

МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ПАРАМЕТРОВ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

З. М. Селиванова, Т. А. Хоан

*Кафедра «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем»;
ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия; selivanova@mail.jesby.tstu.ru*

Ключевые слова: информационно-измерительная система; математические модели коррекции; метод повышения точности; теплофизические свойства материалов; точность измерений.

Аннотация: Предложен метод повышения точности информационно-измерительной системы, позволяющий обеспечить допустимую погрешность структурных компонентов измерительного канала и параметров теплофизических свойств теплоизоляционных материалов в результате применения созданных математических моделей для их коррекции в процессе измерения при воздействии дестабилизирующих факторов.

Точность неразрушающего контроля (**НК**) параметров теплофизических свойств (**ТФС**) материалов позволяет обеспечить качество выпускаемых материалов и изделий из них на производственных предприятиях. Требования к обеспечению точности измерений изложены в Государственной системе обеспечения единства измерений [1].

В реальных условиях эксплуатации информационно-измерительных систем (**ИИС**) при воздействии внешних и внутренних факторов экспериментальным путем установлена нестабильность структурных компонентов измерительного канала (**ИК**) при функционировании измерительной системы [2]. Нестабильность работы ИК обусловлена систематическими и случайными погрешностями измерений. В связи с этим, повышение точности ИИС НК параметров ТФС материалов – коэффициентов тепло- и теплопроводности является важной и актуальной задачей.

Постановка задачи:

1. Определить допустимые пределы изменения погрешностей структурных компонентов ИК ИИС, при которых измерение параметров ТФС исследуемых материалов осуществляется с требуемой точностью.

2. Установить соответствующие поправки в результаты измерения структурных компонентов и параметров ТФС для исключения систематической и случайной погрешностей.

3. Создать интеллектуальный алгоритм введения поправок в результаты измерения структурных компонентов ИК ИИС с использованием их математических моделей для повышения точности преобразования измерительной информации.

Для решения поставленной задачи на основе анализа структуры и характеристик ИИС НК ТФС материалов, априорной информации, экспериментальных данных, полученных при определении ИИС параметров ТФС теплоизоляционных материалов, необходимо разработать метод повышения точности ИИС в результате устранения технического несовершенства структурных компонентов измерительного канала ИИС при воздействии дестабилизирующих факторов (ДФ) – температуры и влажности окружающей среды, шероховатости поверхности исследуемых материалов, нестабильности источника питания и др.

Решение задачи повышения точности измерений ИИС включает следующее: проводится анализ поставленной цели, измерительной задачи, применяемого метода измерений, воздействующих ДФ, определяются методические и инструментальные погрешности и их вид – систематические или случайные погрешности измерений, компонентов ИК и параметров ТФС материалов; оценивается вклад составляющих погрешности измерений и определяются доминирующие из них. Оценка погрешностей измерения выполнена расчетно-экспериментальным методом.

Уравнение преобразования ИИС при контроле температуры T в области контакта измерительного зонда (ИЗ) ИИС и исследуемого материала (ИМ) при частотно-импульсном тепловом воздействии на ИМ линейным нагревателем ИЗ и измерении параметров ТФС материалов имеет вид

$$Q_{\text{ИИС}} = F \left[U_{\text{ТП}} = f(k_{\text{ТП}}T); U_{\text{ДУ}} = f(k_{\text{ДУ}}U_{\text{ТП}}); K_{\text{АЦП}} = f(k_{\text{АЦП}}U_{\text{ДУ}}), P_{\text{ДФ}} \right], \quad (1)$$

где $Q_{\text{ИИС}}$ – выходные определяемые параметры ИИС НК ТФС материалов (коэффициенты тепло- и температуропроводности – λ и α); $U_{\text{ТП}}$ – формируемая термоЭДС на выходе термопары (ТП); $k_{\text{ТП}}$ – коэффициент преобразования ТП; $U_{\text{ДУ}}$ – напряжение на выходе дифференциального усилителя (ДУ), $k_{\text{ДУ}}$ – коэффициент усиления ДУ; $K_{\text{АЦП}}$ – цифровой код на выходе аналого-цифрового преобразователя (АЦП); $k_{\text{АЦП}}$ – коэффициент преобразования АЦП; $P_{\text{ДФ}}$ – воздействующие ДФ на компоненты ИК ИИС.

Относительная погрешность результатов измерения на выходе структурных компонентов, которые указаны в уравнении преобразования (1):

$$\delta_i = (x_{\text{ин}} - x_{\text{ин}}) / x_{\text{ин}} = \Delta x_i / x_{\text{ин}}, \quad (2)$$

где $x_{\text{ин}}$, $x_{\text{ин}}$ – измеренное и номинальное значения выходного параметра структурного компонента ИК ИИС соответственно; Δx_i – абсолютная погрешность результатов измерения на выходе структурных компонентов.

Так как параметры ТФС материалов измеряются косвенным путем, то погрешность, которая вносится каждым i -м компонентом ИК (2) в результат измерения $Q_{\text{ИИС}}$, определяется по методике обработки косвенных измерений

$$\frac{\Delta Q_{\text{ИИС}i}}{Q_{\text{ИИС}}} = \frac{1}{Q_{\text{ИИС}}} \frac{\partial F}{\partial x_{\text{ин}}} \Delta x_{\text{ин}}. \quad (3)$$

Вклад относительной погрешности каждого структурного компонента ИК ИИС определяется коэффициентом влияния

$$L_i = \left(\frac{\Delta Q_{\text{ИИС}i}}{Q_{\text{ИИС}}} \right) / \delta_i = \frac{\partial F}{\partial x_{\text{ин}}} \frac{x_{\text{ин}}}{Q_{\text{ИИС}}}. \quad (4)$$

Абсолютная погрешность ИИС НК ТФС материалов определяется при суммировании аддитивной Δ_a и мультипликативной Δ_m составляющих погрешности

$$\Delta = \Delta_a + \Delta_m = \frac{1}{Q_{\text{ИИС}\gamma}} \sum_{i=1}^{\gamma} N_i P_{\text{ДФ}i} + \sum_{i=1}^l L_i \delta_i, \quad (5)$$

где N_i – коэффициент влияния для аддитивных погрешностей, $N_i = \frac{\partial F}{\partial P_{\text{ДФ}i}}$; γ, l – число коэффициентов влияния.

Определяемые аддитивные погрешности ИИС (3) – (5) включают систематические и случайные. Результаты измерений структурных компонентов ИК ИИС (1) – первичного измерительного преобразователя (термопары), дифференциального усилителя, аналого-цифрового преобразователя, представлены соотношениями:

$$x_{\text{ТП}_n} = x_{\text{ТП}_n} + B_i + C_i; \quad (6)$$

$$x_{\text{ДУ}_n} = x_{\text{ДУ}_n} + B_i + C_i; \quad (7)$$

$$x_{\text{АЦП}_n} = x_{\text{АЦП}_n} + B_i + C_i, \quad (8)$$

$x_{\text{ТП}_n}$, $x_{\text{ТП}_n}$ – измеренные и номинальные значения результатов измерений ТП; B_i , C_i – систематическая и случайная погрешности измерений; $x_{\text{ДУ}_n}$, $x_{\text{ДУ}_n}$ – измеренные и номинальные значения результатов измерений ДУ; $x_{\text{АЦП}_n}$, $x_{\text{АЦП}_n}$ – измеренные и номинальные значения результатов измерений АЦП.

Для исключения и учета влияния систематических погрешностей компонентов ИК ИИС (6) – (8) предлагаются два способа: на основе априорной и экспериментальной информации рассчитать поправки и учитывать их в результатах измерений; определить интервалы систематических погрешностей, которые не предоставляется возможным учесть или исключить, чтобы оценить их вклад в общую погрешность результатов измерения. Мультипликативная погрешность складывается из относительных погрешностей структурных компонентов ИК ИИС.

Наличие систематических погрешностей можно установить в результате анализа графика полученных результатов измерения в течение заданного промежутка времени. Если присутствуют отклонения от равномерного участка графика, то это свидетельствует о присутствии систематической составляющей погрешности. Присутствие систематической погрешности в результатах измерений из-за воздействия ДФ определяется с использованием теории дисперсионного анализа (критерия Фишера) [3]. Для этого выполняют многократные серийные измерения, соответствующие заданному набору значений ДФ, одинаковому для всех серий.

Проведенные n измерений разбивают на k партий ($k > 3$) по r_i результатов измерений ($kr_i = n$) в каждой партии. После этого определяется наличие систематических расхождений между результатами измерений для разных партий. Результаты в партиях распределены в соответствии с нормальным законом распределения [3, 4]. Наличие случайных погрешностей в какой-либо партии характеризуется рассеянием результатов наблюдений. Средняя сумма дисперсий результатов измерений, рассчитанных для каждой партии, является характеристикой совокупности случайных погрешностей [2]:

$$x_{\text{АЦП}_n} = x_{\text{АЦП}_n} + B_i + C_i, \quad (8)$$

$$\bar{x}_j = \frac{1}{r_j} \sum_{i=1}^r x_{ij},$$

где x_{ij} – результат i -го измерения в j -й партии; \bar{x}_j – среднее значение полученного результата партии измерений; k – число партий измерений; r – число результатов измерений.

Предлагается исключение постоянных систематических погрешностей измерения путем введения поправок (величин, одноименным измеряемым) в результаты измерения на основе их коррекции по аппроксимирующим зависимостям выходных сигналов структурных компонентов ИК ИИС при воздействии ДФ, полученным экспериментальным путем. При введении поправки A_j результат измерения на выходе структурных компонентов ИК (6) – (8) будет представлен в следующем виде:

$$\begin{aligned}x_{\text{ТП}_и} &= x_{\text{ТП}_и} + B_i + A_j; \\x_{\text{ДУ}_и} &= x_{\text{ДУ}_и} + B_i + A_j; \\x_{\text{АЦП}_и} &= x_{\text{АЦП}_и} + B_i + A_j.\end{aligned}\tag{10}$$

Если $A_j = -B_j$, то систематическая погрешность исключается из результата измерения. При этом надо отметить, что поправку необходимо вводить отдельно для каждой составляющей систематической погрешности. Так как поправки вводятся по аппроксимирующим зависимостям выходных сигналов от воздействующих ДФ, то точность вводимых поправок определяется точностью аппроксимации. Вследствие этого случайные погрешности результата измерения накапливаются и его дисперсия увеличивается [3].

Результат измерений x_j (9) при введении поправок B_j , где $j = 1, 2, \dots, r$, определяется по формуле

$$x_j = x_i + \sum_{j=1}^r A_j.\tag{11}$$

Дисперсия результата измерений при введении поправки

$$\sigma^2 = D_{\text{БП}}^2 + \sum_{j=1}^r D_{A_j}^2,\tag{12}$$

$D_{\text{БП}}^2$ – оценка дисперсии результата измерений без поправки; $D_{A_j}^2$ – оценка дисперсии j -й поправки. Отсюда следует, что результат измерения уточняется, но при этом возрастает разброс за счет роста дисперсии.

При проведении измерений выходных сигналов структурных компонентов ИК ИИС НК ТФС материалов (10) значение измеренной величины

$$u = \bar{x}_1 \pm t_p D,\tag{13}$$

где \bar{x}_1 – оценка среднего арифметического неисправленного результата измерений; t_p – коэффициент Стьюдента.

На рисунке 1 представлена зависимость вероятности распределения погрешности результатов измерения $P(x)$ с учетом их поправки.

После введения поправки $A \pm t_p D_A$ результат измерения выходных сигналов структурных компонентов ИК ИИС НК ТФС материалов с учетом (11) – (13) определяется по формуле

$$u = (\bar{x}_1 + A) \pm t_p D_{\bar{x}} = \bar{x} \pm t_p D_{\bar{x}},\tag{14}$$

где $D_{\bar{x}} = \sqrt{(D_{\text{БП}}^2 + D_A^2)}$, \bar{x} – оценка среднего арифметического исправленного результата измерений.

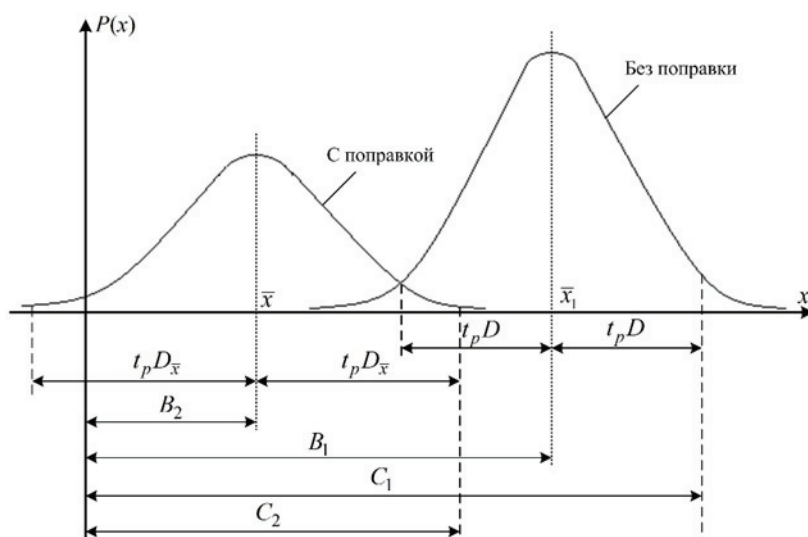


Рис. 1. Зависимость вероятности распределения погрешности результатов измерения $P(x)$ с учетом их поправки

До и после введения поправки доверительные значения погрешности результатов измерения выходных сигналов структурных компонентов ИК ИИС будут соответственно равны:

$$C_1 = B_1 + t_p D; \quad (15)$$

$$C_2 = B_2 + t_p D_{\bar{x}}.$$

В алгоритме коррекции, реализующем предлагаемый метод повышения точности ИИС, процедура реализации поправки вводится до наступления момента равенства погрешности выходных сигналов компонентов ИК и параметров ТФС материалов заданным их доверительным интервалам [5]. Погрешность результатов измерений зависит от точности установления поправки (14) – (15).

Предложенный метод повышения точности ИИС НК ТФС материалов основан на известном способе структурной коррекции [3] и заключается в контроле измеренных значений выходных сигналов на выходе структурных компонентов измерительного канала ИИС в процессе измерения параметров ТФС материалов, сравнении их с допустимыми значениями, которые определяются перед каждым измерением по характеристикам преобразования структурных компонентов ИК, полученным расчетно-экспериментальным методом. Метод повышения точности ИИС позволяет исключить систематические и случайные погрешности структурных компонентов ИК ИИС, обусловленные техническим несовершенством как самих компонентов, так и воздействием внешних и внутренних факторов в результате применения интеллектуального алгоритма автоматической коррекции погрешностей структурных компонентов ИК. Научная новизна метода обусловлена, в отличие от известных методов, применением для коррекции точных математических моделей компонентов ИК ИИС при воздействии ДФ, полученных на основе априорных и расчетно-экспериментальных зависимостей.

Разработаны математические модели коррекции структурных компонентов ИК ИИС НК ТФС материалов [5, 6].

Математическая модель преобразования измерительной информации термопарой ТП получена аппроксимацией полученной экспериментальной зависимости

$$\tilde{U}_{ТП} = f(T_{и}) = 2,7075 \cdot 10^{-5} (T_{и})^2 + 0,0383 T_{и} + 0,00525, \quad (16)$$

где $\tilde{U}_{ТП}$ – значение термоЭДС на выходе термопары; $T_{и}$ – измеренная температура.

В результате расчета усилителя и проведенных экспериментальных исследований создана математическая модель процесса преобразования измерительной информации $U_{\text{ТП}}$ усилителем

$$U_{\text{ДУ}}(T) = U_{\text{ТП}} \cdot 980 \pm 0,61, \quad (17)$$

где $K_{\text{ус}} = 980$ – коэффициент усиления усилителя; $\Delta U_{\text{усДФ}} = \pm 0,61$ – погрешность изменения выходного напряжения усилителя при воздействии дестабилизирующих факторов.

Создана математическая модель АЦП с рассчитанными значениями параметров аналого-цифрового преобразования измерительных сигналов с выхода ДУ

$$K_{\text{АЦП}}(T) = \left[\frac{U_{\text{ДУ}}(t)}{3 \cdot 10^{-5}} \right] \pm 0,062, \quad (18)$$

где $K_{\text{АЦП}}(T)$ – функция $U_{\text{ДУ}}(t)$, представленная в двоичном коде; $U_{\text{ДУ}}$ – измерительный сигнал с выхода дифференциальных усилителей, фиксируемый в заданные моменты времени t .

Интеллектуальный алгоритм в процедуре коррекции результатов измерения структурных компонентов ИИС использует математические модели (16) – (18), учитывает текущую, априорную и вспомогательную информацию о свойствах исследуемых материалов, условия измерений, требования к результатам измерения, предъявляемые ограничения, которые представлены в базе знаний ИИС, характеризуется свойством адаптации в соответствии с изменяющимися условиями функционирования.

Созданный метод и интеллектуальный алгоритм повышения точности ИИС применяются в информационно-измерительной системе НК ТФС материалов, что позволяет повысить метрологический уровень измерений, точность определения коэффициентов тепло- и температуропроводности.

На рисунке 2 представлена структурная схема ИИС, реализующая метод и интеллектуальный алгоритм повышения точности измерения ТФС материалов. ИИС включает следующие основные компоненты: $\text{ТП}_1, \text{ТП}_2, \dots, \text{ТП}_i$ – датчики контроля температуры (термопары) в плоскости контакта исследуемого материала и измерительного зонда, i – число термопар; $\text{ДУ}_1, \text{ДУ}_2, \dots, \text{ДУ}_m$ – дифференциальные усилители, m – число ДУ; АЦП; ВБ – вычислительный блок, в состав которого входят: МК – микроконтроллер; MAO, MPO – модули алгоритмического и программного обеспечения соответственно; БЗ – база знаний; модули коррекции (1 – 3) результатов измерения структурных компонентов ИК ИИС; модули расчета и коррекции λ и α ; Д – дисплей; БУН – блок управления нагревом.

Основные функции в ИИС выполняет ВБ на базе микроконтроллера *PIC18F8720*, который характеризуется высоким быстродействием и большой памятью, многоканальным портом параллельного ввода-вывода информации. Микроконтроллер обрабатывает измерительную информацию, поступающую с первичных измерительных преобразователей; выполняет функции управления режимами работы ИИС и нагрева исследуемых материалов в процессе измерения; осуществляет контроль измерительных сигналов на выходе структурных компонентов измерительного канала и погрешности измерения; реализует интеллектуальный алгоритм коррекции значений выходных сигналов компонентов измерительного канала при воздействии ДФ по полученным аппроксимирующим зависимостям на соответствие их установленным допустимым значениям; выполняет статистическую обработку и метрологический анализ результатов измерений.

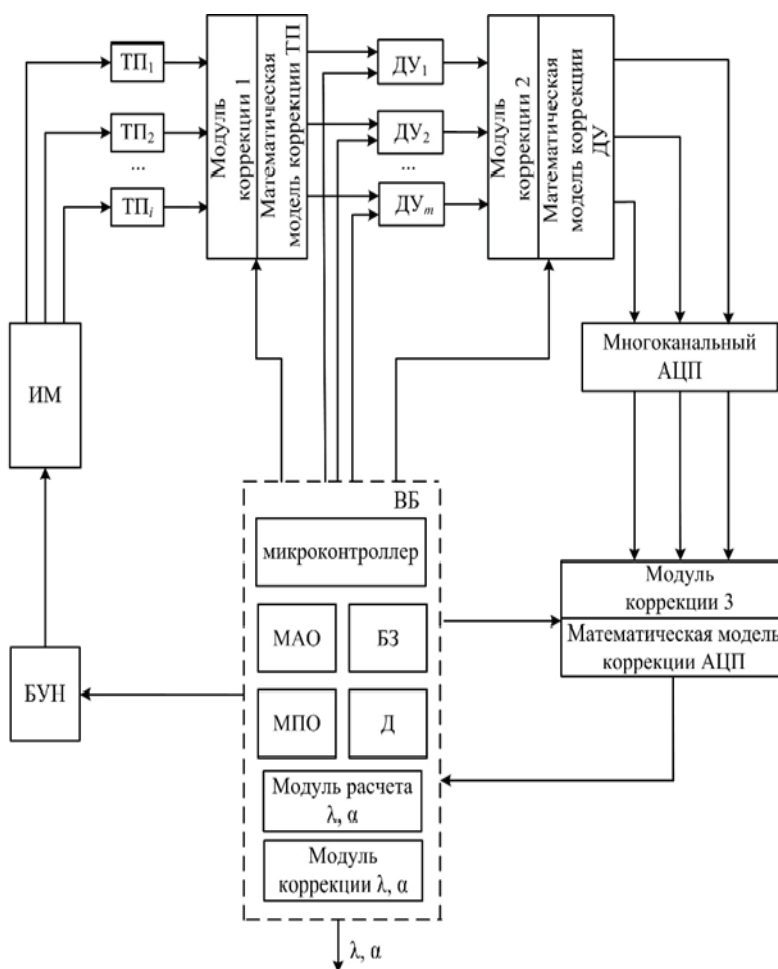


Рис. 2. Структурная схема ИИС НК ТФС материалов, реализующая метод и интеллектуальный алгоритм повышения точности ИИС

Разработано программное обеспечение ИИС на языке программирования C⁺⁺ при использовании компилятора CCS PCWH [7] для реализации метода и алгоритма коррекции технического несовершенства ИИС НК ТФС теплоизоляционных материалов.

Для оценки точности функционирования ИИС НК ТФС материалов проведены экспериментальные исследования системы при воздействии основных дестабилизирующих факторов, воздействующих на структурные компоненты ИИС: неоднородности ТП, погрешности чувствительности из-за отклонения характеристики ТП от номинальной статической характеристики, влияния паразитных термоЭДС, изменения температуры холодных спаев ТП, температуры и влажности окружающей среды. Влияние данных факторов на погрешность результатов измерения коэффициентов тепло- и температуропроводности выявлено на основе экспериментальных данных в процессе разработки ИИС параметров ТФС теплоизоляционных материалов.

На рисунке 3 представлены результаты экспериментальных исследований ИИС: зависимости коэффициента теплопроводности исследуемых материалов от выходного напряжения дифференциального усилителя $\lambda = f(U_{ДУ})$.

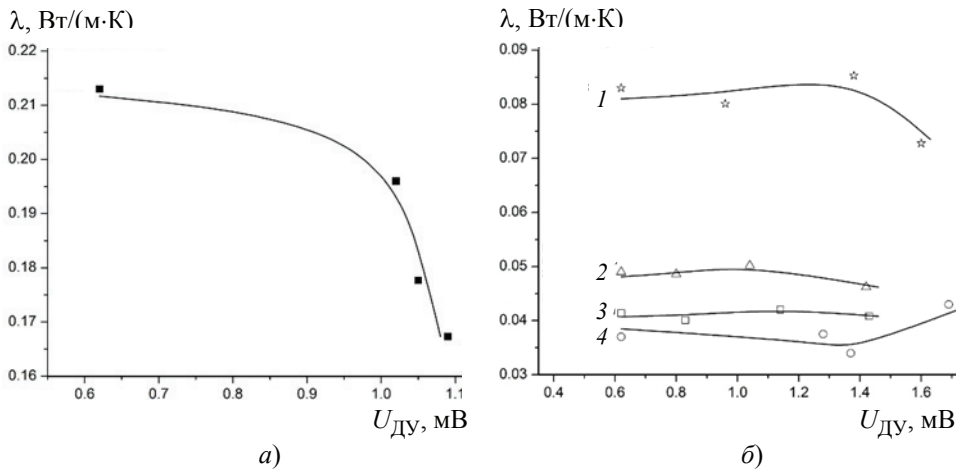


Рис. 3. Зависимости коэффициента теплопроводности исследуемых материалов от выходного напряжения дифференциального усилителя $\lambda = f(U_{ДУ})$:
a – полимер-модифицированный материал; *б* – войлок (1), плита повышенной жесткости (2), полужесткая минвата (3), пенопласт (4)

На рисунке 4 приведены зависимости относительной погрешности коэффициента теплопроводности от погрешности структурных компонентов измерительного канала ИИС НК ТФС материалов.

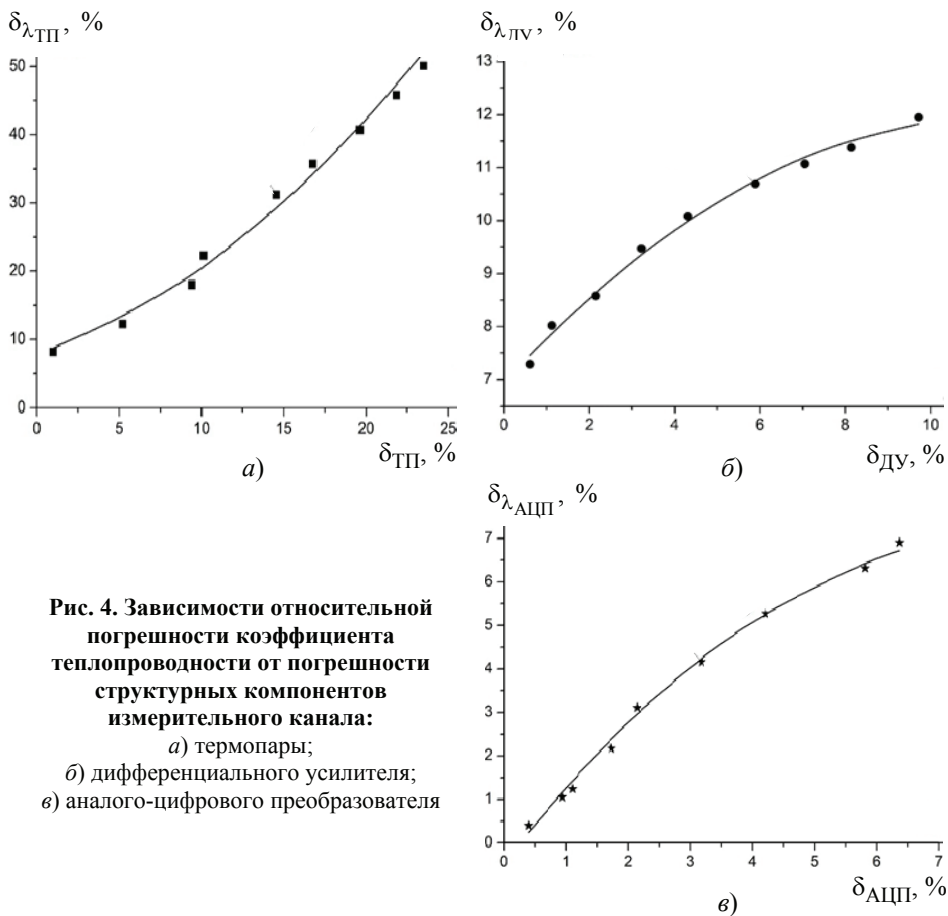


Рис. 4. Зависимости относительной погрешности коэффициента теплопроводности от погрешности структурных компонентов измерительного канала:
a) термопары;
б) дифференциального усилителя;
в) аналого-цифрового преобразователя

Как показывает анализ результатов экспериментальных исследований измерительного канала ИИС ТФС теплоизоляционных материалов, относительная суммарная погрешность ИК при воздействии ДФ составляет до 40%, в том числе вклад погрешности ТП составляет 23,9 %, ДУ – 9,72 %, АЦП – 6,37 %. При воздействии ДФ относительная погрешность определения коэффициента теплопроводности возрастает до 50 %, при этом вклад погрешности ТП составляет 29,88 %, ДУ – 12,15 %, АЦП – 7,97 %.

На основе экспериментальных данных получены аппроксимирующие зависимости относительной погрешности коэффициента теплопроводности от погрешности структурных компонентов измерительного канала, которые используются для прогнозирования погрешности определения λ :

$$\delta_{\lambda_{ТП}} = f(\delta_{ТП}) = 0,0472(\delta_{ТП})^2 + 0,7659(\delta_{ТП}) + 8,0167;$$

$$\delta_{\lambda_{ДУ}} = f(\delta_{ДУ}) = 0,0388(\delta_{ДУ})^2 + 0,8795(\delta_{ДУ}) + 6,9383;$$

$$\delta_{\lambda_{АЦП}} = f(\delta_{АЦП}) = -0,1149(\delta_{АЦП})^2 + 1,8623(\delta_{АЦП}) - 0,4825.$$

На основе экспериментальных данных выполнен расчет погрешности измерительного канала ИИС ТФС теплоизоляционных материалов в результате реализации в ИИС интеллектуального алгоритма коррекции технического несовершенства ИИС при воздействии ДФ [5, 8]. Рассчитаны относительные погрешности структурных компонентов ИК ИИС: $\delta_{ТП} = 1,5\%$; $\delta_{ДУ} = 0,61\%$; $\delta_{АЦП} = \pm 0,4\%$.

Тогда среднеквадратическое отклонение случайной составляющей погрешности ИК ИИС ТФС материалов будет равно $\sigma[\delta_{сл}] = \pm 0,963\%$. Предельно допускаемое значение погрешности ИК ИИС рассчитывается по формуле $\delta_{ИК_{н(в)}} = \pm K_n \sigma[\delta_{сл}]$. Распределение суммарной погрешности для числа измерений больше четырех стремится к нормальному ($K_n = 1,96$):

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

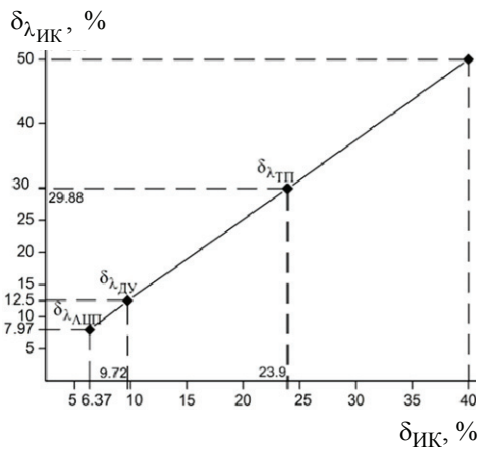


Рис. 5. График зависимости погрешности измерительного канала $\delta_{\lambda_{ИК}}$ структурных компонентов ИК от погрешности определения теплопроводности $\delta_{ИК}$ исследуемых материалов при воздействии ДФ до коррекции результатов измерения теплопроводности $\delta_{\lambda_{ИК}} = f(\delta_{ИК})$

Таким образом, принимается значение нижней (верхней) границы доверительного интервала, в котором с вероятностью $P = 0,95$ находится погрешность ИК ИИС ТФС материалов: $\delta_{ИК_{н(в)}} = \pm 1,89\%$.

На рисунках 5 – 7 представлены результаты экспериментов по оценке влияния погрешности структурных компонентов ИК ИИС при воздействии ДФ на результаты определения коэффициентов тепло- и температуропроводности теплоизоляционных материалов до и после применения алгоритма коррекции технического несовершенства ИИС.

Как показывает анализ графических зависимостей на рис. 5 – 7, полученных по данным экспериментов, в результате применения алгоритма коррекции выходных параметров структурных компонентов ИК ИИС, относительная погрешность определения коэффициентов тепло- и температуро-

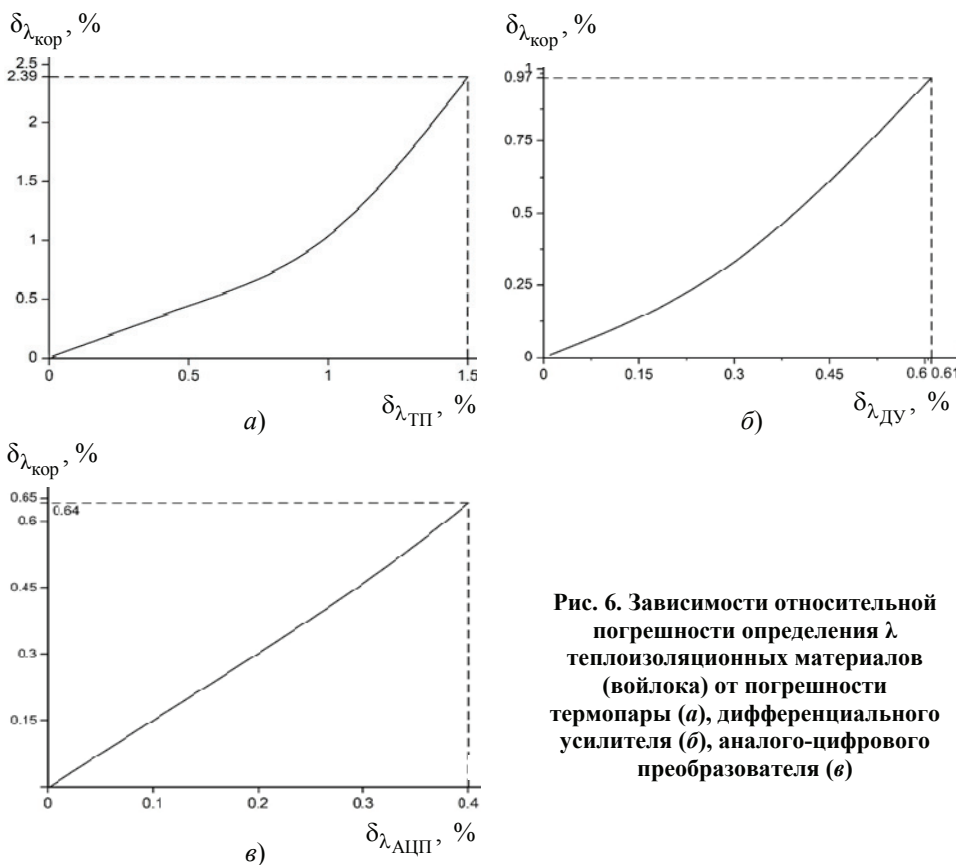


Рис. 6. Зависимости относительной погрешности определения λ теплоизоляционных материалов (войлока) от погрешности термопары (а), дифференциального усилителя (б), аналого-цифрового преобразователя (в)

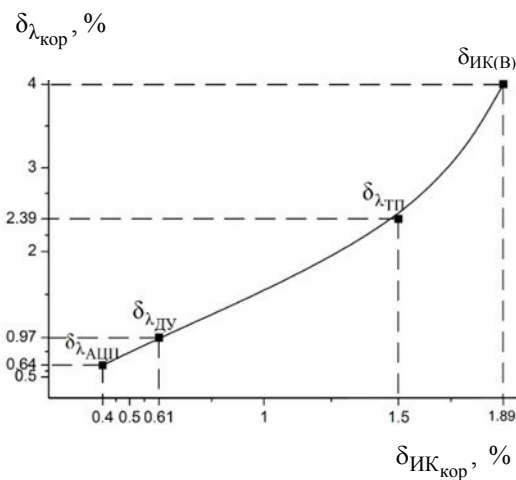


Рис. 7. График зависимости вклада в относительную погрешность определения λ погрешностей структурных компонентов ИК ИИС в результате их коррекции на воздействие ДФ $\delta_{\lambda_{кор}} = f(\delta_{ИК_{кор}})$, $\delta_{ИК(В)}$ – значение погрешности верхней границы доверительного интервала

проводности теплоизоляционных материалов – около 4 %. При этом максимальный вклад погрешности компонентов ИК в суммарную погрешность определения λ и α следующий: ТП – 2,39 %; ДУ – 0,97 %, АЦП – 0,64 %.

Проведены экспериментальные исследования ИИС НК ТФС материалов и определены относительные погрешности результаты измерений коэффициентов тепло- и температуропроводности теплоизоляционных материалов (табл. 1).

В результате метрологического анализа установлено, что относительная погрешность результатов измерений составляет не более 4 %, что соответствует требованиям, предъявляемым к измерительным средствам для определения параметров теплофизических свойств теплоизоляционных материалов.

Таблица 1

**Результаты метрологической обработки
теплофизических измерений исследуемых материалов**

Исследуемые материалы	Эталонные и справочные значения		Измеренные значения		Относительная погрешность измерения	
	$\alpha \cdot 10^{-7}$, м ² /с	λ , Вт/(м·К)	$\alpha \cdot 10^{-7}$, м ² /с	λ , Вт/(м·К)	δ_{α} , %	δ_{λ} , %
Полимер-модифицированный материал	1,09	0,195	1,11	0,1990	1,98	2,05
Рипор	4,61	0,028	4,73	0,0286	2,60	2,14
Минвата полужесткая	3,93	0,040	4,05	0,0413	3,05	3,25
Войлок	4,65	0,080	4,80	0,0830	3,22	3,75
Пенопласт	7,30	0,037	7,58	0,0384	3,83	3,78

Выводы

1. Разработан метод повышения точности ИИС НК ТФС материалов на основе использования точных математических моделей компонентов ИК ИИС, полученных на основе априорных и расчетно-экспериментальных зависимостей, для коррекции систематических и случайных погрешностей структурных компонентов ИК ИИС при воздействии ДФ.

2. Создан алгоритм, реализующий метод повышения точности ИИС НК ТФС материалов, позволяющий в результате целенаправленной коррекции результатов измерения структурных компонентов и выходных параметров ИИС определять коэффициенты тепло- и температуропроводности теплоизоляционных материалов с допустимой погрешностью.

3. Разработана структурная схема ИИС НК ТФС теплоизоляционных материалов, реализующая предложенный метод и алгоритм коррекции значений результатов измерений структурных компонентов ИК ИИС и параметров ТФС материалов при воздействии ДФ.

4. Выполнена метрологическая оценка ИИС НК ТФС материалов. Точность определения коэффициентов тепло- и температуропроводности теплоизоляционных материалов повысилась в 12,5 раз в результате применения в ИИС метода и алгоритма коррекции структурных компонентов ИИС на воздействие ДФ. Относительная погрешность измерения составляет не более 4 %, что соответствует требованиям, предъявляемым к измерительным средствам данного назначения.

Разработанный метод и алгоритм повышения точности ИИС рекомендуется использовать при разработке и эксплуатации ИИС ТФС материалов в условиях воздействия дестабилизирующих факторов.

Список литературы

1. РМГ 64–2003. Государственная система обеспечения единства измерений. Обеспечение эффективности при управлении технологическими процессами. Методы и способы повышения точности измерений. – Введ. 2005–01–01. – М. : Изд-во стандартов, 2004. – 20 с.

2. Селиванова, З. М. Повышение точности информационно-измерительных систем неразрушающего контроля теплофизических свойств твердых материалов / З. М. Селиванова, Т. А. Хоан // Измер. техника. – 2015. – № 9. – С. 45 – 48.

3. Сергеев, А. Г. Метрология : учеб. пособие для вузов / А. Г. Сергеев, В. В. Крохин. – М. : Логос, 2001. – 408 с.

4. Глазкова, В. В. Оценка точности вычисления нижних граничных значений вероятностей состояний функционирования сложных систем / В. В. Глазкова, Д. Ю. Муромцев, В. Н. Шамкин // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2016. – Т. 22, № 3. – С. 340 – 349.

5. Селиванова, З. М. Математические модели и алгоритм для совершенствования информационно-измерительной системы неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов / З. М. Селиванова, Т. А. Хоан // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2016. – Т. 22, № 4. – С. 520 – 534. doi: 10.17277/vestnik.2016.04.pp.520-534

6. Selivanova, Z. M. Increasing the Accuracy of Data-Measuring Systems for the Nondestructive Testing of the Thermal Properties of Solids / Z. M. Selivanova, T. A. Khoan // Measurement Techniques. – 2015. – Vol. 58, No. 9. – P. 1010 – 1015. doi: 10.1007/s11018-015-0834-8

7. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2016663500 Российская Федерация. Программа для реализации алгоритма коррекции технического несовершенства информационно-измерительной системы неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов / Хоан Т. А., Селиванова З. М. ; правообладатель ФГБОУ ВО «Тамб. гос. техн. ун-т». – № 2016660919, заявл. 18.10.2016 ; опубл. 10.01.2017.

8. Методика определения обобщенных метрологических характеристик измерительных каналов ИИС и АСУТП по метрологическим характеристикам агрегатных средств измерений : РД 153-34.0-11.201–97 : утв. Департаментом стратегии развития и науч.-техн. политики РАО «ЕЭС России» 19.08.1997 : ввод в действие с 01.02.1999. – М. : Служба передового опыта ОРГРЭС, 1999. – 16 с.

Method for Increasing the Accuracy of Information-Measuring System of Parameters of Thermophysical Properties of Thermal Insulation Materials

Z. M. Selivanova, T. A. Hoang

*Department “Design of Radio-Electronic and Microprocessor Systems”; TSTU, Tambov, Russia;
selivanova@mail.jesby.tstu.ru*

Keywords: accuracy; information-measuring system; mathematical models correction; method for increasing accuracy; thermal properties of materials;

Abstract: The paper proposes a method for increasing the accuracy of information-measuring system. The proposed method provides a valid error of the structural components of the measuring channel and thermal properties parameters of thermal insulation materials in the application of established mathematical models for their correction in the measurement process under the influence of destabilizing factors.

References

1. Interstate Council on Standardization, Metrology and Certification, *RMG 64–2003. Gosudarstvennaya sistema obespecheniya edinstva izmerenii. Obespechenie effektivnosti pri upravlenii tekhnologicheskimi protsessami. Metody i sposoby povysheniya tochnosti izmerenii* [Recommendations on interstate standardization RMG 64-2003. State system for ensuring the uniformity of measurements. Ensuring the effect of measurements by the control of technological processes. Methods and ways of the measuring accuracy rise], Moscow: Izdatel'stvo standartov, 20 p. (In Russ.)

2. Selivanova Z.M., Khoan T.A. Increasing the Accuracy of Data-Measuring Systems for the Nondestructive Testing of the Thermal Properties of Solids, *Measurement Techniques*, 2015, vol. 58, issue 9, pp. 1010-1015.

3. Sergeev A.G., Krokhin V.V. *Metrologiya* [Metrology], Moscow: Logos, 2001, 408 p. (In Russ.)

4. Glazkova, V.V., Muromtsev D.U., Shamkin V.N. [Research into Dependence of Calculation Accuracy of Lower Boundary Values of Probability States of Complex Systems on Different Factors], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2016, vol. 22, no. 3, pp. 340-349, doi: 10.17277/vestnik.2016.03.pp.340-349 (In Russ., abstract in Eng.)

5. Selivanova Z.M., Hoang T.A. [Mathematical Models and Algorithms for Improving Information-Measuring Systems of Nondestructive Testing of Thermal Physical Properties of Materials], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2016, vol. 22, no. 4, pp. 520-534. doi: 10.17277/vestnik.2016.04.pp.520-534 (In Russ., abstract in Eng.)

6. Selivanova Z. M., Khoan T. A. Increasing the Accuracy of Data-Measuring Systems for the Nondestructive Testing of the Thermal Properties of Solids, *Measurement Techniques*, 2015, vol. 58, no. 9, pp. 1010-1015, doi: 10.1007/s11018-015-0834-8

7. Hoang T.A, Selivanova Z.M. *Programma dlya realizatsii algoritma korreksii tekhnicheskogo nesovershenstva informatsionno-izmeritel'noi sistemy nerazrushayushchego kontrolya teplofizicheskikh svoystv materialov* [Programme for the implementation of the algorithm correcting technical imperfection of information – measuring system of non-destructive testing of thermal properties of materials], Russian Federation, 2016, Certificate of state registration of the computer programs 2016663500. (In Russ.)

8. Department for Development Strategy and Scientific and Technical Policy of RAO “UES of Russia”, *RD 153-34.0-11.201-97. Metodika opredeleniya obobshchennykh metrologicheskikh kharakteristik iz-meritel'nykh kanalov IIS i ASUTP po metrologicheskim kharakteristikam agregatnykh sredstv izmerenii* [Guidance document RD 153-34.0-11.201-97. Generalized method of determining the metrological characteristics of measuring channels MIS and SCADA for metrological characteristics aggregation measurements], Moscow: Sluzhba peredovogo opyta ORGRES, 1999, 16 p. (In Russ.)

Methode der Erhöhung der Genauigkeit des Informatiosmesssystems der Parameter der wärmephysikalischen Eigenschaften der wärmeisolierenden Materialien

Zusammenfassung: Es ist die Methode der Erhöhung der Genauigkeit des Informationsmesssystems vorgeschlagen, die den zulässigen Fehler der strukturellen Komponenten des Messkanals und der Parameter der wärmephysikalischen Eigenschaften der wärmeisolierenden Materialien infolge der Anwendung der geschaffenen mathematischen Modelle für ihre Korrektur im Laufe der Messung bei der Einwirkung der destabilisierenden Faktoren zu gewährleisten zulässt.

Méthode d'élévation de la précision de l'information et du système de mesure des paramètres des propriétés des matériaux thermiques isolants

Résumé: Est proposée une méthode d'élévation de la précision du système informatique de mesure permettant d'assurer une marge d'erreur dans les composants structurels des éléments du canal de mesure et des paramètres des propriétés des matériaux thermiques isolants à la suite de l'emploi des modèles mathématiques créés pour leur correction dans le processus de la mesure lors de l'action des facteurs de déstabilisation.

Авторы: *Селиванова Зоя Михайловна* – доктор технических наук, профессор кафедры «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем»; *Хоан Туан Ань* – аспирант кафедры «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

Рецензент: *Муromцев Дмитрий Юрьевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем, проректор по научно-инновационной деятельности, ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.