h_T \rangle\rangle (\langle n_{2j}^* \langle C_T \rangle \rho_T \rangle\rangle_{q_{1j}} - \langle n_{1j}^* \langle C_n \rangle \rho_n \rangle\rangle_{q_{2j}}) \rangle_{q_{3j}} \rangle_{q_{4j}} \rangle_{q_{6j}}}{\langle n_{1j}^* \langle C_n \rangle \rho_n \rangle\rangle_{q_{5j}}} \quad (2.106)$$

Рассмотрим далее метод неразрушающего бесконтактного контроля толщины защитных покрытий, алгоритм измерений которого состоит в следующем [59].

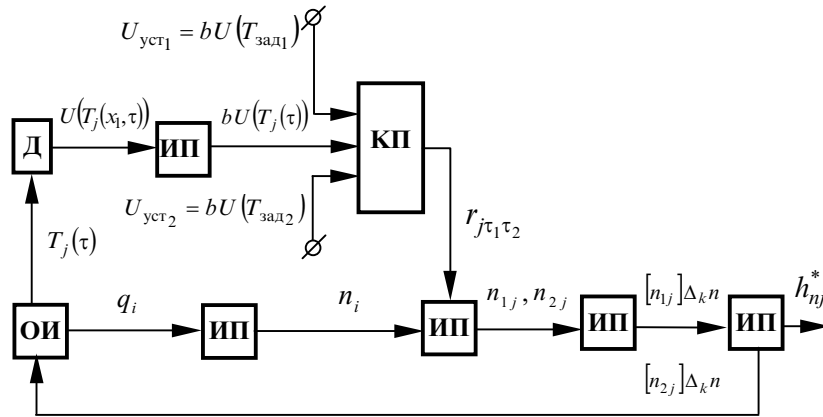


Рис. 2.24 Схема измерительной цепи бесконтактного контроля ТЗП изделий

Над исследуемым изделием помещают точечный источник тепловой энергии и термоприемник, сфокусированный в точку поверхности, подверженной тепловому воздействию. Включают источник энергии и начинают перемещение его и термоприемника над исследуемым изделием с постоянной скоростью. Затем постепенно смещают точку контроля предельной избыточной температуры от пятна нагрева по линии движения источника в сторону отставания до достижения заданного расстояния R_1 между источником и термоприемником, измеряя при этом интегральное по расстоянию значение избыточной температуры $S_1(R)$ на отрезке линии движения от пятна нагрева до точки контроля. Осуществляют измерение избыточной предельной температуры в точке R_1 . Далее уменьшив мощность источника энергии и переместив точку контроля температуры в центр пятна нагрева, смещают постепенно точку контроля избыточной температуры от пятна нагрева по линии движения источника отставания до тех пор, пока контролируемое интегральное по расстоянию перемещения значение избыточной температуры станет равным значению $S_1(R)$ (рис. 2.25). Измеряют найденное значение расстояния R_x и значение избыточной температуры при этом расстоянии отставания точки контроля от центра пятна нагрева, а искомую толщину защитного покрытия определяют по зависимости, полученной на основании следующих рассуждений.

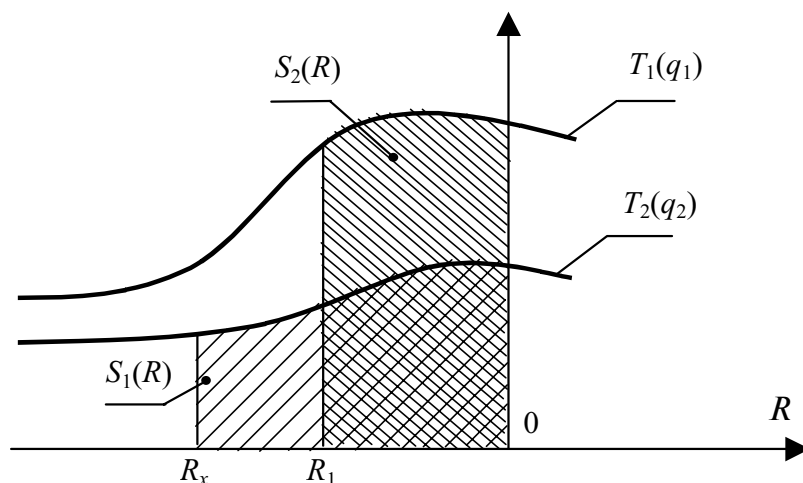


Рис. 2.25 Интегральные значения температур в контролируемых точках поверхности исследуемого объекта

При нагреве поверхности полубесконечного в тепловом отношении тела подвижным точечным источником энергии избыточная предельная температура поверхности этого тела в точках, перемещающихся вслед за источником по линии его движения со скоростью, равной скорости перемещения источника энергии, определяется зависимостью

$$T(R) = \frac{q}{2\pi\bar{\lambda}R}, \quad (2.107)$$

где q - мощность источника, Вт; $\bar{\lambda}$ - средне-интегральный по объему коэффициент теплопроводности изделия, состоящего из покрытия и основания, на которое оно нанесено, Вт/м·К; R - расстояние между центром пятна нагрева и точкой измерения температуры, м.

Поскольку поверхность исследуемого изделия в процессе эксперимента не теплоизолирована от окружающей среды, то после нанесения теплового воздействия часть тепла от нагретой поверхности изделия будет отводиться за счет конвективного теплообмена в окружающую среду. Поэтому измеряемое значение избыточной предельной температуры в точке, перемещающейся в след за источником по линии его движения и отстающей от него на расстояние R_1 , будет определяться зависимостью

$$T(R_1) = \frac{q - \Delta q_{\text{утеч}}}{2\pi\bar{\lambda}R_1}, \quad (2.108)$$

где $\Delta q_{\text{утеч}}$ - потери мощности в окружающую среду за счет конвективного теплообмена.

Из теории теплопроводности известно, что тепловой поток при конвективном теплообмене между поверхностью нагретого тела и окружающей средой определяется выражением

$$q = \alpha [T(R) - T_c], \quad (2.109)$$

где α - коэффициент теплообмена, Вт/м·К; T_c - температура окружающей среды.

Потери тепловой энергии в окружающую среду при прохождении точки контроля температуры расстояния от пятна нагрева до точки с координатой R_1 при мощности источника будут определяться выражением

$$\Delta q_1 = \alpha \int_0^{R_1} (T_1(R) - T_c) dR = S_1(R). \quad (2.110)$$

Чтобы потери энергии в окружающую среду при мощности источника q_2 были бы равны потерям Δq_1 , экспериментально находят такое расстояние R_x между точкой контроля избыточной температуры и пятном нагрева, при котором

$$\Delta q_2 = \alpha \int_0^{R_1} (T_2(R) - T_c) dR = S_1(R) = S_2(R). \quad (2.111)$$

На основании изложенного можно записать, что

$$T_1(R_1) = \frac{q_1 - \Delta q_1}{2\pi \bar{\lambda} R_1}; \quad (2.112)$$

$$T_2(R_x) = \frac{q_2 - \Delta q_2}{2\pi \bar{\lambda} R_x}. \quad (2.113)$$

Поскольку из (2.110) и (2.111) $\Delta q_1 = \Delta q_2$, то после несложных математических преобразований выражений (2.112) и (2.113) получим формулу для расчета среднеинтегрального по объему коэффициента теплопроводности изделия в виде

$$\bar{\lambda} = \frac{q_1 - q_2}{2\pi [T_1(R_1)R_1 - T_2(R_x)R_x]}. \quad (2.114)$$

Измеренный среднеинтегральный по объему коэффициент теплопроводности определяется выражением

$$\bar{\lambda} = K_1 \lambda_n + K_2 \lambda_t, \quad (2.115)$$

где λ_n , λ_t - коэффициент теплопроводности, соответственно, покрытия и тела, на которое оно нанесено; K_1 , K_2 - коэффициенты, значения которых изменяются от 0 до 1, так как в соответствии с выражением (2.115) при отсутствии покрытия $K_1 = 0$, $K_2 = 1$, а при максимальной толщине покрытия, когда теплофизические свойства тела не оказывают влияние на формирование температурного поля на поверхности, наоборот, $K_1 = 1$, $K_2 = 0$.

Поскольку среднеинтегральный коэффициент теплопроводности определяется процентным содержанием материала покрытия и тела в единице объема, то $K_1 + K_2 = 1$ и выражение (2.115) можно записать в следующем виде

$$\bar{\lambda} = K_1 \lambda_{\Pi} + (1 - K_1) \lambda_T. \quad (2.116)$$

Ввиду того, что значение коэффициента K_1 пропорционально толщине защитного покрытия, выражение (2.116) можно записать

$$\bar{\lambda} = b h_{\Pi} \lambda_{\Pi} + (1 - b h_{\Pi}) \lambda_T, \quad (2.117)$$

где h_{Π} - толщина защитного пленочного покрытия; b - коэффициент пропорциональности, определяемый экспериментальным путем и численно равный обратной величине от максимально возможной в тепловом отношении толщины покрытия $h_{\text{макс}}$. Параметр $h_{\text{макс}}$ определяют экспериментально путем удаления термоприемника от точки нагрева материала покрытия до тех пор, пока значение контролируемой избыточной температуры станет равной чувствительности контрольно-измерительной аппаратуры. Найденное расстояние и будет равно искомому параметру $h_{\text{макс}}$. Параметр $h_{\text{макс}}$ можно определить и расчетным путем, используя для этого выражение (2.107), заменив в нем $T(R)$ на ε , λ на λ_{Π} и найдя из полученного уравнения R , который и будет равен искомому параметру $h_{\text{макс}}$.

Произведя ряд несложных математических преобразований выражения (2.117), получим формулу для определения искомой толщины защитного покрытия

$$h_{\Pi} = h_{\text{макс}} \frac{\bar{\lambda} - \lambda_T}{\lambda_{\Pi} - \lambda_T}. \quad (2.118)$$

Используя выражение (2.114), получим следующую формулу для определения толщины защитных покрытий

$$h_{\Pi} = \frac{h_{\text{макс}}}{2\pi(\lambda_{\Pi} - \lambda_T)} \left(\frac{q_1 - q_2}{T_1(R_1)R_1 - T_2(R_x)R_x} - \lambda_T \right). \quad (2.119)$$

Таким образом, определив коэффициент теплопроводности изделия с защитным покрытием $\bar{\lambda}$ с учетом конвективного теплообмена между поверхностью изделия и окружающей средой и зная коэффициенты теплопроводности покрытия λ_{Π} и тела λ_T , а также $h_{\text{макс}}$ по формуле (2.118) можно с большой точностью рассчитать толщину искомого пленочного покрытия.

Уравнение измерения для разработанного метода контроля ТЗП имеет вид

$$h_{nj}^* = \frac{\langle h_{\text{макс}} \rangle_{q_{1j}}}{\langle 2\pi \langle \langle x_n \rangle_{q_{2j}} - \langle \lambda_T \rangle_{q_{3j}} \rangle_{q_{4j}} \rangle_{q_{5j}}} \times \\ \times \frac{\langle \langle Q_1 \rangle_{q_{7j}} - \langle Q_2 \rangle_{q_{8j}} \rangle_{q_{9j}}}{\langle \langle \langle T_1(R_1) \rangle_{q_{10j}} \langle R_1 \rangle_{q_{11j}} - \langle \langle T_2(R_{xj}^*) \rangle_{q_{12j}} \langle R_{xj}^* \rangle_{q_{13j}} \rangle_{q_{14j}} \rangle_{q_{15j}}} \rangle_{q_{16j}} - \\ - \langle \lambda_T \rangle_{q_{17j}} \rangle_{q_{18j}} \rangle_{q_{19j}}.$$

2.3 АЛГОРИТМЫ И УРАВНЕНИЯ АДАПТИВНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ТФХ И ТЗП МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ

2.3.1 АЛГОРИТМЫ, СТРУКТУРЫ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ЦЕПЕЙ И УРАВНЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ ТФХ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ

Основным преимуществом представленных в этом разделе методов измерения ТФХ является поиск в процессе измерения оптимальных значений режимных и энергетических параметров теплофизического эксперимента, что позволяет в условиях недостаточной априорной информации о ТФХ объектов измерения исследовать все твердые материалы с полной гарантией сохранения их целостности и эксплуатационных характеристик, а это в итоге существенно расширяет функциональные возможности адаптивных методов по диапазону и классам исследуемых материалов. Кроме того, получение измерительной информации в ходе теплофизического эксперимента в число- и частотноимпульсной форме позволяет легко преобразовывать измерительную информацию в цифровую форму, что облегчает реализацию адаптивных алгоритмов измерения на основе процессорных ИИС.

Разработан метод НК ТФХ материалов, сущность которого заключается в следующем [60].

На теплоизолированную от внешней среды поверхность исследуемого тела помещают линейный импульсный источник тепла постоянной мощности. После подачи теплового импульса фиксируют интегральное значение температуры в точке поверхности исследуемого тела, расположенной на заданном расстоянии от линии действия источника тепла. При наступлении равенства интегральных значений температуры до и после максимума термограммы нагрева, который определяется дифференцированием температурной кривой, осуществляется тепловое воздействие на исследуемое тело от того же источника вторым тепловым импульсом, равным по мощности первому импульсу. Затем в момент времени, когда интегральное во времени значение температуры в контролируемой точке с момента подачи второго теплового импульса до момента наступления максимума термограммы станет равным интегральному значению после максимума, воздействуют на исследуемое тело третьим тепловым импульсом той же мощности и т.д. При этом измеряют частоту следования импульсов на исследуемое тело, а искомые теплофизические характеристики определяют по формулам:

$$a = \frac{x_1^2(1 - \tau_1 F_x)}{4\tau_1 \ln(\tau_1 F_x)}; \quad (2.120)$$

$$\lambda = \frac{p}{2\pi S_1(x, \tau)} \int_{\tau_1}^{\tau_{\max}} \frac{1}{\tau} \exp\left(-\frac{x_1^2}{4a\tau}\right) d\tau, \quad (2.121)$$

где x_1 - координата точки, расположенной на заданном расстоянии от линии действия импульсного источника тепла; τ_1 - заранее заданный момент времени; τ_{\max} - момент наступления максимальной температуры в контролируемой точке; F_x - частота следования импульсов теплового воздействия; $S_1(x, \tau)$ - интегральное значение температуры на интервале времени $\tau_1 - \tau_{\max}$; p - количество тепла, выделяемое одним импульсом на единицу длины источника.

Таким образом, измерив частоту следования тепловых импульсов от источника тепла к исследуемому телу, интегральное во времени значение температуры $S_1(x, \tau)$ и зная мощность теплового воздействия, время наступления максимума термограмм нагрева, по формулам (2.120) и (2.121) можно рассчитать значения коэффициентов тепло- и температуропроводности исследуемых тел.

Структура измерительной цепи для данного метода измерения представлена на рис. 2.26.

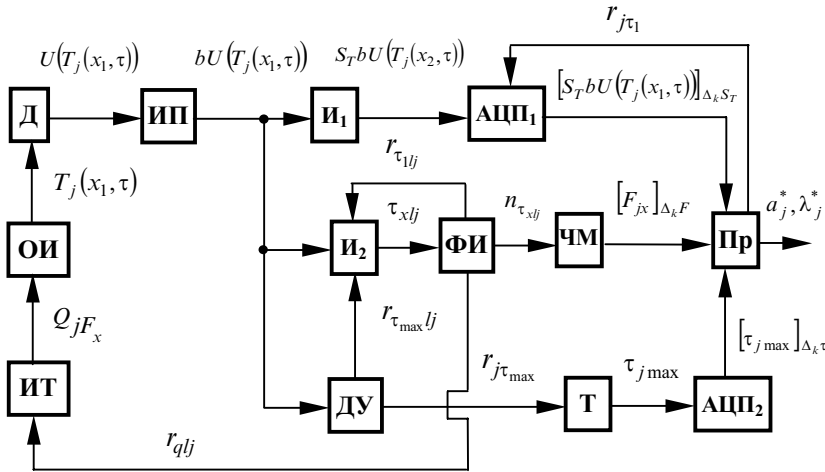


Рис. 2.26 Схема измерительной цепи адаптивного алгоритма измерения ТФХ

В схеме на рис. 2.26 И₁ - интегратор, фиксирующий интегральное значение температуры в первом цикле измерения на интервале времени $\tau_1 - \tau_{\max}$; И₂ - реверсивный интегратор, определяющий моменты времени τ_{x_l} равенства интегральных значений температуры до и после максимума, причем переключение И₂ из режима суммирования в режим вычитания осуществляется по команде с управляющего устройства в моменты времени $\tau_{\max l}$; ФИ - формирователь импульсов, который подает импульсы в моменты времени τ_{x_l} на частотомер ЧМ, а также подает команды на источник тепла ИТ, по которым очередной импульс тепла наносится на поверхность тела; r_{τ_l} - идентификатор команды на начало интегрирования в И₂; $r_{j l}$ - идентификатор команды на подачу теплового импульса в l -м цикле; ЧМ - частотомер, определяющий частоту F_x импульсов с формирователя ФИ и преобразующий F_x в числовой эквивалент (код).

Уравнения измерений ТФХ в соответствии с формулами (2.120) и (2.121) имеют

вид:

$$a_j^* = \frac{\langle \langle x_1 \rangle \rangle^2 \rangle_{q_{1j}} \langle (1 - \langle \tau_1 \rangle F_{jx}^*) \rangle_{q_{2j}} \rangle_{q_{3j}} \rangle_{q_{4j}} \rangle_{q_{8j}}}{\langle 4 \langle \tau_1 \rangle \ln \langle \tau_1 \rangle F_{jx}^* \rangle_{q_{5j}} \rangle_{q_{6j}} \rangle_{q_{7j}}} ; \quad (2.122)$$

$$\lambda_j^* = \langle \langle \frac{\langle p \rangle}{\langle 2\pi S_j^* \rangle_{q_{1j}}} \rangle_{q_{2j}} \int_{\tau_1}^{\tau_{\max}} \frac{1}{\tau'} \exp\left(-\frac{x_1^2}{4a_j^* \tau'}\right) dt' \rangle_{q_{3j}} \rangle_{q_{4j}} . \quad (2.123)$$

Разработан метод НК ТФХ материалов, сущность которого заключается в следующем [61].

На поверхность исследуемого тела помещают линейный источник тепла заданной мощности и осуществляют тепловое воздействие одним импульсом. Затем определяют интервал времени $\tau_{\text{имп1}}$ и $\tau_{\text{имп2}}$ от начала теплового воздействия до момента, когда

температура в точках контроля x_1 и x_2 станет равной первоначальной температуре T_0 , после чего определяют минимальную частоту следования импульсов

$$F_{\min} = \min\left(\frac{1}{\tau_{\text{имп1}}}; \frac{1}{\tau_{\text{имп2}}}\right),$$

при которой не происходит роста температуры в исследуемом теле.

Увеличивают частоту подачи тепловых импульсов по закону

$$\Delta F = F_{\min} T_{\text{изм}} \frac{\Delta T}{T_{\text{зад1}}^2}, \quad (2.124)$$

где $T_{\text{изм}}$ - значение избыточной температуры в первой точке контроля; $T_{\text{зад1}}$ - наперед заданное значение температуры; $\Delta T = T_{\text{зад1}} - T_{\text{изм}}$ - разность значений температур.

Увеличение частоты следования тепловых импульсов в соответствии с зависимостью (2.124) осуществляют до тех пор, пока установившееся интегральное значение контролируемой температуры в точке контроля x_1 не станет равным наперед заданному значению $T_{\text{зад1}}$, и определяют при этом частоту следования импульсов F_{x1} . Затем продолжают увеличение частоты следования тепловых импульсов по указанной зависимости до тех пор, пока установившееся значение избыточной температуры во второй точке контроля x_2 станет равным наперед заданному значению $T_{\text{зад2}}$ и определяют соответствующую этому тепловому режиму частоту следования тепловых импульсов F_{x2} .

Установившееся значение температуры достигается в точках контроля тогда, когда очередной импульс не изменяет температуру в этих точках. По найденным значениям частот F_{x1} и F_{x2} и интервалам $\tau_{\text{имп1}}$, $\tau_{\text{имп2}}$ (времени релаксации ТП при действии одиночного импульса) рассчитывают искомые теплофизические характеристики исследуемого материала по формулам, полученным на основании следующих рассуждений.

Процесс распространения тепла на теплоизолированной от внешней среды поверхности полубесконечного в тепловом отношении тела при действии линейного источника тепла описывается решением задачи теплопроводности, которое имеет вид

$$T(x, \tau - \tau_i) = \sum_{i=1}^n \frac{Q}{2\pi\lambda(\tau - \tau_i)} \exp\left[-\frac{x^2}{4a(\tau - \tau_i)}\right], \quad (2.125)$$

где x - расстояние от линейного источника тепла до точки контроля, м; τ - время, с; τ_i - момент нанесения i -го теплового импульса на поверхность тела.

При нанесении одного теплового импульса изменение температуры в точке контроля определяется соотношением (1.23).

По заданной величине ε - чувствительности измерительной аппаратуры - из решения уравнения

$$\frac{Q}{\pi\lambda\tau} \exp\left(-\frac{x^2}{4a\tau}\right) = \varepsilon, \quad (2.126)$$

определяются интервалы времени релаксации температурного поля в точках x_1 и x_2 от воздействия теплового импульса $\tau_{\text{имп1}}$, $\tau_{\text{имп2}}$.

Полученные интервалы $\tau_{\text{имп}}$ полностью определяют количество импульсов, влияющих на установившуюся температуру в точке контроля в момент измерения τ , т.е. если τ_i - время подачи импульса не принадлежит интервалу $[\tau - \tau_{\text{имп}}, \tau]$, то он не влияет на температуру в точке контроля. Количество импульсов, подаваемых на интервале $\tau_{\text{имп}}$ с частотой F , определяется соотношением

$$n = E(\tau_{\text{имп}} F), \quad (2.127)$$

где $E(x)$ - функция целой части числа x .

Таким образом, для двух точек контроля, расположенных на расстоянии x_1 и x_2 от линии действия источника тепла, находятся интервалы времени импульсов $\tau_{\text{имп}1}$, $\tau_{\text{имп}2}$ из решения уравнения (2.127). Увеличивая по закону (2.124) частоту подачи импульсов, определяют частоты F_{x1} и F_{x2} , при которых достигается установившееся заданное значение температуры $T_{\text{зад}1}$ в точках контроля x_1 и x_2 , соответственно. Из соотношения (2.127) находят число импульсов n_1 , n_2 , влияющих на температуру в точках контроля x_1 и x_2 :

$$n_1 = E(\tau_{\text{имп}1} F_{x1}) = E\left(\frac{F_{x1}}{F_{\text{имп}1}}\right); \quad (2.128)$$

$$n_2 = E(\tau_{\text{имп}2} F_{x2}) = E\left(\frac{F_{x2}}{F_{\text{имп}2}}\right), \quad (2.129)$$

где $F_{\text{имп}i} = \frac{1}{\tau_{\text{имп}i}}$ ($i = 1, 2$) - минимальные частоты подачи импульсов для соответствующих точек контроля.

Установившаяся температура в результате действия серии импульсов в точках контроля x_1 и x_2 на основании (2.125) будет определяться соотношениями:

$$T_1 = \frac{Q}{2\pi\lambda\Delta\tau_1} \sum_{i=1}^{n_1} \frac{1}{i} \exp\left(-\frac{x_1^2}{4a\Delta\tau_i}\right) = \frac{QF_{x1}}{2\pi\lambda} \sum_{i=1}^{n_1} \frac{1}{i} \exp\left(-\frac{x_1^2}{4a\Delta\tau_i}\right); \quad (2.130)$$

$$T_2 = \frac{QF_{x2}}{2\pi\lambda} \sum_{i=1}^{n_2} \frac{1}{i} \exp\left(-\frac{x_2^2}{4a\Delta\tau_i}\right), \quad (2.131)$$

где $\Delta\tau_i = 1/F_{xi}$ ($i = 1, 2$) - расстояние между передними фронтами импульсов на интервалах $\tau_{\text{имп}1}$ и $\tau_{\text{имп}2}$.

Для решения системы (2.130) - (2.131) относительно a и λ воспользуемся разложением в ряд $e^{-x} = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{x^i}{i!}$, а так как значение x близко к нулю, ограничимся в разложении двумя слагаемыми:

$$T_{\text{зад}1} = \frac{QF_{x1}}{2\pi\lambda} \left(\sum_{i=1}^{n_1} \frac{1}{i} - \frac{x_1^2 F_{x1}}{4a} \sum_{i=1}^{n_1} \frac{1}{i^2} \right); \quad (2.132)$$

$$T_{\text{зад}2} = \frac{QF_{x2}}{2\pi\lambda} \left(\sum_{i=1}^{n_2} \frac{1}{i} - \frac{x_2^2 F_{x2}}{4a} \sum_{i=1}^{n_2} \frac{1}{i^2} \right). \quad (2.133)$$

Поделив (2.132) на (2.133), получим выражение для теплопроводности

$$a = \frac{(x_2 F_{x2})^2 \sum_{i=1}^{n_2} \frac{1}{i^2} - (x_1 F_{x1})^2 \sum_{i=1}^{n_1} \frac{1}{i^2}}{4 \left(F_{x2} \sum_{i=1}^{n_2} \frac{1}{i} - F_{x1} \sum_{i=1}^{n_1} \frac{1}{i} \right)}. \quad (2.134)$$

Для определения коэффициента теплопроводности найденное значение коэффициента подставляют в (2.130)

$$\lambda = \frac{QF_{x1}}{2\pi T_{\text{зад}1}} \sum_{i=1}^{n_1} \frac{1}{i} \exp\left(-\frac{x_1^2 F_{x1}}{4ai}\right). \quad (2.135)$$

Возможно и иное осуществление метода. Применяется только один теплоприемник. После определения частоты тепловых импульсов F_{x1} , соответствующей равенству текущего значения температуры $T_{\text{изм}}$ наперед заданному значению в точке контроля, увеличивают частоту тепловых импульсов до тех пор, пока значение избыточной контролируемой температуры в этой же точке не достигнет второго наперед заданного значения $T_{\text{зад}2}$. Определяют при этом частоту тепловых импульсов F_{x2} , а искомые теплофизические характеристики рассчитывают по формулам, полученным следующим образом.

Система уравнений (2.132) - (2.133) для этого случая будет иметь вид:

$$T_{\text{зад}1} = \frac{QF_{x1}}{2\pi\lambda} \left(\sum_{i=1}^{n_1} \frac{1}{i} - \frac{x_1^2 F_{x1}}{4a} \sum_{i=1}^{n_1} \frac{1}{i^2} \right); \quad (2.136)$$

$$T_{\text{зад}2} = \frac{QF_{x2}}{2\pi\lambda} \left(\sum_{i=1}^{n_2} \frac{1}{i} - \frac{x_2^2 F_{x2}}{4a} \sum_{i=1}^{n_2} \frac{1}{i^2} \right). \quad (2.137)$$

После несложных математических преобразований (2.136) и (2.137) получим следующие формулы для определения коэффициентов тепло- и температуропроводности:

$$a = \frac{x_1^2}{4} \frac{T_{\text{зад}1} F_{x2}^2 \sum_{i=1}^{n_2} \frac{1}{i^2} - T_{\text{зад}2} F_{x1}^2 \sum_{i=1}^{n_1} \frac{1}{i^2}}{T_{\text{зад}1} F_{x2} \sum_{i=1}^{n_2} \frac{1}{i} - T_{\text{зад}2} F_{x1} \sum_{i=1}^{n_1} \frac{1}{i}}; \quad (2.138)$$

$$\lambda = \frac{QF_{x1}}{2\pi T_{зад1}} \sum_{i=1}^{n_1} \frac{1}{i} \exp\left(-\frac{x_1^2 F_{x1}}{4ai}\right). \quad (2.139)$$

Схема процессорного измерителя ТФХ в этом случае имеет вид, представленный на рис. 2.27.

В схеме на рис. 2.27 ВУ₁, ВУ₂ - вычитающие устройства, определяющие разности ΔT_{jl} в любом l -ом цикле; Кп - компаратор, срабатывающий при равенстве измеряемых температур ее первоначальному значению в точках x_1 и x_2 (определяет время релаксации температурного поля); $r_{j\Delta F_x}$ - идентификатор команды на изменение частоты импульсов, в соответствии с законом, в l -ом цикле; r_{qlj} - идентификатор команд на определение разности температур ΔT_j в l -ом цикле.

Уравнения измерений, в соответствии с формулами (2.134) и (2.135), имеют вид:

$$a_j^* = \frac{\langle \langle \langle x_2 \rangle \rangle^2 \rangle_{q_{1j}} \langle \langle F_{x2j}^* \rangle \rangle^2 \rangle_{q_{2j}} \langle S_{2j}^* \rangle_{q_{3j}} - \langle \langle x_1 \rangle \rangle^2 \rangle_{q_{4j}}}{\langle 4 \langle \langle F_{x2j}^* S_{2j}^* \rangle \rangle_{q_{8j}} - \langle F_{x1j}^* S_{1j}^* \rangle_{q_{9j}} \rangle_{q_{10j}} \rangle_{q_{11j}}} \rightarrow \langle \langle F_{x1j}^* \rangle \rangle^2 \rangle_{q_{5j}} \rangle_{q_{6j}} \rangle_{q_{7j}} \rangle_{q_{12j}}, \quad (2.140)$$

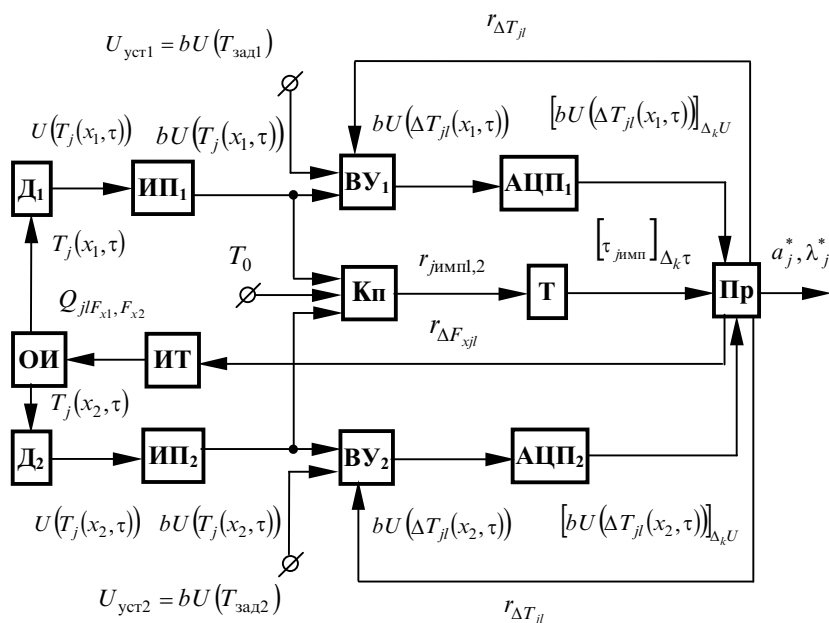


Рис. 2.27 Схема измерительной цепи адаптивного алгоритма измерения ТФХ материалов

$$\lambda_j^* = \frac{\langle \langle Q_0 \rangle \rangle F_{jx1}^* \rangle_{q_{1j}}}{\langle 2\pi \langle T_{зад1} \rangle \rangle_{q_{2j}}} \langle \sum_{i=1}^{n_1} \frac{1}{i} \langle \exp \left[-\frac{\langle \langle x_1 \rangle \rangle^2 \rangle_{q_{4j}} F_{jx1}^*}{\langle 4ia_j^* \langle \Delta \tau \rangle \rangle_{q_{6j}}} \right] \rangle_{q_{3j}} \rightarrow$$

$$\left. \begin{aligned} & \rightarrow \overline{q_{5j}} > q_{7j} > q_{8j} \\ & \left. \right) > q_{9j} > q_{10j}, \end{aligned} \right. \quad (2.141)$$

где $S_{(k=1,2)}^{*jk} = \left\langle \sum_{i=1}^{n_k} \frac{1}{i^2} \right\rangle_{q_{1j}}$; $\overline{S_{(k=1,2)}^{*jk}} = \left\langle \sum_{i=1}^{n_k} \frac{1}{i} \right\rangle_{q_{2j}}$.

2.3.2 АЛГОРИТМЫ, СТРУКТУРЫ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ЦЕПЕЙ И УРАВНЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ ТЗП МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ

Разработан адаптивный метод неразрушающего контроля толщины защитных покрытий, сущность которого заключается в следующем [62].

На поверхность исследуемого изделия без покрытия помещают источник тепловой энергии в виде прямоугольника, длина и ширина которого соответственно равны b и a , и теплоизолируют его от окружающей среды. Осуществляют тепловое воздействие от источника одним тепловым импульсом, в котором выделяется небольшое количество тепла q_0 , Дж. При этом определяют интервал времени τ_0 от момента нанесения теплового импульса на поверхность тела до момента, когда контролируемая в центре прямоугольного участка избыточная температура станет равной первоначальной температуре тела или на 2 - 3 % выше первоначального значения (рис. 2.28, а). Затем определяют минимальную частоту импульсов $F_{\min} = 1/\tau_0$, при которой не будет происходить роста избыточной температуры в точке контроля, если осуществляется воздействие тепловыми импульсами от источника с этой частотой.

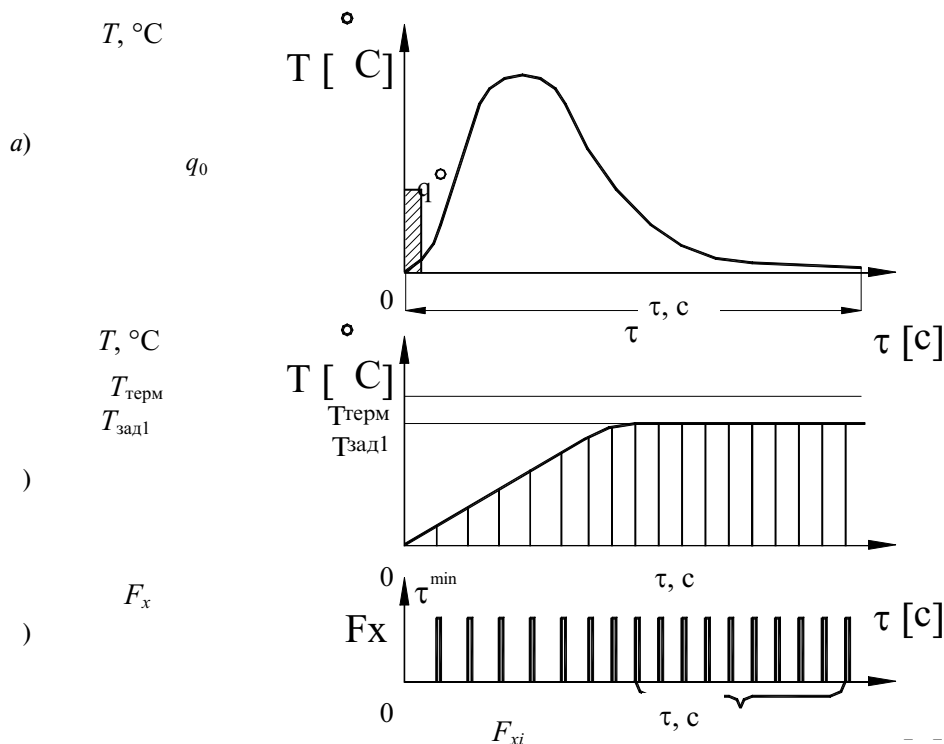


Рис. 2.28 Термограммы нагрева и вид теплового воздействия адаптивного алгоритма измерения ТЗП

Осуществляют тепловое воздействие от источника, увеличивая частоту подачи тепловых импульсов в соответствии с законом:

$$F = 1/\tau_0 + \Delta F_i; \quad (2.142)$$

$$\Delta F_i = K_1 \Delta \tau_i + \frac{1}{K_2} \int_{\tau_{j-1}}^{\tau_j} \Delta T(\tau) d\tau + K_3 \left. \frac{d}{d\tau} [\Delta T_i(\tau)] \right|_{\tau=\tau_i}, \quad (2.143)$$

где $\Delta T(\tau) = T_{\text{зад}} - T(\tau)$ - разность между наперед заданным значением и текущим значением контролируемой температуры; $\Delta T_i = T_{\text{зад}} - T(\tau)$ - разность между заданной и текущей температурой в момент времени, который определяется в соответствии с формулой

$$\tau_i = K_4 \sum_{k=1}^{i-1} \Delta T_k + \tau_{\text{min}}, \quad (2.144)$$

K_1, K_2, K_3, K_4 - коэффициенты пропорциональности, определяемые экспериментальным путем; τ_{min} - минимальный интервал времени определения разности ΔT_i .

Увеличение частоты следования тепловых импульсов в соответствии с приведенным законом осуществляется до тех пор, пока установившееся значение избыточной температуры в точке контроля достигнет наперед заданного значения $T_{\text{зад}}$, т.е. $\Delta T = T_{\text{зад}} - T(\tau) = 0$.

Установившееся значение температуры в точке контроля достигается тогда, когда очередной тепловой импульс из серии импульсов, подаваемых источником, не изменяет температуру в этой точке. Определяют частоту тепловых импульсов F_{x1} и далее аналогичные операции производят над изделием с покрытием, определив при этом частоту наносимых на участок поверхности изделия источником тепла импульсов F_{x2} , при которых контролируемая температура также будет равна заданному значению $T_{\text{зад}}$, причем $T_{\text{зад}}$ на 20 - 30 % задается ниже значения температуры термодеструкции материала и самого изделия. Затем определяют разность найденных частот $\Delta F_x = |F_{x2} - F_{x1}|$, а искомую толщину пленочного покрытия определяют по формуле, полученной на основании следующих рассуждений.

Из теории теплопроводности известно [2], что при нагреве участка полубесконечного в тепловом отношении тела тепловым потоком при достижении квазистационарного теплового режима установившееся значение температуры в центре этого участка определяется выражением

$$T_{\text{уст}} = \frac{2p}{\pi\lambda} \left(a \operatorname{Arsh} \frac{b}{a} + b \operatorname{Arsh} \frac{a}{b} \right), \quad (2.145)$$

где p - плотность теплового потока на участке теплового воздействия, Вт/м²; b и a - соответственно, длина и ширина участка теплового воздействия, м.

Поскольку при импульсном тепловом воздействии плотность теплового потока $p = \sum_{j=1}^n \frac{p_0^n}{T_0 S}$, где n - число тепловых импульсов, поданных источником за период T_0 ; S - площадь прямоугольника, равная ba , то выражение (2.145) для нашего случая можно записать

$$T_{\text{уст}} = \frac{2p_0 F_x}{\pi\lambda S} \left(a \operatorname{Arsh} \frac{b}{a} + b \operatorname{Arsh} \frac{a}{b} \right), \quad (2.146)$$

где $F_x = \frac{n}{T_0}$ частота следования тепловых импульсов от источника тепла, при котором установившееся значение контролируемой температуры будет равно наперед заданному значению $T_{\text{зад}}$.

На основании выражения (2.146) теплопроводность исследуемого изделия без покрытия будет определяться по формуле

$$\lambda_{\text{изд}} = \frac{2p_0 F_{x1}}{\pi S T_{\text{зад}}} \left(a \operatorname{Arsh} \frac{b}{a} + b \operatorname{Arsh} \frac{a}{b} \right). \quad (2.147)$$

Среднеинтегральный коэффициент теплопроводности изделия с нанесенным на его поверхность покрытием будет определяться из соотношения

$$\bar{\lambda}_{\text{ср}} = \frac{2p_0 F_{x2}}{\pi S T_{\text{зад}}} \left(a \operatorname{Arsh} \frac{b}{a} + b \operatorname{Arsh} \frac{a}{b} \right). \quad (2.148)$$

Поскольку участок изделия с покрытием, подвергнутый тепловому воздействию представляет собой двухслойное тело, пронизываемое тепловым потоком, то измеряемый среднеинтегральный по объему коэффициент теплопроводности

$$\bar{\lambda}_{\text{ср}} = m_1 \lambda_{\text{п}} + m_2 \lambda_{\text{изд}}, \quad (2.149)$$

где $\lambda_{\text{п}}$ - коэффициент теплопроводности материала покрытия, m_1 и m_2 - коэффициенты, значения которых изменяются от 0 до 1, так как в соответствии с выражением (2.149) при отсутствии покрытия $m_1 = 0$, $m_2 = 1$, а при максимально возможной толщине покрытия, при которой теплофизические свойства тела изделия практически не оказывают влияния на формирование температурного поля поверхности, наоборот $m_1 = 1$, $m_2 = 0$. Поскольку среднеинтегральный коэффициент теплопроводности $\bar{\lambda}_{\text{ср}}$ определяется процентом содержания покрытия тела в единице объема, то $m_1 + m_2 = 1$ и выражение (2.149) можно записать в следующем виде

$$\bar{\lambda}_{\text{ср}} = m_1 \lambda_{\text{п}} + (1 - m_1) \lambda_{\text{изд}}. \quad (2.150)$$

Ввиду того, что значение коэффициента m_1 пропорционально толщине пленочного покрытия, выражение (2.150) можно представить

$$\bar{\lambda}_{cp} = l\lambda_{п} h_{п} + (1-l h_{п})\lambda_{изд}, \quad (2.151)$$

где $h_{п}$ - толщина пленочного покрытия; l - коэффициент пропорциональности, определяемый экспериментальным путем и численно равный обратной величине от максимально возможной в тепловом отношении толщины покрытия.

Используя выражение (2.147), (2.148) и (2.151), после несложных математических преобразований получим следующую формулу для определения искомой толщины пленочного покрытия

$$h_{п} = \frac{2p_0 |F_{x2} - F_{x1}| h_{max} \left(a \operatorname{Arsh} \frac{b}{a} + b \operatorname{Arsh} \frac{a}{b} \right)}{\pi S T_{зад} \lambda_{п} - 2p_0 F_{x1} \left(a \operatorname{Arsh} \frac{b}{a} + b \operatorname{Arsh} \frac{a}{b} \right)}. \quad (2.152)$$

Входящий в расчетную формулу параметр h_{max} можно определить экспериментально или расчетным путем. В первом случае параметр h_{max} определяют путем удаления термоприемника от участка нагрева материала покрытия до тех пор, пока значение контролируемой избыточной температуры станет равной чувствительности ε контрольно-измерительной аппаратуры. Найденное расстояние x будет равно искомому параметру h_{max} . Параметр h_{max} можно определить расчетным путем, используя выражение для температурного поля в исследуемом полубесконечном в тепловом отношении теле, подверженном тепловому воздействию через прямоугольный участок поверхности,

$$T(x, \tau) = \frac{2q_0}{\lambda} \left[\left(\frac{a\tau}{\pi} \right)^{1/2} e^{-\frac{x^2}{4a\tau}} - \frac{x}{2} \Phi \left(\frac{x}{2\sqrt{a\tau}} \right) \right], \quad (2.153)$$

где a - температуропроводность тела; $\Phi(x)$ - функция ошибок Гаусса. Приравняв выражение (2.153) величине ε , численным методом находят значение расстояния x , которое будет равно параметру h_{max} .

Измерительная цепь представленного алгоритма измерения ТЗП изделий приведена на рис. 2.29.

В схеме рис. 2.29 $r_{j\Delta T}$ - идентификатор команды, по которой осуществляется определение ΔT_{jl} в l -ом цикле; $r_{j\Delta F}$ - идентификатор команды на источник ИТ, в соответствии с которой изменяется частота теплового импульса ΔF_{xi} .

Уравнение измерения в соответствии с формулой (2.152) имеет вид

$$h_{пj}^* = \left\langle \frac{\langle 2 \langle Q_0 \rangle \langle F_{x1j}^* - F_{x2j}^* \rangle_{q_{1j}} \langle L \rangle_{q_{2j}}}{\langle \langle \pi \langle S \rangle \langle T_{зад} \rangle \langle \lambda_{п} \rangle \rangle_{q_{3j}} - \langle 2 \langle Q_0 \rangle \langle F_{x1j}^* \rangle \langle L \rangle \rangle_{q_{4j}} \rangle_{q_{5j}}} \right\rangle_{q_{6j}}, \quad (2.154)$$

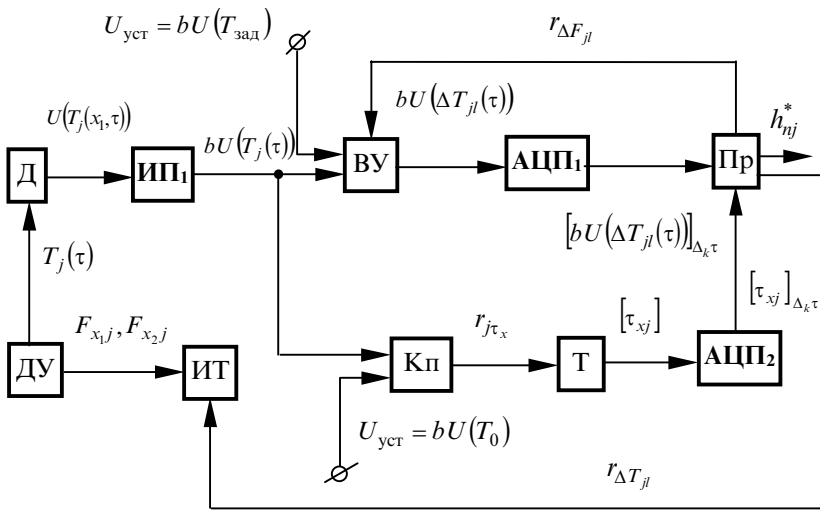


Рис. 2.29 Схема измерительной цепи адаптивного алгоритма НК ТЗП материалов и изделий

где

$$L = \langle \langle \langle a \rangle \rangle \text{Arsh} \left\langle \frac{\langle b \rangle}{\langle a \rangle} \right\rangle_{q_{1j}} \rangle_{q_{2j}} \rangle_{q_{3j}} + \langle \langle b \rangle \rangle \text{Arsh} \left\langle \frac{\langle a \rangle}{\langle b \rangle} \right\rangle_{q_{4j}} \rangle_{q_{5j}} \rangle_{q_{6j}} \rangle_{q_{7j}} ;$$

a и b - ширина и длина прямоугольного нагревателя.

Рассмотрим бесконтактный адаптивный метод измерения толщины защитных покрытий, отличительной особенностью которого является поиск в процессе измерения оптимального по критерию точности расстояния между термодатчиком и источником теплоты [27]. Сущность метода измерения заключается в следующем.

Над исследуемым изделием (рис. 2.30) помещают источник энергии и термодатчик, включают источник и начинают перемещение его и термодатчика над исследуемым изделием с постоянной скоростью V . Термодатчик, движущийся при этом по линии перемещения источника энергии с отставанием от него, регистрирует избыточную температуру нагреваемой поверхности, соответствующую установившемуся квазистационарному режиму нагрева. Затем изменяют расстояние отставания точки контроля температуры от центра пятна нагрева источника энергии в соответствии с зависимостью

$$x = x_n + \Delta x, \tag{2.155}$$

где x_n - начальное расстояние между точкой регистрации температуры и центром пятна нагрева; $\Delta x = K [T_{зад} - T(x)] = K \Delta T$; $T_{зад}$ - заданное значение температуры поверхности исследуемого тела, величина которого устанавливается таким образом, чтобы ее можно было измерить с помощью измерительной аппаратуры с погрешностью не более 1 % ; $T(x)$ - избыточная предельная температура в точке контроля; K - коэффициент пропорциональности,

величина которого задается от 0,1 до 2. Изменение расстояния между точкой контроля температуры и центром пятна нагрева и перемещения термоприемника осуществляют до тех пор, пока контролируемая избыточная температура поверхности исследуемого изделия станет равной заданному значению $T_{зад}$, т.е. $T_{зад} = T(x)$, $\Delta T(x) = 0$.

При нагреве поверхности полубесконечного в тепловом отношении изделия подвижным точечным источником энергии избыточная температура поверхности этого изделия в точке, перемещающейся вслед за источником по линии его движения со скоростью, равной скорости перемещения источника, определяется формулой

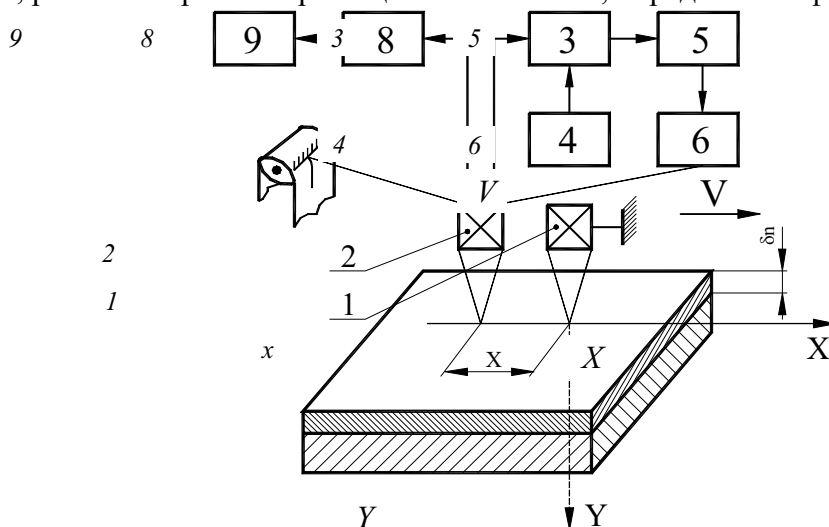


Рис. 2.30 Схема физической системы адаптивного бесконтактного алгоритма измерения ТЗП изделий

$$T(x) = \frac{P_0}{2\pi\bar{\lambda}x}, \quad (2.156)$$

где P_0 - мощность источника; $\bar{\lambda}$ - среднеинтегральный по объему коэффициент теплопроводности тепловой системы, состоящий из покрытия и основания, на которое оно нанесено; x - расстояние между точкой измерения температуры и центром пятна нагрева поверхности исследуемого изделия сосредоточенным источником энергии.

Поскольку расстояние между точкой контроля температуры и центром пятна нагрева адаптивно изменяется до момента наступления равенства $T(x) = T_{зад}$, то в соответствии с формулой (2.156)

$$x = P_0 / 2\pi\lambda T_{зад} = K_1 / \lambda, \quad (2.157)$$

где $K_1 = P_0 / 2\pi T_{зад}$ - постоянная величина.

Таким образом, измеренное расстояние между точкой контроля температуры и центром пятна нагрева x функционально связано с коэффициентом теплопроводности исследуемого изделия.

Поскольку покрытие и изделие, на которое оно нанесено, представляют собой двухслойную тепловую систему, пронизываемую при тепловом воздействии тепловым потоком, перпендикулярным слоям, то на основании формулы Цедерберга можно записать

$$\bar{\lambda} = n_1 \lambda_{\text{п}} + n_2 \lambda_{\text{т}}, \quad (2.158)$$

где $\lambda_{\text{п}}$, $\lambda_{\text{т}}$ - соответственно, коэффициенты теплопроводности покрытия и изделия, на которое оно нанесено;

$$n_1 = \frac{m_{\text{п}}}{m_{\text{п}} + m_{\text{т}}}; \quad n_2 = \frac{m_{\text{т}}}{m_{\text{п}} + m_{\text{т}}},$$

$m_{\text{п}}$ - масса покрытия; $m_{\text{т}}$ - масса тела.

Так как $m_{\text{п}} = V_1 \rho_{\text{п}} = S_{\text{контр}} l_{\text{п}} \rho_{\text{п}}$, а $m_{\text{т}} = V_2 \rho_{\text{т}} = S_{\text{контр}} l_{\text{т}} \rho_{\text{т}}$, где V_1 и V_2 , соответственно, объем покрытия и тела, подверженный тепловому воздействию; $S_{\text{контр}}$ - площадь участка активного теплового воздействия; $l_{\text{п}}$ и $l_{\text{т}}$ - соответственно, толщина покрытия и изделия; $\rho_{\text{п}}$, $\rho_{\text{т}}$ - плотности покрытия и тела, то

$$n_1 = \frac{l_{\text{п}} \rho_{\text{п}}}{l_{\text{п}} \rho_{\text{п}} + l_{\text{т}} \rho_{\text{т}}}; \quad n_2 = \frac{l_{\text{т}} \rho_{\text{т}}}{l_{\text{п}} \rho_{\text{п}} + l_{\text{т}} \rho_{\text{т}}}. \quad (2.159)$$

Подставив (2.159) в (2.158) и произведя ряд несложных математических преобразований, получим формулу для определения толщины покрытия

$$l_{\text{п}} = \frac{l_{\text{т}} \rho_{\text{т}} (\lambda_{\text{т}} - \bar{\lambda})}{\rho_{\text{п}} (\bar{\lambda} - \lambda_{\text{п}})}. \quad (2.160)$$

Используя соотношение (2.157), формулу (2.160) можно записать

$$l_{\text{п}} = K_2 \frac{x_{\text{изм}} \lambda_{\text{т}} - K_1}{K_1 - \lambda_{\text{п}} x_{\text{изм}}}, \quad (2.161)$$

где $K_2 = \frac{l_{\text{т}} \rho_{\text{т}}}{\rho_{\text{п}}}$ - постоянная, зависящая от отношения плотности покрытия и изделия.

Таким образом, измерив расстояние между точкой контроля температуры и центром пятна нагрева и зная плотность и теплопроводность покрытия и изделия, а также мощность теплового воздействия и значение заданной температуры $T_{\text{зад}}$, по формуле (2.161) можно определить искомую толщину покрытия.

На рис. 2.30 показано устройство, реализующее представленный метод. Устройство содержит точечный источник тепловой энергии 1, термоприемник 2, перемещаемый с постоянной скоростью V относительно исследуемого изделия. Выход термоприемника подключен к первому входу вычитающего устройства 3, на второй вход которого подается с блока 4 напряжение уставки, моделирующее величину наперед заданной температуры $T_{\text{зад}}$. Разностный сигнал с выхода вычитающего устройства 3 через усилитель мощности 5 поступает на реверсивный двигатель 6, вал которого кинематически соединен с механизмом перемещения термоприемника 2 относительно источника тепловой энергии 1. Термоприемник 2 соединен с регистрирующим прибором 7, осуществляющим запись и показания толщины покрытия исследуемых изделий, а также с преобразователем перемещения в электрический сигнал 8, выход которого подключен к микропроцессору 9.

Устройство реализует алгоритм измерения следующим образом. Включают источник 1 энергии и начинают его перемещение и термоприемника 2 над исследуемым изделием с постоянной скоростью V . Термоприемник 2, движущийся при этом по линии перемещения источника энергии с отставанием от него, регистрирует избыточную температуру нагреваемой поверхности. Разностный сигнал $\Delta T(x)$ с выхода вычитающего устройства 3 через усилитель 5 поступает на реверсивный двигатель 6, который в зависимости от знака и величины рассогласования перемещает в ту или иную сторону термоприемник 2

относительно источника 1. Изменение расстояния между точкой контроля температуры и центром пятна нагрева осуществляют до тех пор, пока контролируемая избыточная температура поверхности исследуемого изделия станет равной заданному значению $T_{зад}$, т.е. $T_{зад} = T(x)$, $\Delta T(x) = 0$. При этом разностный сигнал на выходе вычитающего устройства 3 отсутствует. На регистрирующем приборе 7 фиксируется местоположение термоприемника 2 и соответствующая этому месту поверхности изделия толщина покрытия. Измерив расстояние между точкой контроля температуры и центром пятна нагрева и используя зависимость (2.161), определяют искомую толщину покрытия.

Схема измерительной цепи для изложенного выше алгоритма адаптивного бесконтактного измерения ТЗП идентична схеме, представленной на рис. 2.18. Уравнение измерения данного алгоритма имеет следующий вид

$$h_{пj}^* = \llcorner L_2 \llcorner \frac{\llcorner \llcorner x_j^* \llcorner \llcorner \lambda_{\tau} \llcorner \llcorner q_{1j} - \llcorner L_1 \llcorner \llcorner q_{2j}}{\llcorner \llcorner L_1 \llcorner \llcorner - \llcorner \llcorner \lambda_{\pi} \llcorner \llcorner x_j^* \llcorner \llcorner q_{3j} \llcorner \llcorner q_{4j}} \llcorner q_{5j} \llcorner q_{6j}, \quad (2.162)$$

$$\text{где } L_1 = \llcorner \frac{\llcorner P_0 \llcorner}{\llcorner 2\pi \llcorner \llcorner \lambda \llcorner \llcorner T_{зад} \llcorner \llcorner q_{1j}} \llcorner q_{2j}; \quad L_2 = \llcorner \frac{\llcorner \llcorner l_{\tau} \llcorner \llcorner \rho_{\tau} \llcorner \llcorner q_{1j}}{\llcorner \llcorner \rho_{\pi} \llcorner} \llcorner q_{2j}.$$

Далее рассмотрим адаптивный метод бесконтактного контроля толщины защитных покрытий изделий с поиском оптимальной скорости перемещения источника и термоприемника над исследуемым изделием [63]. Сущность этого способа заключается в следующем.

Начинают перемещение источника энергии и термоприемника над исследуемым изделием с некоторой постоянной скоростью V_0 . Датчик температуры, движущийся при этом по линии, параллельной линии перемещения источника энергии с фиксированным отставанием x от него, регистрирует избыточную температуру нагреваемой поверхности. Затем изменяют скорость перемещения источника и термоприемника в соответствии с зависимостью

$$V = V_0 \pm \Delta V, \quad (2.163)$$

где $\Delta V = k[T_{зад} - T(V)]$; $T(V)$ - избыточная температура в точке контроля. Изменение скорости перемещения производят до тех пор, пока контролируемая избыточная температура поверхности изделия станет равной в начале значению $T_{зад1}$, т.е. $T_{зад1} = T(V)$, $\Delta T(V) = 0$, а затем второму заданному значению $T_{зад2}$, т.е. $T_{зад2} = T(V)$; $\Delta T(V) = 0$. Значения заданных температур $T_{зад1}$ и $T_{зад2}$ берутся меньше температуры предельного состояния по структурной целостности исследуемых покрытий. По найденным значениям скоростей V_1 и V_2 определяют толщину покрытия изделия по формуле, полученной на основании следующих рассуждений. Согласно выражения (1.60) при достижении равенства установившейся температуры заданным значениям будут справедливы равенства:

$$T_{зад1} = (P_0/2\pi\lambda R)\exp[-V_1(R-x)/2a]; \quad (2.164)$$

$$T_{зад2} = (P_0/2\pi\lambda R)\exp[-V_2(R-x)/2a]. \quad (2.165)$$

Поделив (2.165) на (2.164), получим температуропроводность исследуемого изделия

$$a = (V_2 - V_1)(R - x)/2 \ln(T_{\text{зад1}}/T_{\text{зад2}}). \quad (2.165)$$

Для определения теплопроводности найденное значение коэффициента температуропроводности a подставляем в выражение (2.164) и получим

$$\lambda = (P_0/2\pi T_{\text{зад1}} R) \exp \left\{ \left[-V_1/(V_2 - V_1) \right] \ln(T_{\text{зад1}}/T_{\text{зад2}}) \right\}. \quad (2.166)$$

Таким образом, определив коэффициент теплопроводности тела с нанесенным на него покрытием $\bar{\lambda}$ и, зная теплопроводности покрытия $\lambda_{\text{п}}$ и тела $\lambda_{\text{т}}$, а также максимально возможную в тепловом отношении толщину покрытия h_{max} , по формуле (2.160) можно определить толщину защитного покрытия.

Структура измерительной цепи для данного алгоритма адаптивного измерения ТЗП идентична структуре, представленной на рис. 2.18, только в ней D_2 - датчик скорости движения, фиксирующий V_1 и V_2 .

Уравнение измерения для этого метода имеет вид

$$h_{\text{пj}}^* = \left\langle \frac{\langle \lambda_j^* \rangle - \langle \lambda_{\text{т}} \rangle}{\langle l \rangle \langle \lambda_{\text{п}} \rangle - \langle \lambda_{\text{т}} \rangle} \right\rangle_{q_{1j}} \left\langle \frac{1}{q_{2j}} \right\rangle_{q_{4j}}; \quad (2.167)$$

где

$$\lambda_j^* = \left\langle \frac{\langle P_0 \rangle}{\langle 2\pi \langle T_{\text{зад}} \rangle \langle R_1 \rangle} \right\rangle_{q_{1j}} \left\langle \exp \left[\left\langle -\frac{V_{1j}^*}{\langle V_{j2}^* - V_{j2}^* \rangle} \right\rangle_{q_{4j}} \ln \left\langle \frac{\langle T_{\text{зад2}} \rangle}{\langle T_{\text{зад1}} \rangle} \right\rangle_{q_{5j}} \right] \right\rangle_{q_{7j}} \left\langle \frac{1}{q_{8j}} \right\rangle_{q_{9j}}.$$

Разработан бесконтактный адаптивный способ НК толщины защитных покрытий, сущность которого заключается в следующем [64].

Измерительной головкой, включающей точечный источник энергии и термоприемник, сканируют поверхность контролируемого изделия с начальной скоростью $V_{\text{н}}$, величина которой берется такой, чтобы при выбранной мощности источника температура нагрева изделия была небольшой.

Термоприемник, движущийся при этом по линии, параллельной линии перемещения источника энергии с отставанием от него, будет регистрировать температуру нагреваемой поверхности, соответствующую установившемуся квазистационарному режиму нагрева.

Затем изменяют расстояние между термоприемником и источником энергии до тех пор, пока контролируемая температура в точке ее регистрации достигнет максимального значения $T_{\text{max1}}(R_{\text{опт1}})$ (рис. 2.31). Поиск экстремального значения T_{max1} осуществляется следующим образом. В соответствии с зависимостью

$$\Delta R_i = k \Delta T_i(R) \quad (2.168)$$

перемещают термоприемник относительно источника энергии до тех пор, пока разность $\Delta T_i(R) = T(R_i) - T(R_{i-1})$ станет равной нулю. Это будет соответствовать экстремуму функции $T(R)$, т.е. точке $T_{\max 1}(R_{\text{опт}1})$ (рис. 2.31).

Затем постепенно уменьшают скорость движения измерительной головки в соответствии с зависимостью:

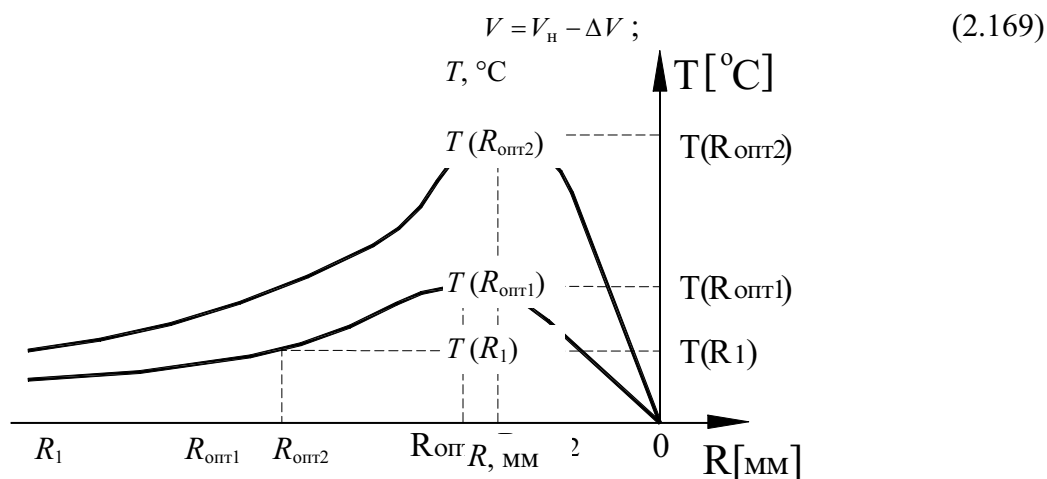


Рис. 2.31 Термограммы нагрева адаптивного алгоритма измерений ТЗП изделий

$$\Delta V = k [T_{\text{зад}} - T(V)] = k \Delta T(V), \quad (2.170)$$

где V_H - начальная скорость движения источника и термоприемника; $T_{\text{зад}}$ - наперед заданное значение температуры, величина которой задается, как правило, в диапазоне 50 - 70 % от температуры термодеструкции исследуемого покрытия; k - коэффициент пропорциональности, величина которого задается в диапазоне от 0,1 до 3.

В соответствии с вышеописанным алгоритмом поиска экстремального значения термограммы нагрева находят расстояние $R_{\text{опт}2}$ между источником и термоприемником, которое соответствует максимуму избыточной температуры $T_{\max 2}(R_{\text{опт}2})$. Информация о скоростях движения измерительной головки V_{x1} и V_{x2} , расстоянии между термоприемником и источником энергии $R_{\text{опт}1}$, $R_{\text{опт}2}$, максимальной температуре $T_{\max 1}(R_{\text{опт}1})$, $T_{\max 2}(R_{\text{опт}2})$ используется для определения толщины покрытия микропроцессором.

На основании зависимости (1.60) можно записать

$$T_{\max 1} = \frac{P_0}{2\pi\lambda R_{\text{опт}1}} \exp\left[-\frac{V_{x1}}{2a}(R_{\text{опт}1} - x_1)\right]; \quad (2.171)$$

$$T_{\max 2} = \frac{P_0}{2\pi\lambda R_{\text{опт}2}} \exp\left[-\frac{V_{x2}}{2a}(R_{\text{опт}2} - x_2)\right]. \quad (2.172)$$

После несложных математических преобразований получим формулу для расчета теплопроводности

$$a = \frac{V_{x1}(R_{\text{опт}1} - x_1) - V_{x2}(R_{\text{опт}2} - x_2)}{2 \ln(T_{\max 2} R_{\text{опт}2} / T_{\max 1} R_{\text{опт}1})}. \quad (2.173)$$

Теплопроводность определяют по формуле, полученной при подстановке выражения (2.202) в (2.201),

$$\lambda = \frac{P_0}{2\pi T_{\max 2} R_{\text{опт}2}} \exp\left[\frac{V_{x2}(R_{\text{опт}2} - x_2) \ln(T_{\max 2} R_{\text{опт}2} / T_{\max 1} R_{\text{опт}1})}{V_{x1}(R_{\text{опт}1} - x_1) - V_{x2}(R_{\text{опт}2} - x_2)}\right]. \quad (2.174)$$

Искомая толщина покрытия определяется по формуле (2.160).

Отличительной особенностью рассмотренного выше метода является адаптивный поиск оптимальных в метрологическом отношении по критерию точности как расстояния от источника энергии до точки контроля температуры, так и скорости движения измерительной головки относительно исследуемого изделия, что обуславливает максимальную точность и полную гарантию сохранения целостности любых исследуемых покрытий. Последнее обстоятельство значительно расширяет диапазон и классы исследуемых покрытий.

Структура измерительной цепи для изложенного выше алгоритма бесконтактного адаптивного измерения ТЗП представлена на рис. 2.32.

В схеме МПД, МИС - механизм перемещения датчика относительно источника тепла и механизм изменения скорости движения их относительно объекта измерения; Д₂, Д₃, Д₄ - датчики определения расстояний x и R , а также скорости V ; $r_{j\Delta x}$, $r_{j\Delta R}$ - идентификаторы команд на изменение расстояния Δx и ΔR в l -ом цикле измерений; $r_{jiT_{\max}}$ - идентификатор команды на считывание информации с АЦП₁ о $T_{\max i}$ в l -ом цикле; $r_{jlT_{\max}}$ - идентификатор команды с процессора Пр на отыскание T_{\max} в l -ом цикле измерения; $U_2(x)$, $U_3(R)$, $U_4(V)$ - градуировочные характеристики датчиков Д₂, Д₃, Д₄; m , d , c - характеристики соответствующих преобразований.

Уравнения измерения для этого метода имеют вид

$$\lambda_j^* = \left\langle \left\langle \frac{\langle P_0 \rangle}{2\pi T_{j\max 1}^* R_{j2}^*} \right\rangle_{q_{2j}} \times \right. \\ \left. \left\langle \left\langle V_{j2x}^* R_{j2}^* \right\rangle_{q_{3j}} - X_{j2}^* \right\rangle_{q_{4j}} \left\langle \ln \left\langle \frac{\langle T_{j\max 2}^* R_{j2}^* \rangle_{q_{5j}}}{\langle T_{j\max 1}^* R_{j1}^* \rangle_{q_{6j}}} \right\rangle_{q_{7j}} \right\rangle \\ \times \exp \left\langle - \frac{\left\langle \left\langle V_{jx1}^* \langle R_{j1}^* - X_{j1}^* \rangle_{q_{10j}} \right\rangle_{q_{11j}} - \langle V_{jx2}^* \langle R_{j2}^* - X_{j2}^* \rangle \right\rangle}{\left\langle \left\langle V_{jx1}^* \langle R_{j1}^* - X_{j1}^* \rangle_{q_{10j}} \right\rangle_{q_{11j}} - \langle V_{jx2}^* \langle R_{j2}^* - X_{j2}^* \rangle \right\rangle} \right\rangle$$

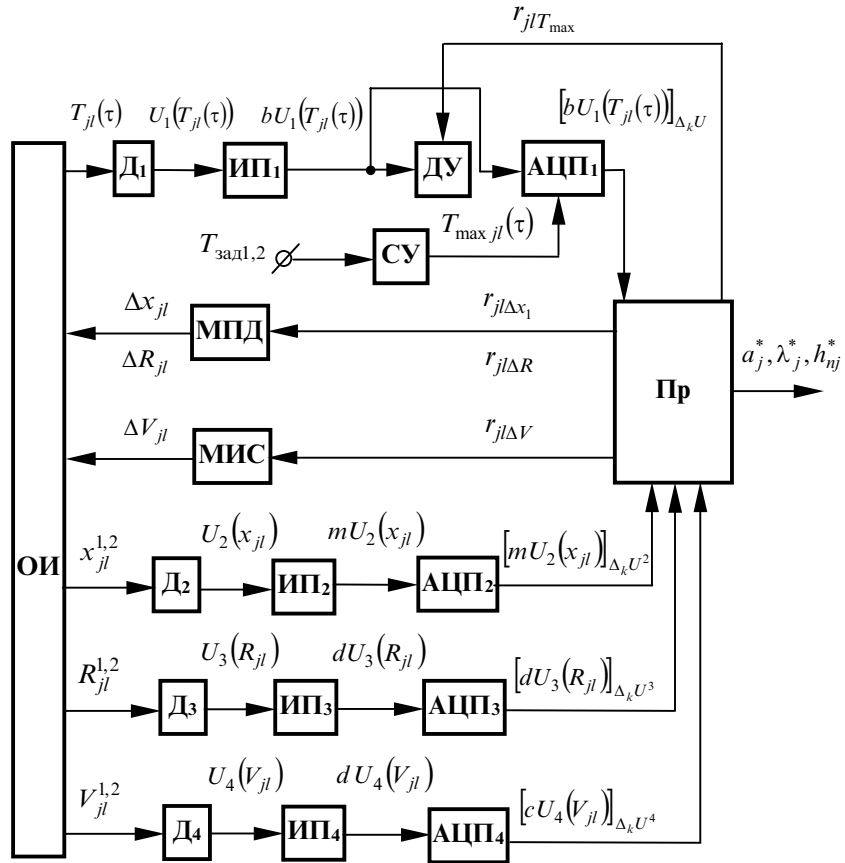


Рис.2.32 Схема измерительной цепи бесконтактного адаптивного измерения ТЗП материалов и изделий

$$\rightarrow \frac{\langle q_{8j} \rangle \langle q_{9j} \rangle}{\langle q_{12j} \rangle \langle q_{13j} \rangle \langle q_{14j} \rangle} \langle q_{15j} \rangle \langle q_{16j} \rangle ; \quad (2.175)$$

$$h_{nj}^* = \frac{\langle \langle \lambda_j^* \rangle - \langle \lambda_T \rangle \rangle_{q_{1j}}}{\langle \langle l \rangle \langle \langle \lambda_{II} \rangle \rangle - \langle \lambda_T \rangle \rangle_{q_{2j}} \langle q_{3j} \rangle} \langle q_{4j} \rangle ;$$

$$X_{ji}^* = X \left(\langle \langle [bU_2(x_i)]_{\Delta_k U_2}^h \rangle_{q_{1j}} \langle m_x \rangle_{q_{2j}} \rangle_{q_{3j}} \right) \langle q_{4j} \rangle ;$$

$$R_{ji}^* = R \left(\langle \langle [dU_3(R_i)]_{\Delta_k U_3}^h \rangle_{q_{1j}} \langle m_R \rangle_{q_{2j}} \rangle_{q_{3j}} \right) \langle q_{4j} \rangle ,$$

где $T_{j\max i}^* = T \left(\langle \langle [bU_1(T_{j\max i}(x, \tau))]_{\Delta_k U_1}^h \rangle_{q_{1j}} \langle m_T \rangle_{q_{2j}} \rangle_{q_{3j}} \right) \langle q_{4j} \rangle ;$

$$V_{jxi}^* = V \left(\langle \langle [cU_4(V_{xi})]_{\Delta_k U_4}^h \rangle_{q_{1j}} \langle m_V \rangle_{q_{2j}} \rangle_{q_{3j}} \right) \langle q_{4j} \rangle .$$

Рассмотрим метод бесконтактного контроля толщины пленочных покрытий изделий, в котором для повышения точности определения искомой величины осуществляется

оптимальный выбор тепловых режимов нагрева и измерения. Метод осуществляется следующим образом [28].

Над исследуемым изделием помещают источник тепловой энергии, сфокусированный на поверхность исследуемого изделия в виде полосы длиной 25 - 30 мм, шириной 0,1 - 0,2 мм, т.е. линейный нагреватель. Кроме того, над поверхностью исследуемого изделия размещают два термодатчика, первый из которых сфокусирован на линию теплового воздействия источника, а второй - на точку поверхности, расположенную на определенном расстоянии x от линии действия источника. Первоначально осуществляют тепловое воздействие импульсом минимальной мощностью Q_{\min} , при которой начинает появляться избыточная температура в точке контроля и определяют интервал времени от начала теплового воздействия до момента времени, когда температура на линии действия источника, контролируемая первым термодатчиком, станет равной ее первоначальному значению. Далее осуществляют тепловое воздействие импульсом мощностью Q_{\max} , величина которой берется равной $(0,6-0,8)Q_{\text{терм}}$, где $Q_{\text{терм}}$ - мощность, при которой происходит термодеструкция материала покрытия. Затем определяют интервал времени от начала теплового воздействия до момента времени, когда избыточная температура на линии действия источника будет существовать. Интервал времени между импульсами теплового воздействия определяют из выражения $\tau_{\text{имп}} = (\tau_{\max} - \tau_{\min})/k$, где τ_{\max} , τ_{\min} - соответственно, интервалы времени присутствия избыточной температуры на линии действия источника при тепловом воздействии импульсами мощностью Q_{\max} и Q_{\min} (рис. 2.33, а), k - постоянный коэффициент, значение которого задается в интервале 2 - 5. Далее осуществляют тепловое воздействие импульсами с частотой $F_{\text{имп}} = 1/\tau_{\text{имп}}$ на исследуемое изделие от источника тепловой энергии, начиная с мощности Q_{\min} .

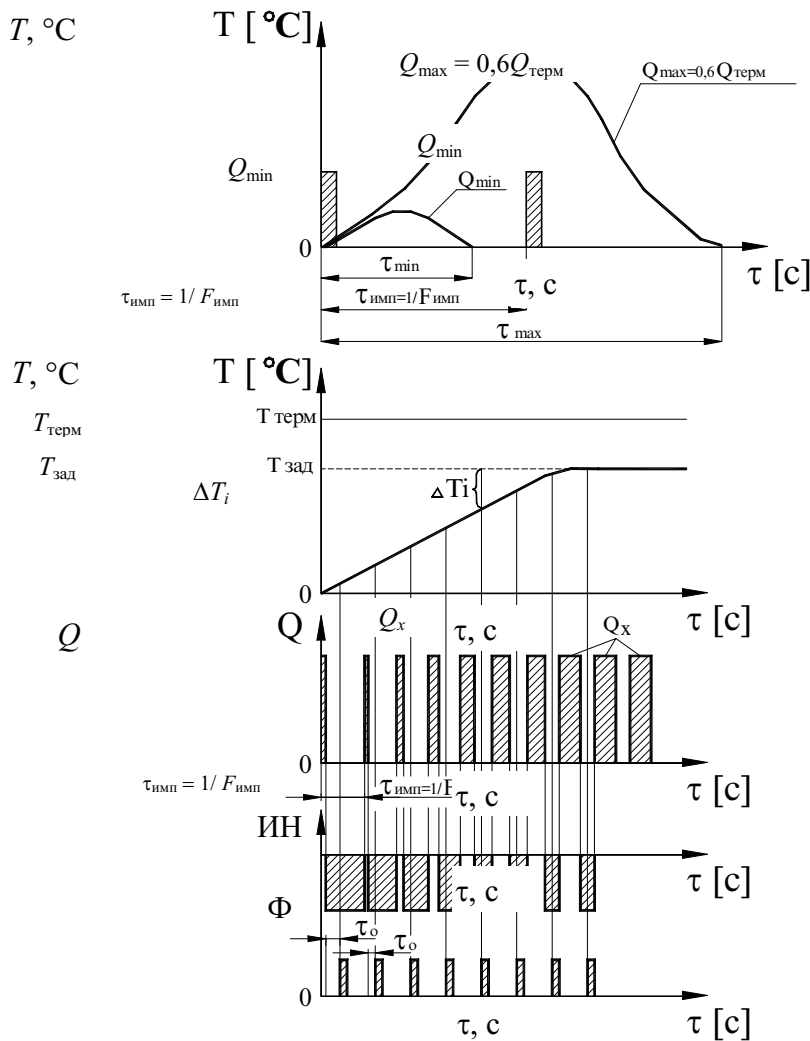


Рис. 2.33 Термограммы нагрева при адаптивном изменении мощности тепловых импульсов, воздействующих на исследуемый объект

При этом адаптивно увеличивают мощность тепловых импульсов в соответствии с зависимостью

$$Q_{\text{имп}} = Q_{i-1} + \Delta Q_i, \quad (2.176)$$

где
$$\Delta Q_i = k_2 \Delta T_i + \frac{1}{k_3} \int_{\tau_{i-1}}^{\tau_i} [T_{\text{зад}} - T(\tau)_{\text{тек}}] d\tau; \quad (2.177)$$

$\Delta T_i = T_{\text{зад}} - T(\tau)_{\text{тек}}$ - разность между наперед заданной температурой $T_{\text{зад}}$ и текущей избыточной температурой $T(\tau)_{\text{тек}}$ на линии действия источника тепла (рис. 2.33, б), измеряемой первым термоприемником, сфокусированным на линию источника тепла, в моменты времени, смещенные относительно заднего фронта тепловых импульсов на интервал времени запаздывания τ_0 , равный 1 - 2 с (рис. 2.33, г, д). Заданное значение температуры нагрева покрытия $T_{\text{зад1}}$ берут равным не выше $0,8T_{\text{терм}}$, где $T_{\text{терм}}$ - температура термодеструкции материала покрытия (определяется по справочным данным или экспериментальным путем). Значение коэффициентов k_2 и k_3 в выражении (2.177) для широкого класса материалов покрытий задают, соответственно, в диапазонах $0,1 \leq k_2 \leq 2$; $10 \leq k_3 \leq 50$. Затем определяют такую мощность импульсов Q_x , при которой установившееся значение избыточной температуры на линии действия источника тепла станет равным наперед заданному значению $T_{\text{зад}}$ (рис. 2.33, б, в). Осуществляют тепловое воздействие на

исследуемое тело импульсами с частотой $F_{\text{имп}}$ и мощностью Q_x , а затем изменяют расстояние между линией теплового воздействия и точкой контроля избыточной предельной температуры вторым термоприемником до тех пор, пока значение избыточной температуры в точке контроля станет равным наперед заданному $T_{\text{зад1}}$, величина которой устанавливается таким образом, чтобы можно было бы измерить с помощью используемой контрольно-измерительной аппаратуры с погрешностью не более 1 %. Измеряют установившееся при этом расстояние x_1 между линией нагрева и точкой контроля температуры вторым термоприемником. Далее изменяют расстояние между линией теплового воздействия и точкой контроля избыточной предельной температуры вторым термоприемником до тех пор, пока значение избыточной температуры в точке контроля станет равным наперед заданному значению $T_{\text{зад2}}$, отличающемуся на 10 - 15 % от $T_{\text{зад1}}$. Измеряют при этом установившееся расстояние x_2 между линией нагрева и точкой контроля температуры. После проведения вышеуказанных операций и стабилизации температурного поля на поверхности исследуемого изделия осуществляют тепловое воздействие от источника энергии одиночным импульсом мощностью Q_x и определяют интервал времени $\tau_{\text{имп},x}$ присутствия избыточной температуры на линии действия источника, а искомую толщину пленочного покрытия определяют по формуле, полученной на основании следующих рассуждений.

При равенстве установившейся температуры на поверхности исследуемого тела заданному значению $T_{\text{зад1}}$ и $T_{\text{зад2}}$, соответственно, на расстояниях x_1 и x_2 от линии действия источника тепла на основании выражений (2.132) и (2.133) будут справедливы следующие соотношения:

$$T_{\text{зад1}} = \frac{Q_x F_{\text{имп}}}{2\pi\lambda} \left(\sum_{j=1}^n \frac{1}{j} - \frac{x_1^2 F_{\text{имп}}}{4a} \sum_{j=1}^n \frac{1}{j^2} \right); \quad (2.178)$$

$$T_{\text{зад2}} = \frac{Q_x F_{\text{имп}}}{2\pi\lambda} \left(\sum_{j=1}^n \frac{1}{j} - \frac{x_2^2 F_{\text{имп}}}{4a} \sum_{j=1}^n \frac{1}{j^2} \right). \quad (2.179)$$

Поделив (2.179) на (2.178), получим формулу для расчета температуропроводности

$$a_{\text{изм}} = \frac{\sum_{j=1}^n \frac{1}{j^2} F_{\text{изм}}}{4 \sum_{j=1}^n \frac{1}{j}} \left(\frac{T_{\text{зад1}} x_2^2 - T_{\text{зад2}} x_1^2}{T_{\text{зад1}} - T_{\text{зад2}}} \right). \quad (2.180)$$

Для определения коэффициента теплопроводности найденное значение $a_{\text{изм}}$ подставляют в (2.178)

$$\lambda_{\text{изм}} = \frac{Q_x}{2\pi T_{\text{зад1}}} \sum_{j=1}^n \frac{F_{\text{имп}}}{j} \exp\left(-\frac{x_1^2 F_{\text{имп}}}{4a_{\text{изм}} j}\right). \quad (2.181)$$

Представленный здесь бесконтактный метод позволяет адаптивно выбрать такую мощность теплового воздействия на исследуемый объект, при которой избыточная

температура в самых теплонагруженных точках не превышает температуру термодеструкции исследуемого материала, что полностью исключает возможность разрушения исследуемых изделий, позволяет определять толщину покрытий изделий бесконтактным методом при одностороннем доступе к ним.

Одним из основных преимуществ разработанного метода является адаптивный поиск в ходе эксперимента оптимального по критерию точности расстояния от линии действия источника тепла до точки контроля избыточной наперед заданной температуры, что дает возможность подвергать тепловому воздействию большой участок и объем исследуемого изделия. Последнее обстоятельство повышает достоверность информации о свойствах и характеристиках исследуемых объектов, позволяет значительно расширить функциональные возможности метода и повышает его точность.

В заключение данного раздела рассмотрим адаптивный метод измерения ТЗП материалов, сущность которого заключается в следующем [17]. На поверхность исследуемого изделия помещают линейный источник тепла, теплоизолируют его от окружающей среды и осуществляют тепловое воздействие одиночным тепловым импульсом заданной мощностью q_0 , которая составляет не более 10 - 15 % от мощности $Q_{\text{терм}}$, при которой температура на линии действия источника тепла достигнет значения температуры термодеструкции материала покрытия, и определяют время релаксации $\tau_{\text{рел}}$ температурного поля в точке поверхности исследуемого тела, расположенной на заданном расстоянии x_1 от линии действия источника тепла. Затем определяют минимальную частоту следования тепловых импульсов в соответствии с зависимостью $F_{\text{мин}} = k / \tau_{\text{рел}}$, где k - коэффициент, задаваемый в диапазоне от 2 до 5; $\tau_{\text{рел}}$ - интервал времени от момента нанесения теплового импульса до момента, когда избыточная температура в точке контроля станет равной порогу чувствительности контрольно-измерительной аппаратуры. Осуществляют тепловое воздействие от линейного источника тепла, увеличивая частоту тепловых импульсов в соответствии с законом

$$F_{\text{имп}} = F_{\text{мин}} + K_1 \Delta T_i + \frac{1}{K_2} \int_{\tau_{i-1}}^{\tau_i} \Delta T(\tau) d\tau + K_3 \left. \frac{d[\Delta T(\tau)]}{d\tau} \right|_{\tau=\tau_i}, \quad (2.182)$$

где $\Delta T(\tau) = T_{\text{зад1}} - T(\tau)$ - разность между наперед заданным значением $T_{\text{зад1}}$ и текущим значением контролируемой температуры; $\Delta T_i = T_{\text{зад1}} - T(\tau_i)$ - разность между заданной и текущей температурой в моменты времени, определяемые соотношением $\tau_i = K_4 \sum_{k=1}^{i-1} \Delta T_k + \tau_{\text{мин}}$, где $K_1 - K_4$ - коэффициенты пропорциональности, значения которых определяются экспериментально на эталонных изделиях, либо задаваемые соответственно в диапазоне $K_1 = 1-10$; $K_2 = 1-100$; $K_3 = 1-50$; $K_4 = 0,1-1$; $\tau_{\text{мин}}$ - минимальный интервал времени определения разности ΔT_i (задается от 1 до 3 с).

Увеличение частоты следования тепловых импульсов в соответствии с законом (2.182) осуществляют до тех пор, пока ус- тановившееся квазистационарное значение

температуры в точке контроля достигнет наперед заданного значения $T_{\text{зад1}}$, т.е. $\Delta T_i = T_{\text{зад1}} - T(\tau_i) = 0$ (см. рис. 2.34, а). Установившееся значение температуры в точке контроля достигается тогда, когда очередной тепловой импульс из серии импульсов, подаваемых линейным источником, изменяет температуру в этой точке на величину, меньшую порога чувствительности ε контрольно-измерительной аппаратуры ($\varepsilon \leq 0,01$ °C). Определяют частоту тепловых импульсов F_{x1} (см. рис. 2.34, б), после чего начинают увеличение мощности тепловых импульсов, начиная с q_0 , в соответствии с зависимостью

$$Q_{\text{имп}} = q_0 + K_1 \Delta T_i + \frac{1}{K_2} \int_{\tau_{i-1}}^{\tau_i} \Delta T(\tau) d\tau + K_3 \left. \frac{d[\Delta T(\tau)]}{d\tau} \right|_{\tau = \tau_i}, \quad (2.183)$$

где $\Delta T(\tau) = T_{\text{зад2}} - T(\tau)$ - разность между вторым наперед заданным значением и текущим значением контролируемой температуры; $\Delta T_i = -T(\tau_i)$ - разность между заданной и текущей температурой в моменты времени, определяемые соотношением $\tau_i = K_4 \sum_{k=1}^{i-1} \Delta T_k + \tau_{\text{мин}}$. Значение температуры $T_{\text{зад2}}$ берется на 20–30 % выше наперед заданного значения $T_{\text{зад1}}$. Увеличение мощности тепловых импульсов в соответствии с законом (2.183) осуществляют до тех пор, пока установившееся значение контролируемой температуры достигнет второго заданного значения $T_{\text{зад2}}$ (см. рис. 2.34, а). Определяют при этом мощность тепловых импульсов Q_{x1} (см. рис. 2.34, б), а затем начинают снова увеличивать частоту тепловых импульсов в соответствии с зависимостью (2.183) до тех пор, пока значение контролируемой избыточной температуры достигнет третьего заданного значения $T_{\text{зад3}}$, которое на 20–30 % меньше наперед заданного значения $T_{\text{зад}}$. Значение температуры $T_{\text{зад4}}$ задается на 20 % меньше температуры термодеструкции исследуемых материалов. Определяют при этом частоту импульсов F_{x2} (см. рис. 2.34, б), после чего увеличивают мощность тепловых импульсов в соответствии с законом (2.183) до тех пор, пока контролируемая избыточная температура достигнет четвертого заданного значения $T_{\text{зад4}}$. Определяют соответствующую этому состоянию тепловой системы мощность импульсов Q_{x2} . Определяют время релаксации температур-

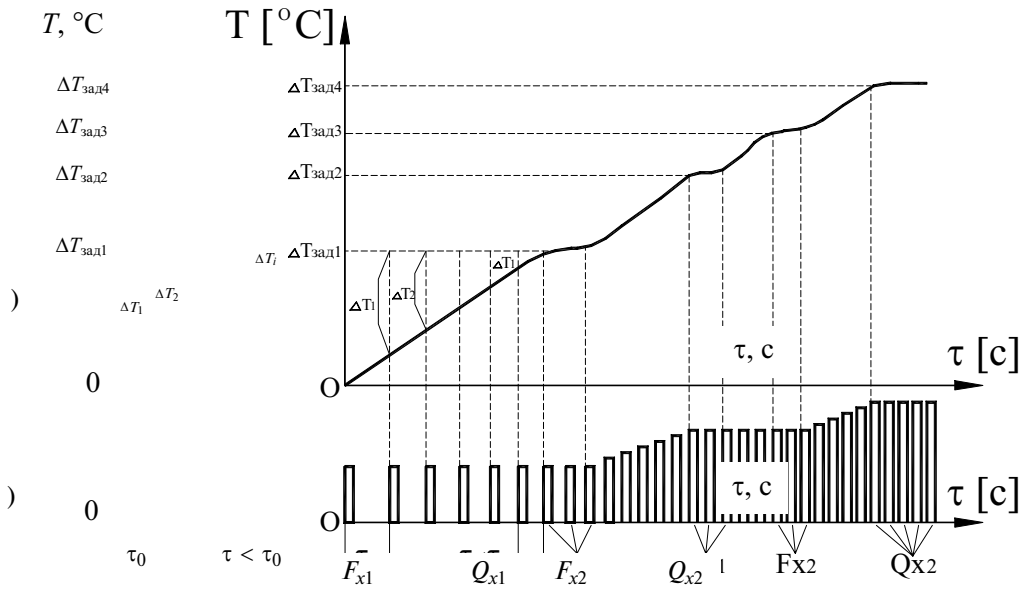


Рис. 2.34 Термограммы нагрева (а) и вид теплового воздействия (б) при адаптивном изменении частоты и мощности тепловых импульсов

ного поля $\tau_{\text{рел1}}$ и $\tau_{\text{рел2}}$ в точке контроля при воздействии одиночными импульсами, соответственно, мощностью Q_{x1} и Q_{x2} и рассчитывают число импульсов n_1 и n_2 , участвующих в формировании температурного поля при двух установившихся состояниях тепловой системы:

$$T(\tau) = T_{\text{зад2}} \quad \text{и} \quad T(\tau) = T_{\text{зад4}} .$$

При этом:

$$n_1 = E\left(\tau_{\text{рел1}} F_{x1}\right) = E\left(\frac{\tau_{\text{рел1}}}{\tau_{\text{имп1}}}\right),$$

$$n_2 = E\left(\tau_{\text{рел2}} F_{x2}\right) = E\left(\frac{\tau_{\text{рел2}}}{\tau_{\text{имп2}}}\right),$$
(2.184)

где $E(x)$ - целая часть числа x .

Таким образом, определив значения частоты импульсов F_{x1} и их мощности Q_{x1} , при которых установившееся значение контролируемой температуры равно второму заданному значению $T_{\text{зад2}}$, частоты F_{x2} и мощности Q_{x2} , при которых значение контролируемой избыточной температуры равно четвертому заданному значению $T_{\text{зад4}}$, а также определив число импульсов n_1 и n_2 , влияющих на формирование суммарной установившейся температуры в контролируемой точке при равенстве ее заданным значениям $T_{\text{зад2}}$ и $T_{\text{зад4}}$,

рассчитывают искомую толщину защитных покрытий исследуемых изделий по формуле, полученной на основании следующих рассуждений.

Равенство квазистационарной температуры в точке контроля x_1 наперед заданным значениям $T_{\text{зад}2}$ и $T_{\text{зад}4}$ при адаптивном изменении частоты импульсов, а затем их мощности на основании (2.178, 2.179) будет выражаться соотношениями:

$$T_{\text{зад}2} = \frac{Q_{x1}}{2\pi\lambda} \sum_{j=1}^{n_1} \frac{F_{x1}}{j} \exp\left(-\frac{x_1^2 F_{x1}}{4aj^2}\right); \quad (2.185)$$

$$T_{\text{зад}4} = \frac{Q_{x2}}{2\pi\lambda} \sum_{j=1}^{n_2} \frac{F_{x2}}{j} \exp\left(-\frac{x_1^2 F_{x2}}{4aj^2}\right). \quad (2.186)$$

Для решения системы (2.185), (2.186) относительно a и λ воспользуемся разложением в ряд

$$\exp(x) = \sum_{j=1}^{\infty} \frac{x^j}{j!}$$

и, ввиду быстрой сходимости ряда, ограничимся в разложении двумя слагаемыми:

$$T_{\text{зад}2} = \frac{Q_{x1} F_{x1}}{2\pi\lambda} \left(\sum_{j=1}^{n_1} \frac{1}{j} - \frac{x_1^2 F_{x1}}{4a} \sum_{j=1}^{n_1} \frac{1}{j^2} \right); \quad (2.187)$$

$$T_{\text{зад}4} = \frac{Q_{x2} F_{x2}}{2\pi\lambda} \left(\sum_{j=1}^{n_2} \frac{1}{j} - \frac{x_1^2 F_{x2}}{4a} \sum_{j=1}^{n_2} \frac{1}{j^2} \right). \quad (2.188)$$

Поделив (2.187) на (2.188) и произведя ряд простых математических преобразований, получим формулу для расчета среднеинтегрального по объему изделия коэффициента теплопроводности материалов

$$\bar{a} = \frac{x_1^2}{4} \frac{T_{\text{зад}2} Q_{x2} F_{x2}^2 \sum_{j=1}^{n_2} \frac{1}{j^2} - T_{\text{зад}4} Q_{x1} F_{x1}^2 \sum_{j=1}^{n_1} \frac{1}{j^2}}{T_{\text{зад}2} Q_{x2} F_{x2} \sum_{j=1}^{n_2} \frac{1}{j} - T_{\text{зад}4} Q_{x1} F_{x1} \sum_{j=1}^{n_1} \frac{1}{j}}. \quad (2.189)$$

Для определения среднеинтегральной по объему теплопроводности $\bar{\lambda}$ изделия найденное значение коэффициента \bar{a} подставляем в выражение (2.185) и получим выражение

$$\bar{\lambda} = \frac{Q_{x1} F_{x1}}{2\pi T_{зад2}} \sum_{j=1}^{n_1} \frac{1}{j} \exp\left(-\frac{x_1^2 F_{x1}}{4\bar{a}j}\right). \quad (2.190)$$

Среднеинтегральный по объему коэффициент теплопроводности $\bar{\lambda}$ при движении теплового потока в изделии от источника тепла к точке контроля температуры в направлении, параллельном плоскости поверхности изделия, определяется

$$\bar{\lambda} = m_1 \lambda_{\Pi} + m_2 \lambda_{и}, \quad (2.191)$$

где λ_{Π} - коэффициент теплопроводности материала покрытия; $m_i = h_i(h_1 + h_2)$ - объемная концентрация i -ой компоненты в анизотропной двухкомпонентной системе, чем является в этом случае исследуемое изделие, поверхность которого покрыта защитной пленкой.

Поскольку среднеинтегральный коэффициент теплопроводности $\bar{\lambda}$ определяется процентным содержанием покрытия в единице объема изделия, подверженного тепловому воздействию, то $m_1 + m_2 = 1$, и выражение (2.191) можно представить в виде

$$\bar{\lambda} = m_1 \lambda_{\Pi} + (1 - m_1) \lambda_{и}. \quad (2.192)$$

Поскольку m_1 определяет объемную концентрацию материала покрытия в единице объема изделия, подверженного тепловому воздействию, то значение m_1 пропорционально толщине пленочного покрытия изделия с коэффициентом пропорциональности, численно равным величине обратной глубине прогрева изделия h_{\max} . Тогда из уравнения (2.192) получим формулу для определения толщины

$$h_{\Pi} = h_{\max} \frac{\bar{\lambda} - \lambda_{и}}{\lambda_{\Pi} - \lambda_{и}}. \quad (2.193)$$

Используя выражения (2.189) и (2.190), после несложных математических преобразований, получим следующую формулу для определения искомой толщины защитного покрытия

$$h_{\Pi} = h_{\max} \frac{\frac{Q_{x1} F_{x1}}{2\pi T_{зад4}} \sum_{j=1}^{n_1} \frac{1}{j} \exp\left(-\frac{x_1^2 F_{x1}}{4\bar{a}j}\right) - \lambda_{и}}{\lambda_{\Pi} - \lambda_{и}}. \quad (2.194)$$

Входящий в формулу (2.194) параметр h_{\max} можно определить экспериментально или расчетным путем. В первом случае h_{\max} определяют путем удаления термоприемника от линии действия источника тепла до тех пор, пока значение контролируемой температуры станет равным чувствительности ε контрольно-измерительной аппаратуры. Найденное значение x будет равно искомому параметру h_{\max} . Параметр h_{\max} можно определить и расчетным путем, используя выражение для температурного поля (1.23).

В разработанном методе тепловая система более плавно и за меньший интервал времени выводится на заданный тепловой режим, так как изменением частоты система оперативно

выводится на первый температурный подуровень ($T_{зад1}$), а затем плавно, за счет адаптивного изменения мощности тепловых импульсов, система выводится на заранее заданный температурный уровень ($T_{зад2}$), на котором и снимается измерительная информация для расчета искомой толщины защитных покрытий. То, что влияние изменения частоты тепловых импульсов на термограмму нагрева значительно выше, чем влияние изменения мощности тепловых импульсов легко доказать, определив функции влияния на контролируруемую избыточную температуру от изменения параметров F и Q в выражениях (2.189) и (2.190). Так функция чувствительности от влияния изменения мощности импульсов Q определяется как $S_q = \frac{Q}{T^*} \frac{\partial T}{\partial Q} = 1$, где T - температура. Функция чувствительности от влияния частоты импульсов F будет равна

$$S_F = \frac{F}{T} \frac{\partial T}{\partial F} = 1 + k F_x \frac{\sum_{j=1}^{n_1} \frac{1}{j^2} \exp\left(-\frac{k F_x}{j}\right)}{\sum_{j=1}^{n_1} \frac{1}{j} \exp\left(-\frac{k F_x}{j}\right)}, \quad \text{где } k = \frac{x^2}{4a}.$$

Из приведенного очевидно, что $S_F > S_q$, а отсюда следует, что изменение мощности тепловых импульсов оказывает меньшее влияние на изменение избыточной температуры в точке контроля, что обеспечивает плавный и динамичный вывод системы с предуровня на заданный температурный режим.

Таким образом, в разработанном методе предложенная последовательность операций позволяет минимизировать время выхода контролируемой избыточной температуры на заданный уровень, в результате чего значительно увеличивается оперативность теплофизического эксперимента, а, следовательно, оперативность и точность определения искомой толщины защитного покрытия.

Для изложенного адаптивного по частоте и мощности тепловых импульсов метода схема измерительных процедур и преобразований идентична схеме на рис. 2.27 с небольшими изменениями, а уравнение измерения в соответствии с зависимостью (2.194) будет иметь следующий вид

$$h_{пj}^* = \langle h_{jmax} \rangle_{q_{1j}} < \frac{\langle \langle \bar{\lambda}_j^* \rangle_{q_{2j}} - \langle \lambda_{п} \rangle \rangle_{q_{3j}}}{\langle \langle \lambda_{п} \rangle - \langle \lambda_{п} \rangle \rangle_{q_{4j}}} \rangle_{q_{5j}} \rangle_{q_{6j}},$$

где

$$\lambda_j^* = \langle \langle \frac{\langle \langle Q_{xj}^* \rangle_{q_{1j}} \langle F_{x1j}^* \rangle_{q_{2j}} \rangle_{q_{3j}}}{\langle 2\pi \langle T_1 \rangle \rangle_{q_{4j}}} \rangle_{q_{5j}} \langle \sum_{i=1}^{n_1} \frac{1}{i} \langle \langle \exp \langle -\frac{\langle \langle x_1 \rangle \rangle^2 \rangle_{q_{6j}} \times F_{jx1}^* \rangle_{q_{7j}}}{\langle i 4 a_j^* \rangle_{q_{8j}}} \rangle_{q_{9j}} \rangle_{q_{10j}} \rangle_{q_{11j}} \rangle_{q_{12j}} \rangle.$$

Глава 3

МИКРОПРОЦЕССОРНЫЕ ИИС ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТФХ И ТЗП МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ

Из анализа предшествующей главы можно сделать вывод, что методы неразрушающего контроля ТФХ материалов и толщины защитных покрытий изделий отличаются сложностью, так как требуют измерения не только основных информативных параметров теплового процесса, таких как температура, тепловой поток, пространственно-временных параметров, но и, во-первых, осуществлять активное воздействие на объект измерения в соответствии с заданным алгоритмом; во-вторых, с учетом изменения состояния и параметров объекта осуществлять

адаптивный поиск в процессе измерения режимных и энергетических параметров теплофизического эксперимента с целью повышения метрологического качества результатов измерений; в-третьих, предусмотреть такой вид теплового воздействия, чтобы обеспечить адекватность математических моделей, описывающих физику тепловых процессов в исследуемых объектах; в-четвертых, создать такие условия и алгоритмы, чтобы измерительная информация о температурно-временных изменениях в контролируемых объектах регистрировалась в частотно-импульсной или число-импульсной форме, что в значительной степени повышает помехозащищенность, позволяет легко преобразовать измерительную информацию в цифровую форму, а это также способствует улучшению метрологических характеристик. Поэтому методы НК

ТФХ материалов и изделий можно эффективно реализовать только на основе разработки и применения информационно-измерительных систем (ИИС), которые позволяют ускорить и полностью автоматизировать проведение теплофизического эксперимента, в отсутствие априорной информации о ТФХ объектов измерения адаптивно изменять режимные и энергетические параметры эксперимента с целью обеспечения адекватности физической и математической моделей тепловых процессов, повышения оперативности, точности, помехозащищенности, а также обеспечения гарантии сохранения целостности и эксплуатационных характеристик объектов измерения. Применение ИИС позволяет осуществлять адаптивную алгоритмическую коррекцию на тепловые потери в окружающую среду, термическое сопротивление в зоне контакта измерительного зонда с объектом измерения, на изменение начальной температуры и влажности исследуемых материалов и на другие дестабилизирующие факторы.

3.1 ИИС, РЕАЛИЗУЮЩИЕ КОНТАКТНЫЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ТФС И ТЗП

Для реализации метода НК ТФХ материалов разработана ИИС, структурная схема которой представлена на рис. 3.1 [60].

Система включает в себя линейный импульсный нагреватель 1, расположенный на поверхности исследуемого полуграниченного тела 2, термопару 3, подключенную к усилителю 4. ИИС содержит электронный ключ 5, вход которого подключен к выходу усилителя, компаратор 6, один из входов которого подключен к усилителю 4, а второй - к электронному ключу 5 и запоминающему конденсатору 7, выход компаратора соединен с одним из входов триггера 8. В систему включен также преобразователь напряжения в частоту 9, вход которого соединен с усилителем 4, а один выход - с первым входом управления реверсивным счетчиком 10, а второй - с цепью управления электронным ключом 5, причем второй управляющий вход реверсивного счетчика подключен к выходу триггера 8, информационный выход реверсивного счетчика 10 подключен к микропроцессору 11, а выходная цепь управления - к частотомеру-хронометру 12, блоку питания нагревателя 13 и установочному входу триггера 8. Информационный выход частотомера-хронометра 12 соединен с микропроцессором 11, на вход которого поступает также информация с блока постоянных коэффициентов 14. Блок управления 15 подключен соответственно к преобразователю напряжения в частоту 9, частотомеру-хронометру 12, триггеру 8, блоку введения постоянных коэффициентов 14, блоку 13 нагревателя 1 и микропроцессору 11.

ИИС НК ТФХ работает следующим образом.

Линейный импульсный нагреватель 1 помещается на теплоизолированную от окружающей среды поверхность исследуемого тела 2 и на заданном расстоянии x от линии действия источника тепла располагается термопара 3.

По сигналу с блока управления 15 включается блок питания 13, при этом на поверхности исследуемого тела наносится тепловой импульс, одновременно с этим

осуществляется ввод постоянных коэффициентов в микропроцессор 11 из блока постоянных коэффициентов 14, включается частотомер-хронометр 12 и приводится триггер 8 в исходное состояние. Сигнал с термопары 3 через усилитель 4 поступает на один из входов компаратора 6 и через электронный ключ 5 - на запоминающую емкость 7, потенциал на которой дискретно изменяется во времени с частотой, определяемой преобразователем напряжения в частоту 9. На входы компаратора 6 поступает разность потенциалов между постоянно растущим напряжением, снимаемым с термопары, и напряжением на запоминающем конденсаторе 7. При достижении момента времени, когда эти напряжения станут равными между собой, что соответствует максимуму температурной кривой, компаратор 6 переключает триггер 8.

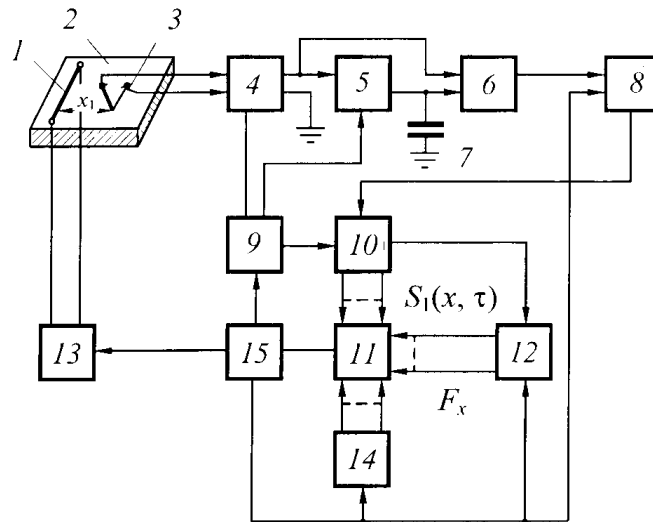


Рис. 3.1 Структурная схема измерительной системы неразрушающего оперативного контроля ТФХ материалов

В заданный момент времени τ_1 блок управления включает преобразователь напряжения в частоту 9, при этом на вход реверсивного счетчика 10, работающего в режиме суммирования, поступают импульсы, число которых пропорционально интегральному во времени значению температуры. При достижении температурного максимума термограммы нагрева по сигналу с триггера 8 осуществляется считывание измерительной информации о значении интегральной температуры $S_1(x_1, \tau)$ на интервале времени $\tau_1 - \tau_{\max}$ со счетчика в микропроцессор и переключение счетчика на режим вычитания. В момент равенства интегрального значения температуры на первом интервале $\tau_1 - \tau_{\max}$ значению интегральной температуры на втором интервале $\tau_{\max} - \tau_x$ происходит обнуление реверсивного счетчика 10, с него подается сигнал на частотомер-хронометр 12, блок питания нагревателя 13 и установочный вход триггера 8. При этом на поверхность исследуемого тела наносится второй тепловой импульс, мощность которого равна первому, а триггер 8 занимает исходное положение. При достижении момента равенства интегральных значений температуры до и после максимума термограммы нагрева от действия второго теплового импульса происходит снова обнуление реверсивного счетчика 10 и с него поступает сигнал на частотомер-хронометр, блок питания и триггер. На поверхность исследуемого тела наносится следующий тепловой импульс и цикл повторяется. При этом частотомер-хронометр фиксирует частоту следования тепловых импульсов и данная информация по команде с блока управления 15 из частотомера-хронометра 12 заносится в микропроцессор 11. Затем с блока управления подается команда в микропроцессор на обработку полученной измерительной информации по заданному алгоритму, построенному в соответствии с расчетными формулами (2.26) и (2.27). Значения полученных результатов хранятся в оперативной памяти микропроцессора и могут быть вызваны оператором на индикаторное устройство микропроцессора в любое время после окончания эксперимента.

Разработанная ИИС обеспечивает высокую точность результатов измерения, так как измерительная информация о температурно-временных изменениях в процессе эксперимента снимается, преобразуется и используется для вычисления искомых параметров в дискретной форме, на которую практически не оказывают влияние температурно-временные дрейфы, изменения в цепях питания блоков устройства, флуктуации и т.д.

Измерительный преобразователь в ИИС выполнен в виде выносного зонда, на контактной поверхности которого закреплены линейные нагреватели в виде нихромовой проволоки диаметром 0,2 мм и хромель-копелевая микротермопара, электроды которой диаметром 0,15 мм сварены встык и расположены параллельно линии источника тепла. При проведении эксперимента измерительный зонд прижимается с постоянным усилием к поверхности исследуемого тела, на нагреватель подавалась мощность импульсов $p = 60 - 75$ Вт/м. В качестве микропроцессорной системы использовалась микро-ЭВМ "Электроника МС-1103". Исследовались полубесконечные в тепловом отношении образцы из полиметилметакрилата, оптических стекол марки КВ, ЛК5, ТФ-1, кварца КВ, фторопласта и т.д. Погрешность результатов измерения комплекса ТФХ для данных материалов 5 - 6 %.

На рис. 3.2 представлена функциональная схема микропроцессорной ИИС "ИТСМ-580", реализующей разработанные в [65] алгоритмы измерения.

В схеме тактовый генератор G предназначен для формирования двух тактовых последовательностей F1 и F2 для тактирования процессора CPU (Central Processor Unit), формирования сигнала сброса системы RESET и сигнала стробирования STSTB для системного контроллера SC (System Controller).

Центральный процессор управляет функционированием всей системы, а именно:

- контролирует температуру датчика и при температуре датчика выше максимально возможной не допускает начала цикла измерения, что могло бы привести к неверным результатам измерения, а в худшем случае и выходу из строя нагревательного элемента датчика;

- формирует временную диаграмму обмена с аналого-цифровым преобразователем ADT (Analog-Digital Transformer) с помощью сигналов DR и ET, выдаваемых через порт IOP1 (Input Output Port 1);

- контролирует состояние кнопки "ПУСК" и активизирует цикл измерения только после ее нажатия;

- дозирует количество теплоты, передаваемое от датчика к образцу путем управления нагревом датчика сигналом PS (Power Select), выдаваемым через порт IOP2 (Input Output Port 2);

- **управляет "растяжкой" шкалы ADT с помощью сигнала LS (Lever Select), выдаваемого через порт IOP 2;**

- осуществляет съем, обработку по алгоритму, размещенному в ROM, и выдачу на индикацию данных, поступающих с ADT;

- осуществляет динамическую индикацию результатов измерения, условной температуры и режимов работы на четырехразрядном цифровом индикаторе DD (Digital Display). Динамическая индикация получается путем одновременной выдачи сигналов данных по шине ДАТА через ключи SW1, порт IOP 2 и выдачи позиционного кода через четырехразрядные ключи SW2 и порт IOP 2 на четыре семисегментных светодиодных индикатора DD.

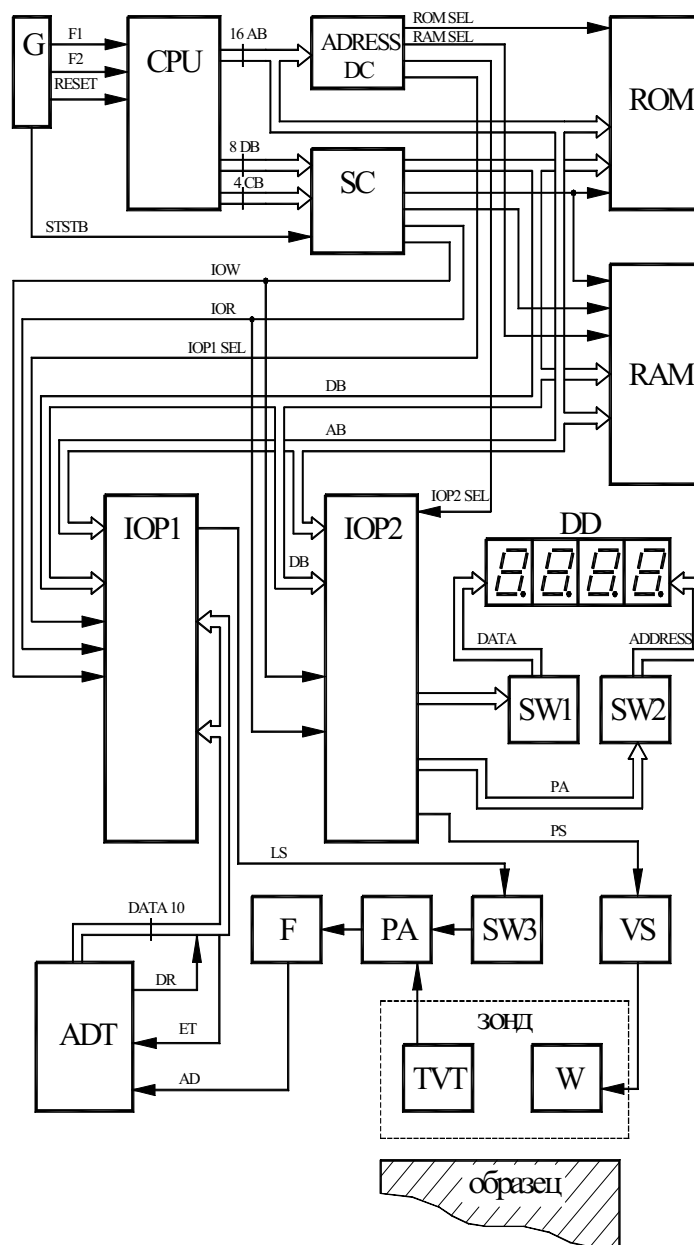


Рис. 3.2 Функциональная схема микропроцессорной ИИС с адаптацией по частоте тепловых импульсов

Дешифратор адреса ADDRESS DS предназначен для формирования сигналов ROM SEL, RAM SEL, IOP1 SEL, IOP2 SEL выбора соответствующего устройства.

Системный контроллер SC буферизует шину данных системы и формирует сигналы MEMR (чтение памяти), MEMW (запись в память), IOR (чтение устройств ввода-вывода), IOW (запись в устройства ввода-вывода).

Постоянное запоминающее устройство ROM предназначено для хранения программного обеспечения системы, имеется возможность увеличения памяти ROM до 8 Кбайт.

Оперативное запоминающее устройство RAM предназначено для накопления и хранения промежуточных данных, результатов измерения.

Ключ SW3 представляет собой специальный прецизионный коммутатор опорных напряжений, управляется CPU по алгоритму, соответствующему данной математической модели.

IOP 1, IOP 2 параллельные адапторы ввода-вывода предназначены для обмена сигналами и данными с внешними блоками и узлами системы.

Прецизионный усилитель РА предназначен для усиления сигналов датчиков TVT, представляет собой сложную схему УПТ МДМ структуры и дифференциального усилительного каскада с автоматическим подавлением синфазной составляющей.

Фильтр F предназначен для ослабления высокочастотных помех, является ФНЧ второго порядка с управляемой крутизной среза АЧХ, выполняет коррекцию уровня сигналов датчиков.

Стабилизатор напряжения VS является источником напряжения нагревателя, управляется по заданному алгоритму центральным процессором.

Измерительный зонд выносной, представляет собой конструкцию, совмещающую в себе систему нагревательных элементов W и преобразователя температура-напряжение TVT, выполнен из теплоизоляционного и термостойкого материала и соединен с ИИС кабелем.

Программное обеспечение (ПО) контроллера написано на языке ассемблера по модульному принципу и поэтому может быть легко модифицировано под конкретную задачу пользователя.

Программное обеспечение включает системное ПО, прикладное ПО, драйверы устройств ввода-вывода, библиотеку подпрограмм арифметики с плавающей запятой, тестовое ПО.

Системное ПО выполняет функцию арбитра между остальными группами программ и представляет им ресурсы системы по их запасам.

Прикладное ПО выполняет конкретную задачу пользователя и может использовать для своих нужд любые подпрограммы и драйверы, имеющиеся в наличии. Оно осуществляет управление системой по заданному алгоритму, формирует необходимые временные задержки, обрабатывает результаты измерений и ведет диалог с пользователем. Таким образом, прикладное ПО является основным для данной системы.

Драйверы устройств ввода-вывода реализуют функцию стандартизации протокола обмена данными между физическими устройствами и программным обеспечением. Включение их в систему позволяет оперативно производить реконфигурацию системы при незначительном изменении ПО.

Библиотека подпрограмм арифметики с плавающей запятой представляет собой набор стандартных подпрограмм для реализации операций над числами с плавающей запятой.

Любая подпрограмма из библиотеки может быть вызвана любой другой программой или подпрограммой при соблюдении соглашения об обмене данными.

Тестовое ПО предназначено для автоматической проверки работоспособности системы при включении и содержит в себе тест ОЗУ, тест ПЗУ (проверку контрольной суммы), тест устройств ввода-вывода и тест процессора.

Система работает следующим образом.

При включении питания процессор устанавливается в исходное состояние, и производится тестирование системы, после чего инициализируются периферийные устройства и устанавливаются в исходное состояние. CPU вырабатывает сигнал, по которому на четырехразрядном индикаторе DD высвечивается приглашение к работе. После установки зонда на исследуемое изделие или образец оператор нажимает кнопку "ПУСК", после чего начинается выполняться автоматически измерение ТФХ по заданному алгоритму, хранящемуся в ROM.

Система опрашивает через порт IOP 1 аналого-цифровой преобразователь, на котором присутствует аналоговый сигнал, усиленный в РА и представляющий собой э.д.с. преобразователя TVT. Время и уровень начальной температуры задаются коммутатором SW3, который управляется процессором CPU. Процессор определяет соответствие функции $T = f(U)$ и сравнивает значение температуры T_i с данным значением температуры $T_{нач}$, хранящемуся в ROM. При равенстве температур включается VS и через нагреватели W осуществляется тепловое воздействие на поверхность исследуемого изделия. По достижении

установившихся температур $T_{зад1}$ и $T_{зад2}$ процессор начинает обработку массива данных по соответствующей математической модели (2.138) и (2.139), вырабатывает сигнал отключения нагревателей, который через порт IOP 2 подается на VS. После обработки данных полученные значения высвечиваются на цифровом индикаторе DD в нормированном виде.

После считывания полученной информации подается сигнал "сброс", который формируется соответствующей кнопкой, и система переходит в режим термостатирования, при котором происходит выравнивание температур измерительного зонда и контролируемого изделия. При достижении равенства температур процесс повторяется. Данный алгоритм работы позволяет производить измерения практически непрерывно, что обеспечивает высокую производительность измерений в условиях производства материалов и готовых изделий из них. Простота и большая степень автоматизации позволяют пользоваться системой практически без специальной подготовки. Возможность связи с персональной ЭВМ позволяет использовать ИИС в автоматических системах управления технологическими процессами (АСУ ТП), для статистического сбора информации, ведения учета качества продукции, входного контроля и т.д. Портативность, малый вес и полная автономность позволяет использовать систему для контроля изделий в условиях производства.

3.2 ИИС, РЕАЛИЗУЮЩИЕ БЕСКОНТАКТНЫЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ТФС И ТЗП

На рис. 3.3 представлена схема измерительной системы [66], которая состоит из источника тепловой энергии 1, сфокусированного на поверхность исследуемого изделия 2 в виде пятна нагрева заданного диаметра, термоприемника 3, расположенного над поверхностью исследуемого изделия и сфокусированного на центр пятна нагрева. Термоприемник подключен ко входам компараторов 4 и 5, выходы которых соединены с первыми входами формирователей импульсов 6 и 7, а вторые входы формирователей подключены к генератору тактовых импульсов 8. Кроме того, выход генератора 8 через вентиль 9 соединен со счетным входом управляемого делителя 10, информационный вход которого соединен с микропроцессором 11, а выход управляемого делителя подключен к управляющему входу стабилизированного блока питания 12, нагрузкой которого является источник тепловой энергии 1. Кроме того, выход управляемого делителя 10 через вентиль 13 соединен со счетным входом счетчика 14, управляющий вход которого подключен к выходу формирователя 7, а информационный выход соединен с микропроцессором 11. Выход формирователя 6 соединен с управляющим входом вентиля 13, а выход формирователя 7 - с управляющим входом, соответственно, вентиля 9 и счетчика 14. Входы установки компараторов 4 и 5 подключены к управляющим входам микропроцессора 11, причем другие управляющие выходы микропроцессора соединены соответственно с вентилем 9 и счетчиком 14.

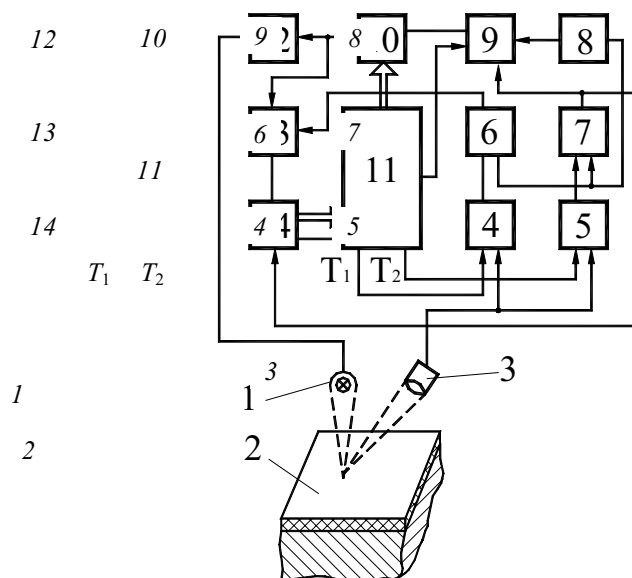


Рис. 3.3 Структурная схема ИИС, реализующая бесконтактный метод НК ТЗП

Процессорное устройство работает следующим образом.

Оператор перед началом измерения через микропроцессор *11* вводит в управляемый делитель *10* код N , который определяет коэффициент деления последнего, дает команду на обнуление счетчика *14*, закрытие вентиля *9*, подачу соответственно опорных напряжений U_1 и U_2 на входы компараторов *4* и *5*, пропорциональных заданным температурам T_1 и T_2 .

Запуск устройства осуществляется оператором подачей команды на открытие вентиля *9*. Импульсы генератора *8* с частотой F_0 поступают через вентиль *9* на счетный вход делителя *10*. На выходе делителя *10* импульсы следуют с частотой $F = F_0/N = 1/\Delta\tau$, где $\Delta\tau$ - интервал времени между тепловыми импульсами, включая каждый раз блок питания *12* и соответственно источник тепла *1*. Термоприемник *3* преобразует изменение температуры в контролируемой точке в напряжение постоянного тока, которое подается на входы компараторов *4* и *5*, где непрерывно сравниваются с опорными напряжениями установки U_1 и U_2 , моделирующими значения температур T_1 и T_2 .

В момент равенства контролируемой температуры заданному значению T_1 компаратор *4* переключается в состояние логической единицы и с выхода формирователя *6* поступает сигнал, который открывает вентиль *13*. Импульсы с управляемого делителя *10* через вентиль *13* поступают на суммирующий счетчик *14* до тех пор, пока значение контролируемой избыточной температуры станет равным T_2 . При этом компаратор *5* переключается в состояние логической единицы, формирователь *7* закрывает вентиль *9* и подает команду на считывание информации о числе тепловых импульсов n_1 из счетчика *14* в оперативную память микропроцессора *11*. Следующее измерение производят на изделии с покрытием аналогично вышеописанной последовательности операций, определяя при этом и записывая в ячейки памяти микропроцессора *11* информацию о числе тепловых импульсов n_2 , которые наносятся на поверхность исследуемого изделия при ее нагреве от температуры T_1 до T_2 . Далее, используя найденные значения n_1 и n_2 , а также информацию о мощности тепловых импульсов p_0 , теплофизических свойствах материалов изделия и покрытия, геометрических размерах участка или объема изделия, подверженного тепловому воздействию, по

программе, построенной в соответствии с формулами (2.104), рассчитывается значение искомой толщины покрытия изделий. Найденные значения толщины покрытий хранятся в оперативной памяти микропроцессора и могут быть вызваны оператором на индикаторное устройство в любое время после окончания эксперимента. Время следования тепловых импульсов $\Delta\tau$ может быть изменено оператором за счет введения соответствующего кода N с целью расширения диапазона и классов исследуемых материалов.

На рис. 3.4 представлена ИИС бесконтактного контроля ТЗП [28], которая состоит из источника тепловой энергии 1, сфокусированного на поверхность исследуемого изделия в виде линии, термоприемника 2, установленного с возможностью перемещения относительно линии нагрева, коммутатора 4, входы которого подключены к термоприемникам и блоку управления 7, схемы сравнения 6. Один вход схемы сравнения через усилитель 5 соединен с коммутатором, а второй вход с блоком управления тремя электронными ключами 8, 9, 10, входы которых подключены к выходу схемы сравнения.

Преобразователь напряжения в частоту 11 подключен к выходу первого ключа 8 и счетному входу счетчика 12, второй вход ко-

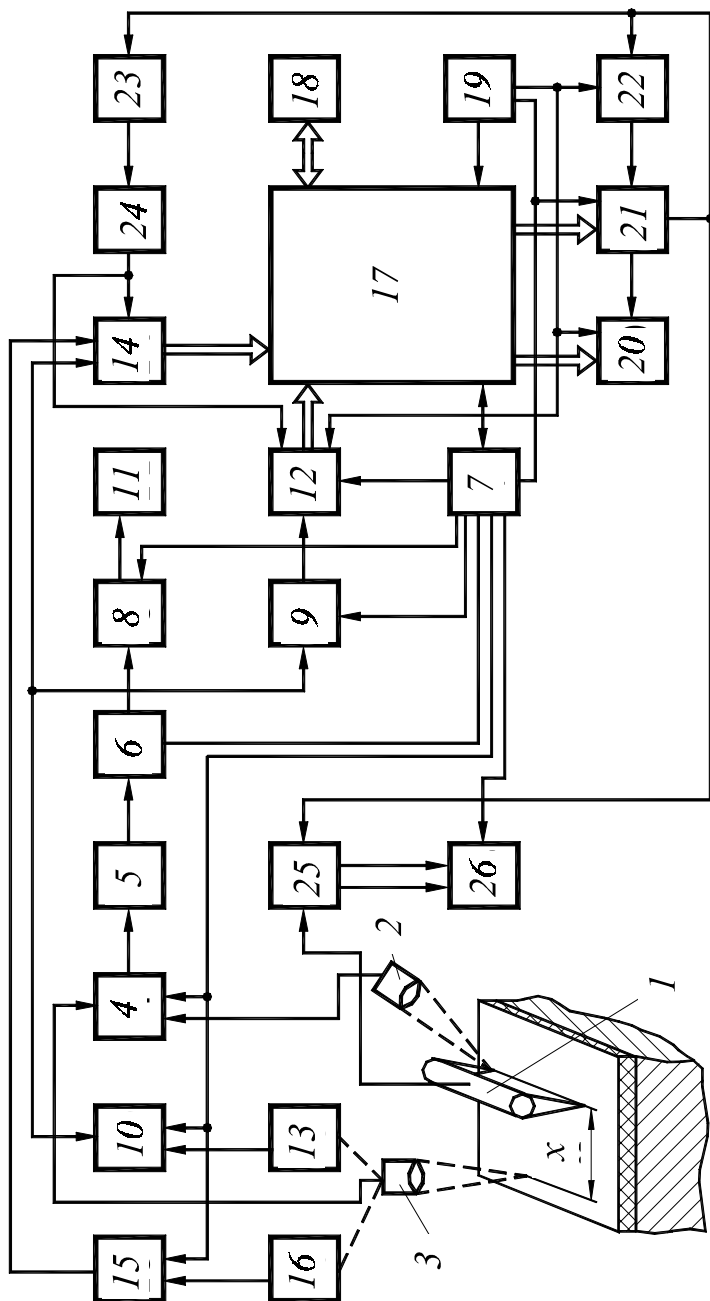


Рис. 3.4 Структурная схема ИИС, реализующая бесконтактный метод НК ТЗР материалов

того - к выходу второго ключа 9, третий вход к блоку управления. Аналого-цифровой преобразователь 14 первым информационным входом подключен к выходу системы сравнения, а вторым входом через четвертый электронный ключ 15 подключен к выходу датчика расстояния 16. Реверсивный двигатель 13 подключен к выходу третьего электронного ключа 10, а вал двигателя связан кинематически со вторым термоприемником. Блок ввода-вывода 18 подключен к микропроцессору 17, к которому подключены выходы счетчика, блок управления и аналого-цифровой преобразователь. Схема генерации импульсов содержит генератор тактовых импульсов 19, вход которого подключен к блоку управления, а выход к микропроцессору, управляемый делитель частоты 20, входы которого подключены к микропроцессору и генератору тактовых импульсов, логический элемент И 22, сдвиговый регистр 21, информационный вход которого соединен с микропроцессором, синхронизирующий вход через логический элемент И - с генератором тактовых импульсов, управляющий вход - с блоком управления, а выход - с одним из входов логического элемента И и с управляющим входом вентиля 25. Схема содержит формирователь импульсов 24, вход

которого через инвертор 23 подключен к выходу сдвигового регистра, а выход - к аналого-цифровому преобразователю и счетчику. Источник тепловой энергии подключен к источнику питания 26 через вентиль, управляющий вход которого соединен с выходом схемы генерации, а блок управления соединен с источником питания и схемой генерации импульсов. Датчик расстояния, кроме того, соединен со вторым термодатчиком.

Процессорное устройство работает следующим образом. Перед началом измерения оператором по команде блока управления 7 устройство приводится в исходное состояние: электронные ключи 8, 9, 10, 15 и логический элемент 22 закрыты, счетчик 12 и сдвиговый регистр 21 "обнулены". Через блок 18 ввода-вывода в микропроцессор вводится программа, включающая подпрограмму расчета частоты подачи тепловых импульсов в соответствии с алгоритмом $F_x = (2 - 5) / \tau_{\max}$, подпрограмму расчета адаптированного изменения мощности тепловых импульсов в соответствии с алгоритмами (2.143) - (2.144), подпрограмму расчета толщины пленочного покрытия в соответствии с алгоритмом (2.188). В ячейки памяти микропроцессора заносятся значения T_{\max} , T_1 , T_2 , Q_{\max} . Затем по команде с блока управления открывается ключ 9, коммутатор 4 подключается к первому термодатчику 2, на второй установочный вход схемы сравнения 6 подается опорное напряжение, величина которого соответствует сигналу первого термодатчика 2 при начальной температуре T_0 или на 1 - 2 % выше T_0 . По команде с блока управления 7 из микропроцессора в блок 21 заносится код, пропорциональный величине Q_{\max} . Управляемый вентиль 25 подключает источник питания 26 к источнику тепловой энергии 1 на время Δt . При этом на поверхность исследуемого изделия наносится тепловой импульс, мощность которого равна Q_{\max} . Сигнал с термодатчика 2, усиленный усилителем 5, через коммутатор 4 подается на сравнение с установкой на схему сравнения 6, при переключении которой в момент равенства текущего значения избыточной температуры опорному напряжению установки из счетчика 12 информация об интервале времени τ_{\max} заносится в оперативную память микропроцессора. Далее в соответствии с алгоритмом $F_x = (2 - 5) / \tau_{\max}$ осуществляется расчет частоты подачи тепловых импульсов и по команде с блока управления в управляемый делитель частоты 20 вводится код N_1 , определяющий коэффициент деления и равный $N_1 = F_0 / F_x$, где F_0 - опорная частота генератора тактовых импульсов. Затем по команде с блока управления закрывается ключ 9, открывается ключ 8 и на вход схемы сравнения подается опорное напряжение, моделирующее значение заданной температуры T_{\max} , при этом подается сигнал на запуск генератора 19. На исследуемое изделие наносятся тепловые импульсы с частотой F_x и начальной мощностью Q_n . На выходе схемы сравнения появится разность $\Delta T = T_{\max} - T(\tau)$, которая поступает на преобразователь напряжения в частоту 11 и на аналого-цифровой преобразователь 14. В счетчике 12, работающем в режиме суммирования, число импульсов будет пропорционально интегральному во времени значению разности $\Delta T(\tau)$. После окончания действия первого теплового импульса начальной мощности управляющий сигнал сдвигового регистра 21 задним фронтом переключает инвертор 23, который включает формирователь импульсов 24, формирующего импульс с определенным фиксированным запаздыванием τ_0 относительно заднего фронта теплового импульса.

По команде сформированного импульса информация об интеграле $\int_0^{\tau_0} \Delta T(\tau) d\tau$ со счетчика и о разности ΔT_1 с аналого-цифрового преобразователя заносится в

оперативную память микропроцессора, где в соответствии с алгоритмом вычисляется приращение мощности ΔQ_1 , затем по алгоритму (2.183) определяется мощность импульсов Q_1 , значение которой в коде заносится в блок 21. С блока 21 сигнал подается на вентиль, который включает источник энергии 1 на интервал времени, за который на исследуемое изделие действует тепловой импульс мощностью Q_1 . После окончания действия второго теплового импульса мощностью Q_1 информация об интегральном

значении разности $\int_0^{\tau_0} \Delta T(\tau) dt$ со счетчика и о разности ΔT_2 с аналого-цифрового

преобразователя вновь заносится в оперативную память микропроцессора. Мощность тепловых импульсов адаптивно изменяется до тех пор, пока установившееся значение избыточной температуры на линии нагрева станет равным заданному значению T_{\max} , при этом $\Delta T_i = 0$. Значение мощности тепловых импульсов Q_x в этом случае заносится в

память микропроцессора и из него же подается на блок управления команда, по которой закрывается ключ 8, открывается ключ 10, переключается коммутатор на второй термодатчик 3, на вход схемы сравнения подается опорное напряжение, моделирующее значение температуры T_1 . Тепловое воздействие на исследуемое изделие продолжает осуществляться тепловыми импульсами мощностью Q_x и частотой F_x .

Разностный сигнал $\Delta T(x)$ с выхода схемы сравнения поступает через аналого-цифровой

преобразователь в микропроцессор и через электронный ключ 10 на реверсивный двигатель 13, который в зависимости от знака и величины рассогласования перемещает ту или иную сторону термодатчик 3 относительно источника тепловой энергии 1. Изменение расстояния между точкой контроля температуры и линии нагрева и перемещение термодатчика 3 осуществляют до тех пор, пока контролируемая избыточная температура станет равной заданному значению $T_1 = T(x_1)$,

т.е. разностный сигнал на выходе схемы сравнения отсутствует. Затем по команде с блока управления открывается ключ 15 и сигнал о расстоянии x_1 между точкой контроля термодатчиком 3 и линией нагрева с датчика расстояния 16 через ключ 15 и аналого-цифровой преобразователь заносится в микропроцессор. Затем по команде с блока управления закрывается ключ 15, подается на схему сравнения опорное напряжение, моделирующее значение температуры T_2 , величина которой на 10 - 15 % отличается от T_1 . Далее процесс измерения осуществляется также как и для установки T_1 и, когда установившееся значение избыточной температуры в точке контроля x_2 станет равным T_2 , фиксируется это расстояние и заносится в память микропроцессора.

После стабилизации температурного поля на поверхности исследуемого изделия по команде с блока управления закрываются ключи 15, 10, 8, открывается ключ 9, коммутатор переключается на термодатчик 2, на установочный вход схемы сравнения подается опорное напряжение, моделирующее T_0 , из микропроцессора в блок сдвигового регистра 21 в коде заносится число, соответствующее значению Q_x . На исследуемое изделие наносится одиночный тепловой импульс мощностью Q_x , с помощью схемы сравнения и счетчика определяется интервал времени $\tau_{\text{инт.х}}$ от момента подачи теплового импульса до момента времени, когда избыточная температура на линии нагрева станет равной ее первоначальному значению или на 1 - 2 % выше этого значения. На основе алгоритма $n = E(\tau_{\text{инт.х}} F_x)$, где $E(x)$ - функция целой части числа x , в микропроцессоре просчитывается значение n и по алгоритму, построенному в соответствии с формулой (2.194), определяется толщина h_n , значение которой записывается в оперативную память микропроцессора и может быть по команде вызвано на индикаторное устройство блока ввода-вывода 18 в любое время после окончания эксперимента.

3.3 АДАПТИВНЫЕ ИИС НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ТФХ И ТЗП

Разработана адаптивная микропроцессорная ИИС НК ТФХ материалов [61], структурная схема которой приведена на рис. 3.5. Схема состоит из линейного импульсного нагревателя *1*, расположенного на поверхности исследуемого полуограниченного тела *2*, термопар *3* и *4*, расположенных также на поверхности исследуемого тела соответственно на расстоянии x_1 и x_2 от линии действия источника тепла и подключенных к коммутатору *5*, выход которого соединен с усилителем постоянного тока *6*, который через первый логический элемент *2И* *7* подключен к амплитудно-частотному преобразователю напряжения *8*. Выход последнего соединен с входом первого счетчика импульсов *9*, информационный выход которого подключен к первому входу вычитающего устройства *10*, а второй его вход соединен с информационным выходом второго счетчика импульсов *11*.

Выход вычитающего устройства *10* соединен с одним из информационных входов микропроцессора *12*, другие входы которого подключены соответственно к блоку ввода-вывода *13*, блоку управления *14*, генератору тактовых импульсов *15*, а управляющие выходы микропроцессора *12* подключены соответственно к первому управляемому делителю *16*. Выход делителя соединен с блоком питания нагревателя *17*, а вход - с генератором тактовых импуль-

Перед началом измерений по команде с блока управления 14 процессорное устройство приводится в исходное состояние: коммутатор 5 подключает термопару 3 к усилителю 6, счетчики 9 и 11 обнулены, логические элементы 7 и 22 закрыты, элемент 19 открыт. Затем по команде с блока управления 14 с источника питания 17 подается импульс на нагреватель 1, при этом включается регистратор времени 21 и на второй установочный вход компаратора 20 подается опорное напряжение, величина которого соответствует сигналу термопары при начальной температуре T_0 или на 1 - 2 % выше T_0 , а на первый вход компаратора поступает усиленное напряжение с термопары 3. Через интервал времени $\tau_{\text{имп1}}$, соответствующий времени действия (создания избыточной температуры в контролируемой точке x_1) одного теплового импульса, термо-э.д.с. на первом входе компаратора 20 станет равной заданному опорному напряжению U_0 , компаратор переключается и подает сигнал на считывание информации об интервале времени $\tau_{\text{имп1}}$ из регистратора времени 21 в ячейку памяти микропроцессора 12. Затем аналогичным образом определяется интервал времени $\tau_{\text{имп2}}$, соответствующий времени действия одного теплового импульса в точке x_2 , определяется минимальный интервал из $\tau_{\text{имп1}}$ и $\tau_{\text{имп2}}$ и его значение вводится в ячейку памяти микропроцессора. По команде с блока управления в микропроцессор вводится подпрограмма расчета искомых теплофизических характеристик. На основе введенной информации об интервале времени $\tau_{\text{имп}}$ вычисляется минимальная частота следования тепловых импульсов $F_{\text{min}} = 1/\tau_{\text{имп}}$ и на управляемый делитель 16 подается команда, в соответствии с которой частота генератора 15 делится блоком 16 на число $N = F_0/F_{\text{min}}$. Затем с блока управления подается сигнал на запуск генератора 15, открытие элементов 22 и 7, закрытие элемента 19. При этом на исследуемое тело с нагревателя 1 подаются тепловые импульсы с частотой F_{min} , в счетчик 11 поступают импульсы с генератора 15 частотой F_0 . Сигнал с термопары 3, усиленный усилителем 6, поступает на амплитудно-частотный преобразователь 8. На счетчик 9, работающий в режиме суммирования, поступают импульсы, число которых пропорционально интегральному во времени значению температуры в контролируемой точке x_1 . Число импульсов в счетчике 11 растет пропорционально интегральному во времени заранее заданному значению температуры $T_{s\text{зад1}}$. Если коэффициент пропорциональности в преобразователе 8 установить равным $2/F_0$, т.е. $F_{\text{пр}} = 2/F_0 T_{\text{изм}}$, где $T_{\text{изм}}$ - текущее значение температуры, $F_{\text{пр}}$ - частота на выходе амплитудно-частотного преобразователя 8, то на выходе вычитающего устройства 10 будет сигнал, величина которого равна разности между интегральными во времени текущим значением температуры $T_{s\text{изм}}$ и заданным $T_{s\text{зад1}}$, т.е. $\Delta T_{s\text{зад1}} - T_{s\text{изм}}$.

По сигналу с выхода второго управляемого делителя частоты 18 информация с вычитающего устройства заносится в оперативную память микропроцессора, где в соответствии с алгоритмом определяется величина, на которую увеличивается частота следования тепловых импульсов, т.е. $F_{\text{min}} + \Delta F$.

При этом на второй управляемый делитель 10 подается сигнал, по которому частота считывания информации с вычитающего устройства увеличивается обратно пропорционально величине ΔT_s . Таким образом, частота следования тепловых импульсов адаптивно увеличивается до тех пор, пока интегральное во времени значение $T_{s\text{изм}}$ станет равным $T_{s\text{зад1}}$, при этом $\Delta T_s = 0$. Это будет в том случае, когда установившееся значение температуры $T_{\text{уст}}$ в точке x_1 станет равным $T_{s\text{зад1}}$. Значение частоты F_{x1} при этом заносится в память микропроцессора и из него же подается на блок управления команда, по которой коммутатор 5 подключает к усилителю 6 термопару 4. Счетчики 9 и 11 обнуляются по сигналу, которым переключается коммутатор, и процесс измерения и адаптивного изменения частот на управляемых

делителях 16 и 18 осуществляется по тем же алгоритмам управления, что и в эксперименте для точки контроля x_1 . В момент времени, когда $T_{уст}$ в точке x_2 станет равным $T_{зад1}$, фиксируется частота следования тепловых импульсов F_{x2} и осуществляется на основе полученной измерительной информации расчет искомых теплофизических характеристик по алгоритму, построенному в соответствии с формулами (2.134) и (2.135). Найденные значения a и λ хранятся в оперативной памяти микропроцессора и могут быть вызваны оператором на индикаторное устройство блока ввода-вывода в любое время после окончания эксперимента. Основным преимуществом разработанной ИИС является возможность адаптивной автоматической подстройки частоты следования тепловых импульсов под заданное значение температуры нагрева исследуемых изделий, что дает возможность с помощью данной системы исследовать практически все твердые материалы и изделия из них. Кроме того, получение измерительной информации в частотно-импульсной форме, ее цифровая обработка снижает погрешности искомых теплофизических характеристик за счет устранения температурно-временных дрейфов, повышает помехозащищенность ИИС и достоверность результатов измерения, увеличивает оперативность измерения, что в конечном счете повышает производительность измерений и точность.

На рис. 3.6 приведена схема бесконтактной ИИС контроля толщины защитных покрытий [64], которая содержит измерительную головку 1 , включающую точечный источник 2 энергии и термоприемник 3 , ключевые элементы $4, 5, 6, 7, 8$, микропроцессор 9 , блоки памяти 10 и 11 , блок вычитания 12 , усилитель 13 , коммутатор 14 , реверсивные двигатели 15 и 16 , привод 17 перемещения измерительной головки, потенциометр 18 , блок питания 19 , двигатель постоянного тока 20 , имеющий кинематическую связь с тахогенератором 22 .

ИИС работает следующим образом.

Включают источник энергии 2 и начинают перемещение измерительной головки 1 над исследуемым изделием с некоторой постоянной скоростью V_n . По команде микропроцессора 9 открывается ключ 5 , и информация о температуре $T(R_n)$ с датчика 3 заносится в блок памяти 11 . Затем по сигналу с микропроцессора механизм перемещения термоприемника изменяет расстояние между источником энергии 3 и термоприемником 2 на расстоянии ΔR_1 , равное $0,5 - 1$ мм. Далее по команде с микропроцессора открывается ключ 4 , и информация о температуре $T(R_n + \Delta R_1)$ с термоприемника 3 заносится в блок 10 памяти. По сигналу микропроцессора 9 открываются ключи 7 и 8 , и на блок вычитания 12 подаются сигналы с блоков 10 и 11 . Разностный сигнал $\Delta T_1(R) = T(R_n) - T(R_n + \Delta R_1)$ усиливается усилителем 13 и через коммутатор 14 подается на реверсивный двига-

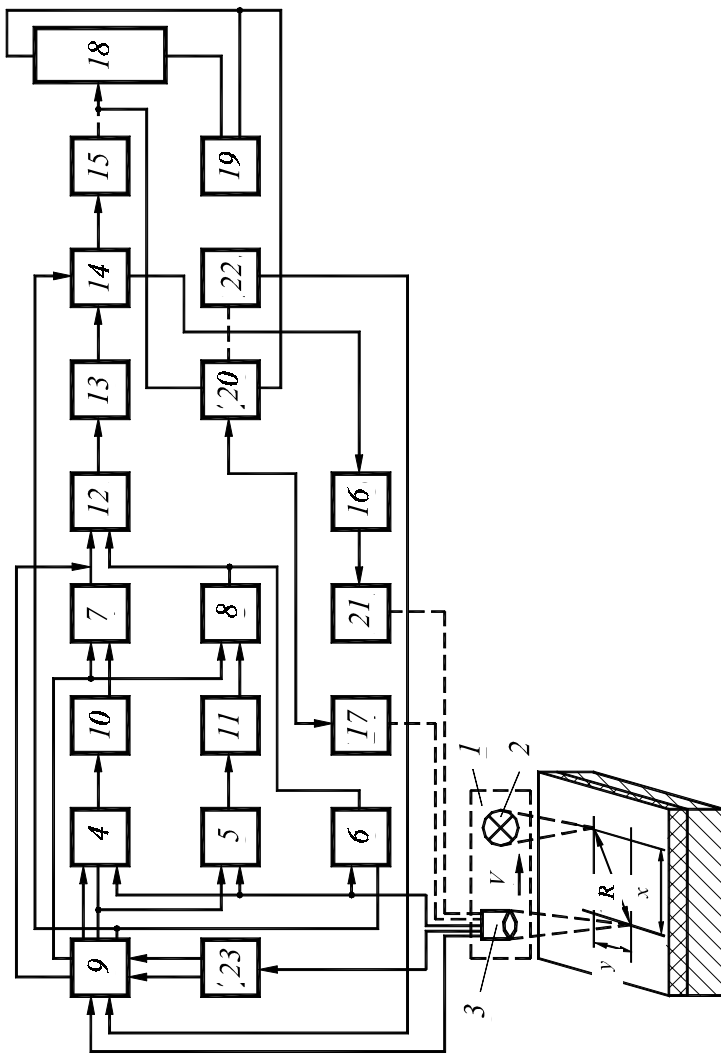


Рис. 3.6 Структурная схема ИИС НК ТЗП, реализующая бесконтактный адаптивный алгоритм измерения

тель 16, который через блок 21 в соответствии с зависимостью $\Delta R_i = K\Delta T_i(R)$ переместит термоприемник 3 относительно источника энергии 2.

Затем информация с датчика 3 о $T(R_2)$ через открытый ключевой элемент 5 заносится в блок памяти 11, при этом предыдущая информация $T(R_n)$ в этом блоке стирается. По команде с микропроцессора 9 открываются ключи 7 и 8, и с блока вычитания 12 разность $\Delta T_2(R) = T(R_n) - T(R_{n2})$ через усилитель 13 и коммутатор 14 поступает на реверсивный двигатель 16, который в зависимости от знака величины разности $\Delta T_2(R)$ переместит термоприемник 3 в точку R_3 . Перемещение термоприемника в соответствии с вышеописанным циклом будет осуществляться до тех пор, пока разность $\Delta T_i(R) = T(R) - T(R_{i-1})$ станет равной нулю. Это будет соответствовать экстремуму функции, т.е. точке $T_{\max 1}(R_{\text{опт1}})$.

Затем на первый вход блока вычитания 12 с микропроцессора 9 подается сигнал, величина которого пропорциональна значению $T_{\text{зад}}$, а на второй вход через открытый ключ 6 подается сигнал с датчика 3. Разностный сигнал $T(V)$ с выхода блока 12 через усилитель мощности 13 и коммутатор 14 поступает на реверсивный двигатель 15, который в зависимости от величины рассогласования перемещает реохорд потенциометра 18, что

приводит к уменьшению напряжения питания двигателя постоянного тока 20. Последний за счет уменьшения числа оборотов через механизм (редуктор) 17 уменьшает скорость движения источника энергии 2 и термодатчика 3 до тех пор, пока контролируемая температура T станет равной заданному значению $T_{зад}$. Затем по команде с микропроцессора в соответствии с ранее описанным алгоритмом поиска экстремального значения термограмм нагрева находят расстояние $R_{опт2}$, которое соответствует максимуму температуры T_{max2} . По команде оператора информация о скоростях движения измерительной головки V_{x1} и V_{x2} с тахогенератора 22 заносится в оперативную память микропроцессора 9, а с датчика 23 заносится информация о расстоянии $R_{опт1}$, $R_{опт2}$ между термодатчиком и источником энергии. На основе полученной измерительной информации в микропроцессоре осуществляется расчет толщины пленочного покрытия исследуемого изделия.

3.4 ТЕРМОЗОНДЫ ДЛЯ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ТФХ И ТЗП МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ

Разработана оригинальная конструкция измерительного термозонда [67], используемого в ПриС оперативного неразрушающего контроля ТФХ и ТЗП и реализующего как абсолютные, так и относительные контактные методы и алгоритмы измерения с применением линейного импульсного нагревателя. На рис. 3.7 представлен общий вид термозонда, а на рис. 3.8 - размещение нагревателя и термочувствительных элементов (микротермопар) на контактной поверхности зонда.

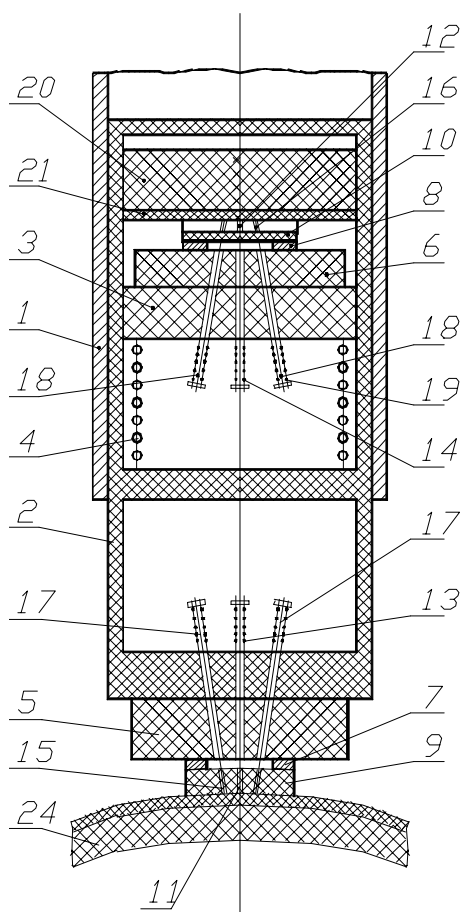


Рис. 3.7 Термозонд для контроля ТФХ и ТЗП с эталонной измерительной головкой

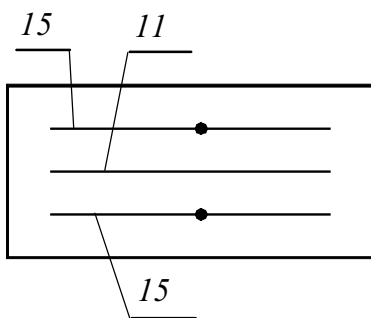


Рис. 3.8 Схема
расположения линейного
нагревателя
и микротермопар
на контактной
поверхности
измерительной головки

Термозонд содержит цилиндрический корпус *1*, размещенный в нем полый держатель *2*, установленный в держателе *2* с возможностью перемещения поршень *3*, подпружиненный относительно держателя *2* силовой пружиной *4*. На держателе *2* и поршне *3* размещены эластичные пластины *5* и *6*, на которых установлены подпружиненные с помощью плоских пружин *7* и *8* теплоизоляционные подложки *9* и *10*. В теплоизоляционных подложках *9* и *10* имеются канавки, в которых расположены выполненные из микропровода электронагреватели *11* и *12*, подпружиненные с помощью пружин *13* и *14*, а также сваренные встык и расположенные по обе стороны от электронагревателей *11* и *12* пары микротермопар *15* и *16*, также подпружиненные с помощью пружин *17* и *18*. В стенке корпуса *1* выполнены отверстия *19*, в которых размещается сменный эталонный образец *20* с покрытием *21*, близким по своим теплофизическим свойствам к контролируемому покрытию. В процессе измерений с покрытием *21* контактируют нагреватель *12* и микротермопары *16*. Нагреватели *11* и *12* подключены параллельно к источнику питания *22*. Микротермопары *15* соединены между собой последовательно-согласно. Две микротермопары *16* соединены между собой последовательно-согласно. Пары микротермопар *15* и *16* включены последовательно-встречно и подключены к измерительному преобразователю канала ПриС. В процессе измерений термозонд размещается на объекте контроля *24* с покрытием *25*.

Термозонд работает следующим образом. При измерениях термозонд прижимают к покрытию *25* объекта контроля *24*. При этом одинаковое усилие прижима микротермопар обеспечивается благодаря наличию силовой пружины *4*, расположенной как на объекте контроля *24*, так и на эталонном образце *20*, что обуславливает равенство контактных тепловых сопротивлений между объектом контроля и эталонным образцом и соответствующими нагревателями и термочувствительными элементами. Затем через нагреватели *11* и *12* в течение некоторого времени пропускают ток, что обеспечивает нагрев эталонного образца и объекта контроля. Разностная ЭДС, получаемая на зажимах микротермопар *15* и *16*, регистрируется в процессорной части ПриС.

Наличие в разработанной конструкции термозонда включенных дифференциально эталонной и измерительной частей повышает (по сравнению с известными) точность измерений за счет компенсации влияния теплопотерь в окружающую среду, влияния контактных термосопротивлений между измерительной головкой зонда и исследуемыми объектами, а также колебаний напряжений источника питания. Размещение нагревателей и термочувствительных элементов на подпружиненной теплоизоляционной подложке позволяет производить исследования покрытий на поверхностях различной кривизны, что расширяет область применения предлагаемого термозонда.

Далее рассматривается конструкция измерительного термозонда, отличительной особенностью которого является существенное уменьшение погрешности результатов

измерения из-за влияния изменения начальной температуры в тепловой системе измерительная головка - исследуемый объект, а также состояния поверхности объекта исследования, меняющегося от эксперимента к эксперименту [67].

На рис. 3.9 изображен термозонд, а на рис. 3.10 - схема размещения нагревателя и термобатарей на контактной поверхности зонда.

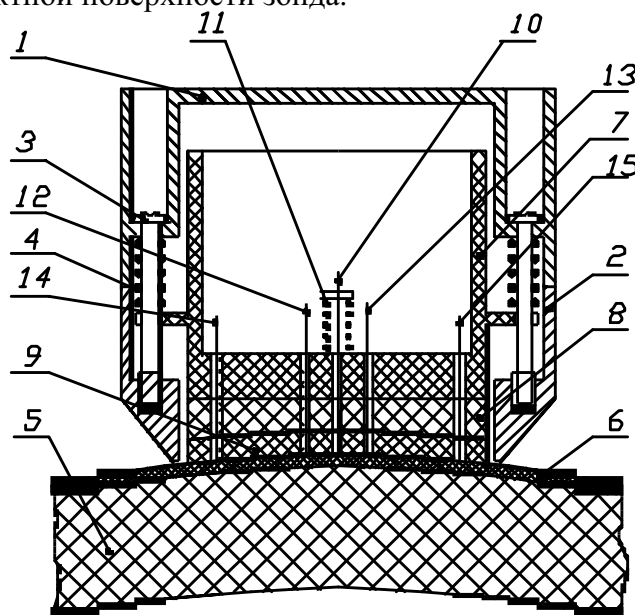


Рис. 3.9 Термозонд для контроля ТФХ и ТЗП с дифференциальными термобатареями в измерительной головке

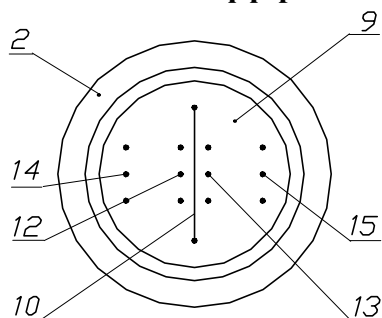


Рис. 3.10 Схема расположения линейного нагревателя и дифференциальных микротермопар на контактной поверхности измерительной головки

Термозонд содержит (рис. 3.9) цилиндрический корпус, состоящий из двух частей 1 и 2, соединенных с помощью четырех винтов 3, на которые установлены пружины 4, обеспечивающие постоянную степень прижатия измерительной головки, имеющей возможность возвратно-поступательного движения цилиндрической полости корпуса 1 - 2, к поверхности исследуемого объекта 5 с пленочным покрытием 6. Измерительная головка состоит из держателя 7, с размещенными на нем эластичной пластиной 8 и теплоизоляционной подложкой 9. На поверхности теплоизоляционной подложки, контактирующей с объектом 5, имеется канавка, в которой помещен линейный электронагреватель 10 из микропровода с высоким электрическим сопротивлением (нихром), постоянное натяжение которого обеспечивается пружинами 11. На заданном расстоянии по обе стороны от нагревателя 10 и параллельно ему расположены спаи рабочих 12, 13 и вспомогательных 14, 15 термобатарей. Причем расстояние от нагревателя до

вспомогательных термобатарей взято на порядок больше, чем расстояние от нагревателя до рабочих термобатарей. Такое расположение рабочих и вспомогательных термобатарей, а также выбор моментов снятия с них измерительной информации, гарантирует то, что тепловая волна не достигнет спаев вспомогательных термобатарей, достигнув рабочих. Обычно расстояние до рабочих термопар берется 2 - 3 мм, а до вспомогательных - 20 мм. Рабочие термобатареи 12, 13, как и вспомогательные термобатареи 14, 15, соединены последовательно, но рабочие термобатареи включены дифференциально относительно вспомогательных термобатарей (рис. 3.10). Количество микротермопар в термобатареях выбирается с учетом требуемого выходного напряжения, характеристик устройств унификации измерительного сигнала и устройств обработки измерительной информации.

Термозонд работает следующим образом. В процессе измерения термозонд прижимается к объекту контроля контактной поверхности измерительной головки. При этом пружины 4 обеспечивают постоянное усилие прижатия термобатарей 12 - 15 и нагревателя 10 к объекту контроля, причем использование эластичной пластины обеспечивает плотное прилегание без воздушных зазоров контактной поверхности измерительной головки как к плоским, так и к имеющим небольшой радиус кривизны объектам контроля. После подачи теплового импульса от нагревателя разностная ЭДС, получаемая от рабочих и вспомогательных термобатарей, в заранее заданные моменты времени поступает на измерительно-вычислительное микропроцессорное устройство 16, где в соответствии с алгоритмом измерения, построенным на основе математической модели тепловых процессов в исследуемом объекте, производится вычисление ТФХ или ТЗП исследуемых объектов. Моменты времени снятия информации о ТП задаются такими, чтобы для исследуемого класса материалов изделий тепловая волна от воздействия теплового импульса достигала спаев рабочих термобатарей, но не доходила до спаев вспомогательных термобатарей.

Имея информацию о температурно-временных изменениях в объекте исследования, а также о мощности теплового воздействия, начальных и граничных условиях проведения теплофизического эксперимента, в соответствии с алгоритмами, изложенными во второй главе, можно определить искомые ТФХ и ТЗП материалов и готовых изделий.

В заключении следует отметить, что существенным преимуществом разработанного термозонда перед известными техническими решениями данного назначения является использование микротермобатарей, позволяющих получить высокий по уровню информационный сигнал, что в итоге существенно уменьшает относительную погрешность температурно-временных измерений и значительно упрощает требования к схемам унификации и нормализации измерительного сигнала.

Г л а в а 4

ОЦЕНКА И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ НАДЕЖНОСТИ СРЕДСТВ НК ТФС И ТЗП

Как было показано в предыдущих главах, методы НК ТФС и ТЗП материалов и изделий отличаются сложностью осуществления алгоритма измерения, так как требуют определения пространственно-временных информативных параметров теплового процесса. Алгоритмическая, структурная и конструктивная сложность средств измерительной техники, реализующих методы НК ТФС и ТЗП материалов, ставит актуальным вопрос об обеспечении их необходимой метрологической надежностью как на этапе проектирования, так и эксплуатации. Известно [68], что метрологической надежностью средств измерений (СИ) называют свойство СИ сохранять во времени метрологические характеристики в пределах

установленных норм при заданных режимах эксплуатации, т.е. метрологическая надежность определяется характером и темпом изменения нормируемых метрологических характеристик исследуемых СИ. Практика эксплуатации СИ показывает, что для них доминирующими среди общего количества отказов являются постепенные отказы, обусловленные монотонным изменением во времени и, в конечном итоге, выходом за допустимые пределы метрологических характеристик СИ. Такие отказы, выявляемые только при проведении проверок, характерны прежде всего для аналоговых блоков (АБ) измерительного канала (ИК) средств НК.

Существуют два подхода к определению метрологической надежности СИ: экспериментальный, основанный на проведении ресурсных испытаний, и теоретический с применением математического моделирования. В силу сложности, трудоемкости и длительности экспериментальных методов наиболее эффективными и перспективными являются методы оценки и прогнозирования метрологической надежности на основе математического моделирования.

Среди показателей, определяющих метрологическую надежность СИ, особо значимым является метрологический ресурс, оцениваемый временем выхода нормируемой метрологической характеристики за допустимые пределы.

Разработка научно обоснованной методики оценки и прогнозирования состояния метрологических характеристик АБ ИК средств НК позволяет определить метрологическую надежность на любой момент времени их эксплуатации, правильно выбрать сроки проверок и профилактических работ, принять меры по предупреждению отказов и, в конечном итоге, проектировать средства НК с увеличенным метрологическим ресурсом.

4.1 ОБЩИЙ АЛГОРИТМ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СОСТОЯНИЯ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК БЛОКОВ СРЕДСТВ НК

Алгоритм прогнозирования состояния метрологических характеристик включает в себя следующие этапы:

- **построение математических моделей метрологических характеристик аналоговых блоков средств НК на основе анализа структурных и принципиальных схем этих блоков;**
- статистическое моделирование метрологических характеристик блоков средств НК в различных временных сечениях;
- математическое описание процессов изменения во времени метрологических характеристик блоков средств НК;
- повышение метрологического ресурса блоков средств НК на этапе их проектирования;
- **определение величины межповерочных интервалов для эксплуатируемых блоков средств НК на основе построенных математических моделей процессов изменения во времени их метрологических характеристик;**
- определение необходимого числа измерений метрологических характеристик исследуемых блоков средств НК при проведении метрологических проверок и необходимого первоначального объема выборки при экспериментальных исследованиях блоков;
- коррекция моделей процессов изменения во времени метрологических характеристик блоков средств НК в процессе их эксплуатации.

4.2. ПОСТРОЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АНАЛОГОВЫХ БЛОКОВ СРЕДСТВ НК

В общем случае математическая модель функционирования любого аналогового блока средства НК [69] выражает зависимость его выходного параметра от значений входного параметра, параметров элементной базы и внешних возмущающих воздействий (условий эксплуатации)

$$y = F_1(x, \bar{\xi}, \bar{\phi}), \quad (4.1)$$

где y - выходной параметр; x - входной параметр; $\bar{\xi} = \{\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n\}$ - вектор параметров комплектующих элементов блока; $\bar{\phi} = \{\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_v\}$ - вектор внешних воздействий (температура, влажность, вибрация и т.д.).

Эта модель строится на основе структурной и принципиальной схем блока с помощью современных методов расчета электронных цепей, теоретических основ электротехники, а также с учетом сведений об условиях эксплуатации блока.

Для изучения метрологических свойств блоков необходимо иметь аналитические выражения для исследуемых метрологических характеристик S . Поэтому математическую модель (4.1) можно преобразовать к виду

$$S = F_2(x, \bar{\xi}, \bar{\phi}). \quad (4.2)$$

Будем рассматривать исследуемые блоки средств НК при неизменных нормальных условиях эксплуатации. При таком допущении исключается влияние изменения внешних воздействий на изменение их метрологических свойств. Тогда математическая модель блоков средств НК окончательно запишется

$$S = F_3(x, \bar{\xi}). \quad (4.3)$$

Таким образом, для задачи прогнозирования состояния метрологических характеристик блоков средств НК математическая модель исследуемых устройств в общем случае представляет функциональную зависимость исследуемой метрологической характеристики от параметров комплектующих элементов и входного сигнала.

4.3 СТАТИСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК БЛОКОВ СРЕДСТВ НК

Для успешного проведения моделирования исходные данные должны быть достаточными по объему, достоверными и точными. Исходными данными для решения задачи моделирования метрологических характеристик блоков средств НК являются [70]:

- 1) математическая модель (4.3);
- 2) функция распределения $P_{t_i}(\xi_i)$ параметров элементов в различных временных сечениях t_i , $i=1, 2, \dots, k$; $j=1, 2, \dots, n$;
- 3) закономерности изменения параметров элементов во времени $\bar{\xi}(t) = \{\xi_1(t), \xi_2(t), \dots, \xi_i(t), \dots, \xi_n(t)\}$.

Первое допущение, которое вводится при формировании исходных данных, - закон распределения параметров элементов нормальный. Правомерность этого допущения доказывается общим свойством всех естественных процессов старения и износа, и статистическими данными по радиоэлектронным элементам [71, 72]. То есть функция

распределения каждого параметра как случайная величина характеризуется математическим ожиданием m_{ξ_j} и среднеквадратическим отклонением σ_{ξ_j} , $j=1, 2, \dots, n$

$$P_{i_j}(\xi_j) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_{\xi_j}(t_i)} \exp \left\{ -\frac{[\xi_j(t_i) - m_{\xi_j}(t_i)]^2}{2\sigma_{\xi_j}^2(t_i)} \right\}, \quad (4.4)$$

где $i=1, 2, \dots, k$.

Статистическое моделирование метрологических характеристик блоков средств НК состоит из двух этапов:

- 1) моделирование законов распределения параметров элементов;
- 2) моделирование реализаций метрологических характеристик блоков в различных временных сечениях.

Рассмотрим алгоритм моделирования случайных величин - параметров элементов с заданным нормальным законом распределения.

Известно [73], что если случайная величина v имеет произвольную плотность распределения вероятностей $P(v)$ в интервале (a_0, b_0) , то распределение случайной величины

$$\eta = \int_a^v P(v) dv \quad (4.5)$$

является равномерным в интервале $(0, 1)$. Таким образом, можно, взяв очередное значение равномерно распределенной случайной величины η и решив уравнение (4.5), найти очередное значение v с заданным законом распределения. Случайные числа η моделируются на компьютере с помощью генератора случайных чисел.

При нормальном законе распределения случайной величины v имеем

$$P(v) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_v} \exp \left\{ -\frac{[v - m_v]^2}{2\sigma_v^2} \right\}, \quad (4.6)$$

т.е. уравнение

$$\eta = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_v} \int_{-\infty}^v \exp \left\{ -\frac{[v - m_v]^2}{2\sigma_v^2} \right\} dv \quad (4.7)$$

относительно v в явном виде неразрешимо.

Поэтому моделирование нормально распределенных случайных величин осуществляется с использованием предельных теорем теории вероятностей. В частности, на основании

центральной предельной теоремы сумма большого числа случайных слагаемых при выполнении некоторых весьма общих условий имеет асимптотически нормальное распределение. Поэтому для получения нормально распределенных случайных величин можно воспользоваться суммированием чисел, равномерно распределенных в интервале (a_0, b_0) .

Если независимые случайные величины $v_1, v_2, \dots, v_i, \dots, v_q$ имеют одинаковое распределение вероятностей и если каждая v_i имеет математическое ожидание m_{v_i} и среднеквадратическое отклонение σ_{v_i} , то сумма $v = v_1 + v_2 + \dots + v_i + \dots + v_q$ асимптотически нормальна с математическим ожиданием

$$m_v = qm_{v_i} \quad (4.8)$$

и среднеквадратическим отклонением

$$\sigma_v = \sqrt{q} \sigma_{v_i}. \quad (4.9)$$

Как показывают расчеты, сумма имеет распределение, близкое к нормальному, при $q = 8 \dots 12$.

Случайная величина v_i с плотностью распределения $P(v_i) = \frac{1}{b_0 - a_0}$ при $a_0 < v < b_0$ согласно (4.5) будет определяться по формуле

$$v_i = a_0 + \eta (b_0 - a_0), \quad (4.10)$$

где η - равномерно распределенные в интервале $(0, 1)$ случайные числа.

Суммирование таких равномерно распределенных случайных величин v_i позволяет получить нормально распределенную случайную величину v . Таким образом, для моделирования каждой реализации случайных величин - параметров элементов блоков средств НК с нормальным законом распределения используется алгоритм, заключающийся в последовательном моделировании по уравнению (4.10) равномерно распределенных случайных величин с параметрами закона распределения a_0 и b_0 , пересчитанными соответствующим образом на основе задания m_{ξ_i} и σ_{ξ_i} , $i = 1, 2, \dots, n$.

Вычисленные по рассмотренному алгоритму частные реализации параметров элементов далее используются для определения по математической модели (4.3) отдельных частных реализаций метрологической характеристики исследуемого блока.

После моделирования N^* наперед заданных реализаций метрологической характеристики проводится статистическая обработка результатов, которая заключается в вычислении статистических характеристик для нормального закона распределения метрологической характеристики - математического ожидания m_S и среднеквадратического отклонения σ_S .

Основная последовательность расчетов повторяется в других временных сечениях t_i , $i = 1, 2, \dots, k$ на основе данных об изменении параметров элементов, входящих в уравнение математической модели (4.3).

Блок-схема алгоритма статистического моделирования метрологических характеристик блоков средств НК в отдельных временных сечениях приведена на рис. 4.1.

Число моделируемых реализаций N^* метрологических характеристик в отдельном временном сечении рассчитывается согласно неравенству Чебышева.

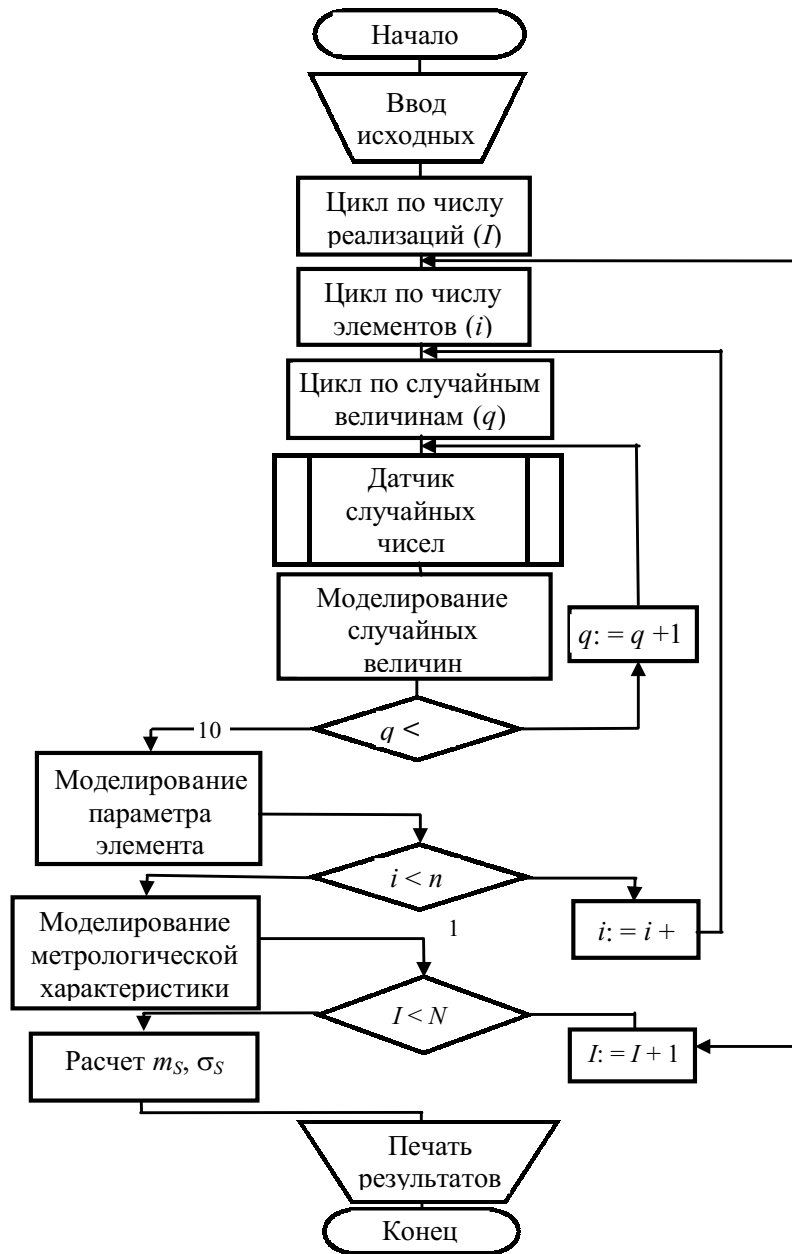


Рис.4.1 Блок-схема алгоритма статистического моделирования состояния метрологических характеристик исследуемых блоков

Если v - произвольная случайная величина с математическим ожиданием m_v и дисперсией σ_v^2 , то для выборочной оценки справедливо неравенство Чебышева

$$P \left[\left| m_v^* - m_v \right| \geq c \sigma_v^* \right] \leq \frac{1}{c^2} \quad (4.11)$$

или

$$P \left[\left| m_v^* - m_v \right| \leq c \sigma_v^* \right] \geq 1 - \frac{1}{c^2}, \quad (4.12)$$

где c - постоянная.

Так как

$$\sigma_{m_v} = \frac{\sigma_v}{\sqrt{N^*}} = \sqrt{\frac{\sigma_v^2}{N^*}}, \quad (4.13)$$

то

$$P \left[\left| m_{\nu}^* - m_{\nu} \right| \leq c \frac{\sigma_{\nu}^*}{\sqrt{N^*}} \right] \geq 1 - \frac{1}{c^2}. \quad (4.14)$$

Для нормального закона распределения при больших N^* неравенство Чебышева при $c = 3$ выполняется с вероятностью 0,997 ("правило трех сигм") [74, 75]

$$P \left[\left| m_{\nu}^* - m_{\nu} \right| \leq c \sqrt{\frac{\sigma_{\nu}^2}{N^*}} \right] \approx 0,997. \quad (4.15)$$

Соотношение (4.15) позволяет определить связь между погрешностью моделирования случайной величины ν и числом реализаций.

В [76] показано, что формула (4.15) может быть приведена к виду, удобному для вычисления числа реализаций N^* при заданной точности

$$N^* \geq \frac{g p (1-p)}{\varepsilon^2}, \quad (4.16)$$

где ε - погрешность моделирования; p - вероятность появления моделируемой случайной величины.

Практически, метод статистического моделирования наиболее эффективен в случае, если погрешность при решении задачи порядка 1 - 5 %.

Конечным результатом проведенного моделирования состояния исследуемых метрологических характеристик блоков в различных временных сечениях области контроля является совокупность данных, характеризующих изменение во времени средних значений $m_S(t)$ метрологических характеристик и разброс реализаций случайных процессов изменения метрологических характеристик около их средних значений $m_S(t) \pm c \sigma_S(t)$, где $\sigma_S(t)$ - изменение во времени среднеквадратического отклонения исследуемой метрологической характеристики, c - постоянный коэффициент, выбираемый в зависимости от заданного уровня доверительной вероятности P и закона распределения метрологической характеристики. Полученные таким образом данные об изменении во времени метрологических характеристик в некоторой области контроля (интервале наблюдения) используются для прогнозирования состояния этих метрологических характеристик в области будущих значений времени эксплуатации.

Таким образом, математическое моделирование метрологических характеристик блоков средств НК, заключающееся в построении математических моделей исследуемых блоков и статистическом моделировании состояния метрологических характеристик блоков в различных временных сечениях области контроля, является одним из основных этапов процесса прогнозирования метрологических характеристик блоков средств НК.

4.4 ПОСТРОЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ПРОЦЕССОВ ИЗМЕНЕНИЯ ВО ВРЕМЕНИ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК БЛОКОВ СРЕДСТВ НК

Математическая модель процесса изменения во времени метрологической характеристики исследуемого блока $S(t)$ представляет собой совокупность аналитических зависимостей, полученных для функции изменения во времени математического ожидания

$m_S(t)$ и функций, характеризующих изменение во времени границ отклонения возможных значений метрологической характеристики от ее математического ожидания (рис. 4.2)

$$\psi_{\pm\sigma}(t) = m_S(t) \pm c\sigma_S(t). \quad (4.17)$$

Экстраполяция математической модели (прогнозирующего выражения) на область будущих значений времени эксплуатации блока дает решение задачи прогнозирования состояния его метрологической характеристики.

Для задачи прогнозирования состояния метрологических характеристик блоков средств НК прогнозирующее выражение является математической моделью нестационарного случайного процесса изменения во времени исследуемой метрологической характеристики.

Анализ экспериментальных данных об изменении во времени метрологических характеристик различных измерительных уст-

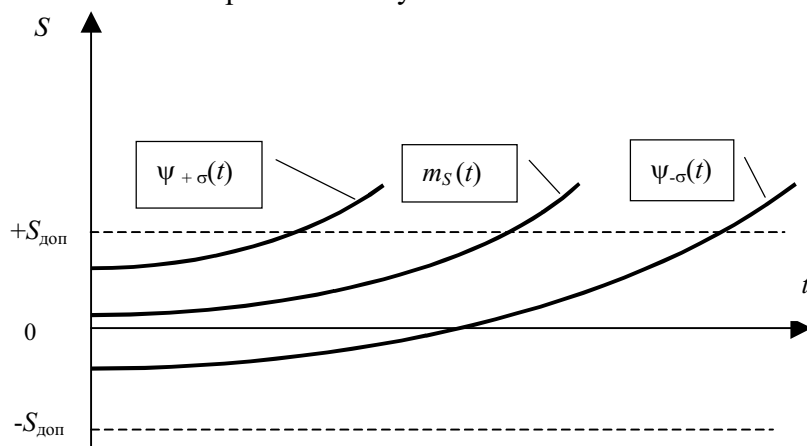


Рис. 4.2 Математическая модель изменения во времени метрологической характеристики

ройств, а также существующие в теории прогнозирования подходы к описанию дрейфа прогнозируемого параметра во времени [77 - 81] показывают, что в качестве основных моделей процессов старения могут быть рекомендованы: линейная, экспоненциальная, логарифмическая или полиномиальная зависимости.

Линейная модель является наиболее простой и представляется в следующем виде

$$S(t) = a_0 + a_1 t, \quad (4.18)$$

где a_0 и a_1 - коэффициенты, составляющие, соответственно, начальное значение исследуемой метрологической характеристики и скорость ее изменения во времени.

Однако, аппроксимация линейной моделью допустима лишь в пределах небольших интервалов работы объектов. Для реальных объектов, в частности для блоков средств НК, при длительных сроках их эксплуатации наиболее предпочтительны нелинейные модели процессов старения метрологических характеристик, а именно:

- экспоненциальные

$$S(t) = a_0 \exp(a_1 t); \quad (4.19)$$

- логарифмические

$$S(t) = \ln(a_0 + a_1 t); \quad (4.20)$$

- полиномиальные

$$S(t) = \sum_{\mu=0}^{\rho} a_{\mu} t^{\mu}. \quad (4.21)$$

В каждом конкретном случае прогнозирования необходимо выбирать определенный вид модели.

Предположим, что исследуемый процесс деградации метрологической характеристики блока средства НК описывается следующей полиномиальной функцией

$$S(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3. \quad (4.22)$$

Коэффициент a_0 характеризует начальное значение исследуемой метрологической характеристики. Постоянный множитель при первой степени полинома a_1 - показатель скорости изменения метрологической характеристики. Коэффициент a_2 идентичен ускорению процесса, другими словами, его второй производной d^2S/dt^2 . Если коэффициенты a_1 и a_2 одного знака, то это означает, что функция $S(t)$ не имеет экстремума. Анализируя коэффициент a_2 , можно сделать вывод о выпуклости или вогнутости кривой $S(t)$. И, наконец, коэффициент a_3 характеризует наличие или отсутствие точек перегиба у исследуемой кривой $S(t)$. Очевидно, что коэффициенты a_1 , a_2 и a_3 описывают все перечисленные свойства процесса старения метрологической характеристики блока (монотонность, инерционность, непрерывность, отсутствие экстремумов и т.д.).

Следовательно, можно сделать вывод, что процесс изменения метрологической характеристики может быть полностью описан полиномиальной зависимостью вида (4.21). Причем, как показывают теоретические и практические исследования, степень $\rho = 3$ является максимально возможной и уравнение (4.21) представляет собой своего рода гарантированную границу изменения метрологических характеристик блоков средств НК.

Для выбора степени $\rho = 2$ или $\rho = 3$ в каждом конкретном случае решения задачи прогнозирования метрологической характеристики блока средства НК устанавливается некоторый критерий, соответствие которому, а также наличие минимальной погрешности аппроксимации, и определяет необходимую для каждого исследуемого процесса изменения метрологической характеристики степень аппроксимирующего полинома.

Необходимое и достаточное условие выбора степени полинома для описания процесса изменения исследуемой метрологической характеристики блоков средств НК устанавливается согласно [79].

Для того, чтобы математическая модель процесса деградации метрологической характеристики исследуемого блока могла быть представлена полиномом степени ρ необходимо и достаточно равенство нулю в пределах заданной точности конечных разностей $(\rho - 1)$ порядка соответственно выбираемой степени полинома.

Следующим заключительным шагом при построении математической модели процесса изменения метрологических характеристик является вычисление коэффициентов полинома. Коэффициенты $a_0, a_1, \dots, a_{\rho}$ определяются по методу наименьших квадратов из условия [81, 75]

$$\sum_{i=1}^k \left[S(t_i) - \sum_{\mu=0}^p a_{\mu} t_i^{\mu} \right]^2 = \min, \quad (4.23)$$

где $S(t_i)$ - значение метрологической характеристики в точках области контроля T_1 , $t_i \in T_1$, $i = 1, 2, \dots, k$.

Метод наименьших квадратов достаточно прост для практической реализации и вычисление коэффициентов по этому методу не представляет существенных трудностей.

В результате всех проведенных вычислений по определению вида, степени и коэффициентов аппроксимационной модели строится математическая модель процесса изменения во времени метрологической характеристики, т.е. функции $m_S(t)$ и $\psi_{\pm\sigma}(t)$. Экстраполяция этих функций на область прогноза на основе полученных для них математических зависимостей выполняется путем простых арифметических действий.

Экстраполяция математической модели процесса изменения метрологической характеристики блока средства НК на область будущих значений времени эксплуатации позволит в теоретическом плане, т.е. при отсутствии данных эксперимента, решить поставленную задачу прогнозирования. Построенная теоретическая модель процесса деградации дает возможность уже на этапе проектирования, не проводя долговременных испытаний блоков, ориентировочно определить характер, скорость процесса старения метрологической характеристики. Знание теоретической математической модели процесса изменения исследуемой метрологической характеристики блока средства НК является непременным условием для выработки рекомендаций по эксплуатации блока данного типа (выбору межповерочных интервалов, необходимого числа измерений при каждой предстоящей поверке и т.д.), для прогнозирования состояния исследуемой метрологической характеристики блока на этапе эксплуатации по мере поступления данных контрольных поверок.

4.5 СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО РЕСУРСА БЛОКОВ СРЕДСТВ НК

Прогнозирование состояния метрологических характеристик блоков средств НК позволяет определить с некоторой доверительной вероятностью время наступления метрологического отказа t_p . Будем называть величину интервала времени $(0, t_p)$ метрологическим ресурсом исследуемого блока, определяющим возможное время работы блока без метрологических отказов. То есть прогнозирование состояния метрологической характеристики блока средства НК позволяет определить метрологический ресурс для каждого конкретного типа эксплуатируемых блоков.

Среди факторов, определяющих метрологический ресурс блока средства НК, можно выделить:

- качество схемного решения блока;
- качество элементной базы при заданной структуре блока.

Варьирование данных факторов позволяет решить задачу увеличения метрологического ресурса исследуемого блока. Эта задача решается на стадии его проектирования по данным о состоянии метрологической характеристики, полученным в процессе ее прогнозирования.

Определение наиболее оптимального схемного решения блока для увеличения его метрологического ресурса может быть осуществлено сравнением различных возможных вариантов схем по показателю метрологического ресурса, совершенствованием технологии изготовления блока средства НК, введением избыточности (резервирования) как на уровне

всего блока, так и отдельных узлов и элементов блока. Перечисленные методы, прежде всего резервирование, относятся к так называемым структурным методам повышения надежности радиоэлектронной аппаратуры, достаточно подробно освещенным в литературе.

Увеличение метрологического ресурса блока ИК может быть достигнуто за счет замены части элементной базы блока или даже одного элемента. Выбор элемента в блоке ИК, подлежащего изменению, определяется степенью его влияния на исследуемую метрологическую характеристику. Критерием выбора этого элемента при условии независимости параметров всех элементов может служить максимум нормируемой частной производной

$$R(\xi_j) = \frac{\bar{R}(\xi_j) \sigma_{\xi_j}}{\sqrt{\sum_j \bar{R}^2(\xi_j) \sigma_{\xi_j}^2}}, \quad (4.24)$$

где $\bar{R}(\xi_j) = \left| \frac{\partial S}{\partial \xi_j} \right|$, $j=1, 2, \dots, n$; ξ_j - параметры комплектующих элементов блока; σ_{ξ_j} - среднеквадратическое отклонение j -го параметра комплектующего элемента блока.

Выбранный критерий учитывает не только влияние номинальных значений, но и разброса параметров элементов σ_{ξ_j} на исследуемую метрологическую характеристику блока. Величина частной производной $\bar{R}(\xi_j)$ вычисляется от функции $S = f(\xi_1, \dots, \xi_n)$, являющейся уравнением исходной математической модели блока ИК.

Расчет величины $R(\xi_j)$ по выражению (4.54) проводится для всех n параметров комплектующих элементов.

Упорядочив электрорадиоэлементы по величине вычисленного критерия $R(\xi_j)$ выбирается элемент, имеющий максимальное значение этого критерия. Данный элемент подлежит замене на аналогичный, но с более стабильными параметрами относительно их изменения во времени.

Расчеты показывают, что скорректированная таким образом элементная база обеспечивает увеличение метрологического ресурса для блоков средств НК в среднем на 30 - 40 %.

4.6 РАСЧЕТ ЧИСЛА ИЗМЕРЕНИЙ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК БЛОКОВ СРЕДСТВ НК ПРИ ПРОВЕДЕНИИ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ПОВЕРОК

Пусть проводится поверка исследуемого блока в момент времени t_i , $i=0, 1, 2, \dots, k$. Измерение исследуемой метрологической характеристики осуществляется высокоточным измерительным прибором, имеющим разрешающую способность Ω , под которой будем понимать возможность измерения данным прибором малых приращений измеряемой величины. Необходимо определить число измерений N во временном сечении t_i , чтобы с заданной вероятностью P случайная величина $\tilde{m}_S(t_i)$ попала бы в интервал Ω , т.е. чтобы выполнялось следующее неравенство

$$|m_S(t_i) - \tilde{m}_S(t_i)| \leq \Omega, \quad (4.25)$$

где $m_S(t_i)$ - математическое ожидание измеряемой величины во временном сечении t_i .

Используя распределение Стьюдента [75], можно записать:

$$m_S(t_i) = \tilde{m}_S(t_i) \pm \zeta;$$

$$\zeta = \frac{\Omega}{2} = t_{p, n_1} \frac{\tilde{\sigma}_S(t_i)}{\sqrt{N}},$$

где t_{p, n_1} - коэффициент Стьюдента, $n_1 = N - 1$; $\tilde{\sigma}_S(t_i)$ - среднеквадратическое отклонение измеряемой метрологической характеристики, вычисляемое по множеству измерений группы блоков данного типа.

Из (4.27) можно выразить N

$$N = \frac{4t_{p, n_1}^2 \tilde{\sigma}_S^2(t_i)}{\Omega^2}. \quad (4.28)$$

Так как $\tilde{\sigma}_S(t_i)$ является случайной величиной, то для нее необходимо определить доверительный интервал. Используя распределение χ^2 можно записать

$$\frac{\tilde{\sigma}_S^2(t_i)(N-1)}{\chi_{N-1, \frac{\alpha}{2}}^2} \leq \sigma_S^2(t_i) \leq \frac{\tilde{\sigma}_S^2(t_i)(N-1)}{\chi_{N-1, 1-\frac{\alpha}{2}}^2},$$

где $\chi_{N-1, \frac{\alpha}{2}}^2$, $\chi_{N-1, 1-\frac{\alpha}{2}}^2$ - критические точки распределения χ^2 .

Из (4.29) можно выделить два уравнения и записать их в виде системы

$$\begin{cases} \tilde{\sigma}_S^2(t_i) = \frac{(N-1)N}{\sigma_S^2(t_i) \chi_{N-1, \frac{\alpha}{2}}^2}; \\ \tilde{\sigma}_S^2(t_i) = \frac{(N-1)N}{\sigma_S^2(t_i) \chi_{N-1, 1-\frac{\alpha}{2}}^2}. \end{cases} \quad (4.30)$$

С учетом (4.28) система (4.30) имеет вид

$$\begin{cases} \frac{4\sigma_S^2(t_i)}{\Omega^2} = \frac{(N-1)N}{\chi_{N-1, \frac{\alpha}{2}}^2 t_{p, n_1}^2}; \\ \frac{4\sigma_S^2(t_i)}{\Omega^2} = \frac{(N-1)N}{\chi_{N-1, 1-\frac{\alpha}{2}}^2 t_{p, n_1}^2}. \end{cases} \quad (4.31)$$

Решение системы уравнений (4.31) позволяет определить число измерений при фиксированном $\sigma_S^2(t_i)$, определенном по математической модели изменения во времени метрологической характеристики блока средства НК и вероятности P .

Наиболее удобно решать систему (4.31) графоаналитическим методом. Принимается следующая последовательность расчетов.

Обозначим

$$C_1 = \frac{(N-1)N}{\chi_{N-1, \frac{\alpha}{2}}^2 t_{p, n_1}}, \quad C_2 = \frac{(N-1)N}{\chi_{N-1, 1-\frac{\alpha}{2}}^2 t_{p, n_1}}.$$

Тогда, задавая N и α , строятся зависимости $c_1 = c_1(N, \alpha)$, $c_2 = c_2(N, \alpha)$.

При известном значении разрешающей способности прибора Ω и заданном в некоторый момент времени t_i значении $\sigma_S(t_i)$ вычисляется

$$C_3 = \frac{4\sigma_S^2(t_i)}{\Omega^2}. \quad (4.32)$$

Входя с полученным числом C_3 в графики $C_1 = f_1(N, \alpha)$ и $C_2 = f_2(N, \alpha)$ можно определить минимальное (рис. 4.3) и максимальное (рис. 4.4) число измерений метрологической характеристики в заданном временном сечении при заданной вероятности P .

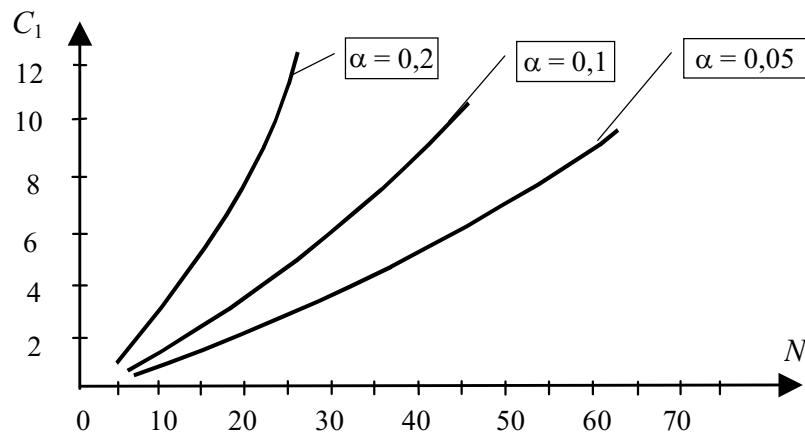


Рис. 4.3 Графики для определения минимального числа измерений метрологических характеристик при поверках

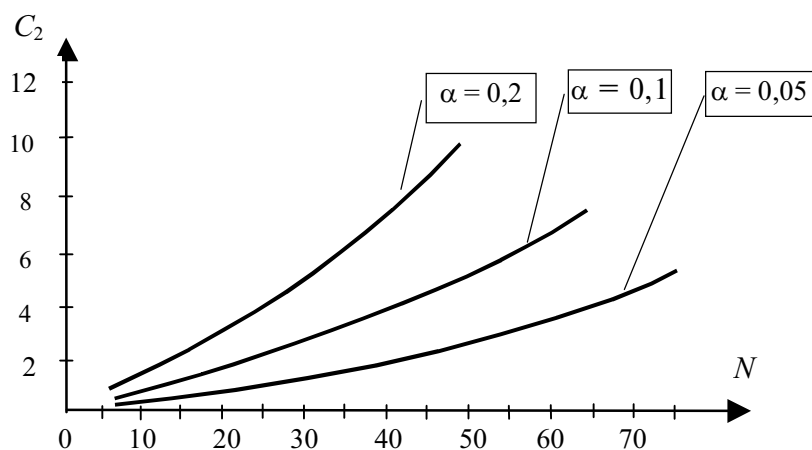


Рис. 4.4 Графики для определения максимального числа измерений метрологических характеристик при поверках

4.7 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЕРВОНАЧАЛЬНОГО ОБЪЕМА ВЫБОРКИ ПРИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ БЛОКОВ СРЕДСТВА НК

Для более глубокого и детального изучения процессов изменения во времени характеристик различных радиоэлектронных объектов и, в том числе, метрологических характеристик блоков средств НК, обусловленных прежде всего изменением параметров элементной базы, необходимо проведение экспериментальных исследований таких объектов на долговременную стабильность. При организации подобного рода исследований перед экспериментаторами встает вопрос о первоначальном объеме выборки, необходимом для проведения эксперимента. В процессе длительных испытаний часть исследуемых устройств может выйти из строя по внезапным отказам. В связи с этим уменьшается достоверность получаемых в эксперименте результатов. Необходимо с учетом заданной для объекта исследования интенсивности внезапных отказов и по результатам статистического моделирования его характеристик (параметров) определить первоначальный объем выборки для эксперимента с целью получения достоверных результатов к моменту времени t_k , $t_k \geq t_i$, $i = 0, 1, 2, \dots, k$.

Рассмотрим решение этой задачи на примере исследования процессов деградации метрологических характеристик блоков средств НК, используя полученные ранее математические выражения для расчета числа измерений в одном временном сечении (4.31). Основное допущение, которое используется при решении этого вопроса, - математическая модель деградации метрологической характеристики блока адекватна реальному объекту.

По определению интенсивности отказов [82]

$$\lambda = \frac{n_{от}}{N_{cp} \Delta t}, \quad (4.33)$$

где $n_{от}$ - число отказавших блоков за время $\Delta t = t_k - t_0$; Δt - рассматриваемый интервал времени; N_{cp} - среднее число исправно работающих блоков в интервале Δt .

Очевидно, что

$$N_{cp} = \frac{N_0 + N_k}{2}; \quad (4.34)$$

$$n_{от} = N_0 - N_k, \quad (4.35)$$

где N_0 - число блоков на момент начала эксперимента (необходимый объем выборки); N_k - число исправно работающих блоков на момент t .

Тогда на основании (4.34) и (4.35) можно записать выражение (4.36) в виде

$$\lambda = \frac{2(N_0 - N_k)}{(N_0 - N_k)\Delta t}. \quad (4.36)$$

Отсюда

$$N_k = \frac{2 - \lambda \Delta t}{2 + \lambda \Delta t} N_0. \quad (4.37)$$

Пусть для момента времени t_k известна система уравнений (4.31), определяющая необходимое число измерений в k -ом временном сечении. При $t_i = t_k$ (4.31) запишется в виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{4\sigma_S^2(t_k)}{\Omega^2} = \frac{N_k(N_k-1)}{t_{p, N-1}^2 \chi_{N-1, \frac{\alpha}{2}}^2}; \\ \frac{4\sigma_S^2(t_k)}{\Omega^2} = \frac{N_k(N_k-1)}{t_{p, N-1}^2 \chi_{N-1, 1-\frac{\alpha}{2}}^2}, \end{array} \right. \quad (4.38)$$

где $\sigma_S(t_k)$ - параметр закона распределения метрологической характеристики блока, определяемый по математической модели процесса деградации метрологической характеристики блока в момент t_k ; N_k - число измерений в сечении t_k .

С учетом (4.37) систему уравнений (4.38) можно преобразовать следующим образом:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{4\sigma_S^2(t_k)}{\Omega^2} = \frac{\frac{2 - \lambda \Delta t}{2 + \lambda \Delta t} N_0 \left(\frac{2 - \lambda \Delta t}{2 + \lambda \Delta t} N_0 - 1 \right)}{t_{p, N-1}^2 \chi_{N-1, \frac{\alpha}{2}}^2}; \\ \frac{4\sigma_S^2(t_k)}{\Omega^2} = \frac{\frac{2 - \lambda \Delta t}{2 + \lambda \Delta t} N_0 \left(\frac{2 - \lambda \Delta t}{2 + \lambda \Delta t} N_0 - 1 \right)}{t_{p, N-1}^2 \chi_{N-1, 1-\frac{\alpha}{2}}^2}. \end{array} \right. \quad (4.39)$$

Обозначим

$$\frac{2 - \lambda \Delta t}{2 + \lambda \Delta t} = a. \quad (4.40)$$

Тогда

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{4\sigma_S^2(t_k)}{\Omega^2} = \frac{aN_0(aN_0-1)}{t_{p, N-1}^2 \chi_{N-1, \frac{\alpha}{2}}^2}; \\ \frac{4\sigma_S^2(t_k)}{\Omega^2} = \frac{aN_0(aN_0-1)}{t_{p, N-1}^2 \chi_{N-1, 1-\frac{\alpha}{2}}^2}. \end{array} \right. \quad (4.41)$$

Решение системы уравнений (4.41) позволит определить необходимый первоначальный объем выборки N_0 . Решить (4.41) можно аналогично решению (4.31) графоаналитическим методом в следующей последовательности.

Вычисляется постоянный коэффициент a по уравнению (4.40) при заданном интервале времени $\Delta t = t_k - t_0$ и заданной для блока средства НК интенсивности внезапных отказов λ на этом интервале.

При различных значениях N_0 и α строятся семейства зависимостей:

$$B_1 = f_1(N_0, \alpha); \quad B_2 = f_2(N_0, \alpha),$$

где $B_1 = \frac{a N_0 (a N_0 - 1)}{t_{p, N-1}^2 \chi_{N-1, \frac{\alpha}{2}}^2}$, $B_2 = \frac{a N_0 (a N_0 - 1)}{t_{p, N-1}^2 \chi_{N-1, 1-\frac{\alpha}{2}}^2}$.

По известным значениям $\sigma_S(t_k)$ и Ω определяется

$$B_3 = \frac{4\sigma_S^2(t_k)}{\Omega^2}. \quad (4.42)$$

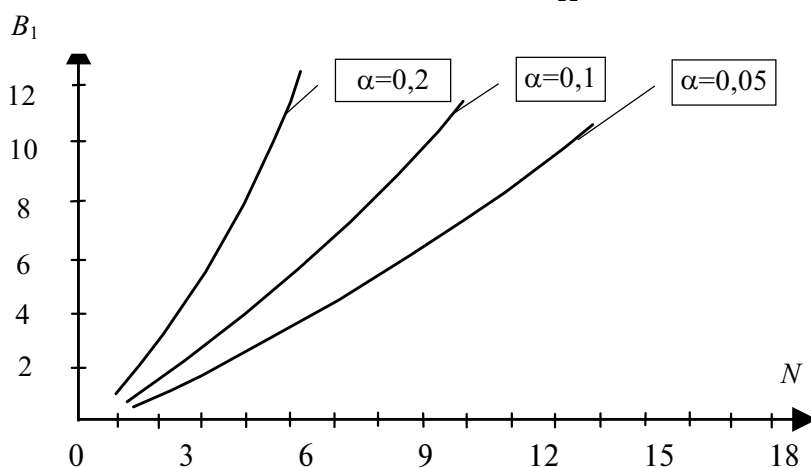


Рис. 4.5 Графики определения минимального объема выборки

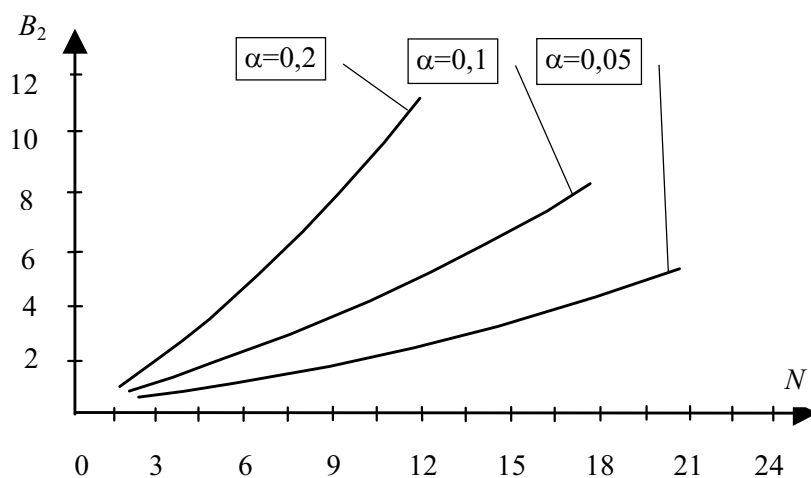


Рис. 4.6 Графики определения максимального объема выборки

Входя с полученным числом в графики $B_1 = f_1(N_0, \alpha)$ (рис. 4.5) и $B_2 = f_2(N_0, \alpha)$ (рис. 4.6) при заданном уровне значимости α , определяется наименьшее N_{01} и наибольшее N_{02} первоначальное количество блоков, т.е. определяется необходимый и достаточный объем выборки для проведения экспериментальных исследований блоков на долговременную стабильность. Следует отметить, что подобным путем могут быть решены задачи об определении первоначального объема выборки для радиоэлектронных устройств любого типа, в том числе и для элементной базы блока средства НК при экспериментальных исследованиях процессов ее старения. Единственным условием является знание интенсивности отказов λ в каждом конкретном случае и среднеквадратического отклонения исследуемого параметра (метрологической характеристики) на рассматриваемый момент времени t_k .

Таким образом, используя свойство адекватности математической модели деградации метрологической характеристики реальному объекту, а также зная интенсивность внезапных отказов для этого объекта, можно решить одну из важных задач, возникающих при экспериментальных исследованиях устройств на долговременную стабильность - определение необходимого первоначального объема выборки.

4.8 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ МЕЖПОВЕРОЧНЫХ ИНТЕРВАЛОВ

Под межповерочным интервалом (МПИ) обычно понимают отрезок времени, в течение которого подразумевается исправная в метрологическом плане, т.е. в пределах определенного допуска, работа какого-либо объекта, в данном случае блока средства НК. МПИ вычисляется по формуле

$$\Delta t = t_{i+1} - t_i, \quad (4.43)$$

где t_i - начальный момент времени межповерочного интервала; t_{i+1} - конечный момент времени межповерочного интервала.

Предположим также как и в п. 2.6, что измерение исследуемой метрологической характеристики осуществляется высокоточным измерительным прибором, имеющим разрешающую способность Ω . Необходимо найти значение межповерочного интервала Δt , т.е. чтобы выполнялось неравенство

$$|m_S(t_{i+1}) - m_S(t_i)| \leq \Omega, \quad (4.44)$$

или в предельном случае равенство

$$|m_S(t_{i+1}) - m_S(t_i)| = \Omega. \quad (4.45)$$

Найдем значение межповерочного интервала при описании математической модели изменения во времени исследуемой метрологической характеристики блока средства НК различными функциями [83].

Опишем математическую модель линейной зависимостью вида (4.18). Тогда выражение (4.45) можно представить

$$a_0 + a_1 t_{i+1} - a_0 + a_1 t_i = \Omega. \quad (4.46)$$

Из (4.42) можно легко найти значение МПИ

$$\Delta t = \frac{\Omega}{a_1}. \quad (4.47)$$

Для экспоненциальной зависимости выражение (4.45) переписывается в виде

$$a_0 \exp(a_1 t_{i+1}) - a_0 \exp(a_1 t_i) = \Omega. \quad (4.48)$$

После осуществления несложных преобразований получаем формулу для определения межповерочного интервала

$$\Delta t = \frac{\ln \Omega}{a_1 \ln a_0}. \quad (4.49)$$

Используя логарифмическую функцию для описания математической модели, имеем следующее выражение

$$\ln(a_0 + a_1 t_{i+1}) - \ln(a_0 + a_1 t_i) = \Omega. \quad (4.50)$$

Принимая во внимание, что из (4.43) $t_{i+1} = \Delta t + t_i$, а также произведя некоторые преобразования, получаем выражение для определения МПИ

$$\Delta t = \frac{(\exp \Omega)(a_0 + a_1 t_i)}{a_1}. \quad (4.51)$$

Рассмотрим далее случай, когда математическая модель аппроксимируется полиномиальной зависимостью второй степени. При этом выражение (4.43) принимает следующий вид

$$a_0 + a_1 t_{i+1} + a_2 t_{i+1}^2 - a_0 - a_1 t_i - a_2 t_i^2 = \Omega. \quad (4.52)$$

Осуществив преобразования получаем следующее квадратное уравнение

$$\Delta t^2 a_2 + \Delta t (a_1 + 2 a_2 t_i) - \Omega = 0. \quad (4.53)$$

Решая это уравнение относительно Δt , получаем необходимое выражение для определения МПИ

$$\Delta t = \frac{-(a_1 + 2 a_2 t_i) \pm \sqrt{(a_1 + 2 a_2 t_i)^2 + 4 a_2 \Omega}}{2 a_2}. \quad (4.54)$$

Наконец, опишем тот случай, когда математическая модель изменения во времени метрологической характеристики блока аппроксимируется полиномиальной зависимостью третьей степени. Тогда (4.43) преобразуется

$$a_0 + a_1 t_{i+1} + a_2 t_{i+1}^2 + a_3 t_{i+1}^3 - a_0 - a_1 t_i - a_2 t_i^2 - a_3 t_i^3 = \Omega. \quad (4.55)$$

Опуская промежуточные вычисления, получаем уравнение третьей степени относительно Δt

$$\Delta t^3 a_3 + \Delta t^2 \left(\frac{a_2 + 3 a_3 t_i}{a_3} \right) + \Delta t \left(\frac{a_1 + 2 a_2 + 3 a_3 t_i^2}{a_3} \right) - \frac{\Omega}{a_3} = 0. \quad (4.56)$$

Используя [84], можно представить решение уравнения (4.56) в следующем виде

$$\Delta t = \sqrt[3]{-Q_1 + \sqrt{Q_1^2 + Q_2^3}} + \sqrt[3]{-Q_1 - \sqrt{Q_1^2 + Q_2^3}} - \frac{1}{3} \left(\frac{a_2 + 3 a_3 t_i}{a_3} \right), \quad (4.57)$$

где $Q_1 = \frac{1}{27} \left(\frac{a_2 + 3 a_3 t_i}{a_3} \right)^3 - \frac{1}{6} \left(\frac{a_1 + 2 a_2 + 3 a_3 t_i^2}{a_3} \right) \left(\frac{a_2 + 3 a_3 t_i}{a_3} \right) + \frac{1}{2} \frac{\Omega}{a_3};$

$$Q_2 = \frac{1}{3} \left(\frac{a_1 + 2 a_2 + 3 a_3 t_i^2}{a_3} \right) - \frac{1}{9} \left(\frac{a_2 + 3 a_3 t_i}{a_3} \right)^2.$$

Таким образом, получены формулы для определения величины межповерочных интервалов при описании математических моделей изменения во времени метрологических характеристик блоков средств НК различными математическими зависимостями.

4.9 МЕТОДЫ КОРРЕКЦИИ МОДЕЛЕЙ ПРОЦЕССОВ ИЗМЕНЕНИЯ ВО ВРЕМЕНИ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК БЛОКОВ СРЕДСТВ НК НА ЭТАПЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Результаты прогнозирования, полученные экстраполяцией математических моделей процессов изменения метрологических характеристик блоков средств НК, позволяют оценить на этапе проектирования метрологическую исправность исследуемых блоков.

На этапе эксплуатации могут существовать отклонения реальных функций изменения исследуемых метрологических характеристик, построенных с учетом экспериментальных данных, от теоретических моделей изменения метрологических характеристик, а следовательно, будут существовать и отклонения результатов прогноза от фактических значений. Это можно объяснить корреляционными связями между элементами блоков средств НК, неточностью данных о деградации элементной базы и о режимах ее работы, влиянием внешних факторов, т.е. того, что не учитывалось при прогнозировании на этапе проектирования.

Следовательно, необходимо на этапе эксплуатации блоков провести коррекцию построенных моделей процессов изменения их метрологических характеристик с учетом реальных данных эксплуатации и осуществить прогнозирование по уже скорректированным моделям.

Исходными данными для проведения коррекции моделей метрологических характеристик являются: собственно математические модели процессов изменения во времени метрологических характеристик, представляющие собой совокупности

аналитических зависимостей для функций $m_S(t)$ и $\psi_{\pm\sigma}(t)$, и значения метрологических характеристик эксплуатируемых блоков, полученные в нескольких точках контроля.

Непосредственно проведению коррекции функций деградации исследуемых метрологических характеристик предшествует этап проверки адекватности моделей и реальных метрологических характеристик (объектов) в точках контроля.

В начальный момент времени эксплуатации модель и реальная метрологическая характеристика блока должны быть всегда адекватны, в противном случае математическая модель блока не могла бы быть использована для прогнозирования. Адекватность математической модели и объекта на момент начала эксплуатации должна быть доказана на этапе построения математической модели блока средства НК. Только на основе такой модели блока может быть построена математическая модель изменения во времени метрологической характеристики блока.

Адекватность математических моделей процессов деградации метрологических характеристик и реальных объектов в точках контроля при групповом прогнозировании проверяется с использованием известных статистических критериев, приведенных, в частности, в [74, 75].

Для проверки различия математических ожиданий метрологической характеристики по модели $m_S(t_1), m_S(t_2), \dots, m_S(t_{k_1})$ и объекту $m_{SP}(t_1), m_{SP}(t_2), \dots, m_{SP}(t_{k_1})$ в точках контроля t_i , $i=1, 2, \dots, k_1$; $k_1 < k$, при нормальном законе распределения исследуемой метрологической характеристики блока, используется критерий Стьюдента.

Для проверки различия дисперсий метрологической характеристики по модели $\sigma_S^2(t_1), \sigma_S^2(t_2), \dots, \sigma_S^2(t_{k_1})$ и объекту $\sigma_{SP}^2(t_1), \sigma_{SP}^2(t_2), \dots, \sigma_{SP}^2(t_{k_1})$ в точках контроля t_i , $i=1, 2, \dots, k_1$, $k_1 < k$, может быть использован также один из параметрических критериев, например, критерий Фишера.

Проверка адекватности модели и объекта по указанным критериям позволяет принять решение о целесообразности проведения коррекции функций $m(t)$ и $\psi_{\pm\sigma}(t)$.

Если модель и объект адекватны по обоим параметрам закона распределения метрологической характеристики, т.е. по математическому ожиданию и дисперсии, то нет необходимости в проведении коррекции модели изменения во времени метрологической характеристики исследуемого блока. Прогнозирование по построенной на этапе проектирования математической модели процесса изменения исследуемой метрологической характеристики блока можно проводить и на этапе эксплуатации блока данного типа.

Если модель и объект не адекватны по математическому ожиданию или по среднеквадратическому отклонению, то необходимо провести коррекцию функций $m_S(t)$ и $\psi_{\pm\sigma}(t)$.

Математическая модель процесса изменения метрологической характеристики аналогового блока средства НК, как показали проведенные ранее исследования, может быть представлена степенным полиномом не выше третьей степени вида (4.22).

Если модель и реальная метрологическая характеристика не адекватны в точках контроля t_i , $i=1, 2, \dots, k_1$, $k_1 < k$, то, следовательно, существуют отклонения экспериментальных величин параметра S -метрологической характеристики от теоретических

$$\sum_{\mu=0}^p a_{\mu} t^{\mu} - S(t_i) = d_i, \quad d_i \neq 0, \quad (4.58)$$

где $i=1, 2, \dots, k_1$.

Следует так изменить (скорректировать) математическую модель вида (4.58), чтобы устранить значимость этих различий d_i , $i=1, 2, \dots, k_1$.

Первый из возможных способов коррекции метрологической характеристики блока требует проведения однократного эксперимента в первых трех точках контроля и носит ориентировочный характер. Он может быть использован для приближенной оценки метрологической исправности и метрологической надежности блока на этапе эксплуатации, а также при условии определенной сложности в осуществлении эксперимента по измерению реальной метрологической характеристики блока в течение более длительного периода эксплуатации.

Сущность этого способа заключается в следующем.

По результатам измерения реальной метрологической характеристики блока в точках контроля t_i , $i=1, 2, \dots, k_1$, и математической модели изменения метрологической характеристики вычисляются значения погрешности прогнозирования состояния метрологической характеристики на этапе проектирования

$$d_m(t_i) = m_{SP}(t_i) - m_S(t_i); \quad (4.59)$$

$$d_{\pm\sigma}(t_i) = \psi_{\pm\sigma p}(t_i) - \psi_{\pm\sigma}(t_i). \quad (4.60)$$

где $d_m(t_i)$ и $d_{\pm\sigma}(t_i)$ - составляющие погрешности прогнозирования на этапе проектирования по функциям $m_{SP}(t_i)$ и $\psi_{\pm\sigma p}(t_i)$ исследуемой метрологической характеристики блока в точках контроля t_i , $i=1, 2, \dots, k_1$; $m_{SP}(t_i)$, $\psi_{\pm\sigma p}(t_i)$ - значения составляющих функций деградации реальной метрологической характеристики в точках контроля; $m_S(t_i)$, $\psi_{\pm\sigma}(t_i)$ - значения составляющих функций математической модели процесса деградации метрологической характеристики в точках контроля.

По полученным дискретным значениям $d_m(t_i)$ и $d_{\pm\sigma}(t_i)$ строятся функции изменения во времени составляющих погрешности прогнозирования $d_m(t)$ и $d_{\pm\sigma}(t)$.

Необходимое число точек контроля k_1 для осуществления коррекции модели деградации метрологической характеристики должно быть не менее $\rho+1$. Это условие позволяет вычислить методом наименьших квадратов наиболее вероятные значения коэффициентов полиномиальных зависимостей $d_m(t)$ и $d_{\pm\sigma}(t)$.

Далее осуществляется экстраполяция построенных функций $d_m(t)$ и $d_{\pm\sigma}(t)$ и исходной математической модели процесса деградации метрологической характеристики исследуемого блока на область будущих значений времени эксплуатации $t > t_k$. Коррекция метрологической характеристики блока с учетом возможных погрешностей прогнозирования на интервале времени $t > t_k$ проводится согласно выражениям:

$$m_{S_{\text{кор}}}(t) = m_S(t) + d_m(t); \quad (4.61)$$

$$\psi_{\pm\sigma_{\text{кор}}}(t) = \psi_{\pm\sigma}(t) + d_{\pm\sigma}(t), \quad (4.62)$$

где $m_{S_{\text{кор}}}(t)$ и $\psi_{\pm\sigma_{\text{кор}}}(t)$ - составляющие скорректированной математической модели процесса деградации метрологической характеристики блока средства НК.

Полученная таким образом скорректированная модель процесса деградации метрологической характеристики блока в дальнейшем может быть использована для прогнозирования на этапе эксплуатации.

Следует отметить, что рассмотренный способ обладает невысокой точностью при прогнозировании на большие интервалы времени вследствие ограниченного объема экспериментальных данных. Более точным является второй способ коррекции. Он предполагает проведение экспериментальных исследований по измерению реальной метрологической характеристики блока средства НК в течение всего периода его эксплуатации.

Процесс коррекции метрологической характеристики в этом случае выполняется следующим образом.

Различия между значениями метрологической характеристики блока, определенными по математической модели ее изменения (4.22) и данных экспериментальных исследований в точках контроля t_i , $i=1, 2, \dots, k_1$, сводятся к нулю введением в модель (4.58) корректировочных (адаптационных коэффициентов) γ_μ , $\mu=0, 1, \dots, \rho$. Тогда в общем виде скорректированная модель запишется следующим образом

$$S_{\text{кор}}(t) = \sum_{\mu=0}^{\rho} \gamma_\mu a_\mu t^\mu. \quad (4.63)$$

Отметим, что и в дальнейшем под $S(t)$ будем понимать функции $m_S(t)$, $\psi_\sigma(t)$, $\psi_{-\sigma}(t)$. Последовательность процесса коррекции каждой из этих функций одна и та же, различными будут только значения коэффициентов γ_μ , a_μ и степени полинома ρ .

Смысл корректировочных коэффициентов заключается в усилении или ослаблении влияния отдельных слагаемых $a_\mu t^\mu$ в изменение функции $S(t)$. Причем, $\gamma_0=1$, что следует из условия адекватности модели и реальной метрологической характеристики в момент начала эксплуатации.

Корректировочные коэффициенты γ_μ , $\mu=0, 1, \dots, \rho$ находятся решением системы (k_1+1) - уравнений вида:

$$\begin{cases} \sum_{\mu=0}^{\rho} \gamma_{\mu} a_{\mu} t^{\mu} - S(t_i) = 0; \\ \gamma_0 = 1, \end{cases} \quad i = 1, 2, \dots, k_1, \quad (4.64)$$

где $S(t_i)$ - значения исследуемой метрологической характеристики, полученные на эксплуатируемом в реальных условиях блоке.

Очевидно, что для проведения коррекции математической модели изменения во времени исследуемой метрологической характеристики блока необходимы экспериментальные данные о значениях метрологической характеристики эксплуатируемого блока не менее чем в $k_1 \geq (\rho + 1)$ точках контроля. В этом случае представляется возможным наиболее достоверно определить корректировочные коэффициенты γ_{μ} , $\mu = 0, 1, \dots, \rho$, так как система уравнений (4.64) может иметь при условии $k_1 \geq (\rho + 1)$ единственное решение.

Затем осуществляется экстраполяция скорректированной модели изменения во времени исследуемой метрологической характеристики $S_{\text{кор}}(t)$ на область будущих значений времени эксплуатации блока. Проводятся измерения метрологической характеристики в следующих $k_2 \geq \rho + 1$ точках контроля. Решением $(k_2 + 1)$ - уравнений вида (4.64) относительно γ_{μ} находятся новые значения корректировочных коэффициентов, введение которых в математическую модель процесса деградации метрологической характеристики блока средства НК позволяет добиться совпадения экспериментальных и теоретических значений.

Другими словами, с получением новых данных об изменении реальной метрологической характеристики блока осуществляется повторная коррекция математической модели изменения во времени метрологической характеристики в соответствии с новыми данными эксперимента. Далее прогнозирование осуществляется с учетом последней проводимой коррекции. С получением новых данных в следующей подобласти эксплуатации блока процесс коррекции повторяется и осуществляется прогнозирование на следующий этап времени эксплуатации.

Таким образом, определяется прогнозирующее выражение, которое позволяет с большой точностью приблизить математическую модель исследуемой метрологической характеристики блока к данным контроля, т.е. к объекту, находящемуся в реальных условиях эксплуатации.

Рассмотренные способы коррекции могут быть использованы при прогнозировании состояния метрологических характеристик исследуемых блоков на основе их математических моделей на этапе эксплуатации. Полученные с учетом проведенной коррекции результаты прогноза наиболее полно будут отражать фактическое состояние исследуемых блоков средств НК.

4.10 МЕТОДИКА ОЦЕНКИ И ПОВЫШЕНИЯ МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ НАДЕЖНОСТИ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ И ЭКСПЛУАТАЦИИ СРЕДСТВ НК

4.10.1 ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Методика распространяется на аналоговые и аналого-цифровые модули, блоки, построенные на радиоэлектронных элементах и входящие в средства НК [69].

В качестве исходных данных, предполагаются известные для исследуемых блоков: технические описания, технические условия, структурные и принципиальные схемы, элементная база и данные об изменении ее характеристик.

Методика оценки и повышения метрологической надежности при проектировании и эксплуатации средств НК состоит из трех этапов:

- оценка и прогнозирование состояния метрологических характеристик блоков средств НК на этапе проектирования;
- разработка исходных данных для оценки состояния метрологических характеристик блоков средств НК в процессе эксплуатации;
- оценка и прогнозирование состояния метрологических характеристик блоков средств НК в процессе эксплуатации.

Результатом прогнозирования является формирование вероятностного суждения о метрологической исправности исследуемых блоков в заданный момент времени в будущем (решение прямой задачи прогнозирования), либо предсказание с некоторой вероятностью момента наступления метрологического отказа блоков (решение обратной задачи прогнозирования).

По результатам прогнозирования могут быть разработаны рекомендации по увеличению ресурса при проектировании и эксплуатации блоков средств НК исследуемых типов.

4.10.2 ОЦЕНКА И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК БЛОКОВ СРЕДСТВ НК НА ЭТАПЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

1 На основе сбора и анализа исходной информации об объекте исследования: технического описания, технических условий, структурных и принципиальных схем, данных об элементной базе и деградации ее характеристик, - выбираются прогнозируемые параметры (метрологические характеристики), т.е. набор характеристик блоков средств НК, по величине и характеру изменения которых можно прогнозировать состояние метрологических характеристик [70].

2 Строятся математические модели блоков, включающие в себя математическую модель функционирования блоков и математическую модель метрологических характеристик блоков. Математическая модель функционирования каждого блока (4.1) выражает зависимость его выходной характеристики от значения входного сигнала, а также параметров комплектующих элементов и внешних влияющих факторов. Модель функционирования блока необходима для получения математической модели метрологической характеристики. Математическая модель метрологической характеристики - это зависимость исследуемой метрологической характеристики от значения входного сигнала и параметров комплектующих элементов (4.3).

3 Осуществляется статистическое моделирование метрологических характеристик блоков средств НК.

Считая постепенные метрологические отказы блоков следствием процессов старения элементной базы при неизменных условиях эксплуатации, значения исследуемых метрологических характеристик определяются по математическим моделям метрологических характеристик (4.3) методом статистического моделирования случайных процессов изменения метрологических характеристик по значениям случайных величин параметров элементов в различных временных сечениях.

Алгоритм статистического моделирования состояния метрологических характеристик блоков средств НК и блок-схема его реализации на персональном компьютере представлены в п. 2.3.

По результатам статистического моделирования для каждого заданного временного сечения t_i ($i = 0, 1, \dots, n$) определяются значения математического ожидания $m_S(t_i)$ и среднеквадратического отклонения $\sigma_S(t_i)$ исследуемых метрологических характеристик.

4 Строятся математические модели процессов изменения во времени метрологических характеристик блоков средств НК, представляющие собой совокупности аналитических

зависимостей, описывающих изменение во времени математического ожидания метрологических характеристик $m_s(t)$ и величины разброса реализаций $\psi_{\pm\sigma}(t)$ случайных процессов изменения метрологических характеристик около математического ожидания.

Математические модели процессов изменения во времени метрологических характеристик представляется полиномиальными зависимостями второй или третьей степени (4.22).

Правила построения математических моделей дрейфа метрологических характеристик разработаны в п. 2.4.

Экстраполяцией построенных математических моделей дрейфа метрологических характеристик на область прогноза осуществляется прогнозирование состояния метрологических характеристик блоков средств НК на этапе проектирования, в результате которого определяется метрологический ресурс блоков.

5 Путем замены наиболее ненадежных с точки зрения метрологической надежности элементов блоков осуществляется повышение их метрологического ресурса. Определение таких элементов подробно описано в п. 2.5.

4.10.3 РАЗРАБОТКА ИСХОДНЫХ ДАННЫХ ДЛЯ ОЦЕНКИ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СОСТОЯНИЯ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК БЛОКОВ СРЕДСТВ НК В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ

1 Определяется необходимое количество измерений N метрологических характеристик блоков при проведении метрологических проверок. Подробно способ определения количества измерений метрологической характеристики описывается в п. 2.6.

2 Вычисляется необходимый первоначальный объем выборки N_0 при экспериментальных исследованиях блоков. Способ определения объема выборки представлены в п. 2.7.

3 Определяется первоначальный минимальный межповерочный интервал Δt , исходя из выбранной математической модели процесса изменения во времени метрологической характеристики блоков. Способ вычисления межповерочного интервала подробно описывается в п. 2.8.

4 Полученные значения N и Δt являются первоначальными исходными данными для исследования метрологических характеристик блоков средств НК на этапе эксплуатации, которые будут корректироваться по мере поступления реальных экспериментальных данных эксплуатации указанных блоков.

4.10.4 ОЦЕНКА И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК БЛОКОВ СРЕДСТВ НК В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ

1 Составляются правила проведения измерений метрологических характеристик эксплуатируемых блоков, содержащие данные о числе измерений в каждом временном сечении, о межповерочных интервалах, схему испытаний и образцовые средства измерений, порядок и условия проведения измерений, форму записи результатов.

Выбранная схема испытаний (измерений) должна обеспечивать многократные изменения входного сигнала, контроль влияния внешних факторов, имитацию канала измерения с сохранением нагрузочных характеристик на входе и выходе на случай отключения его от общей установки.

Выбранные образцовые средства для измерений в соответствии с [85] должны иметь погрешность не более 1/3 величины допустимой погрешности блоков.

По правилам определения основной погрешности СИ необходимо производить измерения в нескольких точках рабочего диапазона, которые выбираются согласно технических условий на блок средства НК. В качестве погрешности исследуемого блока в заданном временном сечении принимается полученное наибольшее значение приведенной или относительной погрешности в соответствии с техническими условиями на данный тип блока ИК. Порядок и условия проведения измерений определяются в соответствии с техническими условиями на данный тип блока средства НК.

Результаты измерений метрологической характеристики вносятся в журнал в виде таблиц, которые также должны включать в себя тип и номер исследуемого блока, условия эксплуатации, данные о поверке блока на общую работоспособность и суммарное время наработки на момент проведения измерений.

2 Результаты экспериментальных исследований (поверки) метрологической характеристики блока в i -м временном сечении ($i=0, 1, 2, \dots, k$) обрабатываются по следующему алгоритму.

Вычисляется выборочное групповое математическое ожидание метрологической характеристики (групповое среднее) для L однотипных блоков

$$m_{SP}(t_i) = \frac{1}{L} \sum_{j=1}^L S_j(t_i), \quad (4.65)$$

где $S_j(t_i)$ - результаты измерения метрологической характеристики j -го блока ИК в i -м временном сечении; $m_{SP}(t_i)$ - групповое выборочное математическое ожидание метрологической характеристики в i -м временном сечении.

Вычисляется межгрупповая дисперсия, характеризующая разброс значений результатов измерений метрологической характеристики для L однотипных блоков средств НК относительно группового среднего

$$\sigma_{SP}^2(t_i) = \frac{1}{L-1} \sum_{j=1}^L [S_j(t_i) - m_{SP}(t_i)]^2, \quad (4.66)$$

где $\sigma_{SP}^2(t_i)$ - межгрупповая дисперсия метрологической характеристики; $S_j(t_i)$ - результат измерения метрологической характеристики j -го блока в i -м временном сечении; $m_{SP}(t_i)$ - групповое среднее метрологической характеристики.

Необходимо отметить, что групповое среднее и межгрупповая дисперсия по выражениям (4.65) и (4.66) вычисляются только для тех L однотипных блоков, метрологические характеристики которых не выходят за допуск.

Осуществляется проверка гипотезы о принадлежности значений метрологической характеристики L однотипных блоков средств НК к одной генеральной совокупности с использованием τ -распределения. Для этого вычисляется величина

$$\tau_j(t_i) = \frac{|\tilde{S}_j(t_i) - m_{SP}(t_i)|}{\sqrt{\sigma_{SP}^2(t_i)}}, \quad (4.67)$$

где $\tilde{S}_j(t_i)$ - минимальное или максимальное значение метрологической характеристики L однотипных блоков; $m_{SP}(t_i)$ - групповое среднее метрологической характеристики; $\sigma_{SP}^2(t_i)$ - межгрупповая дисперсия, которая сравнивается с найденным по таблице [75] при заданном уровне значимости α теоретическим значением $\tau_{\alpha, N}$.

В случае отклонения проверяемой гипотезы для j -го блока он должен быть взят под особый контроль и при повторении подобного результата в t_{i+1} временном сечении данный блок исключается из группы однотипных блоков средств НК, для которых осуществляется групповое прогнозирование. Для данного блока необходимо осуществлять индивидуальное прогнозирование состояния его метрологической характеристики.

Индивидуальное прогнозирование может быть проведено, в частности, методами статистической классификации. При этом "эталонные" параметрические классы R^{λ} , принадлежность к которым определяется в результате прогнозирования указанными методами, формируются по результатам группового прогнозирования.

3 При групповом прогнозировании осуществляется проверка адекватности моделей процессов изменения во времени метрологических характеристик блоков средств НК, полученных на этапе проектирования, и реальных процессов изменения метрологических характеристик эксплуатируемых блоков.

Указанная процедура сводится к проверке незначимости различий между математическими ожиданиями и дисперсиями модели и объекта в i -м временном сечении.

Проверка гипотезы о незначимости различий между математическими ожиданиями метрологической характеристики модели $m_S(t_i)$ и $m_{SP}(t_i)$ с учетом нормальности распределения метрологической характеристики блока может быть осуществлена по критерию Стьюдента.

Проверка гипотезы о незначимости различий между дисперсиями метрологической характеристики модели $\sigma_S^2(t_i)$ и объекта $\sigma_{SP}^2(t_i)$ с учетом нормальности распределения метрологических характеристик может быть осуществлена по критерию Фишера.

4 При прогнозировании состояния метрологических характеристик блоков средств НК на этапе эксплуатации в случае отклонения гипотезы об адекватности модели и объекта осуществляется коррекция моделей деградации метрологических характеристик блоков, построенных на этапе проектирования.

Коррекция может быть осуществлена одним из способов, разработанных в п. 2.9.

Коррекция моделей процессов изменения во времени метрологических характеристик блоков средств НК проводится по мере получения новых данных при поверках.

5 По результатам экстраполяции математических моделей процессов изменения во времени метрологических характеристик блоков средств НК при групповом прогнозировании определяются:

- значения исследуемых метрологических характеристик на момент будущей эксплуатации с некоторой доверительной вероятностью;
- возможное время наступления метрологического отказа.

4.11 ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК БЛОКОВ СРЕДСТВ НК

Для оценки эффективности прогнозирования метрологических характеристик блоков средств НК можно использовать критерий эффективности $K_{\text{э}}$, отражающий целесообразность проведения прогнозирования метрологических свойств блоков средств НК выбранным методом с точки зрения достижения конечной цели прогнозирования - повышения метрологического ресурса исследуемых устройств.

Все критерии эффективности прогнозирования можно разбить на две основные группы [86, 68]: обобщенные критерии (информационные, информационно-стоимостные, стоимостные) и частные критерии.

Информационные критерии эффективности прогнозирования в общем виде можно представить следующим образом

$$K_{\Xi} = \sum_{j=1}^n (H_{0j} - H_j) / \sum_{j=1}^n H_{0j}, \quad (4.68)$$

где H_{0j} , H_j - энтропии по j -му параметру объекта, соответственно, до и после осуществления прогнозирования,

$$H_{0j} = -(P_{0j} \log_2 P_{0j} + (1 - P_{0j}) \log_2 (1 - P_{0j})), \quad (4.69)$$

$$H_j = -(P_j \log_2 P_j + (1 - P_j) \log_2 (1 - P_j)), \quad (4.70)$$

где P_{0j} , P_j - вероятности работоспособности объекта по j -му параметру соответственно до и после осуществления прогнозирования.

Критерии такого типа могут быть применены для оценки эффективности прогнозирования технического состояния различных многопараметрических объектов.

Информационно-стоимостные критерии можно представить в следующем виде

$$K_{\Xi} = J [\bar{\xi}(t \in T_1) \rightarrow \bar{\xi}(t \in T_2)] / C_n, \quad (4.71)$$

где J - информация, получаемая в результате прогнозирования состояния объекта, описываемая параметрами, $\bar{\xi} = \{\xi_1, \dots, \xi_S\}$; T_1 , T_2 - области контроля и прогноза, соответственно.

Также возможна запись информационно-стоимостных критериев

$$K_{\Xi} = \frac{C_{T_2} J_{T_2}(\bar{\xi})}{C_{T_1} J_{T_1}(\bar{\xi})}, \quad (4.72)$$

где C_{T_2} - стоимость, которая была бы затрачена на получение информации $J_{T_2}(\bar{\xi})$ без осуществления прогнозирования; C_{T_1} - стоимость контроля в области T_1 ; J_{T_1} , J_{T_2} - количества информации, соответственно, получаемые в результате контроля и прогнозирования.

Данный вид критериев эффективности целесообразно применять в тех случаях, когда можно определить стоимости контроля и прогноза.

Стоимостные критерии показывают, соответствует ли эффект от использования прогнозирования затратам на его осуществление. Общую формулу для расчета стоимостных критериев можно представить в следующем виде

$$K_{\Xi} = \frac{Q_{\Sigma}}{K_{\Sigma}}, \quad (4.73)$$

где Q_{Σ} - целевая отдача, включающая в себя все положительные эффекты от применения прогнозирования, оцениваемая в стоимостном выражении; K_{Σ} - суммарные затраты на прогнозирование.

Стоимостные критерии могут применяться для определения экономической оценки использования различных методов прогнозирования.

Рассмотренные выше критерии эффективности определяют общий подход к оценке качества прогнозирования. При решении конкретных задач прогнозирования технического состояния различных объектов эти критерии могут принимать определенную форму. Такой вид критериев называется частными критериями эффективности прогнозирования.

В [87] описывается критерий, величина которого зависит от множества данных используемых при решении задачи прогнозирования - $D_{T_1}(\xi)$ и получаемых в результате прогнозирования - $D_{T_2}(\xi)$, где ξ - прогнозируемый параметр.

Этот критерий можно представить в виде соотношения

$$K_{\Theta} = \frac{D_{T_2}(\xi)}{D_{T_1}(\xi)}. \quad (4.74)$$

Для практических целей удобно соотношение (4.74) записать в следующем виде

$$K_{\Theta} = \frac{m}{k}, \quad (4.75)$$

или

$$K_{\Theta} = \frac{t_{k+m} - t_k}{t_k - t_0}, \quad [t_k, t_{k+m}] \in T_2, \quad [t_0, t_k] \in T_1, \quad (4.76)$$

где m - число шагов, на которое осуществляется прогнозирование; k - количество значений исследуемого параметра $\xi(t)$, используемых для осуществления прогноза; t_0, t_k - соответственно, начальный и конечный моменты времени области контроля; t_k, t_{k+m} - соответственно, начальный и конечный моменты времени области прогноза.

Критерий, описанный выражением (4.74), можно применить для оценки эффективности прогнозирования метрологических характеристик блоков средств НК, записав его в виде

$$K_{\Theta} = \frac{D_{T_2}(S)}{D_{T_1}(S)}, \quad (4.77)$$

где $D_{T_1}(S) = \{t_0, t_1, \dots, t_k, S(t_0), S(t_1), \dots, S(t_k)\}$,

$D_{T_2}(S) = \{t_{k+1}, t_{k+2}, \dots, t_{k+m}, S(t_{k+1}), S(t_{k+2}), \dots, S(t_{k+m})\}$ - исходное и полученное в результате прогнозирования множества данных; $S(t_1), \dots, S(t_{k+m})$ - величина исследуемой метрологической характеристики блоков в различных временных сечениях $t_0, t_1, \dots, t_k, t_{k+m}$.

Таким образом, как видно из записи частного критерия эффективности прогнозирования (4.77), он удовлетворяет предъявляемым к таким критериям требованиям, а именно, отражает метрологические характеристики блоков средств НК, изменение его значения напрямую зависит от изменения значений метрологических характеристик, а также он может

быть легко вычислен. Определим особенности выбранного критерия при решении прямой и обратной задач прогнозирования.

Прямая задача состоит в определении метрологических характеристик блоков на некоторый момент времени их эксплуатации в будущем, в частности на момент проведения очередной поверки, t_{k+1} . Обратная же задача состоит в определении момента времени пересечения реализаций случайного процесса изменения исследуемых метрологических характеристик блоков средств НК границ поля допуска или в определении возможного времени наступления метрологического отказа. Ниже рассматриваются вопросы оценки эффективности прогнозирования для обеих задач прогнозирования.

4.11.1 ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРИТЕРИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИ РЕШЕНИИ ПРЯМОЙ ЗАДАЧИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ

Для определения критерия эффективности можно использовать формулу (4.76). Так как прогнозирование будет осуществляться на одну поверку вперед, преобразуем (4.76) к следующему виду

$$K_{\text{Э}} = \frac{t_{k+1} - t_k}{T_k} = \frac{\Delta t}{T_k}, \quad (4.78)$$

где Δt - значение межповерочного интервала; T_k - интервал времени контроля.

Анализ экспериментальных данных об изменении во времени метрологических характеристик различных измерительных устройств, а также приведенные в п. 4.4 сведения показали, что в качестве основных моделей процессов старения могут быть рекомендованы линейная, экспоненциальная, логарифмическая и полиномиальная зависимости.

Ниже рассматриваются значения критериев эффективности при различных моделях процессов изменения во времени метрологических характеристик блоков средств НК.

Предположим, что процесс изменения во времени метрологических характеристик блоков можно описать экспоненциальной зависимостью (4.19). Тогда, используя выражение (4.45) для определения межповерочного интервала Δt , можно определить значение критерия эффективности

$$K_{\text{Э}} = \frac{\ln \Omega}{a_1 \ln a_0 T_k}. \quad (4.79)$$

Если процесс изменения во времени метрологических характеристик блоков можно описать логарифмической зависимостью (4.20), для которой значение межповерочного интервала определяется выражением (4.47), то критерий эффективности при этом будет

$$K_{\Theta} = \frac{(\exp \Omega)(a_0 + a_1 t_i)}{a_1 T_k}. \quad (4.80)$$

Если процесс изменения во времени метрологических характеристик описывается линейной зависимостью вида (4.17), а значение МПИ в этом случае определяется из (4.43), то получаем выражение для определения критерия эффективности в следующем виде

$$K_{\Theta} = \frac{\Omega}{a_1 T_k}. \quad (4.81)$$

Рассмотрим описание процесса изменения во времени метрологических характеристик исследуемых блоков полиномиальной зависимостью второй степени. Определив в данном случае значение межповерочного интервала по формуле (4.50), подставляем его в (4.77) и получаем следующее выражение для нахождения K_{Θ}

$$K_{\Theta} = \frac{-(a_1 + 2 a_2 t_i) \pm \sqrt{(a_1 + 2 a_2 t_i)^2 + 4 a_2 \Omega}}{2 a_2 T_k}. \quad (4.82)$$

И, наконец, рассмотрим описание процесса изменения во времени метрологических характеристик исследуемых блоков средств НК полиномиальной зависимостью третьей степени. Используя полученное выражение для Δt (4.53), получим формулу для определения критерия эффективности

$$K_{\text{Э}} = \frac{\sqrt[3]{-Q_1 + \sqrt{Q_1^2 + Q_2^3}} + \sqrt[3]{-Q_1 - \sqrt{Q_1^2 + Q_2^3}} - \frac{1}{3} \left(\frac{a_2 + 3a_3 t_i}{a_3} \right)}{T_k}. \quad (4.83)$$

Далее найдем численные значения критерия эффективности по полученным выражениям (4.79) - (4.83) с использованием данных прогнозирования. Результаты расчетов приведены в табл. 4.1.

Таблица 4.1

Вид модели	Экспоненциальная	Логарифмическая	Линейная	Полином второй степени	Полином третьей степени
$K_{\text{Э}}$	0,11420	0,0961	0,0934	0,1357	0,1716

Проведенный численный анализ [88] показал целесообразность использования в качестве модели изменения во времени метрологических характеристик блоков средств НК полиномиальной зависимости третьей степени.

4.11.2 ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРИТЕРИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИ РЕШЕНИИ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ

Для определения критерия эффективности при решении обратной задачи прогнозирования можно также воспользоваться формулой (4.74) и представить ее в следующем виде

$$K_{\text{Э}} = \frac{T'_{\text{отк}}}{T_{\text{отк}}}, \quad (4.84)$$

где $T'_{\text{отк}}$ - время наступления отказа исследуемого блока, полученное в результате прогнозирования; $T_{\text{отк}}$ - время наступления отказа исследуемого блока, указанное в его технических условиях.

Выражение для определения критерия эффективности при обратном прогнозировании, также как и при прямом, может принимать различный вид в зависимости от вида математической модели изменения во времени метрологических характеристик.

Предположим, что процесс изменения во времени метрологических характеристик блоков средств НК можно описать экспоненциальной зависимостью. При этом время наступления метрологического отказа $T'_{\text{отк}}$ можно найти из следующего выражения

$$S_{\text{доп}} = a_0 \exp [a_1 T'_{\text{отк}}], \quad (4.85)$$

где $S_{\text{доп}}$ - максимально допустимое значение метрологической характеристики.

Тогда $T'_{\text{отк}}$ будет вычисляться по формуле

$$T'_{\text{отк}} = \frac{\ln \frac{S_{\text{доп}}}{a_0}}{a_1}. \quad (4.86)$$

Подставляя полученное значение $T'_{\text{отк}}$ из выражения (4.85) в (4.83) получаем формулу для вычисления критерия эффективности

$$K_{\text{Э}} = \frac{\ln \frac{S_{\text{доп}}}{a_0}}{a_1 T'_{\text{отк}}}. \quad (4.87)$$

При описании процесса изменения во времени метрологических характеристик блоков логарифмической функцией $T'_{\text{отк}}$ можно найти из следующего выражения

$$S_{\text{доп}} = \ln(a_0 + a_1 T'_{\text{отк}}). \quad (4.88)$$

Из (4.87) получаем

$$T'_{\text{отк}} = \frac{\exp[S_{\text{доп}}] - a_0}{a_1}. \quad (4.89)$$

Критерий эффективности в этом случае будет вычисляться из выражения

$$K_{\text{Э}} = \frac{\exp[S_{\text{доп}}] - a_0}{a_1 T'_{\text{отк}}}. \quad (4.90)$$

Если процесс изменения во времени метрологических характеристик описывается линейной зависимостью

$$S_{\text{доп}} = a_0 + a_1 T'_{\text{отк}}, \quad (4.91)$$

то время наступления метрологического отказа можно определить

$$T'_{\text{отк}} = \frac{S_{\text{доп}} - a_0}{a_1}. \quad (4.92)$$

Используя (4.91), найдем значение критерия эффективности:

$$K_{\text{Э}} = \frac{S_{\text{доп}} - a_0}{a_1 T'_{\text{отк}}}. \quad (4.93)$$

Рассмотрим случай описания процесса изменения во времени метрологических характеристик блоков полиномиальной зависимостью второй степени

$$S_{\text{доп}} = a_0 + a_1 T'_{\text{отк}} + a_2 T'^2_{\text{отк}}. \quad (4.94)$$

Решая (4.93), получим следующее выражение для определения $T'_{\text{отк}}$

$$T'_{\text{отк}} = \frac{-a_1 - \sqrt{a_1^2 - 4a_2 [a_0 - S_{\text{доп}}]}}{2a_2}. \quad (4.95)$$

Используя (4.94), находим формулу

$$K_{\text{Э}} = \frac{-a_1 - \sqrt{a_1^2 - 4a_2 [a_0 - S_{\text{доп}}]}}{2a_2 T'_{\text{отк}}}. \quad (4.96)$$

И, наконец, при описании процесса изменения во времени метрологических характеристик блоков средств НК полиномиальной зависимостью третьей степени значение $T'_{\text{отк}}$ определяется из формулы

$$S_{\text{доп}} = a_0 + a_1 T'_{\text{отк}} + a_2 T'^2_{\text{отк}} + a_3 T'^3_{\text{отк}}. \quad (4.97)$$

Решая уравнение(4.96) относительно $T'_{\text{отк}}$ получим

$$T'_{\text{отк}} = \sqrt[3]{-Q_1 + \sqrt{Q_1^2 + Q_2^3}} + \sqrt[3]{-Q_1 - \sqrt{Q_1^2 + Q_2^3}} - \frac{1}{3} \frac{a_2}{a_3}. \quad (4.98)$$

где $Q_1 = \frac{1}{27} \left(\frac{a_2}{a_3} \right)^3 - \frac{1}{6} \frac{a_2 a_3}{a_3^2} + \frac{1}{2} \frac{[a_0 - S_{\text{доп}}]}{a_3}$; $Q_2 = \frac{1}{3} \left(\frac{a_1}{a_2} \right) - \frac{1}{9} \left(\frac{a_2}{a_3} \right)^2$.

Используя полученное выражение для $T'_{\text{отк}}$, найдем $K_{\text{Э}}$ в окончательном виде

$$K_{\Theta} = \frac{\sqrt[3]{-Q_1 + \sqrt{Q_1^2 + Q_2^3}} + \sqrt[3]{-Q_1 - \sqrt{Q_1^2 + Q_2^3}} - \frac{1}{3} \frac{a_2}{a_3}}{T_{\text{отк}}}. \quad (4.99)$$

Для данной задачи прогнозирования также были найдены численные значения критерия эффективности по выражениям (4.87), (4.90), (4.93), (4.96), (4.99) с использованием данных прогнозирования. Результаты расчетов приведены в табл. 4.2.

Таблица 4.2

Вид модели	Экспоненциальная	Логарифмическая	Линейная	Полином второй степени	Полином третьей степени
K_{Θ}	1,0420	0,7961	0,7538	1,1227	1,4552

Очевидно, что процесс прогнозирования будет эффективен в том случае, когда критерий эффективности будет больше единицы.

Таким образом, проведенная численная оценка критериев эффективности прогнозирования для различных моделей изменения во времени метрологических характеристик блоков средств НК показала, что использование в качестве модели полиномиальной зависимости третьей степени является оптимальным, так как позволяет получить максимальное значение величины рассчитанного критерия эффективности.

Глава 5

ПОГРЕШНОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ ТФС МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ

5.1 ПРИНЦИПЫ ФОРМИРОВАНИЯ ОЦЕНОК ХАРАКТЕРИСТИК ПОГРЕШНОСТЕЙ НА ОСНОВЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ОБЪЕКТОВ И ПРОЦЕДУР ИЗМЕРЕНИЙ

Получение оценок характеристик погрешностей на расчетной основе предполагает использование содержащихся в математических моделях объектов и процедур измерений соответствующих для синтеза аналитических соотношений. Такие соотношения могут быть получены, если указанные математические модели содержат всю необходимую информацию.

Так, при наличии уравнения измерений

$$\lambda_j^* = R_m \dots R_1 \gamma_j(t, \vec{r}), \quad (5.1)$$

выражающего результат измерения через последовательность m элементарных измерительных преобразований входного воздействия $\gamma_j(t, \vec{r})$, использование для синтеза расчетного соотношения известного выражения для характеристики погрешности

$$\theta[\Delta\lambda_j^*] = \int_{\Delta\lambda} q[\Delta\lambda_j^*] \omega(\Delta\lambda_j^*) d\Delta\lambda_j^*, \quad (5.2)$$

где $q[\Delta\lambda_j^*]$ - преобразование, лежащее в основе определения характеристики θ , $\omega(\Delta\lambda_j^*)$ - распределение плотности вероятности погрешности $\Delta\lambda_j^*$, предполагает представление математическими моделями информации, позволяющей установить область существования погрешности $\Delta\lambda$ и вид распределения $\omega(\Delta\lambda_j^*)$. Иначе говоря, математические модели входного воздействия и использованных измерительных средств должны отражать их свойства в той степени, которая позволяет на основе (5.1) и (5.2) синтезировать необходимое расчетное соотношение.

В качестве примера можно привести простейшую измерительную процедуру - аналого-цифровое преобразование, детально исследованное в [89, 90]. Пусть уравнение измерений имеет следующий вид

$$U_j^* = \llcorner \llcorner \left[\int_{t_j}^{t_j + \Delta t_g} U_j(t') h(t, t') dt' \right]_{\Delta_k U} \gg \gg m_U \gg \gg,$$

где U_j , U_j^* - соответственно, истинное значение и результат измерения величины U ; $U_j(t)$ - входное воздействие; $h(t, t')$ - импульсная переходная характеристика дискретизатора; $\Delta_k U$ - интервал квантования; $m_U = \frac{D_k U}{U_1}$ - коэффициент масштабирования (U_1 - принятая единица измерения).

Здесь и далее структуры уравнений измерений и символика соответствуют принятым в [89].

Из приведенного уравнения измерений следует, что погрешность равна сумме двух компонент

где ΔU_j - погрешность дискретизации;

ΔU_j^* - погрешность квантования.

Таким образом, для установления области существования погрешности ΔU необходимо знать вид входного воздействия $U_j(t)$ и вид импульсной переходной характеристики $h(t, t')$.

Пусть

$$h(t, t') = \alpha e^{-\alpha(t-t')}.$$

Тогда

;

;

$$\Delta U_j^* = (i-1)\Delta_k U - U_j.$$

Если $U_j \in [0, U_{\max}]$, то

$$\lceil E(U_j) \rceil$$

($E(\cdot)$ - целая часть (\cdot)) и

$$\lfloor E(U_j) \rfloor$$

, что и определяет область существования $\Delta U_j^* - \Delta U$. Для

установления вида необходимо располагать информацией о распределении плотности вероятности $w(U_j)$.

Если $w(U_j) = \dots$, то [89]

$$\dots$$

где и \dots

$$\dots$$

В рассмотренном примере для количественного анализа основных характеристик погрешности, помимо уравнения аналого-цифрового преобразования, необходимо наличие математической модели входного воздействия

$$\dots$$

и математической модели аналого-цифрового преобразователя

$$\dots$$

где q - разрядность квантователя.

Систематическая погрешность результата аналого-цифрового преобразователя в данном случае равна

$$\dots$$

Среднее квадратическое отклонение

$$\dots$$

Ниже изложенный подход будет распространен на исследование характеристик погрешностей результатов измерений температуропроводность и теплопроводности, которые могут рассматриваться как типовые процедуры измерения ТФХ.

5.2 ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОГРЕШНОСТИ РЕЗУЛЬТАТА ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРОПРОВОДНОСТИ И ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ

Объектом анализа являются уравнения измерений температуропроводности λ и теплопроводности μ следующего вида [65]

$$\lambda = \lambda_0 + \lambda_1 x_1 + \lambda_2 x_2 \quad (5.3)$$

$$\mu = \mu_0 + \mu_1 x_1 + \mu_2 x_2 \quad (5.4)$$

где x_1 и x_2 - соответственно, расстояния между датчиками D_1 и D_2 и источником тепла; t_1 - момент времени, соответствующий следующему соотношению температур

$\lambda_0, \lambda_1, \lambda_2$ - наперед заданный коэффициент; p_0 - количество тепла, выделяемого в единицу времени в начале координат.

Уравнения (5.3) и (5.4) представляют процедуры косвенных измерений, в которых используются следующие результаты принятых измерений температуры T и интервала времени τ ,

$$T = T_0 + T_1 \tau + T_2 \tau^2 \quad (5.5)$$

и $\tau = \tau_0 + \tau_1 \tau + \tau_2 \tau^2$, (5.6)

где τ_0 - коэффициент нормализации с номинальным значением τ_0 ; $u(T)$ - статическая характеристика преобразования датчика; $\tau^i(u)$ - градуировочная характеристика; τ_1 и τ_2 -

τ_1 и τ_2 - коэффициенты масштабирования ($\Delta \tau_{kT}$ и $\Delta \tau_{k\tau}$ - интервалы квантования, τ_1 и τ_2 - принятые единицы измерений).

Уравнения (5.5) и (5.6) представляют процедуры измерений, в которых операции масштабирования выполняются на аппаратной основе аналого-цифровым преобразователем, а полученный результат, выраженный в принятых единицах измерений, переносится в процессор (считывается).

Рассмотрим характеристики погрешности результатов измерений τ . Уравнение (5.6) определяет следующую структуру полной погрешности

$$\tau = \tau_0 + \tau_1 \tau + \tau_2 \tau^2 \quad (5.7)$$

где $\Delta_{\text{кв}}$ - погрешность квантования; $\Delta_{\text{ок}}$ - погрешность из-за округления результата аналого-цифрового преобразования при считывании.

Динамические погрешности полагаются пренебрежимо малыми, так как измеряются медленно меняющиеся величины теплофизического эксперимента.

Погрешность квантования принадлежит интервалу

$$\Delta_{\text{кв}} \in [0; \Delta_{\text{кв}}] \quad (5.8)$$

Основные характеристики погрешности квантования равны

$$\Delta_{\text{кв}} = \Delta_{\text{кв}} \quad (5.9)$$

$$\Delta_{\text{кв}} = \Delta_{\text{кв}} \quad (5.10)$$

Погрешность округления

$$\Delta_{\text{ок}} \in [0; \Delta_{\text{ок}}] \quad (5.11)$$

где $\Delta_{\text{ок}} = \frac{1}{2} \Delta_{\text{кв}}$ (n - число отбрасываемых при считывании разрядов). Распределение вероятности $\Delta_{\text{ок}}$ равномерно, т.е.

$$f(\Delta_{\text{ок}}) = \frac{1}{\Delta_{\text{ок}}} \quad (5.12)$$

и основные характеристики равны

$$\Delta_{\text{ок}} = \Delta_{\text{ок}} \quad (5.13)$$

и

$$\Delta_{\text{ок}} = \Delta_{\text{ок}} \quad (5.14)$$

Следовательно,

$$\Delta_{\text{ок}} = \Delta_{\text{ок}} \quad (5.15)$$

и

$$\Delta_{\text{ок}} = \Delta_{\text{ок}} \quad (5.16)$$

Соотношения (5.15) и (5.16) получены при стандартном предположении, что в пределах каждого интервала $\Delta_{\text{кв}}$ изменение вероятности входного воздействия пренебрежимо мало.

Рассмотрим характеристики погрешности результатов измерений $\Delta_{\text{полн}}$. Уравнение (5.5) определяет следующую структуру полной погрешности

$$\Delta_{\text{полн}} = \Delta_{\text{полн}} \quad (5.17)$$

где $\Delta_{\text{н}}$ - погрешность из-за отличия $x_{\text{н}}$ от номинального значения $x_{\text{н}}$; $\Delta_{\text{р}}$ - погрешность из-за отличия реальной статической характеристики преобразования датчика от номинальной, ибо $x_{\text{н}}$ - градуировочная характеристика, есть преобразование, обратное номинальному преобразованию датчика; эта составляющая включает в себя погрешность аппроксимации при реализации градуировочной характеристики на программной основе; $\Delta_{\text{к}}$ - погрешность из-за квантования; $\Delta_{\text{о}}$ - погрешность из-за округления результата аналого-цифрового преобразования при считывании; $\Delta_{\text{з}}$ - погрешность из-за округления конечного результата (результата обратного преобразования).

Для первой составляющей

$$\Delta_{\text{н}} = \frac{x_{\text{н}} - x_{\text{н}}}{x_{\text{н}}} \quad (5.18)$$

где $x_{\text{н}}$ - $x_{\text{н}}$.

Характеристики $\Delta_{\text{р}}$ определяются следующим образом

$$\Delta_{\text{р}} = \frac{x_{\text{н}} - x_{\text{н}}}{x_{\text{н}}} \quad (5.19)$$

$$\Delta_{\text{р}} = \frac{x_{\text{н}} - x_{\text{н}}}{x_{\text{н}}} \quad (5.20)$$

Соотношения (5.19) и (5.20) представляют характеристики $\Delta_{\text{р}}$ для конкретного измерителя, когда $x_{\text{н}}$. Как показывают (5.19) и (5.20) для оценки $\Delta_{\text{р}}$ и $\Delta_{\text{р}}$ необходимо знать значения $x_{\text{н}}$ и $x_{\text{н}}$.

Вторая составляющая полной погрешности

$$\Delta_{\text{к}} = \frac{x_{\text{н}} - x_{\text{н}}}{x_{\text{н}}} \quad (5.21)$$

При линейной градуировочной характеристике

$$\Delta_{\text{к}} = \frac{x_{\text{н}} - x_{\text{н}}}{x_{\text{н}}} \quad (5.22)$$

а при нелинейной градуировочной характеристике

$$\Delta_{\text{к}} = \frac{x_{\text{н}} - x_{\text{н}}}{x_{\text{н}}} \quad (5.23)$$

Таким образом, характеристики и данной составляющей погрешности могут быть определены при наличии информации о виде распределения вероятности входного воздействия $w(\sigma_j)$, виде градуировочной характеристики $T^{-1}(U)$ и свойствах разности $\Delta U(\sigma_j)$.

При линейной градуировочной характеристике, когда

$$\text{и } \boxed{\times}$$

(и - номинальные значения параметров статической характеристики преобразования датчика)

$$\boxed{\times} \quad (5.24)$$

Следовательно,

$$\boxed{\times};$$

$$\boxed{\times}.$$

Погрешность из-за квантования

$$\boxed{\times} \quad (5.25)$$

где - погрешность квантования результата аналого-цифрового преобразования.

При линейной градуировочной характеристике

$$\boxed{\times}, \quad \text{---}$$

где ΔU_{kT} - интервал квантования температуры .

Соответственно

$$, \quad \boxed{\times}.$$

При нелинейной градуировочной характеристике

$$\boxed{\times}.$$

В этом случае квантование температуры будет неравномерным, и характеристики и могут быть установлены при заданных $w(\sigma_j)$ и .

Составляющая погрешности из-за округления результата аналого-цифрового преобразования

$$\boxed{\times} \quad (5.26)$$

где - результат аналого-цифрового преобразования без учета округления; $\delta_{\text{окр}}$ - погрешность округления результата аналого-цифрового преобразования.

При линейной градуировочной характеристике

$$; \quad \boxed{\times}$$

$$\boxed{\times}$$

При нелинейной градуировочной характеристике

$$\boxed{\times},$$

и характеристики и устанавливаются для конкретных $w(\sigma_j)$ и $\tau^i(u)$.

Составляющая погрешность из-за округления конечного результата

$$\boxed{\times} \quad (5.27)$$

где $\delta_{\text{окр}}$ - цена младшего округленного разряда, определяемая видом градуировочной характеристики.

При этом ;

$$\boxed{\times},$$

где $p_{(q_2)}$ - вероятность округления именно q_2 разрядов.

Проведем анализ характеристик погрешности результатов измерений коэффициента температуропроводности λ . В соответствии с уравнением (5.3) структура полной погрешности результатов измерения λ будет следующей

$$\boxed{\times}, \quad (5.28)$$

где - погрешность, обусловленная неточным определением x_1 ; - погрешность, обусловленная неточным определением x_2 ; - погрешность, обусловленная неточным определением x_3 ; - погрешность, обусловленная неточным определением x_4 ; - погрешности округления.

Первая составляющая полной погрешности

Здесь x_1 и x_2 - точные значения, а \square и \square - неточные значения координат, фигурирующих в (5.3).

Полагая $\Delta x_1 \ll x_1$, приходим к аппроксимации

Соответственно, учитывая, что x_1 , Δx_1 и \square постоянные (не меняются от эксперимента к эксперименту),

 ;

Очевидно, что для погрешности \square и ее характеристик справедливы аналогичные соотношения. Именно

_____ ; ;

.

Следующая составляющая погрешности \square представляется таким образом

Полагая, как и выше, что \square получаем

Учитывая (5.15) и (5.16), а также то обстоятельство, что погрешности квантования и округления при $q_n \gg 1$ и $q \gg 1$ можно считать некоррелированными со значениями измеряемой величины, выражение для характеристик \square можно представить в следующем виде

;

.

Следовательно, при отсутствии округления результата измерения \dots , когда

и ,

то

;
.

Погрешность, обусловленная отличием \dots от номинального значения коэффициента \dots , равна

.

Объектом количественного анализа может быть непосредственно данное соотношение или результат разложения \dots и в ряды. Однако, при \dots эти ряды сходятся медленно и неудобны для использования.

Характеристики данной составляющей погрешности

;

Погрешности из-за округления и определяются таким образом:

;

где и - соответственно, погрешности округления и . Очевидно, что

(5.29)

(5.30)

Погрешность из-за округления

(5.31)

где $\Delta_{\text{окр}}(n)$ - погрешность округления n .

Соответственно,

(5.32)

(5.33)

Следующая составляющая, порождаемая округлением произведения , определяется

(5.34)

где - погрешность округления .

Поскольку в данном случае - случайная величина (меняется от эксперимента к эксперименту)

(5.35)

$$\boxed{\times}$$

$$\boxed{\times} \quad (5.36)$$

Последняя компонента полной погрешности равна

$$\boxed{\times} \quad (5.37)$$

а ее характеристики $\Delta_{\text{н}}$ и $\Delta_{\text{д}}$ определяются на основе данного соотношения.

Дальнейшая конкретизация соотношений (2.29), (2.30), (2.32), (2.33), (2.35), (2.36), а также $\Delta_{\text{н}}$ и $\Delta_{\text{д}}$ может быть проведена при получении исходных данных о виде $\Delta_{\text{н}}$.

Далее рассмотрим характеристики погрешности результатов измерений $\Delta_{\text{н}}$.

В соответствии с уравнением (5.4) структура полной погрешности результата измерения

$$\boxed{\times} \quad (5.38)$$

где $\Delta_{\text{н}}$ - погрешность из-за неточного установления значения τ_0 ; $\Delta_{\text{д}}$ - погрешность из-за неточного установления значения τ_1 ; $\Delta_{\text{н}}$ - погрешность из-за неточного установления значения τ_2 ; $\Delta_{\text{д}}$ - погрешность из-за неточного установления значения τ_3 ; $\Delta_{\text{н}}$ - погрешность из-за неточного установления значения τ_4 ; $\Delta_{\text{д}}$ - погрешности из-за округлений.

Результаты анализа вида погрешностей, проведенные по аналогии с анализом погрешности для температуропроводности a , представлены в табл. 5.1.

Таблица 5.1

№ п/п	Выражение для оценки погрешности
1	2

1	_____	_____
2	_____	_____
3	_____	_____
4	_____	_____

Продолжение табл. 5.1

1	2	
5	_____	_____
6	_____	_____
7	_____	_____
8	_____	_____

9	_____
---	-------

Продолжение табл. 5.1

№ п/п	Выражение для оценки погрешности
10	_____ <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block;"> x </div> _____
11	_____ _____
12	_____
13	_____ _____

Примечание. В приведенных выражениях

- погрешность определения

, $a_{D_0(x)}$ - погрешность округления .

Приведенные в табл. 5.1 соотношения составляют основу для определения математического ожидания и среднеквадратического отклонения компонент, которые устанавливаются с учетом задаваемых исходных данных о виде , и .

**5.3 ВЫДЕЛЕНИЕ ДОМИНИРУЮЩИХ КОМПОНЕНТ
В СОСТАВЕ ПОЛНЫХ ПОГРЕШНОСТЕЙ**

Проведенный анализ позволяет провести оценку вклада каждой компоненты в принятую характеристику полной погрешности. Для систематической погрешности этот вклад

полностью определяется математическими ожиданиями компонент, так как при

[] .

В общем виде для характеристики [], когда необходимо учитывать взаимосвязь компонент, вклад каждой компоненты определяется как разность

[] ,

где [] , причем [] , [] .

Рассмотрим в качестве примера сумму двух компонент полной погрешности результата измерений температуры [] и [] . В соответствии с (5.18) и (5.24)

[] ;

[] .

Поскольку в соответствии с (5.20)

[]

вклад [] в полное среднеквадратическое отклонение погрешности равен

[] ,

т.е. значению среднеквадратического отклонения [] .

Если не учитывать когерентности [] и [] , получим

[]

[] .

При соизмеримости [] и []

[] ,

а значение, получаемое без учета когерентности -

[]

т.е. оценка вклада занижается в 2,5 раза.

Очевидно, что предлагаемый подход обеспечивает корректность выделения доминант в принятой совокупности компонент.

Процедура выделения доминант сводится к следующему: после определения значений всех [] производится их упорядочивание, после чего из рассмотрения исключаются все компоненты с малыми значениями [] суммарный вклад которых в [] меньше установленного.

Так, если в рассмотренном примере [] и компонента с меньшим вкладом исключается из рассмотрения при [] , условие пренебрежимо малого значения

[] относительно [] определяется неравенством []

5.4 ДОСТОВЕРНОСТЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ПОГРЕШНОСТЕЙ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЯ ТФХ

5.4.2 ДОСТОВЕРНОСТЬ ОЦЕНИВАНИЯ
ХАРАКТЕРИСТИК ПОГРЕШНОСТЕЙ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ РАСЧЕТОВ НА АНАЛИТИЧЕСКОЙ ОСНОВЕ

Достоверность оценки характеристики μ определяется ошибкой Δ .

В общем виде оценка характеристики μ посредством расчета на аналитической основе определяется соотношением (5.39). Истинное значение μ

$$\mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i - \Delta$$

(5.40)

$$\Delta = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2}$$

μ и Δ на μ .

Положим, что μ при μ - адекватная характеристика распределения вероятности измеряемой величины. Тогда истинное значение μ равно

$$\mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

Δ - ошибка из-за использования гипотезы о равномерном распределении плотности вероятности μ .

Истинное значение μ равно

$$\mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

Если используется адекватная (истинная) характеристика распределения вероятности μ , то неадекватный алгоритм определения среднеквадратического отклонения погрешности

$$\Delta = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2}$$

а Δ и μ но появляется погрешность из-за неадекватности алгоритма определения μ



5.4.3 ДОСТОВЕРНОСТЬ ОЦЕНИВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ПОГРЕШНОСТЕЙ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Имитационное моделирование (ИМ), понимаемое как моделирование, при котором осуществляется прямая подстановка чисел, имитирующих внешние воздействия, параметры и переменные процессов, в математические модели аппаратуры позволяет получить результаты, недостижимые при использовании расчетов на аналитической основе.

Для установления достоверности получаемой с помощью ИМ оценки $\hat{\theta}$ необходимо сопоставить ее с истинным значением

$$\hat{\theta} - \theta$$

где $\hat{\theta}$ - оценка погрешности, получаемая с помощью ИМ при использовании адекватных моделей объектов условий и средств измерений; θ - оператор идеального усреднения (без округления); θ_0 - гипотетическое исходное преобразование.

Ошибка $\hat{\theta} - \theta$ может быть представлена в виде суммы трех компонент

$$\hat{\theta} - \theta = \theta_0 - \theta + \theta - \hat{\theta}$$

где $\theta_0 - \theta$ -

ошибка из-за неадекватности характеристик;

$$\theta - \hat{\theta} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \theta_i - \theta$$

ошибка из-за конечности объема выборки θ_i ;

$$\theta_0 - \theta = \theta_0 - \theta$$

ошибка из-за неадекватности усреднения и исходного преобразования.

Полагая, применительно к оценкам $\hat{\theta}$ и θ с помощью ИМ, тот же характер неадекватности модели входного воздействия как и при расчетных оценках, т.е. принимая распределение вероятности θ равномерным при истинном линейном распределении, получим для $\theta_0 - \theta$ и $\theta - \hat{\theta}$ те же значения

$$\theta_0 - \theta = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \theta_i - \theta$$

$$\theta - \hat{\theta} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \theta_i - \theta$$

Особенностью анализа ошибок из-за конечности объема выборки $\theta - \hat{\theta}$ является ее случайный характер. Поэтому при определении влияния $\theta - \hat{\theta}$ на точность оценивания $\hat{\theta}$ можно пользоваться либо дисперсией ошибки, либо вероятностью попадания ошибки в установленный интервал $\theta - \hat{\theta}$. Последняя характеристика более информативна, чем дисперсия и используется чаще.

При $n \rightarrow \infty$ в силу центральной предельной теоремы распределение суммы случайных величин сходится к нормальному.

При этом, если $\theta_0 - \theta$, а $\theta - \hat{\theta}$,

а при

если распределение вероятности

равномерно в динамическом диапазоне и

если

неравномерно.

В последнем случае

-

-

;

-

-

-

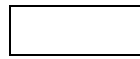
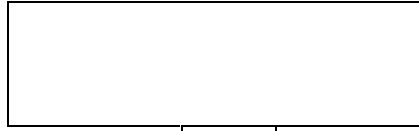
-

-

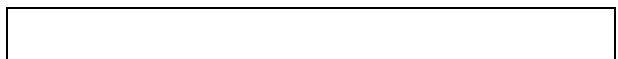
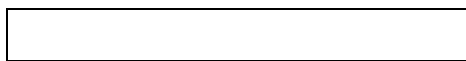
-

-

-



-



□ -

□; □ □ -

□

□ -

-
□ -

-
□ -

□

□); □ -

□ -

□ -

□

□

□;

□;

□

□; □ -

□

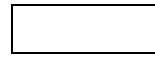
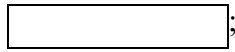
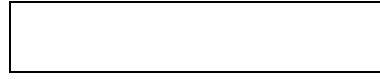
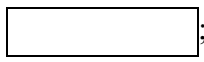
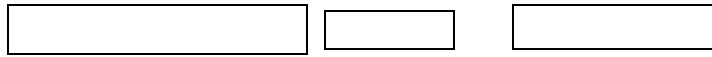
(□ -

□);

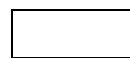
□

(□ -

□ □ -



-

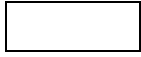


; ;

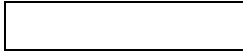
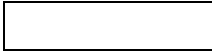
; ;

;

;



-



-

-

-

1

-

2

3

4

5

6

7

8

9

10

3549461/18-

11

-

12

13

- 58.

14

-

15

-

- 95.

16

17

18

20. 18 c.

19

-

20

21

22

23

-

24

431950/25-

25

- 63.

26

4244740/31-

27

4231871/24-

28

-

29

- 190.

989.

30

31

- 118.

32

- 30.

33

31 - 34.

34

35

-

36

37

38

-

39

40

-

41

∴

42

43

44

45

-

46

-

47

48

49

-

50

-

51

52

53

-

54

-

55

56

57

58

59

60

-

61

29719/31-

62

63

64

65

66

- 106.

67

-

68

-

69

122 - 126.

70

-

-

71

-

72

73

-

74

75

76

77

- 17.

78

79

80

81

82

83

- 9.

84

85

-

-

86

87

88

- 22.

89

90

..... 3
.....

6

1.1

6

.....
1.2

14

1.3

20

29

2.1

29

.....
2.1.1

30

.....
2.1.2

ТЗП при воздействии на объект исследования от плоского источника тепла	43
.....	
2.1.3 Алгоритмы, структуры измерительных цепей и уравнения измерений ТФХ при частотно-импульсном тепловом воздействии на исследуемые объекты	52
2.2 Бесконтактные методы неразрушающего контроля ТФХ и ТЗП материалов и изделий	63
2.2.1 Алгоритмы, структуры измерительных цепей и уравнения измерений при бесконтактном контроле ТФХ материалов	63
.....	
2.2.2 Алгоритмы, структуры измерительных цепей и уравнения измерений при бесконтактном контроле ТЗП изделий	89
2.3 Алгоритмы и уравнения адаптивных измерений ТФХ и ТЗП материалов и изделий	97
2.3.1 Алгоритмы, структуры измерительных цепей и уравнения измерений ТФХ материалов и изделий	97
2.3.2 Алгоритмы, структуры измерительных цепей и уравнения измерений ТЗП материалов и изделий	4
Глава 3 МИКРОПРОЦЕССОРНЫЕ ИИС ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТФС И ТЗП МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ	9
3.1 ИИС, реализующие контактные методы измерения ТФС и ТЗП	13
.....	0
3.2 ИИС, реализующие бесконтактные методы измерения ТФС и ТЗП	13
.....	7
3.3 Адаптивные ИИС неразрушающего контроля ТФС и ТЗП	14
.....	4
3.4 Термозонды для неразрушающего контроля ТФС и ТЗП материалов и изделий	15
.....	1
Глава 4	
	15

СРЕДСТВ НК ТФС И ТЗП	5
4.1 Общий алгоритм прогнозирования состояния метрологических характеристик блоков средств НК	15 6
4.2 Построение математических моделей метрологических характеристик аналоговых блоков средств НК	15 7
4.3 Статистическое моделирование состояния метрологических характеристик блоков средств НК	15 8
4.4 Построение математических моделей процессов изменения во времени метрологических характеристик блоков средств НК	16 3
4.5 Способ повышения метрологического ресурса блоков средств НК	16 7
4.6 Расчет числа измерений метрологических характеристик блоков средств НК при проведении метрологических поверок	16 8
4.7 Определение первоначального объема выборки при экспериментальных исследованиях блоков средства НК	17 1
4.8 Определение продолжительности межповерочных интервалов	17 5
4.9 Методы коррекции моделей процессов изменения во времени метрологических характеристик блоков средств НК на этапе эксплуатации	17 7
4.10 Методика оценки и повышения метрологической надежности при проектировании и эксплуатации средств НК	18 3
4.10.1 Общие положения	18 3
4.10.2 Оценка и прогнозирование состояния метрологических характеристик блоков средств НК на этапе проектирования	18 3
4.10.3 Разработка исходных данных для оценки и прогнозирования состояния метрологических характеристик блоков средств НК в процессе эксплуатации	18 5

4.10.4	Оценка и прогнозирование состояния метрологических характеристик блоков средств НК в процессе эксплуатации	18 5
4.11	Оценка эффективности прогнозирования метрологических характеристик блоков средств НК	18 8
4.11.1	Определение критерия эффективности при решении прямой задачи прогнозирования	19 1
4.11.2	Определение критерия эффективности при решении обратной задачи прогнозирования	19 3
Глава 5	ПОГРЕШНОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ ТФС МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ	19 6
5.1	Принципы формирования оценок характеристик погрешностей на основе математических моделей объектов и процедур измерений	19 6
5.2	Характеристики погрешности результата измерения температуропроводности и теплопроводности	19 9
5.3	Выделение доминирующих компонент в составе полных погрешностей	21 2
5.4	Достоверность определения характеристик погрешностей результатов измерения ТФХ	21 3
5.4.1	Методы оценивания характеристик погрешностей	21 3
5.4.2	Достоверность оценивания характеристик погрешностей при использовании расчетов на аналитической основе	21 5
5.4.3	Достоверность оценивания характеристик погрешностей при использовании имитационного моделирования	21 7
5.4.4		
		22
		0

.....	
5.4.5 Достоверность оценивания характеристик погрешностей при выделении в полной погрешности доминирующих компонент	22 2
.....	
5.4.6 Достоверность оценивания характеристик погрешностей результатов измерения температуры при выделении доминант	22 3
.....	
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	22
.....	8
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	23
.....	1