

**ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ
СИСТЕМА ДИСТАНЦИОННОГО КОНТРОЛЯ
ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ
МАТЕРИАЛОВ В УСЛОВИЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ
ДЕСТАБИЛИЗИРУЮЩИХ ФАКТОРОВ**

З. М. Селиванова, Д. С. Куренков

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

Ключевые слова: дестабилизирующие факторы; дистанционный режим контроля; допусковый контроль; комплекс теплофизических свойств; теплоизоляционные строительные материалы.

Аннотация: Предложена методика разработки математической модели интеллектуальной информационно-измерительной системы (ИИИС) и ее структуры, предназначенной для оперативного и точного неразрушающего контроля теплофизических свойств (ТФС) энергетически эффективных теплоизоляционных материалов (ТМ) в режиме дистанционного контроля. Математическая модель процессов измерений в интеллектуальной системе при дистанционном контроле комплекса ТФС исследуемых материалов представлена в виде функциональной зависимости выходных сигналов структурных компонентов измерительного канала информационно-измерительной системы от воздействия входных сигналов с учетом параметров и характеристик компонентов системы, влияющих дестабилизирующих факторов. Создана математическая модель допускового контроля ТФС ТМ, применяемая в ИИИС дистанционного мониторинга для обеспечения качества выпускаемых материалов на производстве.

Введение

При строительстве зданий и сооружений основным фактором, влияющим на их стоимость, долговечность, энергосбережение и экологическую безопасность, является качество применяемых материалов. Снизить затраты на отопление до 40 % и в 4 – 6 раз сократить энергопотери возможно, применяя тепловую изоляцию зданий и сооружений при использовании энергоэффективных теплоизоляционных материалов. Энергосбережение обеспечивается при теплоизоляции внешних и внутренних конструкций объектов и теплоподводящих магистралей теплоизоляционными материалами, которые могут сохранять свои теплоизоляционные свойства не менее 80 лет.

В настоящее время быстрыми темпами растут цены на энергоносители, поэтому задача улучшения энергоэффективности зданий и сооружений является важной и актуальной. Решение задачи возможно при использовании в строительстве объектов качественных теплоизоляционных материалов: минераловатных плит и матов, пенопластов и других, с теплопроводностью в диапазоне 0,03...0,06 Вт/(м·К). Для оценки качества материалов находится один из важнейших параметров – их теплопроводность, которая определяется различными информационно-измерительными системами (ИИС). Применение интеллектуальной ИИС (ИИИС) для дистанционного контроля теплофизических свойств (ТФС) теплоизоляционных материалов (ТМ) позволит повысить их качество.

Дистанционный мониторинг качества ТМ зданий, сооружений и других объектов в различных условиях эксплуатации, при воздействии дестабилизирующих факторов актуален и необходим для своевременного обнаружения нарушений надлежащей теплоизоляции объектов.

Известны следующие ИИС: TRSYS01, предложенная компанией Hukseflux (Делфт, Нидерланды); UnithermTM 2022 [1]. Системы весьма точно определяют теплопроводность материалов, но недостаточно оперативно. В работе [2] рассмотрена ИИС с элементами искусственного интеллекта, определяющая теплопроводность материалов оперативно, но отсутствует дистанционный контроль теплопроводности. Интеллектуальные информационно-измерительные системы с использованием методов искусственного интеллекта рассмотрены в работах известных зарубежных ученых, основоположников интеллектуальных измерений, систем интеллектуального окружения и интеллектуальных сред [3]. Вопросы создания интеллектуальных средств измерений изложены в работе [4]. Анализ работ показывает, что представленные ИИИС имеют недостаточно высокое быстродействие и значительную погрешность измерений исследуемых параметров, обусловленную воздействием дестабилизирующих факторов. Рассмотрение известных ИИИС дистанционного контроля (ДК) ТМ показывает, что существенный их недостаток – недостаточная точность.

Цель исследования – повышение точности дистанционного контроля качественных свойств ТМ с использованием ИИИС в условиях воздействия дестабилизирующих факторов.

Задачи дистанционного контроля отражают концепцию комплексного применения методов дистанционного контроля, аппаратных и программных средств, методов искусственного интеллекта для телеметрического сбора измерительной информации от датчиков, контролирующих теплофизические свойства ТМ в дистанционном режиме. Применение распределенной объектно-ориентированной ИИИС неразрушающего контроля ТФС ТМ, создание телекоммуникационной среды позволит выполнять непрерывный или периодический мониторинг и анализ качественных свойств энергоэффективных материалов [5, 6].

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи: разработать математические модели ИИИС дистанционного контроля ТМ, процесса теплофизического измерения в ИИИС, допускового контроля теплофизических свойств ТМ, а также создать структуру ИИИС, функционирующую в дистанционном режиме. Решение поставленных задач основано на использовании теорий теплопроводности и систем, методов искусственного интеллекта.

Математическая модель интеллектуальной информационно-измерительной системы дистанционного контроля теплоизоляционных материалов

Построение модели ИИИС основано на трех составляющих: цели, окружающей среде, внутреннем состоянии измерительного средства. Разработка математической модели системы предполагает предварительные процессы формирова-

ния архитектуры и алгоритма работы ИИИС ДК ТФС материалов; разработки компонентов измерительной системы и алгоритмов их информационного обмена с учетом окружающей среды при обработке измерительных данных в интеллектуальной системе.

Для создания модели системы определяются: методы для проведения дистанционного контроля параметров теплофизических свойств теплоизоляционных материалов и метрологических анализов результатов измерений; ряд переменных математической модели ИИИС; сведения о параметрах структурных компонентов системы; информация о дестабилизирующих факторах (ДФ) и критериях оценки работы системы; априорные данные об исследуемых материалах (ИМ) и формируемых измерительных ситуациях (ИС). Также необходимо выполнить оценку достаточности полученных данных об исследуемых материалах, измерительной ситуации, дестабилизирующих факторах, проведенной классификации теплоизоляционных материалов. Оценка качественных параметров и эффективность процессов работы ИИИС с учетом влияния ДФ выполняется с помощью выбранной совокупности критериев.

Достоверность приведенной концепции формирования математической модели позволяет выполнить оценку разрабатываемой модели. При оценке модели проверяются поставленные задачи, достоверность априорных данных, методика создания модели, параметры входящих в модель переменных, полученные аппроксимирующие зависимости.

Необходимость учета воздействия множества влияющих внешних факторов, которые оказывают влияние на принятие решения в интеллектуальной информационно-измерительной системе и обеспечение адекватности математической модели ИИИС, обуславливает задачу применения нечетких моделей при моделировании интеллектуальной системы.

С использованием предложенной методики для точного и достоверного определения комплекса ТФС теплоизоляционных материалов разработана математическая модель интеллектуальной информационно-измерительной системы в виде кортежа множеств

$$\mathbf{M}_{\text{ИИИС}} = \langle \mathbf{X}, \mathbf{V}_{\text{ДФ}}, \mathbf{V}_{\text{М}}, \mathbf{V}_{\text{пр}} \rangle,$$

где $\mathbf{X} = \{X_i, i = 1, \dots, 3\}$ – множество входных воздействий (T_i – температура, τ_i – время, F_i – частота); $\mathbf{V}_{\text{ДФ}} = \{V_{\text{ДФ}_i}, i = 1, \dots, 4\}$ – множество лингвистических переменных, соответствующих дестабилизирующим факторам ($T_{\text{ОС}}$ – данные о температуре окружающей среды (ОС), ψ_i – сведения о шероховатости ИМ, RT_i – контактное сопротивление в системе «Измерительный зонд – ИМ», W_i – влажность); $\mathbf{U} = \{U_i, i = 1, \dots, 3\}$ – множество выходных параметров теплофизических свойств ИМ (λ – коэффициент теплопроводности, α – коэффициент температуропроводности, c – теплоемкость); $\mathbf{V}_{\text{М}} = \{V_{\text{М}_i}, i = 1, \dots, k\}$ – множество методов неразрушающего контроля ТФС материалов; $\mathbf{V}_{\text{пр}} = \{V_{\text{пр}_i}, i = 1, \dots, r\}$ – множество методов принятий решений.

Математическая модель интеллектуальной системы применяется при выборе оптимальной архитектуры создаваемой ИИИС при учете перспективы расширения класса по теплопроводности теплоизоляционных строительных материалов при определении их теплофизических свойств в дистанционном режиме.

Математическая модель процесса теплофизических измерений

Предложена математическая модель процесса теплофизических измерений с использованием ИИИС ТФС теплоизоляционных материалов. При формализованном математическом описании ИИИС измерительный канал системы представлен входящими в его состав подсистемами: первичных измерительных преобразователей (СИП), нормирующих усилителей (НУ), аналого-цифровых преобразователей (АЦП), с соответствующими значениями входных сигналов, параметров, воздействующих дестабилизирующих факторов, выходных сигналов каждой подсистемы.

Математическая модель процессов измерений в интеллектуальной информационно-измерительной системе ТФС материалов представлена системой зависимостей

$$\begin{cases} U_{СИП}(Tt) = f_1(T_1, T_2, \dots, T_n; P_{ДФ1}, P_{ДФ2}, \dots, P_{ДФi}; B_1, B_2, \dots, B_{mi}, t); \\ U_{НУ}(T) = f_2(U_{СИП1}, U_{СИП2}, \dots, U_{СИПj}; P_{ДФ1}, P_{ДФ2}, \dots, P_{ДФN}; B_1, B_2, \dots, B_b, t); \\ K_{АЦП}(T) = f_3(U_{НУ1}, U_{НУ2}, \dots, U_{НУk}; P_{ДФ1}, P_{ДФ2}, \dots, P_{ДФd}; B_1, B_2, \dots, B_c, t); \\ E_{ТФС}(T_n) = f_4(T_{k1}, T_{k2}, \dots, T_{kn}; \Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_a; B_1, B_2, \dots, B_T, t), \end{cases}$$

где $U_{СИП}$ – сумма выходных напряжений системы измерительных преобразователей; T_1, T_2, \dots, T_n – значение температуры рабочего спая термопары; $P_{ДФ1}, P_{ДФ2}, \dots, P_{ДФi}$ – вид воздействующих дестабилизирующих факторов на систему измерительных преобразователей – температуры среды, шероховатости исследуемых поверхностей объектов, влажности, контактного сопротивления; B_1, B_2, \dots, B_{mi} – параметры термодатчика (чувствительность, линейность характеристики, класс точности, предел возможных изменений температуры); t – время; $U_{НУ}$ – напряжение с выхода нормирующего усилителя; $U_{СИП1}, U_{СИП2}, \dots, U_{СИПj}$ – выходные значения сигналов с СИП, поступающие на вход усилителя; $P_{ДФ1}, P_{ДФ2}, \dots, P_{ДФN}$ – воздействующие ДФ на нормирующие усилители (изменение температуры среды, напряжений питания, сопротивлений нагрузки); B_1, B_2, \dots, B_b – значения параметров нормирующих усилителей (коэффициентов усиления, входного и выходного сопротивлений); $K_{АЦП}$ – выходной код, пропорциональный сигналу, поступающему на аналого-цифровой преобразователь (АЦП) с нормирующего усилителя: $U_{НУ1}, U_{НУ2}, \dots, U_{НУk}$; $P_{ДФ1}, P_{ДФ2}, \dots, P_{ДФd}$ – воздействующие ДФ на АЦП (различные виды помех и шумов); B_1, B_2, \dots, B_c – виды статических и динамических параметров АЦП; $E_{ТФС}$ – значения параметров ТФС теплоизоляционных материалов (коэффициентов тепло- и температуропроводности, теплоемкости); $T_{k1}, T_{k2}, \dots, T_{kn}$ – температура в контролируемой точке ТМ интеллектуальным зондом; $\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_a$ – погрешности аппроксимации функциональной зависимости коэффициентов тепло- и температуропроводности от температуры в контролируемых точках ТМ; B_1, B_2, \dots, B_T – величины констант, определяемых в процессе градуировки ИИИС.

В интеллектуальной информационно-измерительной системе применяется метод определения теплофизических свойств теплоизоляционных материалов частотно-импульсного теплового воздействия линейным нагревателем интеллектуального измерительного зонда на поверхность исследуемого материала и реги-

страции температурно-временной зависимости $T(x, \tau)$ в контактной области зонда и исследуемого объекта в заданные моменты контроля T_n и T_m . Температура в результате формирования n -го импульса рассчитывается следующим образом [7]

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

где Q – мощность источника тепла; F – частота тепловых импульсов; x – расстояние между линейным источником тепла и контролируемой точкой; τ – время.

Полученная измерительная информация записывается в базу данных ИИИС и применяется при расчете комплекса теплофизических свойств теплоизоляционных материалов.

Используя измеренные значения температур $T(x, n)$ и $T(x, m)$, на основе формулы (1) получены формулы для определения параметров ТФС материалов (коэффициенты тепло- и температуропроводности):

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

Аналоговая измерительная информация температур T_n и T_m преобразуется в цифровой код, используя математическую модель АЦП [7] и формулу (2) для расчета параметров ТФС теплоизоляционных материалов, следующим образом:

$$K_{ИК}(T_n) = \frac{[(U_{СИП}(T_n) + \Delta U_{СИП}(T_n)) K_{ДУ} + \Delta U_{ДУ} ДФ(T_n)]}{3 \cdot 10^{-5}} + 0,062;$$

$$K_{ИК}(T_m) = \frac{[(U_{СИП}(T_m) + \Delta U_{СИП}(T_m)) K_{ДУ} + \Delta U_{ДУ} ДФ(T_m)]}{3 \cdot 10^{-5}} + 0,062;$$

$$\begin{aligned} \alpha &= B_1 \exp\left(B_2 \frac{K_{ИК}(T_n)}{K_{ИК}(T_m)}\right) = \\ &= B_1 \exp\left(B_2 \frac{\frac{[(U_{СИП}(T_n) + \Delta U_{СИП}(T_n)) K_{ДУ} + \Delta U_{ДУ} ДФ(T_n)]}{3 \cdot 10^{-5}} + 0,062}{\frac{[(U_{СИП}(T_m) + \Delta U_{СИП}(T_m)) K_{ДУ} + \Delta U_{ДУ} ДФ(T_m)]}{3 \cdot 10^{-5}} + 0,062}}\right); \\ \alpha &= B_1 \exp\left(B_2 \frac{[(U_{СИП}(T_n) + \Delta U_{СИП}(T_n)) K_{ДУ} + \Delta U_{ДУ} ДФ(T_n)] + 1,86 \cdot 10^{-6}}{[(U_{СИП}(T_m) + \Delta U_{СИП}(T_m)) K_{ДУ} + \Delta U_{ДУ} ДФ(T_m)] + 1,86 \cdot 10^{-6}}}\right); \\ \lambda &= \frac{1}{K_{ИК}(T_m)} B_3 \ln(B_4 \alpha) = \\ &= \frac{1}{\frac{[(U_{СИП}(T_m) + \Delta U_{СИП}(T_m)) K_{ДУ} + \Delta U_{ДУ} ДФ(T_m)]}{3 \cdot 10^{-5}} + 0,062}} B_3 \ln(B_4 \alpha); \end{aligned}$$

$$\lambda = \frac{3 \cdot 10^{-5}}{\left[(U_{\text{СИП}}(T_m) + \Delta U_{\text{СИП}}(T_m)) K_{\text{ДУ}} + \Delta U_{\text{ДУ ДФ}}(T_m) \right] + 1,86 \cdot 10^{-6}} B_3 \ln(B_4 \alpha).$$

Математическая модель допускового контроля параметров теплофизических свойств теплоизоляционных строительных материалов

Модель применяется в ИИИС для оценки соответствия контролируемых параметров ТФС исследуемых материалов допустимым значениям.

На производстве осуществляется допусковый контроль выпускаемых теплоизоляционных материалов – минеральных ват, пенополиуретанов, матов из стекловолокна, рубероида, пенобетонов и др. Контроль теплопроводности в низком диапазоне теплопроводности ТМ является сложным и требует аналитического описания исследуемого объекта (**ИО**), чтобы обеспечить необходимую точность дистанционного контроля ИИИС параметров ТФС ТМ.

Качество изготавливаемых материалов на производстве согласно требованиям нормирующих документов [8] определяется точностью технологических процессов их производства, а также контролем теплопроводности выпускаемой продукции. Обеспечение точности технологического процесса достигается при соответствии заданному допуску его режимных параметров.

Разработана математическая модель допускового контроля режимных параметров технологического процесса изготовления материалов и теплопроводности теплоизоляционных строительных материалов на основе исследования теплофизических свойств различных видов материалов, обоснования требуемой точности дистанционного контроля с использованием ИИИС, анализа дестабилизирующих факторов, влияющих на технологический процесс, предполагаемой архитектуры ИИИС, установления достоверности измерительной информации.

Постановка задачи: измерить теплопроводность теплоизоляционных строительных материалов (**СМ**) $\lambda_{\text{СМ}}$ с требуемой относительной погрешностью δ_λ , при заданном метрологическом уровне ИИИС $\delta_{\text{ИИИС}}$, контролируя дистанционно режимные параметры технологического процесса производства теплоизоляционных материалов $Q_{\text{РП}}$, дестабилизирующие факторы $Q_{\text{ДФ}}$ и определяя их соответствие допустимым значениям в заданные интервалы времени τ .

Математическую модель допускового контроля теплопроводности $\lambda_{\text{СМ}}$ строительных материалов можно представить в общем виде

$$\lambda_{\text{СМ}} = f(Q_{\text{РП}}, Q_{\text{ДФ}}, \delta_\lambda, \delta_{\text{ИИИС}}, \tau). \quad (3)$$

Математическая модель допускового контроля теплопроводности материалов приведена в виде совокупности аналитических зависимостей параметров модели (3):

$$\lambda = f(Q_{\text{РП}}), \quad \lambda = f(Q_{\text{ДФ}}), \quad \lambda = f(\delta_{\text{ИИИС}}). \quad (4)$$

Аналитическая зависимость $\lambda = f(Q_{\text{РП}})$ параметров математической модели (4) включает следующие компоненты:

$$\lambda = f(Q_{\text{РП}}) = f(C_{\text{ИС}}, C_{\text{МД}}, Q_{\text{СК}}), \quad (5)$$

где $C_{\text{ИС}}$ – концентрация исходного сырья; $C_{\text{МД}}$ – концентрация модифицирующих добавок; $Q_{\text{СК}}$ – связующие компоненты.

Получены аппроксимирующие зависимости компонентов выражения (5):

$$\lambda^* = f(C_{\text{ИС}}) = 2,21 \cdot 10^{-4} C_{\text{ИС}} + 1,41 \cdot 10^{-2};$$

$$\lambda^* = f(C_{\text{МД}}) = 2,52 \cdot 10^{-4} C_{\text{МД}} + 1,21 \cdot 10^{-2};$$

$$\lambda^* = f(Q_{\text{СК}}) = 2,13 \cdot 10^{-4} Q_{\text{СК}} + 2,73 \cdot 10^{-2}.$$

Аналитическая зависимость $\lambda = f(Q_{\text{ДФ}})$ параметров математической модели (4) включает следующие компоненты:

$$\lambda = f(Q_{\text{ДФ}}) = f(T_{\text{ОС}}, W_{\text{ОС}}), \quad (6)$$

где $T_{\text{ОС}}$, $W_{\text{ОС}}$ – температура и влажность окружающей среды соответственно.

Получены аппроксимирующие зависимости компонентов выражения (6):

$$\lambda^* = f(T_{\text{ОС}}) = 6,14 \cdot 10^{-4} T_{\text{ОС}} + 2,71 \cdot 10^{-2};$$

$$\lambda^* = f(W_{\text{ОС}}) = 2,23 \cdot 10^{-4} W_{\text{ОС}} + 2,79 \cdot 10^{-2}.$$

Получена аппроксимирующая зависимость $\lambda = f(\delta_{\text{ИИИС}})$ математической модели (4)

$$\lambda^* = f(\delta_{\text{ИИИС}}) = 0,412 \delta_{\text{ИИИС}} + 0,572,$$

где $\delta_{\text{ИИИС}}$ – относительная погрешность измерения λ с помощью ИИИС.

Область существования математической модели (3) определяется следующими ограничениями:

$$Q_{\text{РП}} \in Q_{\text{РП доп}}; \quad \delta_{\text{ИИИС}} \in \delta_{\text{ИИИС доп}};$$

$$Q_{\text{ДФ}} \in Q_{\text{ДФ доп}}; \quad \delta_{\lambda} \in \delta_{\lambda \text{ доп}},$$

где $Q_{\text{РП доп}}$, $Q_{\text{ДФ доп}}$, $\delta_{\lambda \text{ доп}}$, $\delta_{\text{ИИИС доп}}$ – области допустимых значений контролируемых параметров при допусковом контроле теплопроводности строительных материалов с использованием ИИИС.

Математическая модель допускового контроля теплопроводности строительных материалов применяется в информационном виде в базе знаний разработанной ИИИС [9] дистанционного контроля ТМ при определении комплекса ТФС теплоизоляционных материалов с требуемой погрешностью не более 5 %.

Структура ИИИС ДК ТФС теплоизоляционных материалов

На рисунке 1 представлена структурная схема ИИИС ДК ТФС материалов. Контроль параметров ТФС материалов выполняется непосредственно в производственном цехе предприятия по изготовлению различных видов теплоизоляционных строительных материалов, на выходе технологической линии, куда поступает уже готовая продукция. Выпускаемые минеральные ваты – гераклит, изовент, изоруп, изофас и другие, отличаются незначительно по величине теплопроводности: в пределах 0,03...0,06 Вт/мК. Поэтому для точного контроля параметров ТФС минеральных ват в блоке принятия решений ИИИС реализуется процедура выбора оптимальных (рациональных) значений мощности теплового воздействия на исследуемые объекты и оптимальные временные промежутки между проводи-



Рис. 1. Структурная схема интеллектуальной информационно-измерительной системы дистанционного контроля теплоизоляционных материалов

мыми теплофизическими измерениями на основе созданных производственных правил, записанных в базу знаний системы. Заданные оптимальные режимные параметры в устройстве обработки телеметрических данных с исследуемого объекта, выполненном на базе микроконтроллера, с помощью устройства управления передаются в интеллектуальный измерительный зонд (ИИЗ) при проведении теплофизических измерений с помощью метода линейного мгновенного источника тепла. Интеллектуальный измерительный зонд реализует интеллектуальные процедуры, выбирая оптимальные режимные параметры при проведении теплофизического эксперимента по измерительным данным предварительно снятой тестовой термограммы. Полученная измерительная информация с исследуемых теплоизоляционных материалов через коммутатор каналов и радиомодем в виде радиосигнала поступает в ИИИС, где осуществляется обработка измерительных данных и расчет параметров ТФС теплоизоляционных материалов – коэффициентов тепло- и теплопроводности, теплоемкости.

Если рассчитанные значения параметров ТФС материалов отличаются от допустимых значений, указанных в нормативных документах на изготовление теплоизоляционных материалов, то данная информация поступает в технологический отдел предприятия для принятия решения по коррекции технологического процесса изготовления теплоизоляционных материалов для повышения их качества. Анализ, статистическая обработка измерительной информации об исследуемых объектах и ее хранение выполняются на персональном компьютере и применяются для дальнейшего совершенствования технологического процесса изготовления теплоизоляционных материалов.

В модуль алгоритмического обеспечения ИИИС программным способом записаны разработанные математические модели ИИИС ТФС материалов, процесса теплофизических измерений, допускового контроля ТФС теплоизоляционных материалов, алгоритмы работы ИИИС: идентификации измерительной информации, измерение параметров ТФС материалов, коррекции выходных параметров компонентов ИИИС на влияние ДФ. Базы данных и знаний содержат следующую информацию: параметры и характеристики исследуемых теплоизоляционных материалов, режимные параметры работы системы, а также аппроксимирующие функции, позволяющие выполнить коррекцию полученной измерительной информации в результате влияния воздействующих дестабилизирующих факторов на структурные компоненты измерительного канала ИИИС ДК ТФС материалов.

Обоснование точности информационно-измерительной системы дистанционного контроля теплофизических свойств теплоизоляционных строительных материалов

Для обоснования точности ИИИС ДК ТФС материалов рассмотрены характеристики погрешностей, полученные при обработке результатов измерений ТФС теплоизоляционных материалов с использованием теплового импульсного метода контроля. Анализ математической модели измерительных процессов в ИИИС позволил определить структуру суммарной относительной погрешности $\delta_{\Sigma} P_{\text{ТФС}}$ при ДК ТФС ТМ, которая формируется в результате преобразования измерительной информации T_i в структурных компонентах ИИС и использования аппроксимирующих зависимостей $\delta_{\text{апТФС}}$ при расчете параметров λ , α , c с учетом дестабилизирующих факторов $\delta_{P_{\text{ДФ}}}$:

$$\delta_{\Sigma} P_{\text{ТФС}} = \delta_{\text{ИИЗ}} T_i + \delta_{\text{НУ}} T_i + \delta_{\text{АЦП}} K_{T_i} + \delta_{\text{ИП}} + \delta_{\text{апТФС}} + \delta_{P_{\text{ДФ}}},$$

где $\delta_{\text{ИИЗ}} T_i$, $\delta_{\text{НУ}} T_i$, $\delta_{\text{АЦП}} K_{T_i}$, $\delta_{\text{ИП}}$ – погрешности измерения ИИЗ, НУ, АЦП (K_{T_i} – измерительный сигнал в двоичном коде) и источника питания соответственно.

Погрешности измерения в ИИИС T_i , коэффициентов α и λ определяются по формулам:

а) температуры

$$\delta T_i = \delta_{\text{ИИЗ}} T_i + \delta_{\text{НУ}} T_i + \delta_{\text{АЦП}} K_{T_i} + \delta_{\text{ИП}} + \delta_{\psi} T_i + \delta_W T_i + \delta_{\text{ДФ}} T_i + \delta_R T_i,$$

где $\delta_{\psi} T_i$, $\delta_W T_i$, $\delta_{\text{ДФ}} T_i$, $\delta_R T_i$ – погрешности из-за шероховатости поверхности ТМ, в результате изменения влажности, от влияния ДФ, из-за наличия контактных сопротивлений R соответственно.

б) коэффициента температуропроводности

$$\delta \alpha_i = \delta_{K1} \alpha_i + \delta_{K2} \alpha_i + \delta T_n \alpha_i + \delta T_m \alpha_i,$$

где δ_{K1} , δ_{K2} – погрешности расчета калибровочных коэффициентов K1 и K2 ; δT_n , δT_m – погрешности определения температур T_n и T_m в точках контроля n и m .

в) коэффициента теплопроводности

$$\delta \lambda_i = \delta_{K3} \lambda_i + \delta_{K4} \lambda_i + \delta \alpha \lambda_i + \delta T_m \lambda_i,$$

где δ_{K3} , δ_{K4} , $\delta \alpha$ – погрешности расчета калибровочных коэффициентов K3, K4 и определения температуропроводности α соответственно.

Установлена аналитическая зависимость каждого компонента приведенной структуры суммарной относительной погрешности при дистанционном контроле теплофизических свойств теплоизоляционных материалов от ДФ. Так, аппроксимирующая зависимость напряжения с выхода ИЗ от температуры окружающей среды T_{OC} при измерении $P_{ТФС}$ ТМ имеет вид

$$\tilde{U}_{ИЗ} = f(T_{OC}) = 0,0025(T_{OC})^2 - 0,1164(T_{OC}) + 1,979.$$

Обоснование точности ИИИС ДК параметров ТФС ТМ подтверждено экспериментальными исследованиями системы.

Проведены экспериментальные исследования предложенной ИИИС дистанционного контроля ТФС теплоизоляционных материалов (см. рис. 1), по результатам которых рассчитана относительная погрешность результатов измерения коэффициентов тепло- и температуропроводности исследуемых материалов (табл. 1).

Организация измерительного эксперимента заключается в подготовке, проведении измерений и обработке полученных результатов измерений. При подготовке к измерениям ставится задача обеспечения заданной точности измерения. Для этого создаются условия для измерений: учитывается априорная информация (температура и влажность окружающей среды, плотность материала, шероховатость поверхности исследуемого материала). Проводится предварительное измерение на образцовой мере (полимермодифицированном материале). Если погрешность измерения теплопроводности образцовой меры с использованием ИИС соответствует норме (3 %) при данных условиях измерения, то далее проводятся измерения на других исследуемых материалах.

Таблица 1

**Результаты экспериментальных исследований
ИИИС ДК ТФС исследуемых объектов**

Исследуемый объект	Данные λ , Вт/(мК)		Погрешность измерений δ_λ , %
	справочник	измеренные	
Пенополиуретан	0,029	0,030	3,45
Минеральная вата	0,040	0,0415	3,75
Маты из стекловолокна	0,050	0,052	4,00
Рубероид	0,170	0,178	4,70
Пенобетон	0,210	0,220	4,76

Эксперименты организованы в научно-исследовательской лаборатории «Проектирование интеллектуальных информационно-измерительных систем» ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет». Проведены экспериментальные исследования ИИИС ДК ТФС исследуемых объектов – теплоизоляционных строительных материалов, результаты которых представлены в табл. 1. Анализируя данные, расчетно-экспериментальным методом установили, что относительная погрешность измерения составляет не более 5 %.

Заключение

Разработана методика построения математической модели интеллектуальной информационно-измерительной системы дистанционного контроля ТФС материалов, которая учитывает цели создания системы, оценку функционирования ИИИС, достоверность концепции формирования модели, влияющие дестабилизирующие факторы, проведение оценки достоверности модели.

Создана математическая модель ИИИС ДК теплофизических свойств теплоизоляционных материалов, отличающаяся включением в состав модели концептуальных компонентов, которые являются основными при создании архитектуры ИИИС дистанционного контроля ТФС материалов.

Предложена математическая модель процессов измерений в ИИИС ДК ТФС материалов, отличающаяся применением функциональной зависимости определяемых параметров теплофизических свойств теплоизоляционных материалов от влияющих дестабилизирующих факторов и учетом ограничений на погрешности определения коэффициентов тепло- и температуропроводности, теплоемкости для коррекции результатов измерения при дистанционном контроле.

Разработана математическая модель допускового контроля, отличающаяся наличием совокупности аналитических зависимостей определяемых параметров ТФС теплоизоляционных материалов от точности режимных параметров, дестабилизирующих факторов, относительной погрешности результатов измерения комплекса ТФС материалов.

Предложена ИИИС ДК теплоизоляционных материалов, отличающаяся применением интеллектуального измерительного зонда, устройством обработки телеметрических данных с исследуемых объектов, модулем математического и алгоритмического обеспечения и созданной базой знаний. В базе знаний в формализованном виде представлены математические модели ИИИС, процесса измерений и допускового контроля, применяемые как в процессе проектирования, так и при реализации алгоритма функционирования ИИИС ТФС дистанционного контроля теплоизоляционных материалов.

Получение оперативной и точной информации о ТФС изготавливаемых теплоизоляционных материалов в режиме реального времени способствует повышению качества и снижению процента брака выпускаемых теплоизоляционных материалов.

Выполнено обоснование точности ИИИС ДК ТМ и определена структура суммарной относительной погрешности при дистанционном контроле ТФС теплоизоляционных материалов. Проведены экспериментальные исследования разработанной ИИИС и выполнен метрологический анализ результатов измерений, на основе которых установлено, что относительные погрешности при определении параметров ТФС исследуемых материалов составляют не более 5 %.

Предложенная интеллектуальная информационно-измерительная система с разработанным математическим и информационным обеспечением рекомендуется для дистанционного контроля комплекса теплофизических свойств при производстве теплоизоляционных материалов.

Список литературы

1. Laghi, L. Uncertainty Analysis of Thermal Conductivity Measurements in Materials for Energy-Efficient Buildings / L. Laghi, F. Pennecchi, G. Raiteri // International Journal of Metrology and Quality Engineering. – 2011. – Vol. 2, No. 2. – P. 141 – 151.
2. Селиванова, З. М. Проектирование интеллектуальных информационно-измерительных систем неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов / З. М. Селиванова, А. А. Самохвалов // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2010. – Т. 16, № 2. – С. 273 – 282.
3. Hofman, D. Intellectual Measurements for Obtaining Objective Information in Science and Technology / D. Hofman, K. Karaya // Proceedings of the 10th World Congress of IMEKO. – Prague, 1985. – P. 19 – 34.
4. Раннев, Г. Г. Интеллектуальные средства измерений / Г. Г. Раннев. – М. : Издательский центр «Академия», 2011. – 272 с.
5. Стасенко, К. С. Интеллектуальная информационно-измерительная система мониторинга режимных параметров технологического процесса производства минеральных ват / К. С. Стасенко, З. М. Селиванова // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2013. – Т. 19, № 1. – С. 52 – 60.
6. The Development of the Data Transfer Protocol in the Intelligent Control Systems of the Energy Carrier Parameters / I. S. Karavaev, V. I. Selivantsev, Yu. I. Shtern, M. Yu. Shtern // Conference Venue at the National Research University of Electronic Technology "MIET", Proceedings of the IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus 2018, 29 – 31 January, 2018, Moscow. – М., 2018. – P. 1305 – 1309.
7. 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
8. Свод правил СП 50.13330.2012 Тепловая защита зданий // Минрегион России. – Введ. 2013-07-01. – М. : ООО «Аналитик», 2012. – 95 с.
9. Selivanova, Z. M. Simulation of Intelligent Information-Measuring Systems of Thermophysical Properties of Materials and Products / Z. M. Selivanova, D. S. Kurenkov, T. A. Hoang // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – Vol. 1278. – 7 p.

Intelligent Information-Measuring System for Remote Control of the Thermophysical Properties of Insulating Materials under the Influence of Destabilizing Factors

Z. M. Selivanova, D. S. Kurenkov

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

Keywords: destabilizing factors; remote control mode; tolerance control; complex of thermophysical properties; heat-insulating building materials.

Abstract: A technique is proposed for developing a mathematical model of an intelligent information-measuring system (IIMS) and its structure, designed for operational and accurate non-destructive testing of thermophysical properties (TPPs) of energy-efficient heat-insulating materials (HIMs) in the remote control mode.

The mathematical model of measurement processes in an intelligent system for remote monitoring of the TPP complex of the studied materials is presented in the form of a functional dependence of the output signals of the structural components of the measuring channel of the information-measuring system on the impact of the input signals, taking into account the parameters and characteristics of the system components that affect destabilizing factors. A mathematical model of tolerance control of TPPs of HIMs has been created, which is used at the IIMS remote monitoring to ensure the quality of the materials produced in the production.

References

1. Laghi L., Pennecci F., Raiteri G. Uncertainty Analysis of Thermal Conductivity Measurements in Materials for Energy-Efficient Buildings, *International Journal of Metrology and Quality Engineering*, 2011, vol. 2, no. 2, pp. 141-151.
2. Selivanova Z.M., Samokhvalov A.A. [Design of intelligent information-measuring systems of non-destructive testing of the thermophysical properties of materials], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2010, vol. 16, no. 2, pp. 273-282. (In Russ., abstract in Eng.)
3. Hofman D., Karaya K. Intellectual measurements for obtaining objective information in science and technology, *Proceedings of the 10th World Congress of IMEKO*, Prague, 1985, pp. 19-34.
4. Rannev G.G. *Intellektual'nyye sredstva izmereniy* [Intelligent measuring instruments], Moscow: Izdatel'skiy tsentr «Akademiya», 2011, 272 p. (In Russ.)
5. Stasenko K.S., Selivanova Z.M. [Intelligent Information-measuring System for Monitoring the Regime Parameters of the Technological Process for the Production of Mineral Wool Slabs], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2013, vol. 19, no. 1, pp. 52-60. (In Russ., abstract in Eng.)
6. Karavaev I.S., Selivantsev V.I., Shtern Yu.I., Shtern M.Yu. The Development of the Data Transfer Protocol in the Intelligent Control Systems of the Energy Carrier Parameters, *Conference venue at the National Research University of Electronic Technology "MIET", Proceedings of the IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus 2018*, 29-31 January, 2018, Moscow, 2018, pp. 1305-1309. (In Eng.)
7. Selivanova Z.M., Khoan T.A. [Mathematical Models and Algorithm for Improving the Information-measuring System for 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.)
8. *Svod pravil SP 50.13330.2012 Teplovaya zashchita zdaniy* [Code of rules SP 50.13330.2012 Thermal protection of buildings], Moscow: ООО «Аналитик», 2012, 95 p. (In Russ.)
9. Selivanova Z.M., Kurenkov D.S., Hoang T.A. Simulation of Intelligent Information-Measuring Systems of Thermophysical Properties of Materials and Products, *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, vol. 1278, 7 p.

Intelligentes Messinformationen-Fernbedienungssystem für thermophysikalische Eigenschaften der Wärmedämmstoffe unter den Bedingungen der Einwirkung destabilisierender Faktoren

Zusammenfassung: Angeboten wird die Methodik der Entwicklung eines mathematischen Modells des intelligenten Informations-Messsystems (IMS) und seiner Struktur, das für schnelle und genaue zerstörungsfreie Prüfung der thermischen Eigenschaften (TFE) von energieeffizienten Dämmstoffen (DS) in der

Fernüberwachung bestimmt ist. Das mathematische Modell von Messprozessen in einem intelligenten System zur Fernüberwachung des TFE-Komplexes der untersuchten Materialien wird in Form einer funktionalen Abhängigkeit der Ausgangssignale der Strukturkomponenten des Messkanals des Informationsmesssystems vom Einfluss der Eingangssignale unter Berücksichtigung der Parameter und Eigenschaften der Systemkomponenten dargestellt, die destabilisierende Faktoren beeinflussen. Es ist ein mathematisches Modell zur Toleranzkontrolle von TFE der TM erstellt, das bei der IMS-Fernüberwachung verwendet wird, um die Qualität der in der Produktion hergestellten Materialien sicherzustellen.

Système intellectuel d'information et de mesure pour le contrôle à distance des propriétés thermiques et physiques des matériaux d'isolation thermique sous l'influence des facteurs de déstabilisation

Résumé: Est proposée une méthodologie de l'élaboration d'un modèle mathématique d'un système intellectuel d'information et de mesure (SIIM) et de sa structure conçue pour le transfert rapide et précis du contrôle non destructif des propriétés thermiques et physiques (PTP) des matériaux d'isolation thermique (MIT) en mode de contrôle à distance. Le modèle mathématique des processus de mesure dans un système intellectuel du contrôle à distance du complexe des PTP des matériaux étudiés est présenté sous la forme de la dépendance fonctionnelle des signaux de sortie de l'action des signaux d'entrée en tenant compte des paramètres du système mathématique et des caractéristiques des composants, des facteurs de déstabilisation qui ont de l'influence. Est créé le modèle mathématique du contrôle à distance des PTP de SIIM pour assurer la qualité des matériaux produits.

Авторы: *Селиванова Зоя Михайловна* – доктор технических наук, профессор кафедры «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем»; *Куренков Дмитрий Сергеевич* – магистрант, ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

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