

Комплексный метод повышения точности информационно-измерительной системы для определения теплофизических свойств материалов при воздействии дестабилизирующих факторов

З. М. СЕЛИВАНОВА, Т. А. ХОАН

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

Предложены математические модели оценки точности функционирования информационно-измерительной системы и измерительного канала при воздействии дестабилизирующих факторов. Создан комплексный метод повышения точности системы, позволяющий с допустимой погрешностью измерять параметры теплофизических свойств материалов — коэффициенты тепло- и температуропроводности.

Ключевые слова: метод оценки точности, математическая модель, информационно-измерительная система, теплофизические свойства материалов, алгоритм коррекции.

Mathematical models of assessing the accuracy of information-measuring system's functions and of measuring channel under the influence of destabilizing factors are proposed. The complex method of increasing the accuracy of the system, allowing to determine the parameters of thermophysical properties of materials such as thermal conductivity and thermal diffusivity coefficients with acceptable error.

Key words: accuracy evaluation method, mathematical model, information — measuring system, thermophysical properties of materials, correction algorithm.

Информационно-измерительная система (ИИС) для определения теплофизических свойств (ТФС) материалов в реальных условиях эксплуатации функционирует при воздействии дестабилизирующих факторов. Результаты экспериментальных исследований ИИС и расчётов относительной по-

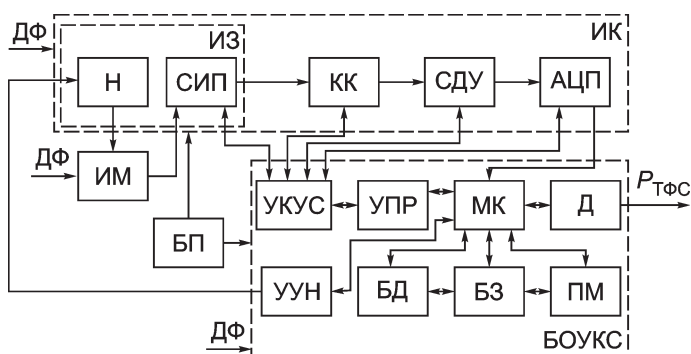


Рис. 1. Структурная схема информационно-измерительной системы для определения теплофизических свойств материалов:

ДФ — дестабилизирующие факторы; *ИЗ* — измерительный зонд; *Н* — нагреватель; *СИП* — система измерительных преобразователей; *ИМ* — исследуемый материал; *БП* — блок питания; *ИК* — измерительный канал; *КК* — коммутатор каналов; *СДУ* — система дифференциальных усилителей; *АЦП* — аналого-цифровой преобразователь; *УКУС* — устройство коррекции и управления сигналами; *УПР* — устройство принятия решения; *МК* — микроконтроллер; *Д* — дисплей; *УУН* — устройство управления нагревом; *БД*, *БЗ* — базы данных и знаний, соответственно; *ПМ* — программный модуль; *БОУКС* — блок обработки, управления и коррекции сигналов

грешности результатов измерений параметров ТФС, т. е. коэффициентов тепло- и температуропроводности (λ , α) показывают, что дестабилизирующие факторы увеличивают погрешность измерений на 10—30 %. Поэтому создание устойчивой к воздействию дестабилизирующих факторов ИИС является актуальной и важной задачей, однако для этого необходимо вначале разработать комплексный метод повышения точности такой системы.

На основе полученной опытным путём информации о методе измерения параметров ТФС материалов, входных и выходных сигналах структурных компонентов ИИС, допустимых значениях погрешности измерения коэффициентов $\Delta\lambda_{\text{доп}}$, $\Delta\alpha_{\text{доп}}$ можно рассчитать некоторые ограничения, накладываемые на показатели точности структурных компонентов ИИС и параметры ТФС материалов, т. е.

$$\Delta y_{\lambda}(S \setminus H) \leq \Delta y_{\lambda \text{ доп}}; \quad \Delta y_{\alpha}(S \setminus H) \leq \Delta y_{\alpha \text{ доп}},$$

где $\Delta y_{\lambda}(S \setminus H)$, $\Delta y_{\alpha}(S \setminus H)$ — соответственно погрешности определения коэффициентов тепло- и температуропроводности λ , α .

Погрешности обеспечиваются множеством структурных компонентов S измерительной системы и множеством H , которое включает входные сигналы структурных компонентов системы x_k , дестабилизирующие факторы, влияющие на компоненты ИИС, D_k , параметры компонентов системы b_k .

Структурная схема разработанной ИИС для определения ТФС материалов представлена на рис. 1. Точность этой системы оценивается по полученной погрешности результатов измерений коэффициентов тепло- и температуропроводности. Информационно-измерительная система состоит из

блока обработки, управления и коррекции сигналов БОУКС, измерительного канала ИК и блока питания БП [1—3]. Блок управления и коррекции сигналов выполнен на базе микроконтроллера МК PIC18F8720 и включает устройства коррекции, управления сигналами УКУС, управления нагревом УУН и принятия решений УПР, базы данных БД и знаний БЗ, программный модуль ПМ и дисплей Д, который отображает исходные данные — значения температур в заданные моменты времени и в определённых точках контроля исследуемого материала ИМ, результаты расчётов коэффициентов λ , α и их погрешности измерений. Измерительный канал состоит из: измерительного зонда ИЗ, в котором расположена система измерительных преобразователей СИП с датчиками температуры (хромель-копелевых термопар), а также нагреватель Н; коммутатора каналов КК; системы дифференциальных усилителей СДУ; аналого-цифрового преобразователя АЦП.

В программный модуль записаны программы измерения параметров ТФС материалов и алгоритмы функционирования ИИС. В базах данных и знаний размещена информация об используемых моделях и алгоритмах, режимных параметрах функционирования системы, аппроксимирующих функциях для выполнения коррекции параметров компонентов измерительного канала и выходных параметров ИИС.

Принцип действия ИИС следующий. Линейный нагреватель измерительного зонда оказывает импульсное воздействие на исследуемый материал. Затем происходит регистрация температурно-временных характеристик в области контакта зонда и материала. Полученные данные записываются в базу знаний ИИС и используются для расчётов определяемых параметров ТФС материалов [4].

При разработке ИИС выявлены дестабилизирующие факторы, определяющие наибольшую составляющую погрешности и влияющие на точность системы. Основную погрешность вносит измерительный канал, а именно — система измерительных преобразователей, дифференциальные усилители и АЦП. На погрешность оказывают влияние климатические помехи — температура окружающей среды $T_{о.с}$ и влажность W , а также контактное сопротивление и шероховатость поверхности исследуемого материала [5]. Погрешность измерений термопар обусловлена нарушением температурного режима «холодного» спая, температурой окружающей среды $T_{о.с}$, случайными погрешностями, связанными с особенностями изготовления термопар, такими как теплоёмкость нагревателя, чувствительность, паразитные термоЭДС.

Функционирование ИИС при воздействии дестабилизирующих факторов в формализованном виде можно представить зависимостью

$$\mathbf{z} = F(\mathbf{y}, \mathbf{x}, \mathbf{v}) + \mathbf{Q}, \mathbf{y} \in Y, \mathbf{x} \in X, \mathbf{v} \in V, \quad (1)$$

где $\mathbf{z}$ — вектор выходных параметров ИИС (параметров ТФС материалов); $\mathbf{x}$, $\mathbf{y}$ — векторы входных управляемых и неуправляемых параметров, соответственно, т. е. мощность теплового воздействия на исследуемый материал и сигналы с выходов компонентов измерительного канала; $\mathbf{v}$ — вектор случайных сигналов ($T_{о.с}$, W); $\mathbf{Q}$ — вектор воздействующих помех при функционировании системы; X , Y , V — множества, включающие векторы $\mathbf{x}$, $\mathbf{y}$, $\mathbf{z}$.

Для оценки точности функционирования ИИС использовали расчётно-аналитический метод. На основе соотноше-

ния (1) разработали математическую модель, устанавливающую зависимость между выходными параметрами точности результатов измерения ТФС материалов и входными параметрами точности, которые вносят погрешность в результаты измерений ТФС:

$$z_n = f(y_{n1}, y_{n2}, \dots, y_{nm}), \quad (2)$$

где z_n — номинальное значение выходных параметров ИИС; $y_{n1}, y_{n2}, \dots, y_{nm}$ — параметры точности компонентов измерительного канала ИИС (системы измерительных преобразователей, системы дифференциальных усилителей, АЦП).

Выходные параметры ИИС измеряются с погрешностью Δz_n , так как параметры компонентов системы вносят погрешности $\Delta y_{n1}, \Delta y_{n2}, \dots, \Delta y_{nm}$:

$$\mathbf{z} = \mathbf{z}_n + \Delta \mathbf{z}_n = f[(y_{n1} + \Delta y_{n1}), (y_{n2} + \Delta y_{n2}), \dots, (y_{nm} + \Delta y_{nm})]. \quad (3)$$

Разложим соотношение (3) в ряд Тейлора [6]. Учтём только члены первого порядка, поскольку погрешности y_n , z_n незначительны по сравнению со значениями входных и выходных параметров:

$$\mathbf{z} = f_1(y_{n1}, y_{n2}, \dots, y_{nm}) + \sum_{j=1}^m (\partial f_1 / \partial y_j) \Delta y_j.$$

Из (3) следует, что абсолютная погрешность результатов измерения в ИИС $\Delta z_n = \mathbf{z} - \mathbf{z}_n$. Тогда

$$\Delta z_n = \sum_{j=1}^m (\partial f_1 / \partial y_j) \Delta y_j = \sum_{j=1}^m C_j \Delta y_j, \quad (4)$$

где C_j — весовой коэффициент погрешности компонентов ИИС, влияющих на точность её выходных параметров.

Относительная погрешность, по которой оценивается точность ИИС, определяется из выражения (4):

$$\delta = \Delta z_n / \mathbf{z} = \sum_{j=1}^m C_j (\Delta y_j / \mathbf{y}).$$

На основе экспериментальных данных ИИС были получены аналитические зависимости математической модели (2) выходных параметров точности z_n от входных параметров Δy_{nm} . Функционирование ИИС осуществляется при обеспечении точности структурных компонентов измерительного канала. Для анализа и оценки его точности необходимо выполнить математическое моделирование, что является важной задачей при разработке любой ИИС. Такая математическая модель представляет собой описание преобразования линейным стационарным оператором измерительной информации в измерительном канале, поступающей от системы измерительных преобразователей через коммутатор каналов на вход системы дифференциальных усилителей. С выхода этой системы данные попадают на вход блока обработки, управления и коррекции сигналов [7]:

$$z(t) = \int_0^t C(t-\tau) y(\tau) d\tau + V_{д.ф}(t), \quad (5)$$

где $z(t)$ — сигнал на выходе измерительного канала; $C(t-\tau)$ — функция веса компонентов измерительного канала; $y(\tau)$ — входной сигнал измерительного канала; $V_{д.ф}(t)$ — аддитивная составляющая сигнала $z(t)$, зависящая от воздействующих дестабилизирующих факторов — температуры $T_{о.с}$ и влажности окружающей среды W , которая является стационарным случайным эргодическим процессом.

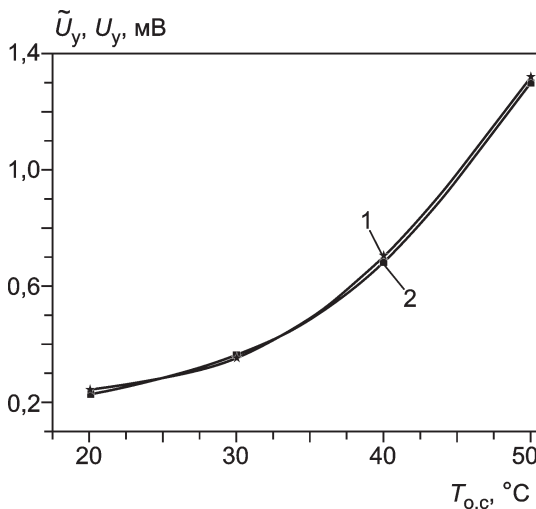


Рис. 2. Экспериментальная (1) $U_y = f(T_{o.c})$ и аппроксимирующая (2) $\tilde{U}_y = f(T_{o.c})$ зависимости результатов измерения выходного напряжения усилителя от температуры окружающей среды

Необходимо в достоверном виде и с минимальной погрешностью обеспечить передачу информации, поступающей от системы измерительных преобразователей, системы дифференциальных усилителей и АЦП. Как показывает метрологический анализ результатов измерения структурных составляющих измерительного комплекса, доминирующим компонентом, вносящим наибольшую погрешность в результаты измерения ИИС, является усилитель. Авторы предложили функциональную модель такого усилителя:

$$U_y = f(U_{вх}, D, \Delta K, N, R_{вх}, R_{вых}, R_n, U_n, F_n, I),$$

где U_y — выходное напряжение усилителя; $U_{вх} = \{U_{вх,i}, i = 1, \dots, n\}$ — множество измерительных входных сигналов; $D = \{D_j, j = 1, \dots, l\}$ — множество воздействующих дестабилизирующих факторов ($T_{o.c}, W$); ΔK — нестабильность коэффициента усиления; N — «дрейф» нуля дифференциального усилителя; $R_{вх}, R_{вых}$ — входное и выходное сопротивления дифференциального усилителя; R_n, U_n, F_n — нестабильности сопротивления нагрузки, напряжения питания дифференциального усилителя и его выходного напряжения, соответственно; I — искажения сигнала в усилителе.

На рис. 2 в качестве примера реализации модели (5) приведены зависимости $U_y = f(T_{o.c})$, полученные при измерениях с помощью разработанной системы параметров ТФС линолеума. Аппроксимирующая функция $\tilde{U}_y = f(T_{o.c})$ имеет вид

$$\tilde{U}_y = 0,0013(T_{o.c})^2 - 0,0551T_{o.c} + 0,8264.$$

Опытным путём найдены аппроксимирующие зависимости выходного напряжения усилителя от $T_{o.c}$ для следующих теплоизоляционных материалов: полиметилметакрилата, минераловатных плит, войлока, пенопласта:

$$\tilde{U}_y^{пм} = f(T_{o.c}) = -0,0015(T_{o.c})^2 + 0,1249T_{o.c} - 1,277; \quad (6)$$

$$\tilde{U}_y^{м.п} = f(T_{o.c}) = -0,0018(T_{o.c})^2 + 0,1482T_{o.c} - 1,640; \quad (7)$$

$$\tilde{U}_y^в = f(T_{o.c}) = -0,0017(T_{o.c})^2 + 0,142T_{o.c} - 1,510; \quad (8)$$

$$\tilde{U}_y^n = f(T_{o.c}) = -0,0024(T_{o.c})^2 + 0,1961T_{o.c} - 2,3473. \quad (9)$$

В результате расчёта параметров усилителя и проведённых экспериментальных исследований создана математическая модель процесса преобразования измерительной информации $U_{СИП}$ усилителем. Эта модель представлена как

$$U_y(T) = U_{СИП}K_y \pm \Delta U_{д.ф}, \quad (10)$$

где $K_y = 980$ — коэффициент усиления усилителя; $\Delta U_{д.ф} = \pm 0,61$ — погрешность изменения выходного напряжения усилителя при воздействии дестабилизирующих факторов.

Для реализации предложенных моделей (5), (10) при проектировании измерительного канала и коррекции его структурных компонентов создан программный модуль. Это позволило повысить точность измерительного канала ИИС.

Разработан комплексный метод повышения точности ИИС для определения ТФС материалов. Метод основан на использовании ранее созданных математических моделей, которые включают модели оценки точности структурных компонентов системы и точности определяемых параметров — коэффициентов тепло- и температуропроводности. Метод заключается в контроле, коррекции и проверке результатов измерений выходных сигналов структурных компонентов измерительного канала на соответствие допустимым значениям параметров ТФС по аппроксимирующим зависимостям при воздействии дестабилизирующих факторов, полученных аналитическим методом и на основе экспериментальных данных. Блок-схема алгоритма реализации комплексного метода повышения точности ИИС для определения ТФС материалов представлена на рис. 3.

Для подтверждения результатов реализации разработанного комплексного метода повышения точности ИИС для определения ТФС материалов надо вычислить погрешность $\delta_{ИКС}$ измерительного канала системы. Она определяется погрешностью преобразования измерительных сигналов датчиками температуры — термопарами системы измерительных преобразователей, операционными усилителями, входящими в состав системы дифференциальных усилителей, АЦП. Таким образом, относительная погрешность будет равна сумме погрешностей структурных компонентов измерительного канала, т. е.

$$\delta_{ИКС} = \delta_{СИП} + \delta_y + \delta_{АЦП},$$

где $\delta_{СИП}$ — погрешность системы измерительных преобразователей; δ_y — погрешность усилителя, $\delta_{АЦП}$ — погрешность АЦП.

Погрешность термопреобразователей зависит от многих факторов. К ним относятся: погрешность чувствительности, возникающая из-за отклонения характеристики термопреобразователей от номинальной статической характеристики (НСХ); неоднородности термопреобразователей; паразитные термоЭДС; изменение температуры холодных спаев термопреобразователей. Влияние указанных факторов на погрешность измерения температуры термопреобразо-

вателей определено на основе экспериментальных данных при использовании в качестве датчиков температуры хромель-копелевых термопар на стадии разработки ИИС. Чувствительность термопреобразователей в температурном диапазоне 0—100 °С, при котором проводят теплофизические измерения, определяется по формуле [8]

$$L = \Delta E / \Delta T = (E_2 - E_1) / (T_2 - T_1) = 6,842 / 100 = 0,068 \text{ мВ/}^\circ\text{С},$$

где E_2, E_1 — значения паразитных термоЭДС, соответственно при 100 и 0 °С; T_2, T_1 — температуры при 100 и 0 °С, соответственно.

Максимальная относительная погрешность чувствительности термопреобразователей ($\delta_{\max}$) из-за отклонения их реальной характеристики от номинальной статической характеристики (НСХ), т. е. нелинейности термопреобразователей, в температурном диапазоне 0—100 °С оценивается максимальной относительной погрешностью по соотношению

$$\delta_{\max} = [(E_{\text{НСХ и}} - E_{\text{НСХ р}}) / (E_2 - E_1)] \cdot 100,$$

где $E_{\text{НСХ и}}$, $E_{\text{НСХ р}}$ — соответственно идеальная и реальная НСХ. При расчёте учитывается максимальное значение разности $E_{\text{НСХ и}} - E_{\text{НСХ р}}$. Тогда $\delta_{\max} = [0,081 / (6,842 - 0)] 100 = 1,19 \%$.

Термонеоднородность термопары влияет на изменение НСХ, когда термопреобразователь при теплофизических измерениях находится в области температурного градиента, что приводит к возникновению паразитных термоЭДС. Погрешность оценивали при нагреве термопреобразователя в диапазоне 0—100 °С. Относительную погрешность измерения термопреобразователя с учётом термонеоднородности вычисляли по формуле

$$\delta_{\text{нд}} = [(E_i - E_n) / E_n] \cdot 100,$$

где E_i, E_n — текущее и номинальное значения термоЭДС.

Максимальная относительная погрешность измерений составила $\delta_{\text{нд max}} = [(1,953 - 1,947) / 1,947] \cdot 100 = 0,31 \%$, а суммарная итоговая относительная погрешность термопреобразователя — 1,5 %. Для устранения влияния температуры холодных спаев термопреобразователя на результаты измерений в измерительном зонде ИИС используют дифференциальные термопары. Погрешность дифференциального усилителя определяется изменением напряжения смещения операционного усилителя, т. е. $U_{\text{см}} = 25 \text{ мкВ}$. При суммировании приведённых погрешностей абсолютная аддитивная погрешность смещения нуля операционного усилителя нормируется по номинальному значению максимального входного сигнала системы измерительных преобразователей и составляет 2 мВ:

$$\delta_{\text{см}} = U_{\text{см}} / U_{\text{вх max}} = (25 \cdot 10^{-6}) / (2 \cdot 10^{-3}) = \pm 0,0125 \%. \quad (11)$$

Погрешность смещения нуля операционного усилителя распределена по нормальному закону. Относительная погрешность операционного усилителя из-за влияния $T_{\text{о.с}}$ определяется из выражений (6—9):

$$\delta_{y \text{ max}} = (\tilde{U}_2 / U_1) \cdot 100 = [(1,657 - 1,647) / 1,647] \cdot 100 = 0,61 \%, \quad (12)$$

где $U_1, \tilde{U}_2$ — напряжения на выходе операционного усилителя при нормальных условиях эксплуатации и при воздействии температуры окружающей среды, соответственно.

Погрешность АЦП зависит от $T_{\text{о.с}}$ и нестабильности источника питания $U_{\text{и.п}}$, влияющей на изменение опорного напряжения ($U_{\text{оп}} = 2,5 \text{ В}$). Это и есть мультипликативная погрешность. Погрешность квантования АЦП равна половине единицы младшего разряда. Изменение температуры приводит к начальному смещению нуля АЦП — это аддитивная погрешность. В результате расчётов установлено, что случайная погрешность АЦП $\delta_{\text{сп}} = 0,1 \%$. Систематическая погрешность (погрешность квантования) $\delta_{\text{кв}} = 0,062 \%$.

Погрешность измерительного канала ИИС вычислена по метрологическим характеристикам его компонентов [9]. Рассчитан доверительный интервал с предельно допустимыми нижней $\delta_{\text{н ик}}$ и верхней $\delta_{\text{в ик}}$ границами. В этом интервале с заданной вероятностью $P = 0,95$ находится погрешность измерительного канала. Принято допущение, что погрешности компонентов измерительного канала являются случайными величинами с нормальным законом распределения плотности.

Среднее квадратическое отклонение (СКО) случайной погрешности измерительного канала $\sigma[\delta_{\text{сп}}]$ определяется геометрическим суммированием СКО случайных погрешностей компонентов этого канала по формуле [9]

$$\sigma[\delta s] = \left[\sum_{i=1}^s \sigma^2[\delta s_i] \right]^{1/2},$$

где s — количество структурных компонентов, входящих в состав измерительного комплекса ИИС; δs_i — СКО случайной погрешности i -го компонента канала.

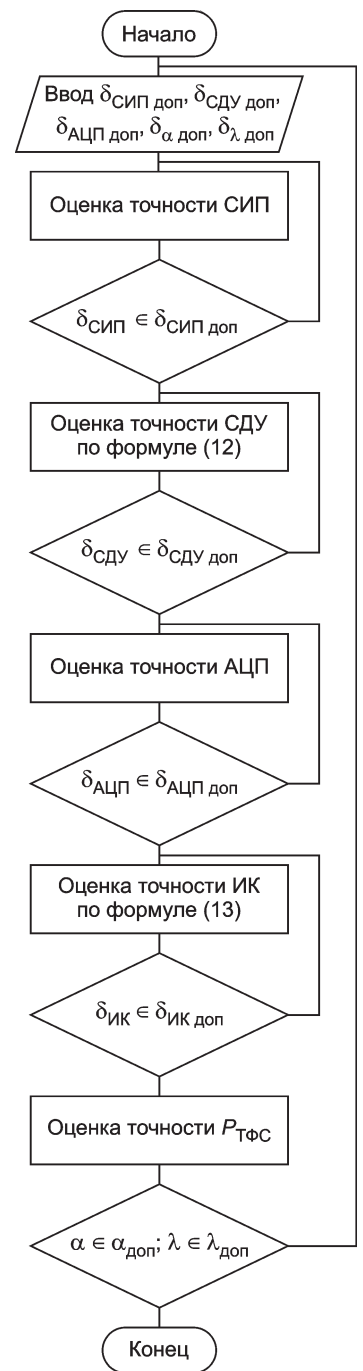


Рис. 3. Блок-схема реализации комплексного метода повышения точности информационно-измерительной системы для определения параметров теплофизических свойств материалов:

$\delta_{\text{СИП доп}}, \delta_{\text{СДУ доп}}, \delta_{\text{АЦП доп}}, \delta_{\alpha \text{ доп}}, \delta_{\lambda \text{ доп}}$ — допустимые относительные погрешности измерений системы измерительных преобразователей, системы дифференциальных усилителей, аналого-цифрового преобразователя, коэффициентов тепло- и теплопроводности, соответственно

Среднее квадратическое отклонение случайной составляющей погрешности измерительного канала системы определяется следующим образом [10]:

$$\sigma[\delta s] = \sqrt{(\delta_{\text{тп}}^2 + \delta_y^2 + \delta_{\text{АЦП}}^2)/q}, \quad (13)$$

где $\delta_{\text{тп}} = 1,5\%$ — относительная погрешность термоэлектрического преобразователя; $\delta_y = 0,61\%$ — относительная погрешность дифференциального усилителя, рассчитанная по формулам (11, 12); $\delta_{\text{АЦП}} = \pm 0,4\%$ — относительная погрешность АЦП; $q = 3$ — количество дифференциальных усилителей, для которых нормированы изменения метрологических характеристик компонентов измерительного канала.

В результате расчёта по формуле (13) СКО суммарной погрешности измерительного канала ИИС ТФС материалов составило

$$\sigma[\delta s] = \sqrt{[(1,5)^2 + (0,61)^2 + (0,4)^2]/3} = 0,963\%;$$

$$\sigma[\delta_{\text{сн}}] = \pm 0,963\%.$$

Предельно допускаемое значение погрешности измерительного канала системы рассчитывается по формуле [9]:

$$\delta_{\text{ИК н(в)}} = \pm K_{\text{н}} \sigma[\delta_{\text{сн}}].$$

Для числа измерений больше четырёх распределение суммарной погрешности стремится к нормальному ($K_{\text{н}} = 1,96$):

$$\delta_{\text{ИК н(в)}} = \pm (1,96 \cdot 0,963) = \pm 1,89\%.$$

Таким образом, значение нижней (верхней) границы доверительного интервала, в котором с вероятностью $P = 0,95$ находится погрешность измерительного канала ИИС, составляет

$$\delta_{\text{ИК н(в)}} = \pm 1,89\%.$$

Заключение. Разработана математическая модель оценки точности функционирования ИИС ТФС материалов в виде аналитической зависимости выходных параметров от входных с учётом влияния внешних факторов. Создана математическая модель измерительного канала ИИС, позволяющая выполнить анализ преобразования информации в этом канале при воздействии дестабилизирующих факторов и уменьшить погрешность канала до 1,89 %.

Предложенный комплексный метод повышения точности функционирования ИИС в результате контроля, коррекции и проверки выходных параметров структурных компо-

нентов измерительного канала на соответствие допустимым значениям и результатам измерения параметров ТФС материалов при влиянии дестабилизирующих факторов по полученным аппроксимирующим зависимостям позволяет обеспечить погрешность определения коэффициентов тепло- и температуропроводности материалов не более 2—3 %. Полученные результаты проведённых исследований ИИС рекомендуется использовать при разработке и эксплуатации ИИС ТФС материалов в реальных условиях при воздействии дестабилизирующих факторов.

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. Селиванова З. М., Хоан Т. А. Повышение точности информационно-измерительных систем неразрушающего контроля теплофизических свойств твёрдых материалов // Измерительная техника. 2015. № 9. С. 45—48.
3. Стасенко К. С., Селиванова З. М. Метод и интеллектуальная информационно-измерительная система для повышения точности допускового контроля теплопроводности теплоизоляционных материалов // Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2015. Т. 21. № 1. С. 42—49.
4. Пат. 2301996 РФ. Способ неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов и изделий / Ю. Л. Муромцев, З. М. Селиванова. // Изобретения. Полезные модели. 2007. № 18.
5. Муромцев Д. Ю., Артёмов С. В., Грибков А. Н. Прогнозирование и компенсация возмущения в системах оптимального управления // Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2003. Т. 9. № 4. С. 632—637.
6. Кабанов Д. А., Коротков Ю. Я. Статистический эксперимент при анализе точности РЭА: учеб. пособие для вузов. Нижний Новгород: ГПИ им. Жданова, 1984.
7. МИ 222—81. Методика расчёта метрологических характеристик измерительных каналов информационно-измерительных систем по метрологическим характеристикам компонентов.
8. ГОСТ Р 8.585—2001. ГСИ. Термопары. Номинальные статические характеристики преобразования.
9. РД 153-34.0-11.201—97. Методика определения обобщённых метрологических характеристик измерительных каналов ИИС и АСУТП по метрологическим характеристикам агрегатных средств измерений.

Дата принятия: 25.01.2017.