

Повышение точности информационно-измерительных систем неразрушающего контроля теплофизических свойств твердых материалов

З. М. СЕЛИВАНОВА, Т. А. ХОАН

Тамбовский государственный технический университет,
Тамбов, Россия, e-mail: selivanova@mail.jesby.tstu.ru

Предложено решение задачи повышения точности информационно-измерительной системы неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов. Разработан алгоритм коррекции технического несовершенства структурных компонентов системы на основе использования математической модели процесса измерений и информации о воздействующих дестабилизирующих факторах.

Ключевые слова: информационно-измерительная система, теплофизические свойства материалов, математическая модель, интеллектуальный датчик, алгоритм коррекции.

The solution of a problem of accuracy increase for information and measuring systems of nondestructive control of thermophysical properties of materials is proposed. An algorithm of correction of technical imperfection of structural system components based on use of the created mathematical model of process of measurement and information on acting destabilizing factors is developed.

Key words: information and measuring system, thermophysical properties of materials, mathematical model, intelligent sensor, correction algorithm.

Исследование возможностей и путей совершенствования информационно-измерительных систем (ИИС) теплофизических свойств (ТФС) твердых материалов, улучшение их технических характеристик важно и актуально для повышения производительности и точности неразрушающего контроля [1].

Цель работы — изучение информации о дестабилизирующих факторах, создание математической модели ИИС и разработка алгоритма коррекции результатов измерений параметров ТФС материалов. Структурная схема рассматриваемой ИИС представлена на рис. 1. Интеллектуальный датчик ИД включает систему измерительных преобразователей СИП и микроконтроллер, который выбирает измерительные преобразователи в зависимости от задачи по определению качественных характеристик исследуемых материалов ИМ. Переносной вычислительный блок ПВБ предназначен для регистрации информации о воздействующих дестабилизирующих факторах, синтеза алгоритма измерений и структуры ИИС в зависимости от ситуации, выполнения последовательности измерительных процедур и управления ими. В компьютере К обрабатываются и хранятся экспериментальные данные, принимаются решения на основе информации проведенных экспериментов и базы знаний при синтезе измерительных процедур, а также выходная информация о параметрах ТФС материалов представляется в удобном для пользователя виде. В состав ИИС также входят блок принятия решений БПР; база знаний БЗ; пользовательский интеллектуальный интерфейс ПИИ общения пользователя и эксперта.

На основе анализа структуры и технических характеристик существующих ИИС были разработаны информационная и математическая модели системы, а также алгоритм кор-

рекции результатов измерений. При решении поставленных задач использовали методы теории измерительных систем математического и физического моделирования, классической теории теплопроводности.

Математическая модель процесса измерений в ИИС.

Анализ архитектуры ИИС с учетом составляющих структурных компонентов и связей информационного обмена позволяет представить обобщенную модель системы в виде:

$$D = \langle S, C_k, \Phi \rangle, \quad (1)$$

где S — множество структурных компонентов, участвующих в процессе формирования измерительной информации от

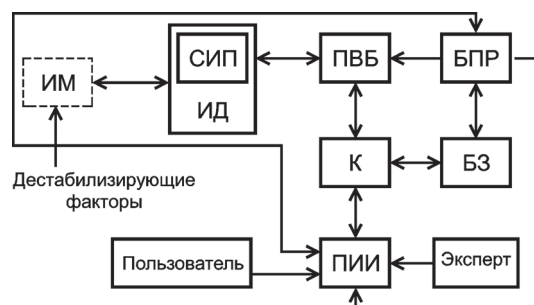


Рис.1. Структурная схема информационно-измерительной системы неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов:

ИМ — исследуемые материалы; СИП — система измерительных преобразователей; ИД — интеллектуальный датчик; ПВБ — переносной вычислительный блок; БПР — блок принятия решений; К — компьютер; БЗ — база знаний; ПИИ — пользовательский интеллектуальный интерфейс

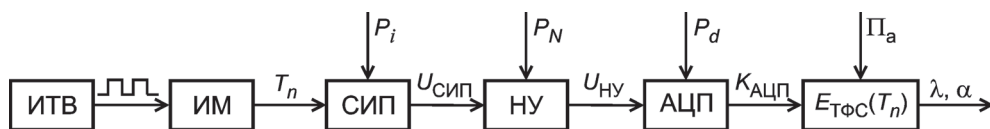


Рис. 2. Функциональная схема процесса измерений в информационно-измерительной системе: ИТВ — источник теплового воздействия на исследуемые материалы; T_n — его температура в момент контроля; P_i, P_N, P_d — воздействующие дестабилизирующие факторы на систему измерительных преобразователей, нормирующий усилитель, аналого-цифровой преобразователь, соответственно; $E_{ТФС}(T_n)$ — информация о параметрах теплофизических свойств материалов зависимостей $\lambda(T), \alpha(T)$; Π_a — погрешность аппроксимации

первичных измерительных преобразователей, усиления измерительного сигнала в нормирующем усилителе (НУ), в процессе аналого-цифрового преобразования, обработки измерительной информации в микроконтроллере; S_k — множество связей информационного обмена между структурными компонентами системы; Φ — множество формируемой измерительной информации в соответствующих элементах с учетом воздействия дестабилизирующих факторов [2].

На основе обобщенной модели (1) разработана математическая модель ИИС с учетом алгоритма функционирования системы, входных и выходных сигналов основных структурных компонентов и зависимостей между ними при воздействии дестабилизирующих факторов [3, 4]. Для создания математической модели проанализированы как известные зависимости при математическом описании СИП, НУ, аналого-цифрового преобразователя (АЦП), так и полученные экспериментально. На рис. 2 приведена функциональная схема процесса измерений в рассматриваемой ИИС с обозначением структурных компонентов системы, оказывающих основное влияние на точность измерений, входных воздействий, параметров и воздействующих дестабилизирующих факторов. В процессе измерений с источника теплового воздействия ИТВ на ИМ поступают импульсы нагрева с заданной частотой и мощностью. После этого регистрируется температура T_n ИМ в определенные моменты контроля n , которая используется в микроконтроллере для получения информации $E_{ТФС}$ о параметрах ТФС материалов: коэффициентах тепло- и температуропроводности (λ и α соответственно) с учетом погрешности аппроксимации Π_a выходных зависимостей структурных компонентов ИИС при воздействии дестабилизирующих факторов В соответствии с приведенной схемой можно записать систему:

$$\left. \begin{aligned} U_{СИП}(T_t) &= f_1(T_1, T_2, \dots, T_n; P_1, P_2, \dots, P_i; B_1, B_2, \dots, B_{mi}, t); \\ U_{НУ}(T) &= f_2(U_{СИП1}, U_{СИП2}, \dots, U_{СИПj}; P_1, P_2, \dots, P_N; B_1, B_2, \dots, B_b, t); \\ K_{АЦП}(T) &= f_3(U_{НУ1}, U_{НУ2}, \dots, U_{НУk}; P_1, P_2, \dots, P_d; B_1, B_2, \dots, B_c, t); \\ E_{ТФС}(T_n) &= f_4(T_{k1}, T_{k2}, \dots, T_{kn}; \Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_a; B_1, B_2, \dots, B_T, t), \end{aligned} \right\} (2)$$

где $U_{СИП}, U_{НУ}$ — выходные напряжения СИП и НУ, соответственно; $T_1, T_2, \dots, T_n$ — температуры рабочих спаев термомпар; P соответственно с индексами $1, \dots, i, 1, \dots, N, 1, \dots, d$ — дестабилизирующие факторы — температура окружающей среды, шероховатость исследуемой поверхности объекта, влажность, контактное сопротивление, нестабильность напряжения питания, изменение сопротивления нагрузки, помехи, шумы, — воздействующие на СИП, НУ и АЦП; B соответственно с индексами $1, \dots, m, 1, \dots, b, 1, \dots, c$ — параметры

термопар, НУ и АЦП, характеризующие чувствительность, линейность характеристики, класс точности, предел допустимых отклонений температуры, коэффициенты усиления, помехи, шумы; t — время; $K_{АЦП}$ — выходной код АЦП, пропорциональный сигналам, поступающим с выхода НУ; $E_{ТФС}$ — выходные параметры теплофизических свойств ИМ, т. е. λ, α — коэффициенты тепло- и

температуропроводности, соответственно; $T_{k1}, T_{k2}, \dots, T_{kn}$ — температура в точках контроля материала измерительным зондом; $\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_a$ — погрешности аппроксимации зависимости λ, α от температуры в точках контроля объекта; $B_1, B_2, \dots, B_T$ — константы, определяемые при градуировке измерительной системы.

Математическая модель процесса измерений температуры СИП в модели (2) имеет вид [5]:

$$U_{СИП}(T) = \sum_{i=1}^n H_{i1} T^2 + H_{i1} T + H_{3i}, \quad (3)$$

где n — число датчиков температуры СИП; H_i — коэффициенты аппроксимирующей функции.

Математическую модель процесса преобразования измерительной информации усилителем представим соотношением

$$U_{НУ}(T) = U_{СИП} K_{НУ} \pm \Delta U_{НУ}, \quad (4)$$

где $K_{НУ}$ — коэффициент усиления нормирующего усилителя; $\Delta U_{НУ}$ — погрешность усилителя при воздействии дестабилизирующих факторов.

Математическую модель процесса преобразования измерительной информации в АЦП запишем как [6]

$$K_{АЦП}(T) = [U_{НУ}(T) = (U_{НУ} u \theta)] / h \pm \delta_{K_{АЦП}}, \quad (5)$$

где θ — период дискретизации входного аналогового сигнала; u — число периодов; $\delta_{K_{АЦП}}$ — относительная погрешность АЦП.

Таким образом, при использовании (3)–(5) в математической модели процесса измерений (2) повышается точность определения параметров ТФС материалов.

Выходные параметры ИИС неразрушающего контроля ТФС материалов определяют с использованием линейного мгновенного источника тепла (электронагревателя, изготовленного из провода нихрома с высоким электрическим сопротивлением) в плоскости контакта двух полуограниченных тел. При этом процесс распространения тепла на теплоизолированной поверхности описывается зависимостью [7]:

$$T(x, \tau) = Q / 4\pi\lambda\tau \exp(-x^2/4\alpha\tau), \quad (6)$$

где x — расстояние от линейного источника тепла до точки контроля температуры; Q — мощность теплового воздействия; τ — время.

При частотно-импульсном воздействии на ИМ температуру при подаче n -го импульса на основе (6) можно определить по формуле

$$T(x, n) = QF / 4\pi\lambda \sum_{i=1}^{n-1} i^{-1} \exp(-x^2 F / 4\alpha i \Delta\tau), \quad (7)$$

где F — частота поступления тепловых импульсов на линейный нагреватель.

Используя два измеренных значения температуры $T(x, n)$, $T(x, m)$ соответственно в заданные моменты времени τ_1 , τ_2 по (7), получим формулы для расчета коэффициентов тепло- и температуропроводности

$$\begin{cases} \alpha = K_1 \exp(K_2 T_n / T_m); \\ \lambda = K_3 \ln(K_4 \alpha) / T_m, \end{cases}$$

где $K_1, \dots, K_4$ — калибровочные коэффициенты.

Оценка точности ИИС. Характеристики погрешностей результатов измерений параметров ТФС твердых материалов проанализированы на основе (2). Определены структуры погрешностей результатов измерений температуры:

$$\Delta T_i = \Delta_{\text{СИП}} T_i + \Delta_{\text{НУ}} T_i + \Delta_{\text{АЦП}} T_i + \Delta_{\psi} T_i + \Delta_W T_i + \Delta_{\text{ОС}} T_i + \Delta R_T T_i,$$

где $\Delta_{\text{СИП}} T$, $\Delta_{\text{НУ}} T_i$, $\Delta_{\text{АЦП}} T_i$ — погрешности преобразования СИП, НУ, АЦП; $\Delta_{\psi} T_i$, $\Delta_W T_i$, $\Delta_{\text{ОС}} T_i$, $\Delta R_T T_i$ — погрешности из-за шероховатости исследуемого материала, изменения его влажности, воздействия температуры окружающей среды и изменения контактного сопротивления, соответственно; температуропроводности и теплопроводности:

$$\Delta \alpha_i = \Delta_{K_1} \alpha_i + \Delta_{K_2} \alpha_i + \Delta T_n \alpha_i + \Delta T_m \alpha_i;$$

$$\Delta \lambda_i = \Delta_{K_3} \lambda_i + \Delta_{K_4} \lambda_i + \Delta_{\alpha} \lambda_i + \Delta T_m \lambda_i,$$

где $\Delta_{K_1}, \dots, \Delta_{K_4}$ — погрешности определения калибровочных коэффициентов $K_1, \dots, K_4$; ΔT_n , ΔT_m , $\Delta_{\alpha} \lambda_i$ — погрешности определения температур T_n , T_m и температуропроводности α , соответственно.

Получены аналитические зависимости всех рассмотренных компонентов суммарной погрешности от воздействующих факторов: например, аппроксимирующая зависимость коэффициента теплопроводности полиметилметакрилата (органического стекла) от температуры окружающей среды [9]: $\lambda = F(T) = 3,35 \cdot 10^{-8} T^3 + 1,203 \cdot 10^{-6} T^2 + 2,28 \cdot 10^{-4} T + 0,19$. Определены аналогичные зависимости для ряда теплоизоляционных ($\lambda = 0,03 \dots 0,2$ Вт/мК), полимерных ($0,2 \dots 0,4$ Вт/мК) и строительных материалов ($0,3 \dots 0,9$ Вт/мК). Оценен вклад каждой составляющей в характеристики погрешности. Создан и экспериментально опробован алгоритм коррекции технического несовершенства структурных компонентов ИИС с учетом дестабилизирующих факторов, представленный на рис. 3.

Измерения выполняли при мощности теплового воздействия от линейного источника тепла мощностью 10 Вт в точке контроля, расположенной на расстоянии $L = 0,002$ м от нагревателя в моменты времени 5; 120 с. В таблице приведены результаты определения погрешностей измерений λ образцовых мер из полиметилметакрилата и рипора: оценки математических ожиданий абсолютной и относительной погрешностей — $M[\Delta \lambda_i]$, $M[\delta \Delta \lambda_i]$; средние квадратические значения абсолютной и относительной погрешностей — $\sigma[\Delta \lambda_i]$,

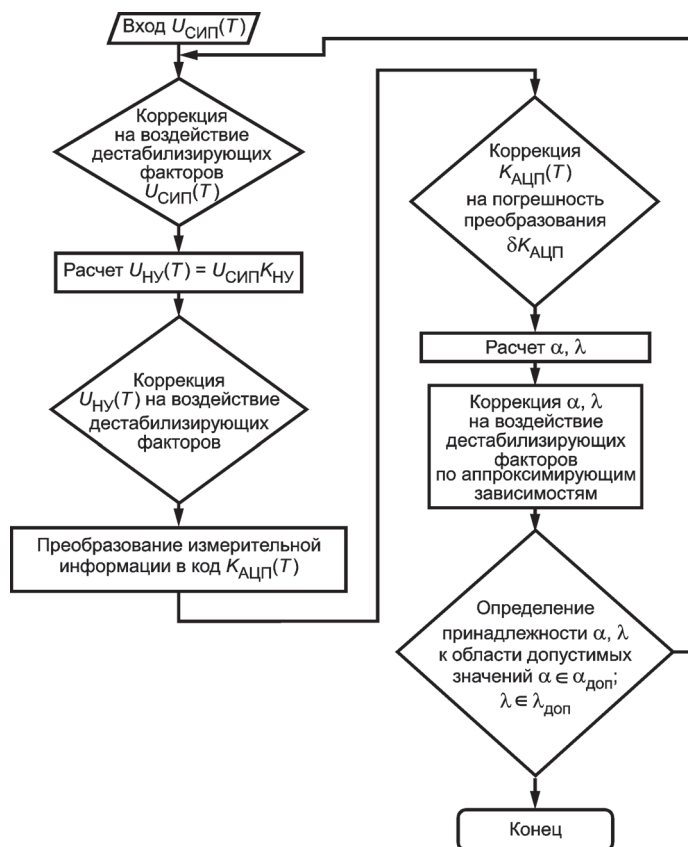


Рис. 3. Структурная схема алгоритма коррекции технического несовершенства структурных компонентов информационно-измерительной системы

Погрешности измерений теплопроводности материалов

Погрешности и их характеристики	Полиметилметакрилат	Рипор
$M[\Delta \lambda_i]$	$1,72 \cdot 10^{-3}$	$6,70 \cdot 10^{-4}$
$\sigma[\Delta \lambda_i]$	$1,13 \cdot 10^{-3}$	$4,49 \cdot 10^{-4}$
$M[\delta \Delta \lambda_i], \%$	0,89	2,35
$\sigma[\delta \Delta \lambda_i], \%$	0,57	1,67
$\Delta_{\text{пред}} \lambda_i$	$4,1 \cdot 10^{-3}$	$1,59 \cdot 10^{-3}$
$\delta_{\text{пред}} \lambda_i$	$2,11 \cdot 10^{-2}$	$5,68 \cdot 10^{-2}$

$\sigma[\delta \Delta \lambda_i]$; предельные абсолютные и относительные погрешности — $\Delta_{\text{пред}} \lambda_i$, $\delta_{\text{пред}} \lambda_i$.

Из анализа таблицы следует, что максимальные значения систематической погрешности $M[\delta \Delta \lambda_i] = 2,35 \%$ и случайной составляющей погрешности $\sigma[\delta \Delta \lambda_i] = 1,67 \%$ соответствуют требованиям к точности теплофизических измерений; систематическая и случайная составляющие погрешности измерений значительно снижаются при применении алгоритма коррекции технического несовершенства структурных компонентов ИИС при воздействии дестабилизирующих факторов.

Приведенные результаты подтверждают адекватность предложенной математической модели процесса измерения ТФС материалов ИИС.

Выводы. Создана математическая модель процесса измерений параметров ТФС — коэффициентов тепло- и тем-

пературопроводности с учетом погрешностей измерений структурных компонентов ИИС при воздействии дестабилизирующих факторов. Разработан алгоритм коррекции технического несовершенства структурных компонентов ИИС по полученным аппроксимирующим зависимостям параметров ТФС от температуры. Использование предложенного алгоритма повышает точность функционирования ИИС.

Полученные результаты рекомендуется применять при проектировании и эксплуатации в реальных условиях информационно-измерительных систем неразрушающего контроля теплофизических свойств твердых материалов.

Л и т е р а т у р а

1. Селиванова З. М., Самохвалов А. А. Интеллектуальная информационно-измерительная система для определения теплофизических свойств материалов и изделий // Измерительная техника. 2012. № 9. С. 38—42.

2. Муромцев Д. Ю., Артемова С. В., Грибков А. Н. Прогнозирование и компенсация возмущения в системах оптимального управления // Вестник Тамбовского гос. техн. ун-та. 2003. Т. 9. № 4. С. 632—637.

3. Павлов В. И., Аксенов В. В., Белова Т. В. Оптимизация функционирования измерительных систем // Известия Томского политех. ун-та. 2010. № 11. С. 65—68.

4. Советов Б. Я., Яковлев С. А. Моделирование систем: Учеб. для вузов. М.: Высшая школа, 2005.

5. ГОСТ Р 8.585—2001. Термопары. Номинальные статистические характеристики преобразования.

6. Опадчий Ю. Ф., Глудкин О. П., Гуров А. И. Аналоговая и цифровая электроника: Учеб. пособие для вузов. М.: Радио и связь, 2002.

7. Лыков А. В. Теория тепло- и массопереноса. М.: Госэнергоиздат, 1963.

8. Пат. 2301996 РФ. Способ неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов и изделий / Ю. Л. Муромцев, З. М. Селиванова // Изобретения. Полезные модели. 2007. № 18.

9. ГОСТ 17622—72. Стекло органическое техническое. Технические условия.

Дата принятия 12.11.2014 г.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

621.317.328:53.089.6

Метрологическое обеспечение измерений параметров сильных импульсных электромагнитных полей в субнаносекундном диапазоне

К. Ю. САХАРОВ, В. А. ТУРКИН, О. В. МИХЕЕВ, М. И. ДОБРОТВОРСКИЙ,
А. В. СУХОВ, А. И. АЛЕШКО

Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений,
Москва, Россия, e-mail: sukhov@vniiofi.ru

С целью метрологического обеспечения средств измерений параметров мощных быстронарастающих электромагнитных импульсов разработана и исследована высоковольтная субнаносекундная полеобразующая система на основе ТЕМ-ячейки с расщепленным потенциальным электродом. Данная система в составе эталона обеспечила режим воспроизведения электромагнитных импульсов амплитудой до 300 кВ/м (800 А/м) при длительности фронта не более 100 пс.

Ключевые слова: эталон, субнаносекундный электромагнитный импульс.

The high-voltage subnanosecond field-forming system based on of TEM-cell with splitted potential electrode to provide the metrological assurance for high power fast rising electromagnetic pulse parameters measuring instruments has been developed and studied. This system was included into the structure of standard facility. It provided the reproduction mode of electromagnetic pulses with amplitude up to 300 kV/m (800 A/m) at pulse edge duration no more than 100 ps.

Key words: standard, subnanosecond electromagnetic pulse.

Основные принципы метрологического обеспечения измерений параметров импульсных электрических и магнитных полей (электромагнитных импульсов (ЭМИ)) сформули-

рованы в [1], где показано, что для калибровки средств измерений (СИ) необходимо в полеобразующих системах воспроизводить эталонные ступенчатые ЭМИ с максимально ко-