

## РЕКОНФИГУРИРУЕМАЯ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ С ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫМ ДАТЧИКОМ

З.М. Селиванова

selivanova\_zm@mail.ru

В.С. Ерышова

veraeryshova@mail.ru

ТГТУ, Тамбов, Российская Федерация

---

### Аннотация

Разработана информационно-измерительная система неразрушающего контроля теплофизических свойств твердых материалов с интеллектуальным датчиком. Созданы математические модели реконfigurирования структуры информационно-измерительной системы и интеллектуального датчика. Разработаны алгоритмы изменения конфигурации интеллектуального датчика и функционирования информационно-измерительной системы, позволяющие расширить функциональные возможности системы по исследованию теплофизических свойств твердых материалов в широком диапазоне значений теплопроводности, а также повысить точность и оперативность проведения теплофизических измерений за счет адаптации системы к классу исследуемых материалов

### Ключевые слова

*Интеллектуальный датчик, информационно-измерительная система, математическая модель, теплофизические свойства материалов, реконfigurирование структуры*

Поступила 30.07.2018

© Автор(ы), 2019

---

*Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России (государственное задание. Проект «Интеллектуальная информационно-измерительная и управляющая система оперативного контроля теплофизических характеристик теплоизоляционных материалов, применяемых в условиях Арктики. Разработка теоретических основ, методологии построения интеллектуальных информационно-измерительных и управляющих систем»)*

**Введение.** Информационно-измерительные системы (ИИС) применяют на производстве для неразрушающего контроля теплофизических свойств (ТФС) теплоизоляционных, полимерных, строительных материалов и изделий из них, что позволяет повысить качество выпускаемой продукции.

Информационно-измерительные системы с использованием методов искусственного интеллекта рассмотрены в работах зарубежных ученых, основоположников интеллектуальных измерений, систем интеллектуального

окружения и интеллектуальных сред (*Ambient Intelligence & Smart Environments*) — Д. Хофмана, Л. Финкельштейна, Л. Мари. В работах российских ученых — В.Н. Романова, В.С. Соболева, В.И. Цветкова, Г.Г. Раннева — изложены вопросы создания интеллектуальных средств измерений. Анализ работ показывает, что представленные ИИС имеют недостаточно высокое быстродействие и значительную погрешность измерений исследуемых параметров, обусловленную воздействием дестабилизирующих факторов.

*Цель работы* — устранение технического несовершенства существующих ИИС, заключающееся в невозможности измерения параметров ТФС теплоизоляционных, строительных и полимерных материалов в широком диапазоне значений теплопроводности ( $0,025 \dots 10$  Вт/(м·К)) с требуемыми точностью и оперативностью.

Разработка ИИС с реконфигурируемой структурой для определения ТФС материалов предполагает создание универсальной и многофункциональной структуры ИИС с адаптацией к классу исследуемых материалов с теплопроводностью  $0,025 \dots 10$  Вт/(м·К). Для этого исследована типовая структура ИИС [1] и на основании анализа полученных результатов разработано алгоритмическое обеспечение, модули программного и метрологического обеспечения ИИС с реконфигурируемой структурой. При разработке структуры ИИС учтены особенности применяемых методов определения ТФС материалов, сформированы множества возможных измерительных ситуаций, режимов работы системы, структурных компонентов системы (микроконтроллеров, баз знаний и данных, нормирующих усилителей, аналого-цифровых преобразователей, источников стабилизированного питания), ориентированных на различные классы исследуемых материалов. Созданы различные виды структур ИИС ТФС, а также алгоритм выбора структуры системы, соответствующей измерительной ситуации и классу исследуемых материалов [2, 3].

**Математическая модель реконфигурирования информационно-измерительной системы.** Разработана графовая математическая модель реконфигурирования ИИС ТФС материалов в соответствии с измерительной ситуацией и классом исследуемых материалов (рис. 1). Вершины  $M_{s_i}$ ,  $i = 1, \dots, 4$ , обозначают модели (вербальные) структур ИИС:

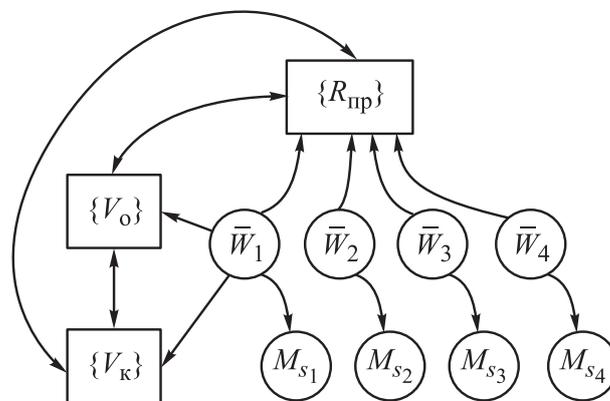
$M_{s_1} = (V_{MAO_{s_1}}, V_{MМО_{s_1}}, V_{MΠO_{s_1}}, БЗ, ИД)$  — модель типовой структуры;

$M_{s_2} = (V_{MAO_{s_2}}, V_{MМО_{s_2}}, V_{MΠO_{s_2}}, БД1, ИЯЛН, НУ1, АЦП1)$  — модель структуры для определения ТФС материалов низкой теплопроводности  $\lambda = 0,025 \dots 0,200$  Вт/(м·К);

$M_{s3} = (V_{MAOs_3}, V_{MMOs_3}, V_{MPOs_3}, \text{БД2, ИЯПН, НУ2, АЦП2})$  — модель структуры для контроля ТФС материалов средней теплопроводности  $\lambda = 0,21 \dots 1,0 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ ;

$M_{s4} = (V_{MAOs_4}, V_{MMOs_4}, V_{MPOs_4}, \text{БД3, ИЯКН, НУ3, АЦП3})$  — модель структуры для измерения ТФС материалов высокой теплопроводности  $\lambda = 1,1 \dots 10 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ . Модели (описания структур)  $M_{s1} - M_{s4}$  включают в себя следующие структурные компоненты ИИС:

- модули алгоритмического обеспечения  $V_{MAOs_1} - V_{MAOs_4}$ ;
- модули метрологического обеспечения  $V_{MMOs_1} - V_{MMOs_4}$ ;
- модули программного обеспечения  $V_{MPOs_1} - V_{MPOs_4}$ ;
- базу знаний БЗ;
- интеллектуальный датчик ИД;
- базы данных БД1–БД3;
- измерительные ячейки (ИЯЛН, ИЯПН, ИЯКН) с линейным, плоским и круглым нагревателями;
- нормирующие усилители НУ1–НУ3;
- аналого-цифровые преобразователи АЦП1–АЦП3.



**Рис. 1.** Граф реконfigurирования структуры ИИС ТФС материалов

В модели (см. рис. 1) операторы  $\bar{W}_i$ ,  $i = 1, \dots, 4$ , формализуют алгоритм изменения структуры ИИС согласно измерительной ситуации, которая формируется по итогам идентификации ТФС исследуемых материалов в результате проведения предварительного тестового теплофизического измерения и снятия термограммы<sup>1</sup>. По результатам анализа полученной тер-

<sup>1</sup>Термограмма — температурно-временная зависимость в области контакта измерительного зонда и исследуемого материала при частотно-импульсном тепловом воздействии на объект исследования.

мограммы исследуемый материал относится к соответствующему классу по теплопроводности (низкая, средняя или высокая), для которого определена измерительная ситуация, включающая метод определения ТФС материала, режимные параметры теплофизических измерений (мощность теплового воздействия, число импульсов нагрева, время измерений), вид структуры интеллектуального датчика и ИИС, алгоритм функционирования системы.

Каждый оператор  $\bar{W}_i$ ,  $i = 1, \dots, 4$ , представлен кортежем вида

$$\bar{W} = \langle V_O, V_K, A_P \rangle, \quad (1)$$

где  $V_O = \{V_{MAO_{s_i}}, V_{MМО_{s_i}}, V_{MΠO_{s_i}}, i = 1, \dots, k_O\}$  — множество модулей обеспечения ИИС;  $V_K = \{V_{K_s}, s = 1, \dots, k_K\}$  — множество видов реконфигурируемой структуры ИИС, которые отличаются от типовой структуры ИИС входящими в ее состав компонентами (измерительными ячейками, нормирующими усилителями, аналого-цифровыми преобразователями, базами данных и знаний, модулями алгоритмического, программного и метрологического обеспечений);  $A_P$  — алгоритм реконфигурирования структуры системы.

Алгоритм  $A_P$  реконфигурирования ИИС осуществляет изменение модулей алгоритмического, программного и метрологического обеспечений, а также преобразование типовой структуры системы в структуру, которая обеспечивает адаптацию системы к классу исследуемых материалов. Алгоритм реконфигурирования структуры системы использует множества продукционных правил

$$R_{PP} = \{R_{PP1}, \dots, R_{PP4}\}, \quad (2)$$

где  $R_{PP1}, \dots, R_{PP4}$  — наборы правил;  $R_{PP1}$  — продукционное правило, применяющееся для формирования типовой структуры ИИС в соответствии с моделью  $M_{S1}$ ;  $R_{PP2}$  — правило, определяющее структуру системы согласно модели  $M_{S2}$ ;  $R_{PP3}$  — правило, позволяющее создавать структуру ИИС на основе модели  $M_{S3}$ ;  $R_{PP4}$  — правило, применяемое для создания структуры системы в соответствии с моделью  $M_{S4}$ . Формирование структуры ИИС ТФС материалов  $M_{S_i}$ ,  $i = 1, \dots, 4$ , в соответствии с результатами идентификации измерительной ситуации осуществляется с использованием операторов  $\bar{W}_i$  вида (1) согласно алгоритму реконфигурирования структуры ИИС и созданным продукционным правилам (2):

$$\bar{W}_i \rightarrow A_{Pi} \rightarrow \{R_{PPi}\}, \quad i = 1, \dots, 4. \quad (3)$$

Разработан алгоритм функционирования ИИС с реконфигурируемой структурой (3), который заключается в следующем [4, 5]. Определяется теплопроводность исследуемого материала при воздействии внешних дестабилизирующих факторов  $P_{ДФ}$ , для чего снимается тестовая термограмма, позволяющая предварительно определить теплопроводность материала. В зависимости от значения теплопроводности исследуемых материалов в блоке принятия решений ИИС принимается решение о классе исследуемого материала и соответствующей ему измерительной ситуации. При тепловом воздействии устройством формирования импульсов нагрева на исследуемый материал полученная измерительная информация о температуре в области контакта материалов и измерительного зонда поступает в устройство обработки измерительных данных и управления, где на основе записанных в базе знаний формул в микроконтроллере МК1 рассчитываются параметры ТФС материалов. Далее выполняется метрологический анализ результатов измерения и сравнение их с допустимыми значениями параметров ТФС ( $\lambda$  и  $a$ ), записанными в базе данных системы. Если погрешность определения ТФС материалов превышает заданное допустимое значение, то формируется решение в блоке принятия решений ИИС о коррекции алгоритма теплофизического измерения на воздействие дестабилизирующих факторов [6] и проводятся повторные измерения. При этом алгоритм измерения дополняется действиями по коррекции результатов измерения при влиянии внешних факторов с использованием аппроксимирующих зависимостей  $\lambda$  и  $a$  от воздействующих факторов.

**Математическая модель интеллектуального датчика реконфигурируемой структуры.** С использованием теории графов и на основе результатов расчетно-экспериментальных исследований разработана математическая модель интеллектуального датчика реконфигурируемой структуры [6]. Получена экспериментальная зависимость выходного сигнала интеллектуального датчика  $U_{\text{вых ИД}}$  при проведении теплофизических измерений в течение заданного интервала времени  $\tau$  в условиях воздействия на интеллектуальный датчик дестабилизирующих факторов  $P_{ДФ}$ , определяемая по формуле

$$U_{\text{вых ИД}} = f(U_{\text{вых Л}}, U_{\text{вых К}}, U_{\text{вых П}}, P_{ДФ}, \tau),$$

где  $U_{\text{вых Л}}$ ,  $U_{\text{вых К}}$ ,  $U_{\text{вых П}}$  — выходные сигналы измерительных ячеек интеллектуального датчика.

Определены зависимости выходных сигналов измерительных ячеек от входных сигналов измерительных ячеек ИЯЛН, ИЯКН и ИЯПН  $U_{\text{вх Л}}$ ,  $U_{\text{вх К}}$ ,  $U_{\text{вх П}}$  при воздействии дестабилизирующих факторов:

$$U_{\text{вых Л}} = f(U_{\text{вх Л}}, P_{\text{ДФ}}, \tau); U_{\text{вых К}} = f(U_{\text{вх К}}, P_{\text{ДФ}}, \tau);$$

$$U_{\text{вых П}} = f(U_{\text{вх П}}, P_{\text{ДФ}}, \tau).$$

Экспериментальные данные измерительных ячеек соответствуют ограничениям:  $U_{\text{вых Л}} \in U_{\text{доп Л}}$ ;  $U_{\text{вых К}} \in U_{\text{доп К}}$ ;  $U_{\text{вых П}} \in U_{\text{доп П}}$ , где  $U_{\text{доп Л}}$ ,  $U_{\text{доп К}}$ ,  $U_{\text{доп П}}$  — области допустимых значений напряжения на выходе измерительных ячеек.

Постановка задачи создания математической модели реконфигурирования структуры интеллектуального датчика: необходимо определить коэффициенты тепло- и температуропроводности материалов ( $\lambda$  и  $a$ ) с обеспечением заданной относительной погрешности  $\delta$  результатов их измерения не более 6 %. Для повышения точности измерений устанавливается принадлежность исследуемых материалов определенному классу теплопроводности на основе использования информации тестовой термограммы, баз данных и знаний, подключения соответствующей измерительной ячейки интеллектуального датчика путем реконфигурирования его структуры.

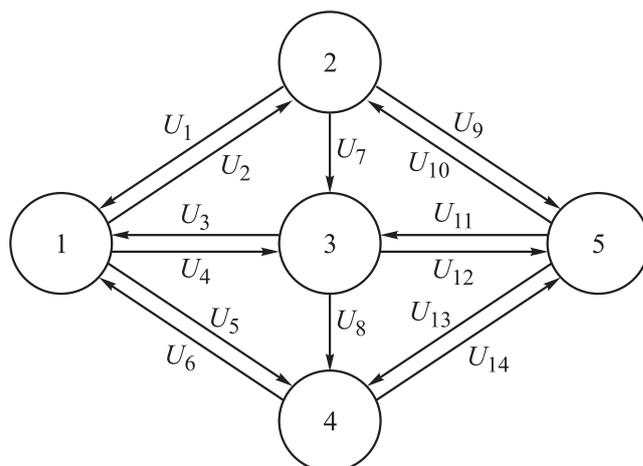
Измерительная ячейка с линейным нагревателем применяется для определения коэффициентов  $\lambda$  и  $a$  теплоизоляционных материалов (ТМ) низкой теплопроводности ( $\lambda = \lambda_{\text{ТМ}}$ ), ИЯКН — полимерных материалов (ПМ) средней теплопроводности ( $\lambda = \lambda_{\text{ПМ}}$ ), ИЯПН — строительных материалов (СМ) высокой теплопроводности ( $\lambda = \lambda_{\text{СМ}}$ ).

Разработанная математическая модель реконфигурирования структуры интеллектуального датчика в виде графа представлена на рис. 2 [7, 8]. В соответствии с графом

$$U_i = \begin{cases} 0, & \text{если ИМ относится к ТМ, что соответствует } (1;2;5) \quad \lambda_{\text{ТМ}}; \\ 1, & \text{если ИМ относится к ПМ, что соответствует } (1;2;3;5) \quad \lambda_{\text{ПМ}}; \\ 01, & \text{если ИМ относится к СМ, что соответствует } (1;2;3;4;5) \quad \lambda_{\text{СМ}}. \end{cases}$$

Здесь ИМ — исследуемые материалы; 1–5 — вершины графовой модели (см. рис. 2), которые определяют траекторию подключения соответствующей измерительной ячейки при определении теплопроводности  $\lambda_{\text{ТМ}}$ ,  $\lambda_{\text{ПМ}}$ ,  $\lambda_{\text{СМ}}$  исследуемых материалов. Таким образом, справедливо одно из равенств:

$$\begin{aligned} U_1 + U_2 + U_7 + U_8 + U_9 + U_{10} &= 0; \\ U_1 + U_3 + U_4 + U_7 + U_8 + U_{11} + U_{12} &= 1; \\ U_1 + U_5 + U_6 + U_7 + U_8 + U_{13} + U_{14} &= 01. \end{aligned}$$



**Рис. 2.** Графовая модель реконфигурирования интеллектуального датчика ИИС: 1 — ИИС; 2 — ИЯЛН; 3 — ИЯКН; 4 — ИЯПН; 5 — исследуемый материал;  $U_i$  — информационные связи между структурными компонентами графа

Алгоритм реконфигурирования структуры интеллектуального датчика в соответствии с математической моделью (см. рис. 2) реализует микроконтроллер МК2, входящий в интеллектуальный датчик, на основе продукционных правил, записанных в базе знаний ИИС.

ЕСЛИ  $\lambda_1 \in \lambda_{ТМ}$ , ТО использовать БД1, измерительную ячейку ИЯЛН,  $U_{БСП1}$ , НУ1, АЦП1;

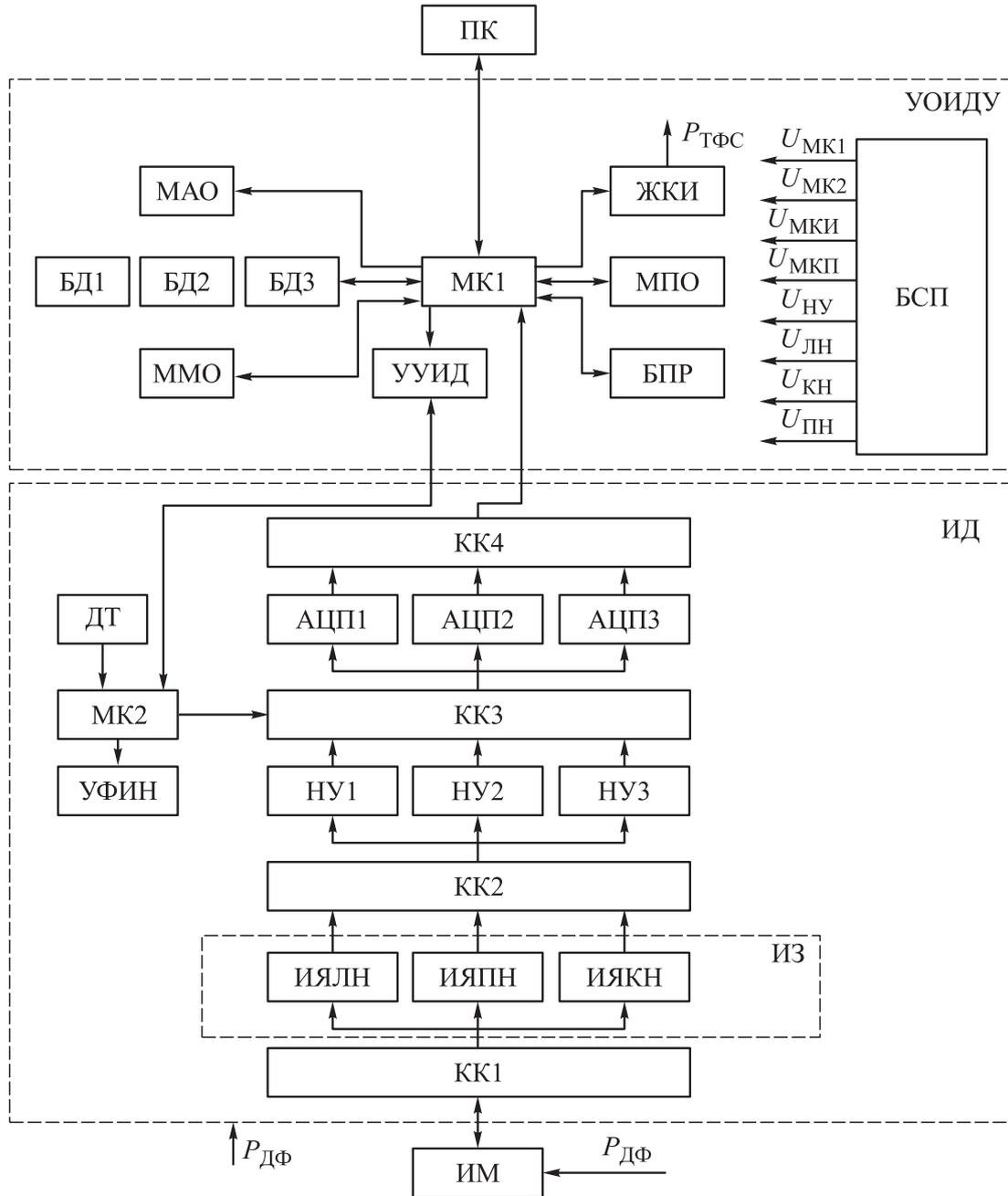
ЕСЛИ  $\lambda_2 \in \lambda_{ПМ}$ , ТО использовать БД2, измерительную ячейку ИЯКН,  $U_{БСП2}$ , НУ2, АЦП2;

ЕСЛИ  $\lambda_3 \in \lambda_{СМ}$ , ТО использовать БД3, измерительную ячейку ИЯПН,  $U_{БСП3}$ , НУ3, АЦП3.

Здесь  $U_{БСП1}$ ,  $U_{БСП2}$ ,  $U_{БСП3}$  уровни напряжений, поступающих от блока стабилизированного питания (БСП) к измерительным ячейкам.

**Аппаратная реализация измерительной системы.** Структурная схема созданной ИИС (рис. 3) состоит из устройства обработки измерительных данных и управления (УОИДУ) и интеллектуального датчика [1, 6, 9]. Устройство обработки измерительных данных и управления реализует алгоритм функционирования системы и следующие процедуры:

- принятие решений в ИИС в условиях неопределенности (когда неизвестен класс исследуемого материала и воздействующие факторы);
- метрологический анализ;
- формирование измерительных цепей в ИИС с интеллектуальным реконфигурируемым датчиком;
- коррекция результатов измерения при определении параметров ТФС в условиях воздействия внешних и внутренних дестабилизирующих факторов на ИИС.



**Рис. 3.** Структурная схема ИИС ТФС материалов:

$P_{ТФС}$  — параметры теплофизических свойств материалов; ЖКИ — жидкокристаллический индикатор; БПР — блок принятия решений;  $U_{МК1}$ ,  $U_{МК2}$ ,  $U_{ЖКИ}$ ,  $U_{АЦП}$ ,  $U_{НУ}$ ,  $U_{ЛН}$ ,  $U_{КН}$ ,  $U_{ПН}$  — напряжения, подаваемые с БСП на структурные компоненты ИИС; ДТ — датчик температуры; ИЗ — измерительный зонд

Базы знаний и данных содержат информацию об исследуемых материалах, классах измерительных ситуаций, методах и алгоритмах теплофизического измерения. В состав измерительной цепи интеллектуального датчика входит микроконтроллер МК2, реализующий функциональные процедуры получения информации с измерительного зонда при проведении

теплофизических измерений, коррекции результатов измерения при воздействии внешних факторов, а также функции технической самодиагностики и метрологического самоконтроля. Устройство обработки измерительных данных и управления, а также интеллектуальный датчик выполнены на базе PIC-микроконтроллеров МК1, МК2 фирмы MICROCHIP.

Преобразователи АЦП1, АЦП2, АЦП3 предназначены для преобразования сигналов с нормирующих усилителей НУ1, НУ2, НУ3 в двоичный код. На устройство формирования импульсов нагрева (УФИН) подаются напряжения  $U_{БСП1}$ ,  $U_{БСП2}$ ,  $U_{БСП3}$  соответствующего уровня от БСП при подключении ИЯЛН, ИЯКН или ИЯПН.

Микроконтроллер МК1 выполняет функции управления интеллектуальным датчиком; принятия решений в ИИС на основе информации, представленной в базах знаний БЗ и данных; преобразования модулей алгоритмического MAO, программного МПО и метрологического ММО обеспечений в зависимости от измерительной ситуации в соответствии с классом исследуемого материала; обработки измерительной информации, поступающей с интеллектуального датчика. Базы знаний и данных содержат информацию о характеристиках и параметрах исследуемых материалов, полученные экспериментальным путем значения и аппроксимирующие зависимости коэффициентов тепло- и температуропроводности от воздействующих дестабилизирующих факторов (температуры и влажности окружающей среды); математические соотношения для расчета коэффициентов  $\lambda$  и  $a$  в соответствии с используемым методом определения ТФС материалов. Устройство управления интеллектуальным датчиком (УУИД) служит для формирования управляющего сигнала микроконтроллеру МК2 при проведении первоначального тестового измерения и идентификации измерительной ситуации, синтеза измерительной цепи, подключения соответствующей измерительной ячейки ИЯЛН, ИЯКН или ИЯПН, нормирующих усилителей НУ1, НУ2, НУ3, аналого-цифровых преобразователей АЦП1, АЦП2, АЦП3 и коммутаторов каналов КК1, КК2, КК3 при определении ТФС исследуемых материалов. Результаты обработки измерительной информации с интеллектуального датчика, расчета параметров ТФС материалов, метрологической обработки результатов измерений поступают для анализа и хранения в персональный компьютер (ПК).

Информационно-измерительная система с интеллектуальным датчиком реконфигурируемой структуры использует импульсные методы определения ТФС материалов [6] при воздействии линейного, круглого или плоского источников теплоты на исследуемый материал. Принцип действия ИИС заключается в формировании теплового воздействия

с помощью устройства подачи импульсов нагрева на исследуемый объект с последующей регистрацией измерительной информации о температурном поле в области контакта измерительного зонда и исследуемого материала. На этой основе в микроконтроллере МК1 выполняется расчет параметров ТФС ( $\lambda$  и  $a$ ) материалов в соответствии с используемым теплофизическим методом. Например, процесс распространения теплоты на теплоизолированной поверхности полубесконечного в тепловом отношении тела с использованием метода воздействия мгновенного линейного источника теплоты в плоскости контакта двух полуограниченных тел — подложки из материала рипора и исследуемого твердого материала — представляется в результате решения задачи теплопроводности в виде [6, 10–12]:

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

Здесь  $x$  — расстояние от линейного источника теплоты до точки контроля;  $Q$  — мощность теплового воздействия;  $\tau$  — время;  $T(x, \tau)$  — температура.

В результате частотно-импульсного теплового воздействия на исследуемый материал при подаче  $n$ -го импульса определяется температура  $T(x, \tau)$ , которая с использованием (4) рассчитывается по формуле

$$T(x, n) = \frac{QF}{4\pi\lambda} \sum_{i=1}^{n-1} \frac{1}{i} \exp\left(-\frac{x^2 F}{4ai\Delta\tau}\right). \quad (5)$$

Формулы для расчета коэффициентов  $\lambda$  и  $a$  получены для измеренных значений температуры  $T(x, n)$  и  $T(x, m)$  в моменты контроля  $T_n, T_m$  с использованием зависимости (5):

$$\lambda = \frac{1}{T_m} B_3 \ln(B_4 a); \quad a = B_1 \exp\left(B_2 \frac{T_n}{T_m}\right), \quad (6)$$

где  $B_1, B_2, B_3, B_4$  — калибровочные коэффициенты, которые определяются при проведении теплофизических измерений на образцовых мерах теплопроводности.

Аналогично получены математические зависимости для расчета коэффициентов  $\lambda$  и  $a$  при частотно-импульсном тепловом воздействии на исследуемый материал круглым и плоским источниками нагрева.

**Натурные эксперименты и обсуждение их результатов.** Проведены экспериментальные исследования предложенной ИИС ТФС (рис. 4) материалов, по результатам которых рассчитана относительная погреш-



**Рис. 4.** Реконфигурируемая ИИС неразрушающего контроля ТФС материалов с интеллектуальным датчиком

ность измерения коэффициентов тепло- и температуропроводности исследуемых материалов (таблица).

**Значения относительной погрешности ( $\delta_\lambda$  и  $\delta_a$ )  
измерения коэффициентов тепло- и температуропроводности  
исследуемых материалов**

Исследуемый материал	Справочные значения		Измеренные значения		Относительная погрешность измерения, %	
	$\lambda$ , Вт/(м·К)	$a$ , $10^{-7}$ м <sup>2</sup> /с	$\lambda$ , Вт/(м·К)	$a$ , $10^{-7}$ м <sup>2</sup> /с	$\delta_\lambda$	$\delta_a$
Рипор	0,028	4,61	0,029	4,76	3,57	3,25
Полимермодифицированный материал	0,195	1,09	0,203	1,13	4,10	3,67
Газосиликат	0,23	3,47	0,239	3,61	3,91	4,00
Мрамор	0,96	41,35	1,01	43,82	5,21	5,97
Бетон	1,28	2,49	1,35	2,62	5,47	5,22
Кирпич карборундовый	10,1	1,66	10,7	1,76	5,94	6,00

Организация измерительного эксперимента заключается в подготовке, проведении измерений и обработке полученных результатов. 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 выполняются измерения на исследуемых материалах.

Эксперименты выполнены в научно-исследовательской лаборатории «Проектирование интеллектуальных информационно-измерительных систем» ТГТУ. Теплофизические измерения проведены на твердых материалах в диапазоне значений теплопроводности 0,02...10 Вт/(м·К). При проведении теплофизических измерений в ИИС принято решение о реконфигурировании структуры системы и интеллектуального датчика по результатам идентификации измерительной ситуации.

В результате анализа относительной погрешности измерения коэффициентов тепло- и температуропроводности (см. таблицу) установлено, что относительные погрешности измерений  $\delta_\lambda$  и  $\delta_a$  в результате реконфигурирования структуры ИИС в соответствии с классом исследуемых материалов составляют не более 6 %.

**Заключение.** На основе теории графов разработана математическая модель реконфигурирования структуры ИИС неразрушающего контроля ТФС материалов с учетом измерительной ситуации и класса исследуемых материалов. Эта модель применяется в алгоритме функционирования ИИС при определении коэффициентов тепло- и температуропроводности исследуемых твердых материалов.

Предложен алгоритм реконфигурирования структуры ИИС, отличающийся подключением соответствующих модулей алгоритмического, программного и метрологического обеспечений системы, по результатам идентификации измерительной ситуации при проведении теплофизических измерений.

Разработана математическая модель реконфигурирования структуры интеллектуального датчика с использованием теории графов и продукционных правил, записанных в базу знаний ИИС.

Созданный алгоритм изменения конфигурации интеллектуального датчика ИИС на основе математической модели реконфигурирования структуры датчика позволяет проводить теплофизические измерения по определению коэффициентов  $\lambda$  и  $a$  с адаптацией к классу исследуемых материалов. Адаптация осуществляется в результате подключения соответствующих структурных компонентов интеллектуального датчика: измерительной ячейки датчика для формирования требуемой мощности теплового воздей-

ствия на исследуемый материал и контроля температуры при его нагреве, нормирующих усилителей и аналого-цифровых преобразователей.

Разработан алгоритм функционирования ИИС с реконфигурируемой структурой, позволяющий расширить функциональные возможности системы по исследованию ТФС теплоизоляционных, строительных и полимерных материалов в диапазоне значений теплопроводности 0,025... 10 Вт/(м·К), повысить точность и оперативность проведения теплофизических измерений. Согласно результатам проведенных экспериментальных исследований ИИС ТФС материалов, относительная погрешность измерений не превышает 6 %, время проведения одного измерения 3 мин.

Создана ИИС, отличающаяся наличием интеллектуального датчика, использованием процедур реконфигурирования структуры ИИС в соответствии с теплопроводностью исследуемого материала, которая предварительно определяется по тестовой термограмме.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Стасенко К.С., Селиванова З.М. Интеллектуальная информационно-измерительная система мониторинга режимных параметров технологического процесса производства минеральных ват. *Вестник ТГТУ*, 2013, т. 19, № 1, с. 52–60.
- [2] Буренок В.М., Найденов В.Г., Поляков В.И. Математические методы и модели в теории информационно-измерительных систем. М., Машиностроение, 2011.
- [3] Ахремчик О.Л. Информационная база для автоматизированного проектирования схем систем управления технологическими объектами. *Информационные технологии*, 2009, № 8, с. 17–21.
- [4] Зинченко Л.А., Шахнов В.А. Особенности применения вычислительных систем в САПР нанотехнологий. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*, 2010, № 5, с. 100–109.
- [5] Selivanova Z.M., Khoan T.A. Increasing the accuracy of data-measuring systems for the nondestructive testing of the thermal properties of solids. *Meas. Tech.*, 2015, vol. 58, iss. 9, pp. 1010–1015. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11018-015-0834-8>
- [6] Селиванова З.М., Хоан Т.А. Математические модели и алгоритм для совершенствования информационно-измерительной системы неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов. *Вестник ТГТУ*, 2016, т. 22, № 4, с. 520–534.
- [7] Макаровских Т.А. Комбинаторика и теория графов. М., Ленанд, 2016.
- [8] Миронова Ж.А., Шахнов В.А., Гриднев В.Н. Высокоплотная компоновка проводящего рисунка многослойных коммутационных плат. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*, 2014, № 6, с. 61–70.
- [9] Шахнов В.А., Аверьянихин А.Е., Власов А.И. и др. Представление знаний в информационной системе с учетом свойств наноразмерных объектов и материалов. *Информационные технологии и вычислительные системы*, 2014, № 3, с. 89–96.

[10] Karavaev I.S., Selivantsev V.I., Shtern Yu.I., et al. The development of the data transfer protocol in the intelligent control systems of the energy carrier parameters. *ElConRus*, 2018, pp. 781–786. DOI: 10.1109/ElConRus.2018.8317336

[11] Shtern Y.I., Karavaev I.S., Rykov V.M., et al. Development of the method of software temperature compensation for wireless temperature measuring electronic instruments. *ИЖТА*, 2016, no. 9, pp. 139–146.

[12] Belyaev V.P., Mischenko S.V., Belyaev P.S. Determination of the diffusion coefficient in nondestructive testing of thin articles of anisotropic porous materials. *Meas. Tech.*, 2017, vol. 60, iss. 4, pp. 392–398. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11018-017-1208-1>

**Селиванова Зоя Михайловна** — д-р техн. наук, профессор кафедры «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем» ТГТУ (Российская Федерация, 392000, Тамбов, ул. Советская, д. 106).

**Ерышова Вера Сергеевна** — студентка магистратуры кафедры «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем» ТГТУ (Российская Федерация, 392000, Тамбов, ул. Советская, д. 106).

**Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:**

Селиванова З.М., Ерышова В.С. Реконфигурируемая информационно-измерительная система теплофизических свойств твердых материалов с интеллектуальным датчиком. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*, 2019, № 5, с. 4–19. DOI: 10.18698/0236-3933-2019-5-4-19

**RECONFIGURABLE INFORMATION-MEASURING SYSTEM  
OF THERMOPHYSICAL PROPERTIES OF SOLID MATERIALS  
WITH AN INTELLIGENT SENSOR**

**Z.M. Selivanova**  
**V.S. Eryshova**

**selivanova\_zm@mail.ru**  
**veraeryshova@mail.ru**

**Tambov State Technical University, Tambov, Russian Federation**

---

**Abstract**

An information-measuring system for non-destructive testing of thermophysical properties of solid materials with an intelligent sensor has been developed. Mathematical models for reconfiguring the structure of the information-measuring system and the intelligent sensor were built. Algorithms for changing the configuration of the intelligent sensor and the functioning of the information-measuring system have been developed, allowing us to expand the system's functionality for study-

**Keywords**

*Intelligent sensor, information-measuring system, mathematical model, thermophysical properties of materials, structure reconfiguration*

ing thermophysical properties of solid materials in a wide range of thermal conductivities, as well as to improve the accuracy and efficiency of thermophysical measurements by adapting the system to the class of materials studied

Received 30.07.2018  
© Author(s), 2019

*The work was supported by Ministry of Education and Science of Russian Federation (Project “Intelligent information-measuring and control system of operational control of thermal characteristics of thermal insulation materials used in the Arctic. Development of theoretical foundations, methodology of intelligent information-measuring and control systems”)*

## REFERENCES

- [1] Stasenko K.S., Selivanova Z.M. Intelligent data measuring system to monitor mode parameters of production process of mineral wool plates. *Vestnik TGTU* [Transactions TSTU], 2013, vol. 19, no. 1, pp. 52–60 (in Russ.).
- [2] Burenok V.M., Naydenov V.G., Polyakov V.I. *Matematicheskie metody i modeli v teorii informatsionno-izmeritelnykh system* [Mathematical methods and models in theory of information and measurement systems]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2011.
- [3] Akhremchik O.L. Information base for computer aided design of electric diagrams of technological object control systems. *Informatsionnye tekhnologii* [Information Technologies], 2009, no. 8, pp. 17–21 (in Russ.).
- [4] Zinchenko L.A., Shakhnov V.A. Special aspects of application of computer systems in nanoengineering. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Instrument Engineering*, 2010, no. 5, pp. 100–109 (in Russ.).
- [5] Selivanova Z.M., Khoan T.A. Increasing the accuracy of data-measuring systems for the nondestructive testing of the thermal properties of solids. *Meas. Tech.*, 2015, vol. 58, iss. 9, pp. 1010–1015. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11018-015-0834-8>
- [6] Selivanova Z.M., Khoan T.A. Mathematical models and algorithms for improving information-measuring systems of nondestructive testing of thermal physical properties of materials. *Vestnik TGTU*, 2016, vol. 22, no. 4, pp. 520–534 (in Russ.).
- [7] Makarovskikh T.A. *Kombinatorika i teoriya grafov* [Combinatorics and graph theory]. Moscow, Lenand Publ., 2016.
- [8] Mironova Zh.A., Shakhnov V.A., Gridnev V.N. High-density layout of conductive pattern for multilayer wiring board. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Instrument Engineering*, 2014, no. 6, pp. 61–70 (in Russ.).
- [9] Shakhnov V.A., Averyanikhin A.E., Vlasov A.I., et al. Nanotechnology knowledge representation in information systems. *Informatsionnye tekhnologii i vychislitelnye sistemy*, 2014, no. 3, pp. 89–96 (in Russ.).

[10] Karavaev I.S., Selivantsev V.I., Shtern Yu.I., et al. The development of the data transfer protocol in the intelligent control systems of the energy carrier parameters. *EIConRus*, 2018, pp. 781–786. DOI: 10.1109/EIConRus.2018.8317336

[11] Shtern Y.I., Karavaev I.S., Rykov V.M., et al. Development of the method of software temperature compensation for wireless temperature measuring electronic instruments. *IJCTA*, 2016, no. 9, pp. 139–146.

[12] Belyaev V.P., Mischenko S.V., Belyaev P.S. Determination of the diffusion coefficient in nondestructive testing of thin articles of anisotropic porous materials. *Meas. Tech.*, 2017, vol. 60, iss. 4, pp. 392–398.

DOI: <https://doi.org/10.1007/s11018-017-1208-1>

**Selivanova Z.M.** — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Design of Radio-electronic and Microprocessor Systems, Tambov State Technical University (Sovetskaya ul. 106, Tambov, 392000 Russian Federation).

**Eryshova V.S.** — Master's Degree Student, Department of Design of Radioelectronic and Microprocessor Systems, Tambov State Technical University (Sovetskaya ul. 106, Tambov, 392000 Russian Federation).

**Please cite this article in English as:**

Selivanova Z.M., Eryshova V.S. Reconfigurable information-measuring system of thermophysical properties of solid materials with an intelligent sensor. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Instrument Engineering*, 2019, no. 5, pp. 4–19 (in Russ.). DOI: 10.18698/0236-3933-2019-5-4-19