ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИИ В ПРИБОРОСТРОЕНИИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКЕ

DESIGN AND TECHNOLOGY IN INSTRUMENTATION AND RADIO ELECTRONICS

УДК 620.1.08.
doi:10.21685/2307-4205-2022-2-7

ИНФОРМАЦИОННАЯ И МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ НАДЕЖНОСТИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ

З. М. Селиванова[1], К. В. Скоморохов[2]

[1, 2] Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия
[1] selivanova_zm@mail.ru, [2] kirillv6812@gmail.com

Аннотация. *Актуальность и цели.* Прогнозирование изменения надежности интеллектуальной информационно-измерительной системы является актуальной задачей при определении теплофизических свойств теплоизоляционных, композитных, строительных и других материалов на производственных предприятиях. Отказ интеллектуальной измерительной системы заключается в превышении погрешности измерений компонентов системы, что приводит к неточности контроля теплофизических свойств материалов и снижению качества выпускаемых материалов на производстве. Оценка надежности системы на основе созданных информационной и математических моделей прогнозирования надежности позволит своевременно поддерживать работоспособность структурных компонентов измерительной системы, повысить точность измерительной информации для расчета параметров теплофизических свойств материалов и, следовательно, улучшить качество выпускаемой продукции. *Материалы и методы.* Прогнозирование надежности интеллектуальной информационно-измерительной системы выполнено на основе классической теории надежности, математического моделирования, теории вероятности и математической статистики, методов программного и аппаратного самоконтроля, алгоритма прогнозирования надежности измерительной системы. *Результаты*. Разработаны информационная и математические модели для прогнозирования надежности интеллектуальной информационно-измерительной системы теплофизических свойств материалов, база знаний, что способствует повышению вероятности безотказной работы данной системы. *Выводы*. Прогнозирование надежности интеллектуальной информационно-измерительной системы позволяет исключить нарушение работоспособности системы, повысить точность получаемых измерительных данных с объекта контроля и обеспечить достоверность определяемых теплофизических свойств материалов для повышения качества выпускаемой продукции на производственных предприятиях.

Ключевые слова: прогнозирование надежности, интеллектуальная измерительная система, теплофизические свойства материалов

Для цитирования: Селиванова З. М., Скоморохов К. В. Информационная и математические модели для прогнозирования надежности интеллектуальной информационно-измерительной системы теплофизических свойств материалов // Надежность и качество сложных систем. 2022. № 2. С. 61–69. doi:10.21685/2307-4205-2022-2-7

© Селиванова З. М., Скоморохов К. В., 2022. Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License / This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

INFORMATION AND MATHEMATICAL MODELS FOR RELIABILITY PREDICTION OF INTELLIGENT INFORMATION-MEASURING SYSTEM OF THERMOPHYSICAL PROPERTIES OF MATERIALS

Z.M. Selivanova[1], K.V. Skomorokhov[2]

[1, 2] Tambov State Technical University, Tambov, Russia
[1] selivanova_zm@mail.ru, [2] kirillv6812@gmail.com

Abstract. *Background.* Predicting the change in the reliability of an intelligent information-measuring system is an urgent task in determining the thermophysical properties of heat-insulating, composite, building and other materials at manufacturing enterprises. The failure of an intelligent measuring system consists in exceeding the measurement error of the system components, which leads to inaccurate control of the thermophysical properties of materials and a decrease in the quality of manufactured materials in production. Evaluation of system reliability based on the created information and mathematical models of reliability prediction will make it possible to maintain the efficiency of the structural components of the measuring system in a timely manner, improve the accuracy of measuring information for calculating the parameters of the thermophysical properties of materials and, therefore, improve the quality of products. *Materials and methods.* The prediction of the reliability of an intelligent information-measuring system is based on the classical theory of reliability, mathematical modeling, probability theory and mathematical statistics, methods of software and hardware self-control, and an algorithm for predicting the reliability of a measuring system. *Results.* Information and mathematical models have been developed to predict the reliability of an intelligent information-measuring system of thermophysical properties of materials, a knowledge base, which helps to increase the probability of failure-free operation of this system. *Conclusions.* Forecasting the reliability of an intelligent information-measuring system makes it possible to exclude a violation of the system's operability, improve the accuracy of the measurement data obtained from the control object and ensure the reliability of the determined thermophysical properties of materials to improve the quality of products manufactured at manufacturing enterprises.

Keywords: reliability prediction, intelligent measuring system, thermophysical properties of materials

For citation: Selivanova Z.M., Skomorokhov K.V. Information and mathematical models for reliability prediction of intelligent information-measuring system of thermophysical properties of materials. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2022;(2):61–69. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2022-2-7

Введение

Контроль теплофизических свойств (ТФС) теплоизоляционных, композитных, строительных и других видов материалов с использованием интеллектуальной информационно-измерительной системы (ИИИС) необходим на производственных предприятиях для повышения качества выпускаемых материалов. На качество выпускаемой продукции оказывают влияние состав исходного сырья, технология изготовления, а также их теплофизические свойства, точность определения которых зависит от надежности ИИИС ТФС материалов. Надежность ИИИС при определении ТФС материалов – это свойство системы сохранять функции структурных компонентов без изменения во времени установленных эксплуатационных параметров в допустимых пределах и погрешность измерения измерительного канала ИИИС.

Методы прогнозирования надежности ИИИС ТФС материалов заключаются в оценке ожидаемого уровня надежности системы на основе информации о достигнутых значениях и выявленных тенденциях изменения прогнозируемой надежности измерительной системы, которая аналогична рассматриваемой ИИИС по назначению и принципу работы (ГОСТ Р 27.013–2019 (МЭК 62308:2006). Национальный стандарт российской федерации. Надежность в технике. Методы оценки показателей безотказности). Для оценки надежности ИИИС необходимо разработать информационную и математические модели прогнозирования надежности измерительной системы, математическую модель прогнозирования изменения теплопроводности материалов с течением времени, структурную схему ИИИС ТФС материалов с пополняемой базой знаний.

Материалы и методы

С учетом вышеизложенных задач разработана информационная модель для формирования математических моделей прогнозирования надежности и ИИИС теплофизических свойств материалов (рис. 1) [1, 2].

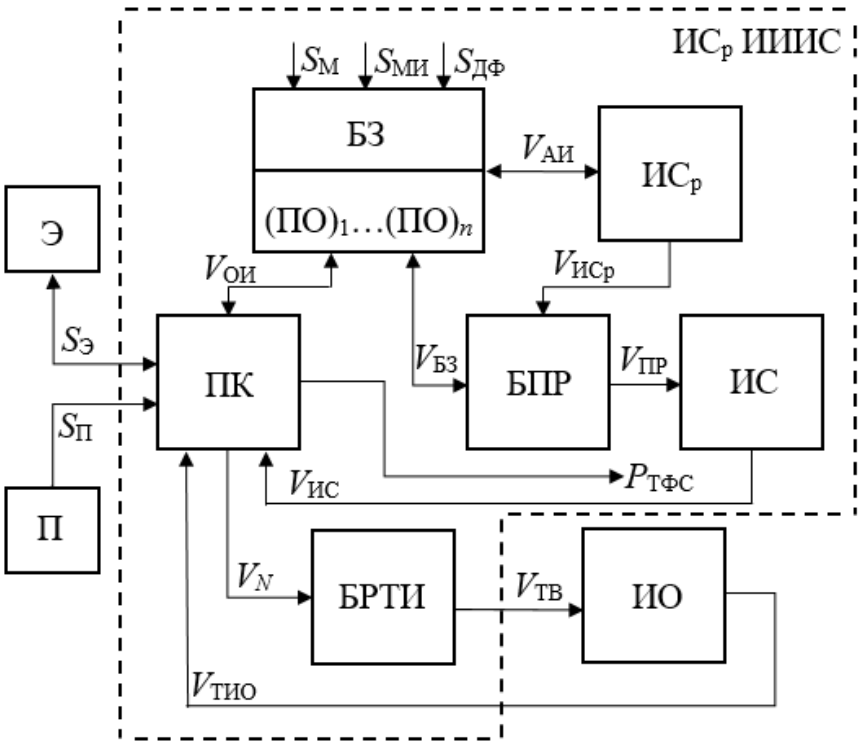


Рис. 1. Информационная модель ИИИС: ИСр – информационная среда; Э – эксперт; П – пользователь; БЗ – база знаний; ПК – персональный компьютер; БПР – блок принятия решений: ИС – виды измерительных ситуаций; БРТИ – блок, реализующий теплофизические измерения; ИО – исследуемые объекты; $(ПО)_1…(ПО)_n$ – сведения о предметных областях, n – количество предметных областей; $S_{МИ}$ – данные о методах измерений ТФС исследуемых объектов; $S_{ДФ}$ – сведения о виде дестабилизирующего фактора (ДФ); $S_М$ – данные об объекте исследования; $S_э$ – информация экспертов; $S_п$ – данные пользователей; $V_{ОИ}$ – процессы обменов информационными данными; $V_{ИСр}$ – измерительная среда на основе базы знаний; $V_{ПР}$ – формирование принятия решения с использованием БЗ; $V_{ИС}$ – формирование информационных данных для персонального компьютера об измерительных ситуациях; $P_{ТФС}$ – параметры ТФС материалов; $V_{ТИО}$ – данные о значениях температур ИО; V_N – значения мощностей тепловых воздействий на исследуемые материалы; $V_{ТВ}$ – информационные данные о нагреве материалов; $V_{АИ}$ – виды априорной информации

При проведении теплофизических измерений материалов блок принятия решения выполняет функции идентификации и выбора измерительных ситуаций для соответствующих диапазонов теплопроводности объектов исследования. На основе данных информационной модели интеллектуальной системы в зависимости от предметных областей исследований персональный компьютер реализует применяемый метод определения теплофизических свойств объектов и обрабатывает поступающую измерительную информацию с исследуемого материала с использованием априорных данных БЗ. Созданное информационное поле позволяет сформировать требования к объекту прогнозирования надежности – ИИИС ТФС исследуемых материалов (ИМ).

Информационная модель ИИИС $М_{инфИИИС}$ представлена в виде кортежа множеств:

$$М_{инфИИИС} =< \mathbf{T}_{ИМ}, \mathbf{U}_{П}, \mathbf{V}_{ДФ}, \mathbf{X}_{вхДФ}, \mathbf{Y}_{выхДФ}, \mathbf{J}_{ИП}, \mathbf{J}_{ИЭ}, \mathbf{J}_{БЗ}, \mathbf{J}_{БПР}, \mathbf{S}_{ИИИС}, \mathbf{K}_{ИИИС} >,$$

где приведены множества: $\mathbf{T}_{ИМ} = \{T_{ИМi}, i = 1,..., N\}$ – выходные сигналы датчиков ИМ; $\mathbf{U}_{П} = \{U_i, i = 1,..., m\}$ – определяемые параметры ТФС; $\mathbf{V}_{ДФ} = \{V_{ДФi}, i = 1,..., n\}$ – дестабилизирующие факторы; $\mathbf{X}_{вхДФ} = \{X_{вхДФi}, i = 1,..., x\}$ – входные сигналы при влиянии ДФ; $\mathbf{Y}_{выхДФ} = \{Y_{выхДФi}, i = 1,..., y\}$ – выходные сигналы с учетом ДФ; $\mathbf{J}_{ИП} = \{J_{ИПi}, i = 1,..., l\}$ – информация, представленная пользователем; $\mathbf{J}_{ИЭ} = \{J_{ИЭi}, i = 1,..., h\}$ – информация, данная экспертом; $\mathbf{J}_{БЗ} = \{J_{БЗi}, i = 1,..., k\}$ – информация,

представленная в БЗ; $\mathbf{J}_{\text{БПР}} = \{J_{\text{БПРi}}, i = 1,...,r\}$ – информация, формируемая БПР; $\mathbf{S}_{\text{ИИИС}} = \{S_{\text{ИИИС}i}, i = 1,..., j\}$ – виды структур интеллектуальных информационно-измерительных систем; $\mathbf{K}_{\text{ИИИС}} = \{\Pi_{\text{Т}}, \Pi_{\text{оп}}, \delta\}$ – критерии, позволяющие оценить надежность ИИИС ТФС материалов ($\Pi_{\text{т}}$ – потери точности, $\Pi_{\text{оп}}$ – потери оперативности, δ – погрешность измерения).

Информационная среда ИИИС включает созданную базу знаний на основе фреймовой модели представления знаний (рис. 2). База знаний создана с использованием фреймов, применяющихся для реализации интеллектуального алгоритма функционирования ИИИС ТФС материалов. Фреймовая модель базы знаний создана в нотации *UML* на платформе для моделирования *StarUML.* База знаний содержит априорную информацию, которая используется в процессе функционирования измерительной системы. Информационное обеспечение ИИИС позволяет получить, обрабатывать, анализировать, хранить, а также извлекать необходимую измерительную информацию о теплофизических свойствах материалов.

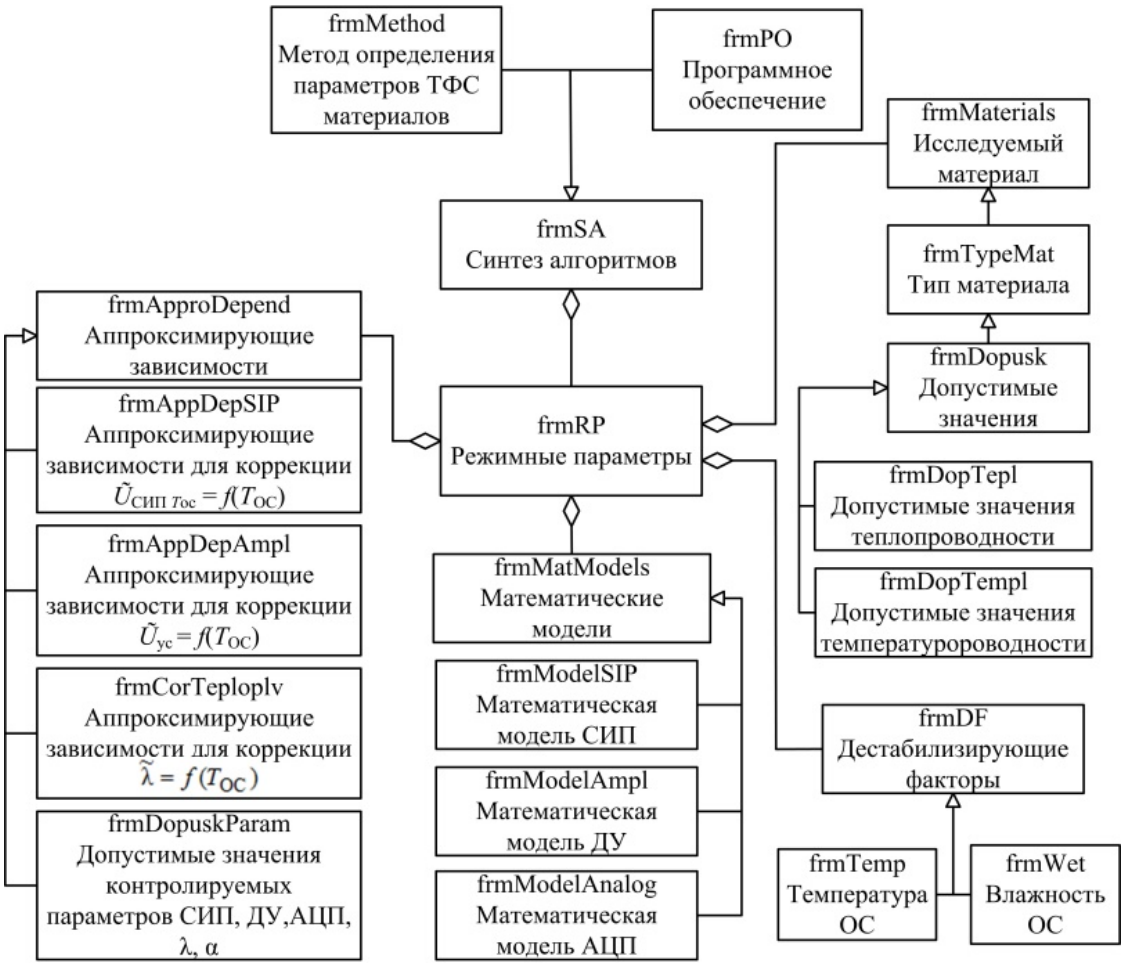


Рис. 2. Фреймовая модель знаний ИИИС ТФС материалов: СИП – система измерительных преобразователей; ДУ – дифференциальные усилители; АЦП – аналого-цифровые преобразователи; $\tilde{U}_{\text{СИП}}$ – сигнал на выходе СИП; $\tilde{U}_{\text{УС}}$ – сигнал на выходе усилителя; $T_{\text{ОС}}$ – температура окружающей среды

Информационная модель и фреймовая модель представления знаний служат основой для разработки ИИИС ТФС исследуемых объектов (рис. 3) [3–5].

ИИИС ТФС материалов выполнена на базе микроконтроллера *PIC18F8720,* который имеет большой объем памяти, высокое быстродействие, многоканальный параллельный информационный ввод-вывод. Функции микроконтроллера: обработка измерительной информации с термопар; управление выбором режимов работы системы и нагревом ИМ при проведении теплофизических измерений; осуществление контроля измерительной информации с выходов термопар, усилителей и АЦП и их погрешностей измерений; реализация интеллектуального алгоритма коррекции измерительной

информации структурных компонентов с использованием полученных аппроксимирующих зависимостей и проверки их соответствия заданному допуску, а также применение интеллектуального алгоритма прогнозирования надежности ИИИС. В базе знаний ИИИС ТФС исследуемых объектов хранится информация об алгоритмах функционирования системы; методах контроля коэффициентов λ и α исследуемых объектов, принятия решений при реализации интеллектуальных алгоритмов функционирования и прогнозирования надежности ИИИС. Согласно изменяющимся условиям функционирования ИИИС, информационной среды в системе применяется адаптивный интеллектуальный алгоритм, выполняющий процедуры коррекции результатов измерений компонентов измерительного канала с использованием информационной и математической моделей для прогнозирования надежности системы с учетом текущей и априорной информации об объектах исследования, представленных в базе знаний ИИИС. Алгоритмическое обеспечение ИИИС ТФС материалов реализовано с использованием разработанного программного обеспечения на основе языка программирования С++ и компилятора CCS PCWH. Повышение надежности ИИИС осуществляется методом самоконтроля системы на основе допускового контроля выходной информации компонентов измерительного канала с использованием программного обеспечения [6, 7].

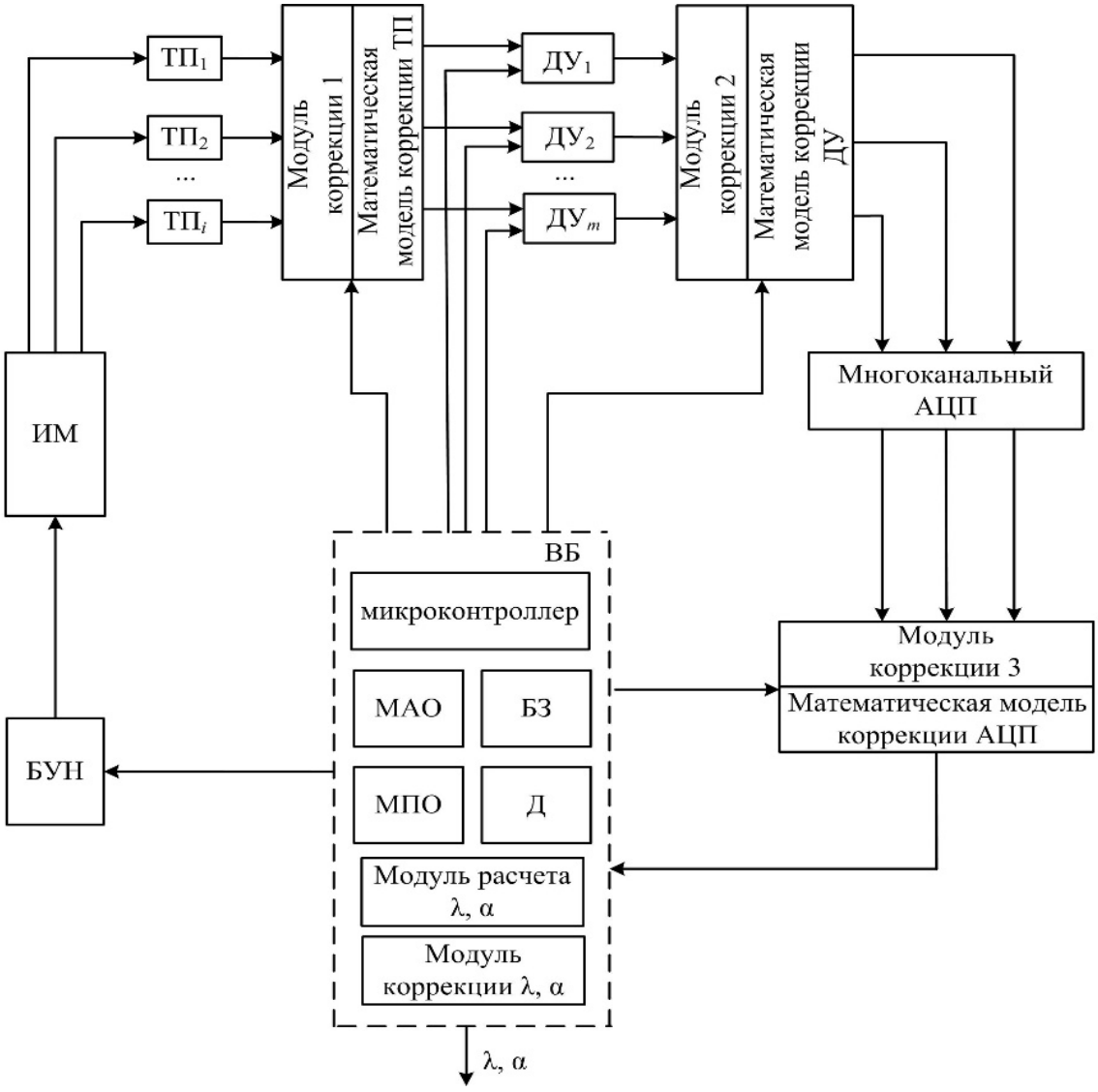


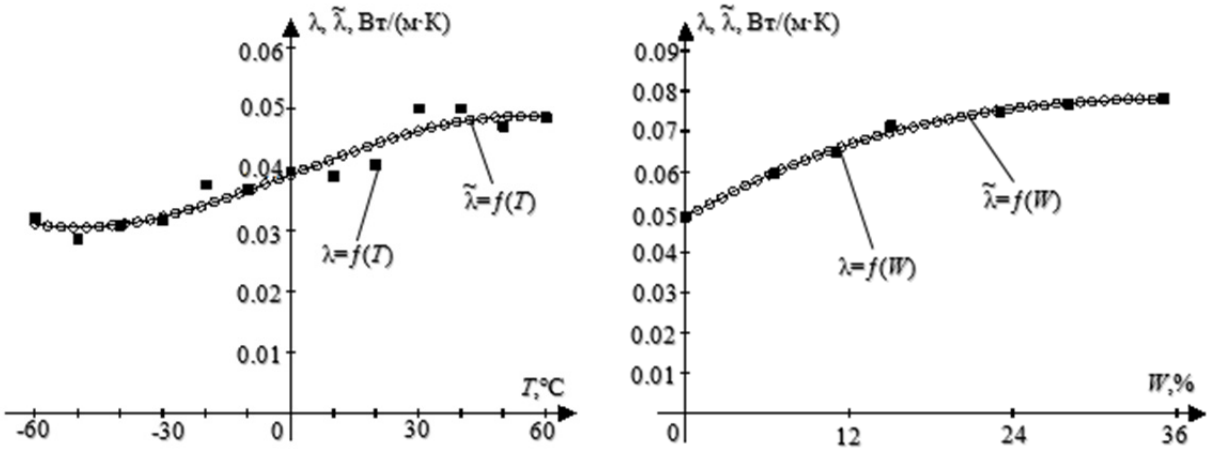
Рис. 3. Структурная схема ИИИС для определения теплофизических свойств материалов и прогнозирования надежности системы: ТП1, ТП2, ..., $ТП_i$ – система термопар, размещенная в контактной области ИМ и измерительного зонда; i – число термопар; ДУ1, ДУ2, ..., $ДУ_m$ – дифференциальные усилители; m – количество усилителей; ВБ – вычислительный блок, включающий: МК – микроконтроллер; МАО – модуль алгоритмического обеспечения; МПО – модуль программного обеспечения; модули коррекции результатов измерения; модули расчета и коррекции λ и α; Д – дисплей; БУН – блок управления нагревом ИМ

Экспериментальные исследования ИИИС позволили получить зависимости коэффициентов теплопроводности λ и температуропроводности α теплоизоляционных, строительных и других материалов от температуры $\lambda = f(T)$, влажности $\lambda = f(W)$ и их аппроксимирующие функции $\tilde{\lambda} = f(T)$, $\tilde{\lambda} = f(W)$, хранящиеся в базе знаний ИИИС. Пример зависимостей для минеральной ваты приведен на рис. 4.

Аппроксимирующие зависимости $\tilde{\lambda} = f(T)$, $\tilde{\lambda} = f(W)$ имеют следующий вид:

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

$$\tilde{\lambda} = f(W) = 2{,}86 \cdot 10^{-7} W^3 - 4{,}27 \cdot 10^{-5} W^2 + 0{,}0019 W + 0{,}048.$$



а) *б*)

Рис. 4. Зависимости результатов измерения теплопроводности минеральной ваты от температуры $\lambda = f(T)$:
а – влажности $\lambda = f(W)$; *б* – аппроксимирующие функции $\tilde{\lambda} = f(T)$, $\tilde{\lambda} = f(W)$

Если λ и α не соответствуют области допуска, то выполняется их коррекция с использованием аппроксимирующих зависимостей, хранящихся в БЗ ИИИС.

Постановка задачи прогнозирования надежности ИИИС ТФС материалов. При аналитическом прогнозировании измерительные сигналы компонентов измерительного канала $P_{\tau i} = (p_1, p_2, \ldots, p_i)$, контролируемые в интервалы времени $\tau_1, \tau_2, ..., \tau_i$, необходимо определить в последующие временные интервалы τ_{i+1}. Решение задачи прогнозирования надежности ИИИС аналитическим методом сводится к формированию массива измерительной информации прогнозируемых параметров $P_{\tau i}$, анализу данных, получению аппроксимирующей функции, по которой определяется прогнозируемая величина параметра $P_{\tau i}$ [8–10].

Математическая модель прогнозирования изменения теплофизических свойств исследуемых материалов представлена в виде следующей аналитической зависимости:

$$P_{Q_{n+1}} = A P_{Q_{ni}} f(\rho, W, T) + \delta_{P_{Q_{ni}}},$$

где $P_{Q_{n+1}}$ – прогнозируемые параметры материалов; A – коэффициент коррекции параметров теплоизоляционных материалов; $P_{Q_{ni}}$ – параметры объектов при исследовании; $\delta_{P_{Q_{ni}}}$ – погрешность определения ТФС объектов; ρ – плотность материалов.

Модель прогнозирования свойств материалов позволяет определить направления изменения теплофизических свойств материалов при установлении качества теплозащитных покрытий объектов.

Разработана графовая математическая модель прогнозирования ТФС материалов (рис. 5).

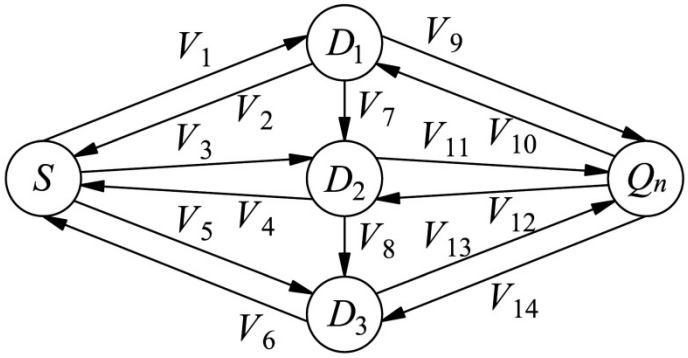


Рис. 5. Графовая математическая модель прогнозирования состояния теплозащитного покрытия объектов: S – ИИИС ТФС материалов; D_1, D_2, D_3 – датчики плотности покрытия объекта (ρ), влажности (W) и температуры (T) соответственно; Q_n – покрытие объекта; n – вид материала покрытия; $V_1 \dots V_{14}$ – информационные сигналы между вершинами графа

В соответствии с графовой моделью на рис. 5

$$V_i = \begin{cases} 0, \text{если } D_1 \text{ подключается } Q_n, \\ 1, \text{если } D_2 \text{ подключается } Q_n, \\ 01, \text{если } D_3 \text{ подключается } Q_n. \end{cases}$$

Таким образом,

$$V_1 + V_2 + V_7 + V_8 + V_9 + V_{10} = 0,$$

$$V_1 + V_3 + V_4 + V_7 + V_8 + V_{11} + V_{12} = 1,$$

$$V_1 + V_5 + V_6 + V_7 + V_8 + V_{13} + V_{14} = 01.$$

При прогнозировании состояния теплозащитных покрытий объектов применяется метод экстраполяции при оценке будущих состояний качества покрытий на основе результатов исследований качественных показателей и статистической связи параметров покрытия объекта в настоящем и прошлом.

Прогнозирование погрешности при определении λ осуществляется с использованием полученных экспериментальным путем аппроксимирующих зависимостей относительной погрешности λ от погрешностей структурных элементов в измерительном канале системы:

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

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

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

Результаты и обсуждение

Разработана информационная модель ИИИС ТФС материалов, отличающаяся наличием созданной базы знаний, содержащей информацию о параметрах разработанных математических моделей, методах определения ТФС материалов и аппроксимирующих зависимостях теплопроводности и температуропроводности материалов от температуры и влажности среды.

Математические модели прогнозирования используются для определения направления изменений контролируемых параметров ТФС исследуемых материалов с целью повышения качества выпускаемой продукции на предприятии.

Рекомендуется применение ИИИС с предложенным математическим и алгоритмическим обеспечением для контроля теплофизических свойств теплозащитных покрытий объектов, непрерывного или периодического мониторинга, анализа и прогнозирования уровня качества теплоизоляционных материалов.

Заключение

Информационное обеспечение использовано при разработке ИИИС ТФС материалов для реализации расчетно-аналитических функций и использования априорных данных для точного определения ТФС материалов и повышения качества изготавливаемых материалов на производстве.

Разработана структурная схема ИИИС теплофизических свойств исследуемых объектов, включающая разработанную информационную модель, базу знаний, реализующая предложенные математические модели прогнозирования надежности системы, интеллектуальные алгоритмы коррекции результатов измерений коэффициентов тепло- и температуропроводности, что позволяет повысить точность контроля теплофизических свойств материалов.

Математическое и информационное моделирование, тестовый самоконтроль структурных компонентов измерительного канала ИИИС на основе программного метода, алгоритмов коррекции технического несовершенства измерительной системы для повышения вероятности безотказной работы ИИИС обеспечило повышение надежности ИИИС ТФС материалов, что способствует повышению качества выпускаемой продукции на предприятии, сохранению необходимой теплоизоляции и увеличению срока эксплуатации теплозащитных покрытий исследуемых объектов.

Список литературы

1. Андрейчиков А. В., Андрейчикова О. Н. Интеллектуальные информационные системы и методы искусственного интеллекта. М. : ИНФРА-М, 2021. 530 с.
2. Selivanova Z. M., Kurenkov D. S., Hoang T. A. Modelling of intelligent information measuring system to control hermophysical properties of materials and products // Journal of Physics: Conference Series. 2019. Vol. 1278. P. 012040. doi:10.1088/1742-6596/1278/1/012040
3. Селиванова З. М., Куренков Д. С. Интеллектуальная информационно-измерительная система дистанционного контроля качественных параметров теплоизоляционных материалов в условиях воздействия дестабилизирующих факторов // Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2020. Т. 26, № 1. С. 6–19. doi:10.17277/vestnik.2020.01.pp.006-019
4. Селиванова З. М., Куренков Д. С., Калинин В. Ф., Пасечников И. И. Повышение оперативности контроля теплофизических свойств теплоизоляционных материалов интеллектуальной информационно-измерительной системой // Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2018. Т. 24, № 3. С. 424–436. doi:10.17277/vestnik.2018.03.pp.424-436
5. Selivanova Z. M., Khoan T. A. A Systematic Method of Improving the Accuracy of an Information and Measuring System for Determining the Thermophysical Properties of Materials Under the Effect of Destabilizing Factors // Measurement Techniques. 2017. Vol. 60. P. 473–480. doi:10.1007/s11018-017-1220-5
6. Selivanova Z. M., Kurenkov D. S., Varepo L. G., Trapeznikova O. V. Intelligent system functioning for thermophysical measurements in an uncertain measuring situation // Journal of Physics: Conference Series. 2021. Vol. 1791. P. 012110. doi:10.1088/1742-6596/1791/1/012110
7. Селиванова З. М., Скоморохов К. В. Идентификация измерительной ситуации при неопределенности теплофизических измерений // Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2021. Т. 27, № 4. С. 516–527. doi:10.17277/vestnik.2021.04
8. Селиванова З. М., Хоан Т. А. Оценка надежности информационно-измерительной системы теплофизических свойств материалов при воздействии дестабилизирующих факторов // Надежность и качество сложных систем. 2016. № 4. С. 13–19. doi:10.21685/2307-4205-2016-4-2
9. Михайлов В. С., Юрков Н. К. Интегральные оценки в теории надежности. Введение и основные результаты : монография. М. : Техносфера, 2020. 152 с.
10. Викторова В. С., Степанянц А. С. Модели и методы расчета надежности технических систем. Изд. 2-е, испр. М. : Ленанд, 2016. 256 с.

References

1. Andreychikov A.V., Andreychikova O.N. *Intellektual'nye informatsionnye sistemy i metody iskusstvennogo intellekta = Intelligent information systems and methods of artificial intelligence*. Moscow: INFRA-M, 2021:530. (In Russ.)
2. Selivanova Z.M., Kurenkov D.S., Hoang T.A. Modelling of intelligent information measuring system to control hermophysical properties of materials and products. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019;1278:012040. doi:10.1088/1742-6596/1278/1/012040
3. Selivanova Z.M., Kurenkov D.S. Intelligent information-measuring system for remote control of quality parameters of thermal insulation materials under the influence of de-stabilizing factors. *Vestnik Tambovskogo gosudar-*

stvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Tambov State Technical University. 2020;26(1):6–19. (In Russ.). doi:10.17277/vestnik.2020.01.pp.006-019
4. Selivanova Z.M., Kurenkov D.S., Kalinin V.F., Pasechnikov I.I. Increasing the efficiency of control of thermophysical properties of thermal insulation materials by an intelligent information-measuring system. *Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Tambov State Technical University*. 2018;24(3):424–436. (In Russ.). doi:10.17277/vestnik.2018.03.pp.424-436
5. Selivanova Z.M., Khoan T.A. A Systematic Method of Improving the Accuracy of an Information and Measuring System for Determining the Thermophysical Properties of Materials Under the Effect of Destabilizing Factors. *Measurement Techniques*. 2017;60:473–480. doi:10.1007/s11018-017-1220-5
6. Selivanova Z.M., Kurenkov D.S., Varepo L.G., Trapeznikova O.V. Intelligent system functioning for thermophysical measurements in an uncertain measuring situation. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021;1791:012110. doi:10.1088/1742-6596/1791/1/012110
7. Selivanova Z.M., Skomorokhov K.V. Identification of the measuring situation with the uncertainty of thermophysical measurements. *Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Tambov State Technical University*. 2021;27(4):516–527. (In Russ.). doi:10.17277/vestnik.2021.04
8. Selivanova Z.M., Khoan T.A. Evaluation of the reliability of the information-measuring system of thermophysical properties of materials under the influence of destabilizing factors. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2016;(4):13–19. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2016-4-2
9. Mikhaylov V.S., Yurkov N.K. *Integral'nye otsenki v teorii nadezhnosti. Vvedenie i osnovnye rezul'taty: monografiya = Integral estimates in the theory of reliability. Introduction and main results : monograph*. Moscow: Tekhnosfera, 2020:152. (In Russ.)
10. Viktorova V.S., Stepanyants A.S. *Modeli i metody rascheta nadezhnosti tekhnicheskikh sistem = Models and methods for calculating the reliability of technical systems*. 2nd ed. rev. Moscow: Lenand, 2016:256. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Зоя Михайловна Селиванова
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры конструирования
радиоэлектронных и микропроцессорных систем,
Тамбовский государственный
технический университет
(Россия, г. Тамбов, ул. Советская, 106)
E-mail: selivanova_zm@mail.ru

Zoya M. Selivanova
Doctor of technical sciences, professor,
professor of the sub-department of design
of radio-electronic and microprocessor systems,
Tambov State Technical University
(106 Sovetskaya street, Tambov, Russia)

Кирилл Викторович Скоморохов
аспирант,
Тамбовский государственный
технический университет
(Россия, г. Тамбов, ул. Советская, 106)
E-mail: kirillv6812@gmail.com

Kirill V. Skomorokhov
Postgraduate student,
Tambov State Technical University
(106 Sovetskaya street, Tambov, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /
The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию/Received 15.12.2021
Поступила после рецензирования/Revised 10.01.2022
Принята к публикации/Accepted 15.02.2022