

**МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И АЛГОРИТМ
ДЛЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ИНФОРМАЦИОННО-
ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО
КОНТРОЛЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ 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: алгоритм коррекции; измерительный зонд; информационно-измерительная система; математическая модель; теплофизические свойства материалов.

Аннотация: Предложены математические модели процесса измерения в информационно-измерительной системе неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов, структурных компонентов измерительного канала системы и алгоритм аналого-цифровой коррекции для устранения технического несовершенства и повышения точности информационно-измерительной системы.

Применение информационно-измерительных систем неразрушающего контроля теплофизических свойств (**ИИС НК ТФС**) материалов для повышения качества выпускаемой продукции на производстве требует обеспечения достоверности получаемой в процессе измерения информации. Повышение точности информационно-измерительных систем для формирования достоверной информации в измерительном канале системы в результате устранения ее технического несовершенства является важной и актуальной задачей.

Целью данной работы является улучшение технических характеристик измерительного канала **ИИС НК ТФС** материалов в результате минимизации погрешности измерения его структурных компонентов при воздействии дестабилизирующих факторов (**ДФ**) на основе использования созданного алгоритма аналого-цифровой коррекции для повышения точности неразрушающего контроля параметров **ТФС** материалов – коэффициентов тепло- и температуропроводности (λ и α).

Для решения задачи исследования на основе анализа структуры и характеристик существующих **ИИС НК ТФС** материалов для устранения их технического несовершенства необходимо разработать математические модели процесса измерения в **ИИС**, структурных компонентов измерительного канала (**ИК**) системы, а также алгоритм аналого-цифровой коррекции результатов измерения **ТФС** материалов при воздействии дестабилизирующих факторов, что позволит повысить точность **ИИС НК ТФС** материалов [1, 2].

При решении поставленной задачи использовались методы математического и физического моделирования, теории измерительных систем [3].

Структурная схема созданной ИИС НК ТФС материалов представлена на рис. 1. На схеме введены следующие обозначения: ПК – персональный компьютер, ИК – измерительный канал; ИЗ – измерительный зонд; СИП – система измерительных преобразователей; $ТП_1, ТП_2, \dots, ТП_i$ – термопары, i – число термопар; $УК_1, УК_2, УК_3$ – устройства коррекции; $ДТ_{1ХСТП}$ – датчик температуры холодных спаев термопары; K_1, K_2, \dots, K_j – каналы передачи информации, j – число каналов передачи информации; $КК$ – коммутатор каналов; $СДУ$ – система дифференциальных усилителей ($ДУ$) $ДУ_1, ДУ_2, \dots, ДУ_m$, m – число $ДУ$; $ДТ_{1ОС}, ДТ_{2ОС}$ – датчики температуры окружающей среды; $АЦП$ – аналого-цифровой преобразователь; $P_{ТФС}$ – параметры ТФС материалов; $P_{ДФ}$ – дестабилизирующие факторы; $ИМ$ – исследуемый материал.

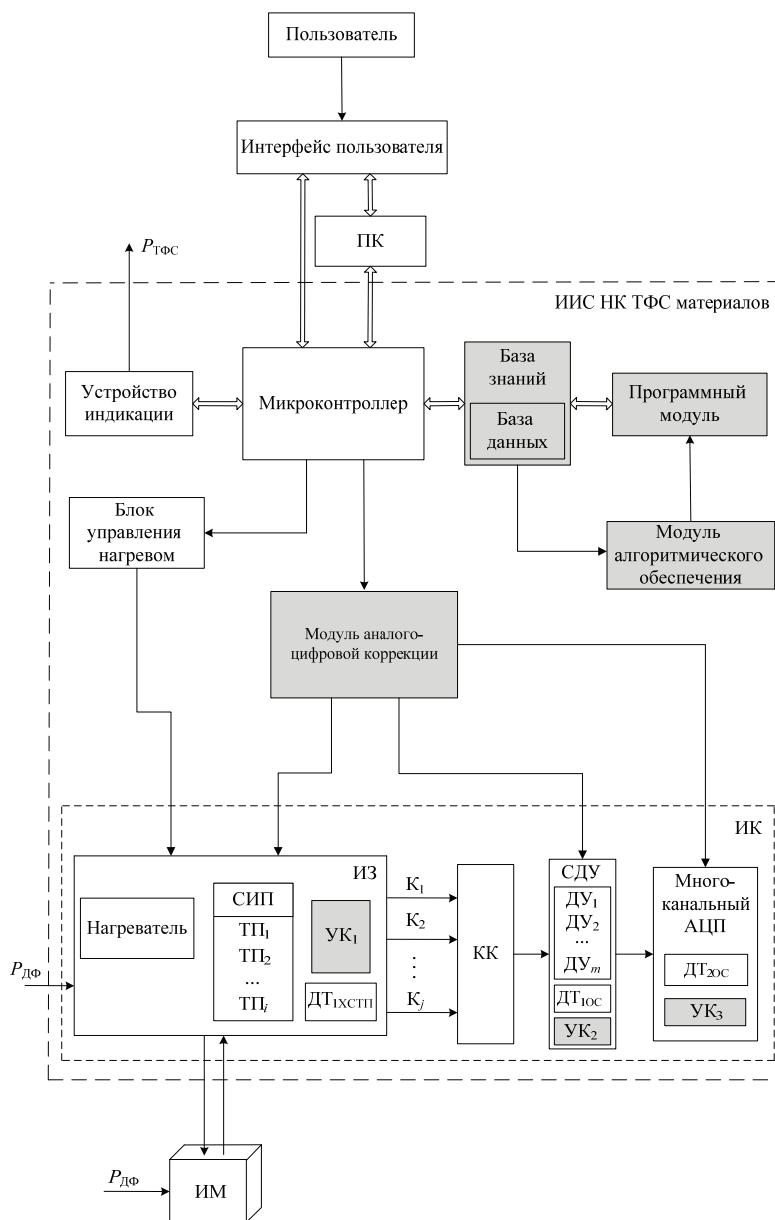


Рис. 1. Структурная схема ИИС НК ТФС материалов

На рисунке 1 выделены структурные компоненты, которые разработаны для данной ИИС. Создан интерфейс пользователя с выводом окон, в которых указана последовательность действий по выбору интерактивных технических руководств для работы с ИИС, диапазонов измерений параметров ТФС материалов, методики калибровки системы и др. Модуль алгоритмического обеспечения содержит совокупность математических методов, моделей и алгоритмов, используемых в системе для решения задачи повышения точности и достоверности измерительной информации при определении ТФС материалов. В программный модуль записаны программы алгоритмов функционирования ИИС, измерения параметров ТФС материалов, уравнения процесса измерения, коррекции выходных параметров структурных компонентов ИК ИИС на воздействие дестабилизирующих факторов. Модуль аналого-цифровой коррекции реализует функции аналого-цифровой и схмотехнической коррекции компонентов ИК ИИС. В базах данных и знаний размещена информация об используемых моделях и алгоритмах в системе, режимных параметрах функционирования ИИС и аппроксимирующих функциях для выполнения процедуры коррекции параметров компонентов ИК и выходных параметров ИИС при влиянии ДФ. Персональный компьютер обрабатывает и хранит экспериментальные данные, принимает решения на основе измерительной информации о проведенных экспериментах и информации БЗ при синтезе измерительных процедур и представляет выходную информацию о параметрах ТФС материалов в виде, удобном для пользователя [4].

Выходные параметры ИИС НК ТФС материалов определяются с помощью метода при действии линейного мгновенного источника тепла в плоскости контакта двух полуограниченных тел [5]. При этом процесс распространения тепла на теплоизолированной поверхности полубесконечного в тепловом отношении тела при действии линейного источника тепла описывается решением задачи теплопроводности, которое имеет вид [6]

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

где $T(x, \tau)$ – температура; Q – мощность теплового воздействия; τ – время контроля температуры; x – расстояние от линейного источника тепла до точки контроля;

При частотно-импульсном воздействии на исследуемый материал температура $T(x, \tau)$ в моменты контроля n и m при подаче n -го импульса может быть определена по формуле [6]

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

На основе измеренных значений температуры $T(x, n)$ и $T(x, m)$ с использованием зависимости (1) определены формулы для расчета коэффициентов тепло- и температуропроводности [6]

$$\alpha = B_1 \exp\left(B_2 \frac{T_n}{T_m}\right); \quad \lambda = \frac{1}{T_m} B_3 \ln(B_4 \alpha). \quad (2)$$

Постановка задачи разработки математической модели процесса измерения в ИИС НК ТФС материалов. На основе полученной экспериментальным путем и известной информации о методе измерения ТФС материалов, входных и выходных сигналах структурных компонентов ИИС, допустимых значениях погрешности измерения коэффициентов тепло- и температуропроводности $\Delta\lambda_{\text{доп}}$,

$\Delta\alpha_{\text{доп}}$ требуется сформировать подмножество структурных компонентов S ИИС, которое обеспечивает выполнение ограничений на показатели точности определения параметров ТФС материалов, то есть

$$\begin{aligned} \Delta y_{\lambda}(S/x_{kX}, P_{kP}, b_{kB}) &\leq \Delta y_{\lambda\text{доп}}; \\ \Delta y_{\alpha}(S/x_{kX}, P_{kP}, b_{kB}) &\leq \Delta y_{\alpha\text{доп}}, \end{aligned} \quad (3)$$

где $\Delta y_{\lambda}(S/x_{kX}, P_{kP}, b_{kB})$ и $\Delta y_{\alpha}(S/x_{kX}, P_{kP}, b_{kB})$ – погрешности определения коэффициентов тепло- и температуропроводности, которая обеспечивается группой структурных компонентов S измерительной системы соответственно, x_1, x_2, \dots, x_{kX} – входные сигналы структурных компонентов системы; $P_{\text{ДФ}1}, P_{\text{ДФ}2}, \dots, P_{\text{ДФ}k}$ – дестабилизирующие факторы; b_1, b_2, \dots, b_{kB} – параметры компонентов системы.

Математическая модель процесса измерения в ИИС НК ТФС материалов устанавливает зависимость выходных сигналов при воздействии входных, дестабилизирующие факторы, а также состояние системы в рассматриваемые моменты времени. В общем виде математическую модель процесса измерения с учетом ограничений на показатели точности (3) можно представить в виде системы зависимостей

$$\begin{cases} y_1(T) = f_1(x_1, x_2, \dots, x_{kX}; P_1, P_2, \dots, P_{kP}; b_1, b_2, \dots, b_{kB}, t), \\ y_2(T) = f_2(x_1, x_2, \dots, x_{kX}; P_1, P_2, \dots, P_{kP}; b_1, b_2, \dots, b_{kB}, t), \\ \dots \\ y_n(T) = f_n(x_1, x_2, \dots, x_{kX}; P_1, P_2, \dots, P_{kP}; b_1, b_2, \dots, b_{kB}, t). \end{cases} \quad (4)$$

В модели (4) $y_1(T), y_2(T), \dots, y_n(T)$ – выходные сигналы подсистем; t – время измерения.

Анализ данных проведенного измерительного эксперимента структурных компонентов ИИС НК ТФС материалов позволил установить, что наибольшую погрешность в результаты измерения параметров ТФС материалов λ и α (до 80 %) вносят структурные компоненты измерительного канала системы при воздействии основного дестабилизирующего фактора – температуры окружающей среды.

На основе экспериментальных исследований измерительного канала разработаны математические модели структурных компонентов ИК ИИС НК ТФС материалов: системы измерительных преобразователей, дифференциального усилителя и АЦП.

Суммарное напряжение на выходе СИП $U_{\text{СИП}}$ является функциональной зависимостью от температуры рабочего и холодного спаев термопар [7] и ряда воздействующих факторов

$$U_{\text{СИП}} = f(T_{\text{РС}}, T_{\text{ХС}}, \delta_{T_{\text{ОС}}}, \delta_{\text{сл}}, t),$$

где $T_{\text{РС}}, T_{\text{ХС}}$ – температуры рабочего и холодного спаев термопар; $\delta_{T_{\text{ОС}}}$ – погрешность измерения термопар из-за влияния температуры окружающей среды; $\delta_{\text{сл}}$ – случайная погрешность измерения.

На рисунке 2 представлены графики зависимостей выходного напряжения СИП от температуры в области контакта измерительного зонда и исследуемого материала с учетом воздействия дестабилизирующих факторов.

Математическая модель СИП в (4) получена аппроксимацией экспериментальной зависимости и представлена в виде уравнения регрессии

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

где $T_{\text{и}}$ – измеренная температура.

Получена экспериментальная зависимость выходного напряжения СИП от температуры окружающей среды $U_{\text{СИП } T_{\text{OC}}} = f(T_{\text{OC}})$, представленная на рис. 3, и аппроксимирующие зависимости $\tilde{U}_{\text{СИП } T_{\text{OC}}} = f(T_{\text{OC}})$ для коррекции $U_{\text{СИП } T_{\text{OC}}}$.

При заданных значениях $U_{\text{СИП}}$ аппроксимация зависимости $\tilde{U}_{\text{СИП } T_{\text{OC}}}$ имеет вид:

$$U_{\text{СИП}} = 0,5 \text{ мВ}, \quad \tilde{U}_{\text{СИП } T_{\text{OC}}} = f(T_{\text{OC}}) = 0,0656 T_{\text{OC}} + 0,4873; \quad (6)$$

$$U_{\text{СИП}} = 1 \text{ мВ}, \quad \tilde{U}_{\text{СИП } T_{\text{OC}}} = f(T_{\text{OC}}) = 0,0656 T_{\text{OC}} + 0,9871; \quad (7)$$

$$U_{\text{СИП}} = 1,5 \text{ мВ}, \quad \tilde{U}_{\text{СИП } T_{\text{OC}}} = f(T_{\text{OC}}) = 0,0656 T_{\text{OC}} + 1,4872; \quad (8)$$

$$U_{\text{СИП}} = 2 \text{ мВ}, \quad \tilde{U}_{\text{СИП } T_{\text{OC}}} = f(T_{\text{OC}}) = 0,0656 T_{\text{OC}} + 1,9874. \quad (9)$$

На основе экспериментальных исследований усилителя установлено, что выходное напряжение усилителя определяется функциональной зависимостью от нестабильности параметров усилителя и воздействия внешних и внутренних факторов:

$$U_{\text{вых.ус}} = f(U_{\text{вх}}, P_{\text{ДФ}}, \Delta U_{\text{П}}, \Delta R_{\text{П}}, \Delta R_{\text{ВХ}}, \Delta K_{\text{У}}),$$

где $U_{\text{вх}} = \{U_{\text{вх } i}, i = 1, \dots, g\}$ – множество измерительных входных сигналов, g – число входных сигналов с СИП; $P_{\text{ДФ}} = \{W, T_{\text{OC}}, D\}$ – множество воздействующих внешних дестабилизирующих факторов (W – влажность окружающей среды, D – давление); $\Delta U_{\text{П}}$ – нестабильность напряжения питания усилителей; $\Delta R_{\text{П}}$ – нестабильность сопротивления нагрузки; $\Delta R_{\text{ВХ}}$ – нестабильность входного сопротивления усилительных устройств; $\Delta K_{\text{У}}$ – нестабильность коэффициента усиления.

На рисунке 4 приведены экспериментальные и аппроксимирующие зависимости выходного напряжения усилителя от T_{OC} при определении ТФС теплоизоляционных материалов.

В результате расчета усилителя и проведенных экспериментальных исследований создана математическая модель процесса преобразования измерительной информации $U_{\text{СИП}}$ усилителем в модели (4), которая представлена в виде

$$U_{\text{ус}}(T) = U_{\text{СИП}} \cdot 980 \pm 0,61, \quad (10)$$

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

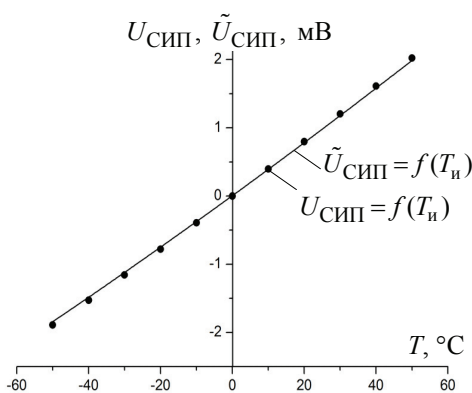


Рис. 2. Графики экспериментальной зависимости выходного напряжения СИП от измеряемой температуры $U_{\text{СИП}} = f(T_{\text{н}})$ и аппроксимирующей $\tilde{U}_{\text{СИП}} = f(T_{\text{н}})$

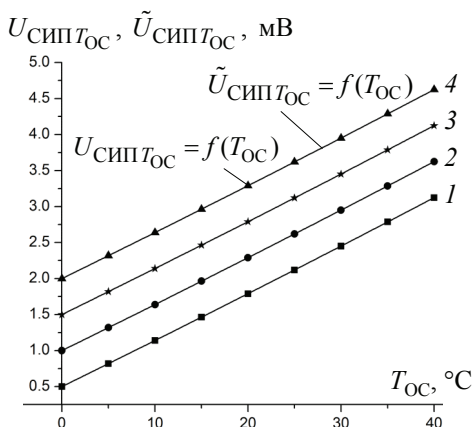


Рис. 3. Графики экспериментальной зависимости выходного напряжения СИП от температуры окружающей среды $U_{\text{СИП } T_{\text{OC}}} = f(T_{\text{OC}})$ и аппроксимирующей $\tilde{U}_{\text{СИП } T_{\text{OC}}} = f(T_{\text{OC}})$ при $U_{\text{СИП}}$ равном, мВ: 1 – 0,5; 2 – 1; 3 – 1,5; 4 – 2

По экспериментальным данным получены аппроксимирующие зависимости выходного напряжения усилителя от T_{OC} для теплоизоляционных материалов – полиметилметакрилата (ПММ) (11), минераловатных плит (12), войлока (13), пенопласта (14):

$$\tilde{U}_{yc} = f(T_{OC}) = -0,0015 T_{OC}^2 + 0,1249 T_{OC} - 1,277; \quad (11)$$

$$\tilde{U}_{yc} = f(T_{OC}) = -0,0018 T_{OC}^2 + 0,1482 T_{OC} - 1,640; \quad (12)$$

$$\tilde{U}_{yc} = f(T_{OC}) = -0,0017 T_{OC}^2 + 0,142 T_{OC} - 1,510; \quad (13)$$

$$\tilde{U}_{yc} = f(T_{OC}) = -0,0024 T_{OC}^2 + 0,1961 T_{OC} - 2,3473. \quad (14)$$

Математическая модель процесса преобразования измерительной информации в АЦП в модели (4) приведена в следующем виде [8]

$$K_{АЦП}(T) = \left(\frac{U_{yc}(T) = (U_{yc} uL)}{h} \right) \pm \delta K_{АЦП}, \quad (15)$$

где L – период дискретизации входного аналогового анализа; u – число периодов дискретизации; $\delta K_{АЦП}$ – погрешность преобразования АЦП; h – шаг квантования.

Среднеквадратическое значение шума (ошибки) квантования определяется по формуле $\delta_{кв} = \frac{F}{K}$, где F – вес наименьшего значащего разряда; K – число разрядов. Тогда $\delta_{кв} = 1/16 = 0,062$.

Входное напряжение АЦП $U_{вх АЦП} = 2$ В, число уровней квантования для шестнадцатиразрядного АЦП $N = 2^{16}$. Тогда шаг квантования определяется по формуле

$$h = \frac{A_{max}}{N} = \frac{2}{2^{16}} = 3,10^{-5} \text{ В},$$

где A_{max} – максимальная амплитуда входного напряжения.

Погрешность квантования изменяется в интервале $-h/2 \leq \delta_{кв} \leq h/2$.

Создана математическая модель АЦП в соответствии с (15) и рассчитанными значениями параметров АЦП измерительных сигналов с выхода СДУ

$$K_{АЦП}(T) = \left[\frac{U_{СДУ}(t)}{3 \cdot 10^{-5}} \right] \pm 0,062, \quad (16)$$

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

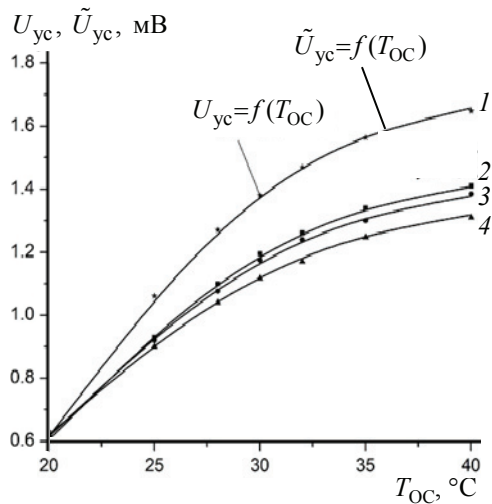


Рис. 4. Графики экспериментальной зависимости выходного напряжения усилителя от температуры окружающей среды $U_{yc}(T) = f(T_{OC})$ и аппроксимирующей $\tilde{U}_{yc}(T) = f(T_{OC})$:
 1 – пенопласт; 2 – минвата;
 3 – войлок; 4 – ПММ

Адекватность разработанных математических моделей подтверждается степенью соответствия цели исследования – повышение точности ИК ИИС НК ТФС материалов, на основе сравнения данных экспериментальных исследований ИИС при определении коэффициентов тепло- и температуропроводности и полученных при использовании для их определения созданных математических моделей. Для проверки адекватности использовался метод математической статистики – оценка по средним значениям откликов ИИС $y(T)$ и модели $y'(T)$. Сравнение результатов оценки математического ожидания и дисперсии откликов модели и ИИС подтверждают их сходимость, что свидетельствует об адекватности созданных моделей.

Проведены исследования ТФС материалов при воздействии на измерительный зонд ИИС температуры окружающей среды. На рисунке 5 представлены зависимости теплопроводности $\lambda = f(T_{OC})$ исследуемых материалов при воздействии температур в диапазоне $-60...60$ °С.

По экспериментальным данным, приведенным на рис. 5, получены аппроксимирующие зависимости $\tilde{\lambda} = f(T_{OC})$ исследуемых материалов – ПММ (17), войлока (18), линолеума (19), минваты (20) и рипора (21):

$$\tilde{\lambda} = f(T_{OC}) = 3,35 \cdot 10^{-8} T_{OC}^3 + 1,203 \cdot 10^{-6} T_{OC}^2 + 2,28 \cdot 10^{-4} T_{OC} + 0,19; \quad (17)$$

$$\tilde{\lambda} = f(T_{OC}) = -2,17 \cdot 10^{-8} T_{OC}^3 - 2,30 \cdot 10^{-6} T_{OC}^2 + 2,11 \cdot 10^{-4} T_{OC} + 0,08; \quad (18)$$

$$\tilde{\lambda} = f(T_{OC}) = -5,56 \cdot 10^{-9} T_{OC}^3 + 2,91 \cdot 10^{-7} T_{OC}^2 + 2,20 \cdot 10^{-4} T_{OC} + 0,048; \quad (19)$$

$$\tilde{\lambda} = f(T_{OC}) = -3,310 \cdot 10^{-8} T_{OC}^3 + 1,843 \cdot 10^{-7} T_{OC}^2 + 2,64 \cdot 10^{-4} T_{OC} + 0,039; \quad (20)$$

$$\tilde{\lambda} = f(T_{OC}) = 2,77 \cdot 10^{-8} T_{OC}^3 + 7,59 \cdot 10^{-8} T_{OC}^2 + 7,79 \cdot 10^{-4} T_{OC} + 0,025. \quad (21)$$

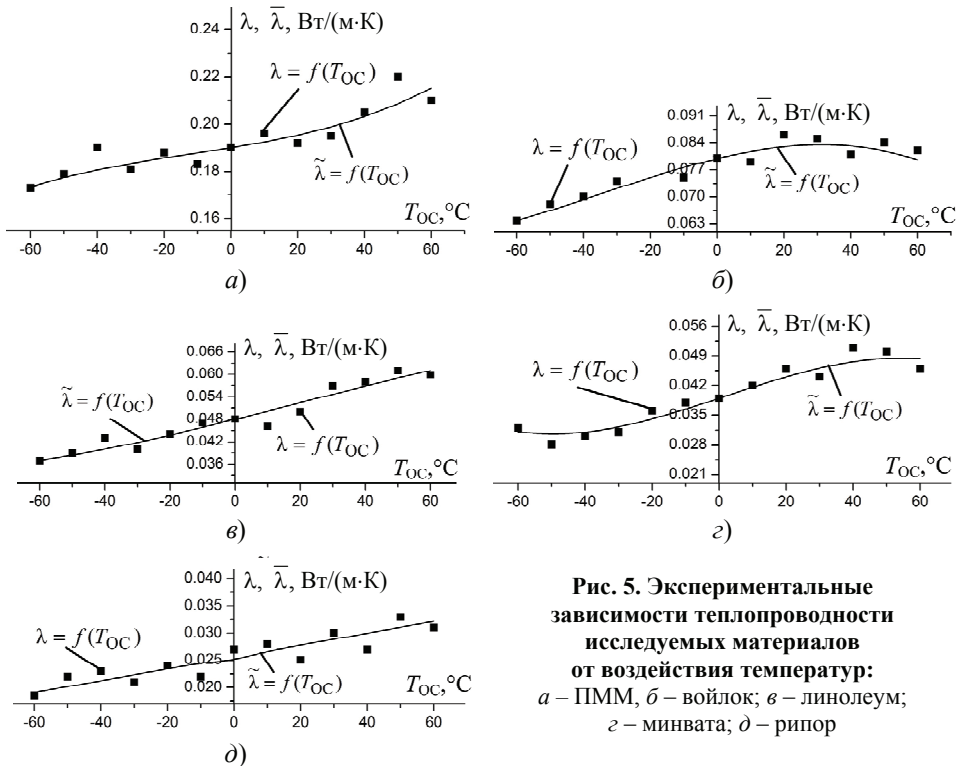


Рис. 5. Экспериментальные зависимости теплопроводности исследуемых материалов от воздействия температур:
 а – ПММ, б – войлок; в – линолеум;
 г – минвата; д – рипор

Предлагается решение вопроса адаптации компонентов ИК ИИС для условий эксплуатации системы при воздействии дестабилизирующих факторов с использованием созданных математических моделей процесса измерения в ИИС, структурных компонентов измерительного канала, которые реализованы в алгоритме коррекции технического несовершенства структурных компонентов измерительного канала ИИС НК ТФС материалов, приведенного на рис. 6. В процессе коррекции измеряемых и контролируемых параметров измерительного канала ИИС осуществляется проверка их принадлежности к области допустимых значений. В случае несоответствия определяемых параметров к данной области проводится их коррекция по аппроксимирующим зависимостям, приведенным в базе знаний ИИС.

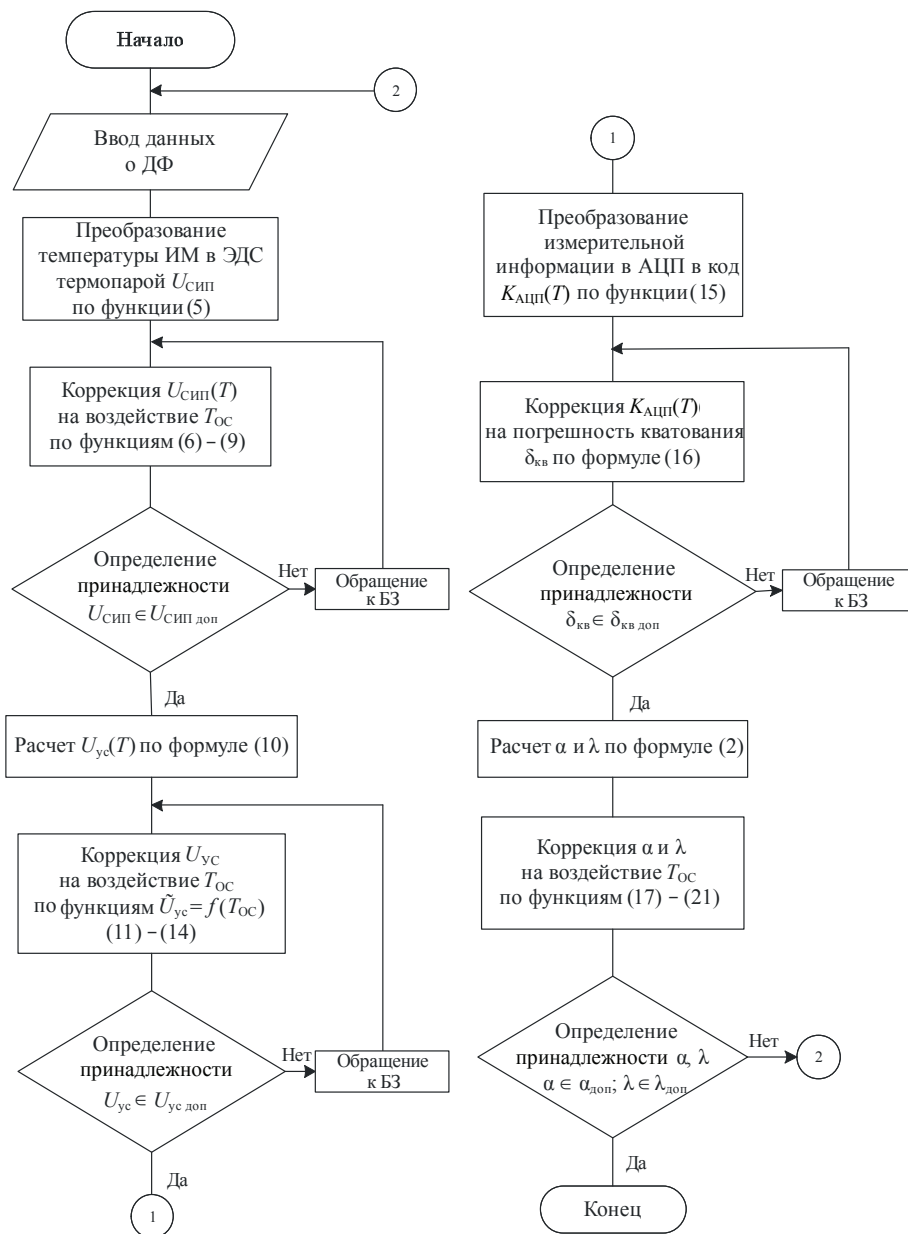


Рис. 6. Алгоритм коррекции структурных компонентов ИК ИИС НК ТФС материалов

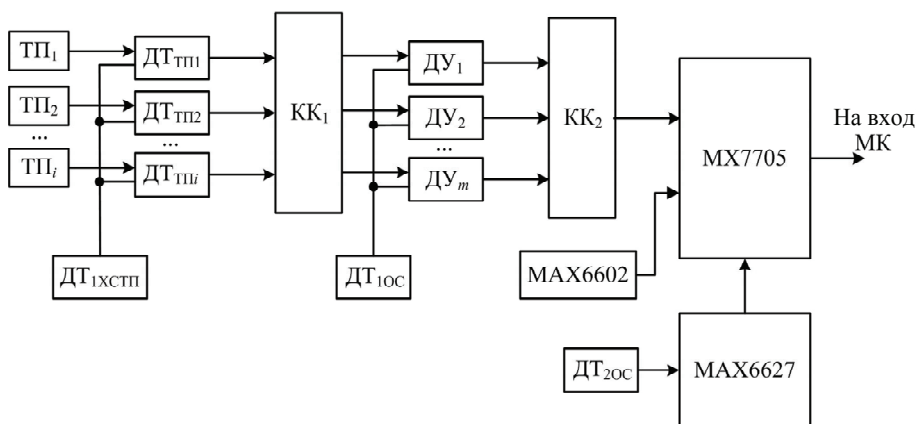


Рис. 7. Структурная схема модуля аналого-цифровой коррекции ИК ИИС НК ТФС материалов

Разработанный алгоритм отличается от существующих применением при его реализации модулей аналого-цифровой (рис. 7) и цифровой коррекции (рис. 8) компонентов ИК ИИС НК ТФС материалов, что существенно повышает точность передачи и преобразования измерительной информации в ИК. На рисунке 7 следующее функциональное назначение элементов: MX7705 – 16-разрядный АЦП; MAX 6602 – обеспечивает опорное напряжение 2,5 В для MX 7705; MAX 6627 – измеряет температуру окружающей среды [8].

На рисунке 8 элементы схемы выполняют следующие функции: MX 7705 включает встроенный прецизионный усилитель с программируемым коэффициентом усилителя, благодаря которому АЦП воспринимает сигналы микровольтового уровня с термопар; MAX 6602 – обеспечивает опорное напряжение 2,5 В для MX 7705; MAX 6627 измеряет сигнал с полупроводникового датчика температуры холодных спаев термопар, который представляет собой диодное включение интегрального *n-p-n*-транзистора [8].

Проведена проверка повышения точности измерительного канала ИИС в результате применения алгоритма аналого-цифровой коррекции структурных компонентов ИК ИИС НК ТФС материалов на основе расчета погрешности и оценки точности измерительного канала системы.

Расчет погрешности измерительного канала ИИС НК ТФС материалов. Погрешность измерительного канала $\delta_{ИК\Sigma}$ определяется нестабильностью источника питания (ИП), погрешностью преобразования измерительных сигналов, датчиками температуры – термопарами СИП, операционными усилителями, входящими в состав СДУ, АЦП, то есть относительная погрешность измерения будет равна сумме погрешностей структурных компонентов ИК ИИС

будет равна сумме погрешностей структурных компонентов ИК ИИС

$$\delta_{ИК\Sigma} = \delta_{ИП} + \delta_{ТП} + \delta_{ЛС} + \delta_{УС} + \delta_{АЦП},$$

где $\delta_{ИП}$, $\delta_{ТП}$, $\delta_{ЛС}$, $\delta_{УС}$, $\delta_{АЦП}$ – погрешности источника питания, термопары, линий связи (термоэлектродных проводов) термопары, усилителя, АЦП соответственно.

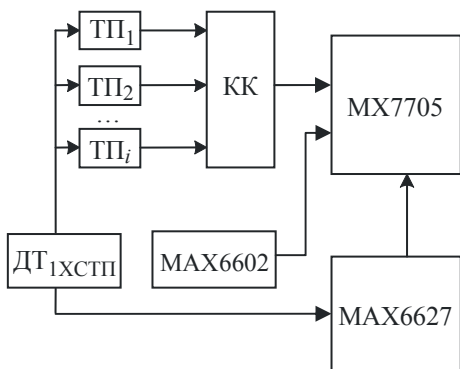


Рис. 8. Структурная схема цифровой коррекции ИК ИИС НК ТФС материалов

Погрешность источника питания $\delta_{ИП}$, %, рассчитывается по треугольному распределению:

$$\delta_{ИП} = \frac{\delta_n}{\sqrt{6}} = \frac{0,2}{\sqrt{6}} = 0,08. \quad (22)$$

Погрешность измерений термопар в составе СИП обусловлена нарушением температурного режима «холодного» спая, внешними дестабилизирующими факторами T_{OC} , случайной погрешностью, связанной с особенностями изготовления термопар (теплоемкость нагревателя, чувствительность, паразитные термо-ЭДС).

Коэффициент преобразования термопары (чувствительность) Q , мВ/град, определяется по формуле

$$Q = \frac{\Delta E_T}{\Delta T},$$

где E_T – термо-ЭДС термопары; ΔT – приращение измеряемой температуры.

Погрешность ДУ определяется изменением напряжения смещения $U_{см}$ операционного усилителя. Как показывают эксперименты, $U_{см} = 25$ мкВ.

При суммировании приведенных погрешностей абсолютная аддитивная погрешность смещения нуля операционного усилителя нормируется по номинальному значению максимального входного сигнала с СИП $U_{вх\max} = 2 \cdot 10^{-3}$ В:

$$\delta_{\max} = \frac{U_{см}}{U_{вх\max}} = \frac{25 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot 10^{-3}} = \pm 0,0125. \quad (23)$$

Погрешность смещения нуля операционного усилителя распределена по нормальному закону. Относительная погрешность операционного усилителя из-за влияния T_{OC} определяется на основе выражений (11) – (14)

$$\delta_{у\с\max} = \frac{\tilde{U}_{у\с\ T_{OC}} - U_{у\с\ н.у}}{U_{у\с\ н.у}} \cdot 100\% = \frac{1,657 - 1,647}{1,647} \cdot 100\% = 0,61\%, \quad (24)$$

где $U_{у\с\ н.у}$ – напряжение на выходе операционного усилителя при нормальных условиях эксплуатации, $\tilde{U}_{у\с\ T_{OC}}$ – напряжение на выходе операционного усилителя при воздействии T_{OC} .

Погрешность АЦП зависит от T_{OC} и нестабильности источника питания $U_{ИП}$, которая влияет на изменение опорного напряжения ($U_{ОП} = 2,5$ В) – мультипликативная погрешность. Погрешность квантования АЦП равна половине единицы младшего разряда. Изменение температуры приводит к начальному смещению нуля АЦП – аддитивная погрешность.

В результате расчетов установлено, что случайная ошибка АЦП $\delta_{сл} = 0,1\%$. Систематическая ошибка (ошибка квантования) $\delta_{кв} = 0,062$.

Выполнен расчет погрешности ИК ИИС НК ТФС материалов в соответствии РД 153-34.0-11.201-97 [9] по метрологическим характеристикам его компонентов. Рассчитывается доверительный интервал с предельно допустимыми нижней $\delta_{н\ ИК}$ и верхней $\delta_{в\ ИК}$ границами, в котором с заданной вероятностью $P = 0,95$ находится погрешность измерительного канала. Результатами расчета являются численные значения границ доверительного интервала $\delta_{н\ ИК} \dots \delta_{в\ ИК}$. Исходные данные для расчета: первичные измерительные преобразователи – хромель-копелевые (ХК) термопары, диапазон измерений температуры – от 0 до 600 °С. Принимается допущение, что погрешности компонентов ИК являются случайными величинами с нормальным законом распределения плотности.

Среднее квадратическое отклонение случайной погрешности ИК $\sigma[\delta_{\text{сл}}]$ определяется геометрическим суммированием средних квадратических отклонений случайных погрешностей компонентов ИК по формуле [9]

$$\sigma[\delta R] = \sqrt{\sum_{i=1}^r \sigma^2[\delta R_i]},$$

где r – число структурных компонентов, входящих в состав ИК ИИС; $\sigma[\delta R_i]$ – среднее квадратическое отклонение случайной погрешности i -го компонента ИК, %.

Среднее квадратическое отклонение случайной составляющей погрешности ИК ИИС НК ТФС материалов определяется в соответствии с [9] по формуле

$$\sigma[\delta R] = \sqrt{\frac{\delta_{\text{ТП}}^2 + \delta_{\text{ЛС}}^2 + \delta_{\text{ИП}}^2 + \delta_{\text{УС}} + \delta_{\text{КК}} + \delta_{\text{АЦП}}}{q}}, \quad (25)$$

где $\delta_{\text{ТП}}$ – основная погрешность термоэлектрического преобразователя ТП, определяемая по ГОСТ Р 50431–92; $\delta_{\text{ТП}} = \pm[(0,0075 \cdot 600^\circ\text{C}) \cdot 100\%]/600^\circ\text{C} = 0,75\%$; $\delta_{\text{ЛС}}$ – дополнительная погрешность от отклонения термо-ЭДС термоэлектродных проводов (линий связи) от номинальной по ГОСТ 24335–80, $\delta_{\text{ЛС}} = \pm 0,6\%$; $\delta_{\text{ИП}}$ – основная погрешность источника питания, определяемая по формуле (22), $\delta_{\text{ИП}} = 0,08\%$; $\delta_{\text{УС}}$ – основная погрешность дифференциального усилителя, рассчитываемая по формулам (23) и (24), $\delta_{\text{УС}} = 0,61\%$; $\delta_{\text{КК}}$ – основная погрешность коммутатора каналов передачи измерительной информации с системы измерительных преобразователей, $\delta_{\text{КК}} = \pm 0,1\%$; $\delta_{\text{АЦП}}$ – основная погрешность аналого-цифрового преобразователя, $\delta_{\text{АЦП}} = \pm 0,4\%$; q – число ДФ, для которых нормированы изменения метрологических характеристик компонентов ИК.

В результате расчета по формуле (25) среднее квадратическое отклонение суммарной погрешности ИК ИИС НК ТФС материалов будет равно

$$\sigma[\delta R] = \sqrt{\frac{(0,75)^2 + (0,6)^2 + (0,08)^2 + (0,61)^2 + (0,1)^2 + (0,4)^2}{3}} = 0,61\%,$$

$$\sigma[\delta_{\text{сл}}] = \pm 0,61\%.$$

Предельно допускаемое значение погрешности ИК ИИС НК ТФС материалов рассчитывается по формуле [9]

$$\delta_{\text{ИК НК(В)}} = \pm K_{\text{н}} \sigma[\delta_{\text{сл}}].$$

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

$$\delta_{\text{ИК НК(В)}} = \pm(1,96 \cdot 0,61) = \pm 1,2\%.$$

Таким образом, принимается значение нижней (верхней) границы доверительного интервала, в котором с вероятностью $P = 0,95$ находится погрешность ИК ИИС НК ТФС материалов

$$\delta_{\text{ИК НК(В)}} = \pm 1,2\%.$$

**Погрешности измерений теплопроводности исследуемых материалов
и их метрологические характеристики**

Погрешности и их характеристики	ПММ	Рипор
$M[\Delta\lambda_i]$	$1,63 \cdot 10^{-3}$	$6,81 \cdot 10^{-4}$
$\sigma[\Delta\lambda_i]$	$1,14 \cdot 10^{-3}$	$4,52 \cdot 10^{-4}$
$M[\delta\Delta\lambda_i], \%$	0,91	2,41
$\sigma[\delta\Delta\lambda_i], \%$	0,62	1,59
$\Delta_{\text{пред}}\lambda_i$	$4,3 \cdot 10^{-3}$	$1,63 \cdot 10^{-3}$
$\delta_{\text{пред}}\lambda_i$	$2,15 \cdot 10^{-2}$	$5,71 \cdot 10^{-2}$

Проведены экспериментальные исследования разработанной ИИС НК ТФС материалов. В таблице 1 приведены результаты определения погрешностей измерений λ образцовых мер из ПММ [10] 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 – $\sigma[\Delta\lambda_i]$, $\sigma[\delta\Delta\lambda_i]$; предельные абсолютные и относительные погрешности – $\Delta_{\text{пред}}\lambda_i$, $\delta_{\text{пред}}\lambda_i$.

Из анализа данных таблицы 1 следует, что максимальные значения систематической погрешности $M[\delta\Delta\lambda_i]=2,41$ и случайной составляющей погрешности $\sigma[\delta\Delta\lambda_i]=1,59$ соответствуют требованиям к точности определяемых параметров теплофизических свойств исследуемых материалов; систематическая и случайная составляющие погрешности измерений значительно снижаются при применении алгоритма аналого-цифровой коррекции технического несовершенства структурных компонентов ИИС ТФС материалов при воздействии дестабилизирующих факторов.

Выводы

1. Разработана математическая модель процесса измерений параметров ТФС – коэффициентов тепло- и температуропроводности с учетом погрешностей измерений структурных компонентов ИИС при воздействии дестабилизирующих факторов.

2. Созданы математические модели структурных компонентов измерительного канала ИИС, содержащие параметры основных воздействующих факторов, которые корректируются в процессе измерения.

3. Разработан алгоритм аналого-цифровой коррекции технического несовершенства структурных компонентов ИИС по полученным аппроксимирующим зависимостям их выходных измерительных сигналов от температуры и параметров ТФС от дестабилизирующих факторов, в результате применения которого предельно допускаемое значение погрешности измерительного канала составляет $\pm 1,2 \%$.

4. Решена задача повышения точности ИИС НК ТФС материалов. Как показывают результаты экспериментальных исследований ИИС, относительная погрешность измерения коэффициентов тепло- и температуропроводности не более 3 %.

Полученные результаты исследований рекомендуется использовать для повышения точности разрабатываемых информационно-измерительных систем неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов.

Список литературы

1. 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.
2. Муромцев, Д. Ю. Прогнозирование и компенсация возмущения в системах оптимального управления / Д. Ю. Муромцев, С. В. Артемова, А. Н. Грибков // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2003. – Т. 9, № 4. – С. 632 – 637.
3. Советов, Б. Я. Моделирование систем : учеб. для вузов / Б. Я. Советов, С. А. Яковлев – 4-е изд. стер. – М. : Высшая школа, 2005. – 343 с.
4. Селиванова, З. М. Проектирование интеллектуальных информационно-измерительных систем контроля теплофизических свойств материалов / З. М. Селиванова, А. А. Самохвалов // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2010. – Т. 16, № 2. – С. 273 – 283.
5. Лыков, А. В. Теория тепло- и массопереноса / А. В. Лыков. – М. : Госэнергоиздат, 1963. – 536 с.
6. Пат. 2301996 Российская Федерация, МПК G01N 25/00. Способ неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов и изделий / Ю. Л. Муромцев, З. М. Селиванова ; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «Тамб. гос. техн. ун-т». – № 2005130834/28 ; заявл. 04.10.2005 ; опубл. 27.06.2007, Бюл. № 18. – 15 с.
7. ГОСТ Р 8.585–2001. Государственная система обеспечения единства измерений Термопары. Номинальные статические характеристики преобразования. – Взамен ГОСТ Р 50431–92, МИ 2559–99 ; введен 2002–07–01. – М. : Стандартинформ, 2010. – 82 с.
8. Хоровиц, П. Искусство схемотехники : пер. с англ. В 2-х т. с доп. Т. 1 / П. Хоровиц, У. Хилл. – М. : Мир, 1986. – 600 с.
9. 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» 19.08.97 : ввод в действие с 1999–02–01. – М. : ОРГРЭС, 1999. – 17 с.
10. ГОСТ 17622–72. Стекло органическое техническое. Технические условия. – Введ. 1973–07–01. – М. : Изд-во стандартов, 1989. – 18 с.

Mathematical Models and Algorithms for Improving Information-Measuring Systems of Nondestructive Testing of Thermal Physical Properties of Materials

Z. M. Selivanova, T. A. Hoang

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

Keywords: correction algorithm; information-measuring system; mathematical model; thermal properties of materials.

Abstract: The authors propose mathematical models of the measurement process in the information-measuring system of non-destructive testing of thermal properties of materials – coefficients of heat conductivity and thermal conductivity under the

influence of destabilizing factors and structural components of the measuring channel of the system taking into account the measurement errors. The algorithm of analog-to-digital correction of the structural components of the system was obtained by measuring channel approximating dependences of the output signals on the impact of external factors to resolve the technical imperfections of the system and increase the accuracy of the measurement results. The algorithm is implemented in the developed information-measuring system. The proposed algorithm is different from the existing application in its implementation modules of analog-to-digital and digital correction of measuring channel components, which significantly improves the accuracy of transmission and transformation of information.

References

1. 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.
2. Muromtsev D.Y., Artemova S.V., Gribkov A.N. [Forecast and Disturbance Compensation in Optimal Control Systems], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2003, vol. 9, no. 4, pp. 632-637. (In Russ., abstract in Eng.)
3. Sovetov B.J., Yakovlev S.A. *Modelirovanie sistem* [Modeling systems], Moscow: Vysshaya shkola, 2005, 343 p. (In Russ.)
4. Selivanova Z.M., Samohvalov A.A. [Design of intelligent information and measuring control systems of thermal properties of materials], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2010, vol. 16, no. 2, pp. 273-283. (In Russ., abstract in Eng.)
5. Lykov A.V. *Teoriya teplo- i massoperenosa* [The theory of heat and mass transfer], Moscow: Gosenergoizdat, 1963, 536 p.
6. Muromtsev Y.L., Selivanova Z.M., Tambov State Technical University, *Sposob nerazrushayushchego kontrolya teplofizicheskikh svoystv materialov i izdelii* [Mode of nondestructive control of heat-transfer properties of materials and articles], Russian Federation, 2007, Pat. 2301996. (In Russ., abstract in Eng.)
7. Federal Agency on Technical Regulating and Metrology, *GOST R 8.585-2001. Gosudarstvennaya sistema obespecheniya edinstva iz-merenii Termopary. Nominal'nye staticheskie kharakteristiki preobrazovaniya* [State Standards of the Russian Federation 8.585-2001. State system for ensuring ilie uniformity of measurements. Thermocouples. Nominal static characteristics of conversion], Moscow: Standartinform, 2010, 82 p. (In Russ.)
8. Horowitz P., Hill W. *The art of electronics*, Cambridge: Cambridge University Press, 1980.
9. Department of Development Strategy and the Science and Technology Policy of RAO "UES of Russia", *RD 153-34.0-11.201-97. Metodika opredeleniya obobshchennykh metrologicheskikh kharakteristik izmeritel'nykh kanalov IIS i ASUTP po metrologicheskim kharakteristikam agregatnykh sredstv izmerenii* [Regulatory documents 153-34.0-11.201-97. Technique generalized definition of the metrological characteristics IMS measuring channels and the control system for the metrological performance aggregation measurements], Moscow: ORGRES, 1999, 17 p. (In Russ.)
10. Federal Agency on Technical Regulating and Metrology, *GOST 17622-72. Steklo organicheskoe tekhnicheskoe. Tekhnicheskie usloviya* [Russian Interstate Standards 17622-72. Industrial organic plastic. Specifications], Moscow: Izdatel'stvo standartov, 1989, 18 p. (In Russ.)

Mathematische Modelle und Algorithmus für die Vervollkommnung des Informationsmeßsystems der nicht zerstörenden Kontrolle der wärmephysikalischen Eigenschaften der Materialien

Zusammenfassung: Es sind die mathematischen Modelle des Prozesses der Messung im Informationsmeßsystem der nicht zerstörenden Kontrolle der Eigenschaften der Materialien – der Koeffizienten der Wärme- und Temperaturleitfähigkeit bei der Einwirkung der destabilisierenden Faktoren und der strukturellen Komponenten des Messkanals des Systems unter Berücksichtigung der Fehler der Messungen angeboten. Es ist der Algorithmus der Analogdigitalkorrektur der strukturellen Komponenten des Messkanals des Systems nach den bekommenen approximierenden Abhängigkeiten ihrer Ausgangssignale von den einwirkenden äußerlichen Faktoren für die Beseitigung der technischen Mangelhaftigkeit des Systems und die Lösung der Aufgabe der Erhöhung der Genauigkeit der Ergebnisse der Messungen geschaffen, der in entwickelten Informationsmeßsystem realisiert ist. Der angebotene Algorithmus unterscheidet sich von den existierenden durch die Anwendung bei seiner Realisierung der Module der Analogdigital- und Digitalkorrektur der Komponenten des Messkanals, was die Genauigkeit der Sendung und der Transformation der Informationen wesentlich erhöht.

Modèles mathématiques et algorithme pour le perfectionnement du système de mesure informatique du contrôle non destructif des propriétés thermophysiques des matériaux

Résumé: Sont proposés les modèles mathématiques du processus de mesure du système de mesure informatique du contrôle non destructif des propriétés thermophysiques des matériaux - des coefficients de la conductibilité de chaleur et de température sous l'influence des facteurs déstabilisants et des composants structurels du canal de mesure du système compte tenu des erreurs de mesure. Est créé l'algorithme la correction analogique-numérique des composants structurels du canal de mesure du système d'après les dépendances approximatives des signaux de sortie de l'impact de facteurs externes ainsi que la résolution du problème de l'amélioration de la précision des résultats de mesure. L'algorithme proposé est différent des applications existantes et augmente considérablement la précision de la transmission et la transformation de l'information.

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: *Муромцев Дмитрий Юрьевич* – доктор технических наук, профессор, проректор по научно-инновационной деятельности, ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.
