

ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ДЕСТАБИЛИЗИРУЮЩИХ ФАКТОРОВ

З. М. Селиванова, Т. А. Хоан

На производственных предприятиях при изготовлении теплоизоляционных, композитных, строительных и других материалов, а также изделий из них широко применяются информационно-измерительные системы (ИИС) для измерения и неразрушающего контроля (НК) параметров теплофизических свойств (ТФС) выпускаемой продукции. Необходимое условие точного и достоверного контроля параметров ТФС материалов ($Q_{ТФС}$) при воздействии дестабилизирующих факторов ($Q_{ДФ}$) – это обеспечение надежности функционирования структурных компонентов ИИС [1]. Поэтому повышение вероятности безотказной работы информационно-измерительной системы является важной и актуальной задачей.

Эффективность функционирования ИИС определяют основные характеристики: надежность, быстродействие, достоверность измерительной информации, метрологические характеристики. Надежность – важнейшая характеристика ИИС, при оценке которой учитываются среднее время восстановления компонентов системы, вероятность восстановления в течение заданного времени, средняя наработка системы на отказ, интенсивность отказов, вероятность безотказной работы [2, 3].

Выполним оценку надежности ИИС НК ТФС материалов и рассмотрим направления повышения надежности системы при воздействии основных дестабилизирующих факторов – температуры и влажности окружающей среды.

Анализ функционирования ИИС показывает, что большинство отказов происходят в результате нарушения работоспособности структурных компонентов ИИС при влиянии ДФ: системы измерительных преобразователей (СИП) – датчиков температуры (термопар), коммутатора каналов (КК), системы дифференциальных усилителей (СДУ), аналого-цифрового преобразователя (АЦП), блока управления нагревом (БУН), микроконтроллера (МК) [1]. Структурная схема ИИС НК ТФС материалов представлена на рис. 1.

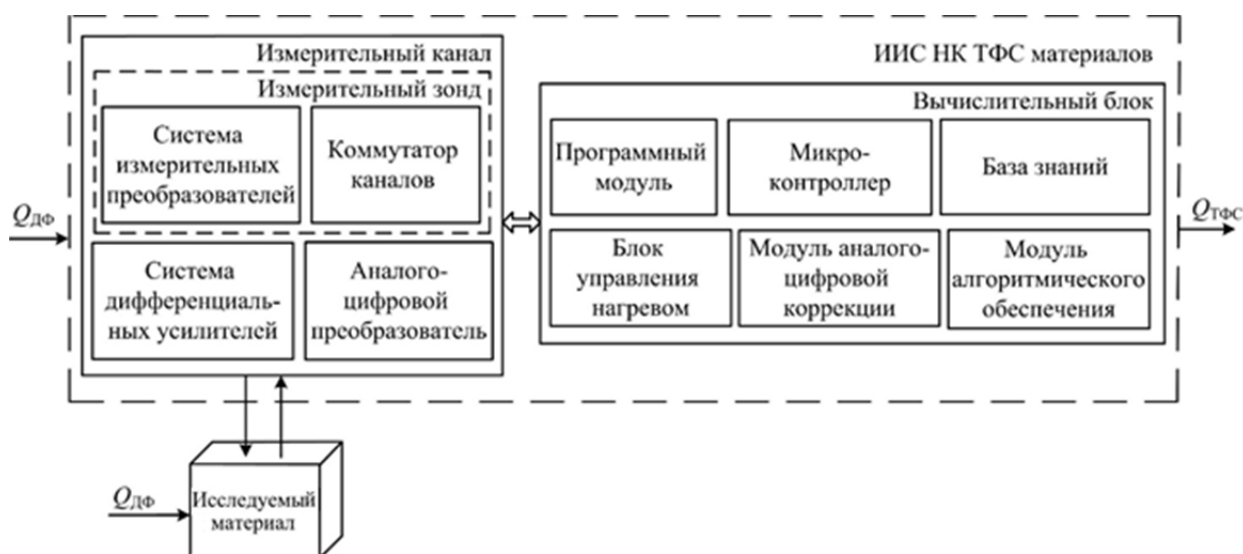


Рис. 1. Структурная схема ИИС НК ТФС материалов

Принцип действия ИИС заключается в импульсном тепловом воздействии измерительного зонда (ИЗ) на исследуемый материал (ИМ) с последующей регистрацией температурно-

временных характеристик в области контакта ИЗ и ИМ, данные которых записываются в базу знаний (БЗ) ИИС и используются для расчета определяемых параметров ТФС материалов.

Среднее время безотказной работы информационно-измерительной системы – основной показатель надежности ИИС. Время безотказной работы зависит от надежности структурных компонентов системы и рассчитывается по методике оценки надежности многокомпонентных систем.

Выполнен расчет показателей надежности предложенной ИИС ТФС материалов. Для расчета показателей надежности принимается средняя наработка до отказа структурных компонентов системы:

- а) системы измерительных преобразователей – $N_{СИП} = 20\,000$ ч;
- б) коммутатора каналов – $N_{КК} = 140\,000$ ч;
- в) дифференциального усилителя – $N_{СДУ} = 21\,000$ ч;
- г) аналого-цифрового преобразователя – $N_{АЦП} = 120\,000$ ч;
- д) блока управления нагревом – $N_{БУН} = 100\,000$ ч;
- е) микроконтроллера *PIC 18F8720* – $N_{МК} = 175\,000$ ч.

Проведен расчет вероятностей безотказной работы для ИИС НК ТФС материалов. При экспоненциальном законе распределения времени до отказа вероятность безотказной работы одного структурного компонента ИИС рассчитывается по следующей формуле [3]:

$$P_i(t) = e^{-\lambda_i t}, \quad (1)$$

где λ_i – интенсивность отказов i -го компонента, $1/\text{ч}$; t – время, при расчете принимается $t = 2000$ ч.

Интенсивность отказов i -го компонента определяется по формуле [3]

$$\lambda_i = \frac{1}{N_i}. \quad (2)$$

В соответствии с формулами (1) и (2) выполнен расчет интенсивности отказов и вероятности безотказной работы структурных компонентов ИИС.

Интенсивность отказов датчика температуры:

$$\lambda_{СИП} = \frac{1}{20\,000} = 5 \cdot 10^{-5} \frac{1}{\text{ч}}. \quad (3)$$

Вероятность безотказной работы датчика температуры за время $t = 2000$ ч:

$$P_{СИП}(t) = e^{(-5 \cdot 10^{-5}) \cdot 2000} = 0,904. \quad (4)$$

Интенсивность отказов коммутатора каналов:

$$\lambda_{КК} = \frac{1}{140\,000} = 7,14 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\text{ч}}. \quad (5)$$

Вероятность безотказной работы коммутатора каналов за 2000 ч:

$$P_{КК}(t) = e^{(-7,14 \cdot 10^{-6}) \cdot 2000} = 0,986. \quad (6)$$

Интенсивность отказов дифференциального усилителя:

$$\lambda_{СДУ} = \frac{1}{21\,000} = 4,76 \cdot 10^{-5} \frac{1}{\text{ч}}. \quad (7)$$

Вероятность безотказной работы дифференциального усилителя:

$$P_{СДУ}(t) = e^{(-4,76 \cdot 10^{-5}) \cdot 2000} = 0,909. \quad (8)$$

Интенсивность отказов аналого-цифрового преобразователя:

$$\lambda_{АЦП} = \frac{1}{120\,000} = 8,33 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\text{ч}}. \quad (9)$$

Вероятность безотказной работы аналого-цифрового преобразователя:

$$P_{\text{АЦП}}(t) = e^{(-8,33 \cdot 10^{-6}) \cdot 2000} = 0,984. \quad (10)$$

Интенсивность отказов блока управления нагревом:

$$\lambda_{\text{БУН}} = \frac{1}{100\,000} = 1 \cdot 10^{-5} \frac{1}{\text{ч}}. \quad (11)$$

Вероятность безотказной работы блока управления нагревом:

$$P_{\text{БУН}}(t) = e^{(-1 \cdot 10^{-5}) \cdot 2000} = 0,98. \quad (12)$$

Интенсивность отказов микроконтроллера:

$$\lambda_{\text{МК}} = \frac{1}{175\,000} = 0,57 \cdot 10^{-5} \frac{1}{\text{ч}}. \quad (13)$$

Вероятность безотказной работы микроконтроллера:

$$P_{\text{МК}}(t) = e^{(-0,57 \cdot 10^{-5}) \cdot 2000} = 0,989. \quad (14)$$

Проведен расчет показателей надежности ИИС НК ТФС материалов с учетом интенсивности отказов и вероятности безотказной работы структурных компонентов ИИС. Вероятность безотказной работы системы с последовательной организацией структурных компонентов системы за 2000 ч работы определяется по следующей зависимости [4, 5]:

$$P_{\text{ИИС}}(t) = \prod_{i=1}^n P_i(t), \quad (15)$$

где n – число последовательно соединенных структурных компонентов ИИС НК ТФС материалов.

В соответствии (15) вероятность безотказной работы ИИС НК ТФС материалов

$$P_{\text{ИИС}}(t) = P_{\text{СИП}}(t) \cdot P_{\text{КК}}(t) \cdot P_{\text{СДУ}}(t) \cdot P_{\text{АЦП}}(t) \cdot P_{\text{БУН}}(t) \cdot P_{\text{МК}}(t), \quad (16)$$

$$P_{\text{ИИС}}(t) = 0,904 \cdot 0,986 \cdot 0,909 \cdot 0,984 \cdot 0,98 \cdot 0,989 = 0,77. \quad (17)$$

Как показывают расчеты (3) – (17), вероятность безотказной работы ИИС за 2000 ч составляет всего 0,77, что является низким показателем, по сравнению с требуемым для данного класса измерительных средств – не менее 0,92.

Для повышения надежности системы используют основные методы самоконтроля системы: тестового контроля программным методом и аппаратного контроля. При тестовом самоконтроле проверяются компоненты системы, осуществляющие обработку измерительной информации. При аппаратном самоконтроле применяется измерительная аппаратура для проверки функционирования структурных компонентов системы. Для безотказной работы структурных компонентов и повышения надежности ИИС предлагается применить в системе поэлементное резервирование, реализуемое для тех структурных компонентов измерительного канала (ИК) ИИС, которые с большей вероятностью могут отказать в процессе функционирования системы. Как показывают результаты проверки их отказоустойчивости, наиболее подвержены отказам в работе подсистемы измерительных преобразователей и дифференциальных усилителей. Резервирование осуществляется по параллельной, наиболее эффективной схеме (рис. 2).

В случае отказа СИП или СДУ автоматически подключается параллельно включенный исправный элемент. Работоспособность СИП и СДУ определяется перед началом процесса измерения в системе в соответствии с алгоритмом тестового самоконтроля компонентов программным методом на соответствие уровня их выходных сигналов заданным допустимым значениям.

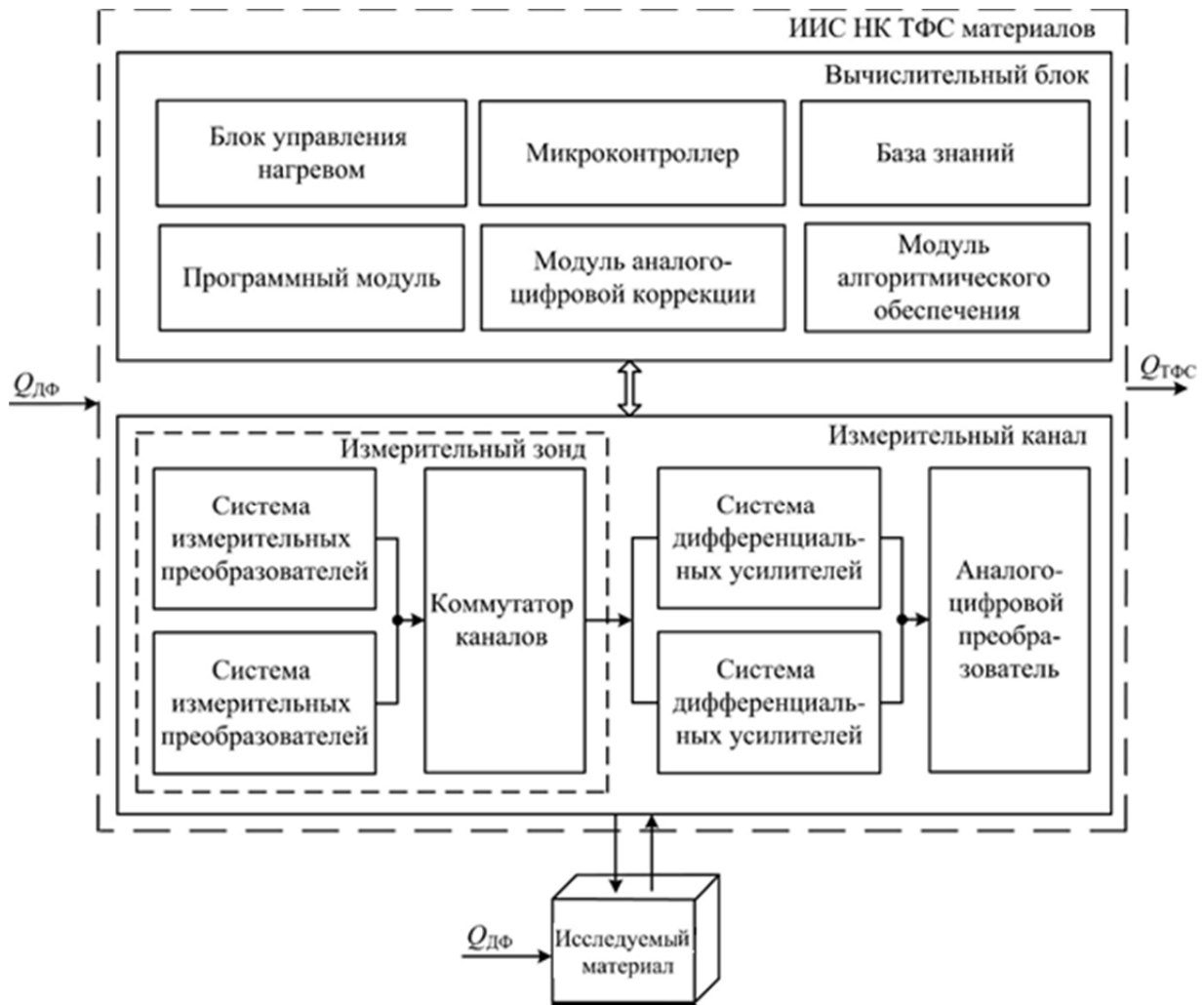


Рис. 2. Структурная схема ИИС ТФС материалов с резервированием структурных компонентов

Вероятность безотказной работы резервной структуры (РС) компонентов ИИС при их параллельном соединении рассчитывается по формуле [4, 5]

$$P_{\text{РС ИИС}}(t) = 1 - \prod_{i=1}^m [1 - P_i(t)], \quad (18)$$

где m – число параллельно включенных структурных компонентов ИК ИИС.

Вероятность безотказной работы параллельно включенных компонентов СИП определяется по формуле

$$P_{\text{РС СИП}}(t) = 1 - \prod_{i=1}^2 (1 - 0,904) = 0,991. \quad (19)$$

Вероятность безотказной работы параллельно включенных компонентов СДУ рассчитывается по выражению

$$P_{\text{РС СДУ}}(t) = 1 - \prod_{i=1}^2 (1 - 0,909) = 0,992. \quad (20)$$

Вероятность безотказной работы ИИС НК ТФС материалов с параллельным резервированием СИП – датчиков температуры, и СДУ определяется следующим образом:

$$P_{\text{РС ИИС}}(t) = 0,991 \cdot 0,986 \cdot 0,992 \cdot 0,984 \cdot 0,98 \cdot 0,989 = 0,92. \quad (21)$$

Интенсивность отказов ИИС НК ТФС материалов с параллельным резервированием равна

$$\lambda_{\text{РС ИИС}} = -\frac{\ln 0,92}{2000} = 4,17 \cdot 10^{-5} \frac{1}{\text{ч}}.$$

Средняя наработка до отказа ИИС НК ТФС материалов с параллельным резервированием рассчитывается по формуле:

$$N_{\text{С ИИС}} = \frac{1}{\lambda_{\text{РС ИИС}}} = \frac{1}{4,17 \cdot 10^{-5}} = 23\,980 \text{ ч}.$$

Как следует из анализа результатов расчетов (18)–(21), при параллельном резервировании структурных компонентов измерительного канала ИИС – СИП и СДУ, имеющих низкую вероятность безотказной работы по сравнению с другими компонентами ИК ИИС, вероятность безотказной работы системы повысилась с 0,77 до 0,92, что свидетельствует о повышении надежности ИИС.

В случае несоответствия определяемых параметров ТФС материалов (коэффициентов тепло- и температуропроводности – λ, α) области допустимых значений (доп.) проводится их коррекция по аппроксимирующим зависимостям, представленным в базе знаний ИИС в соответствии с разработанным алгоритмом коррекции (рис. 3).

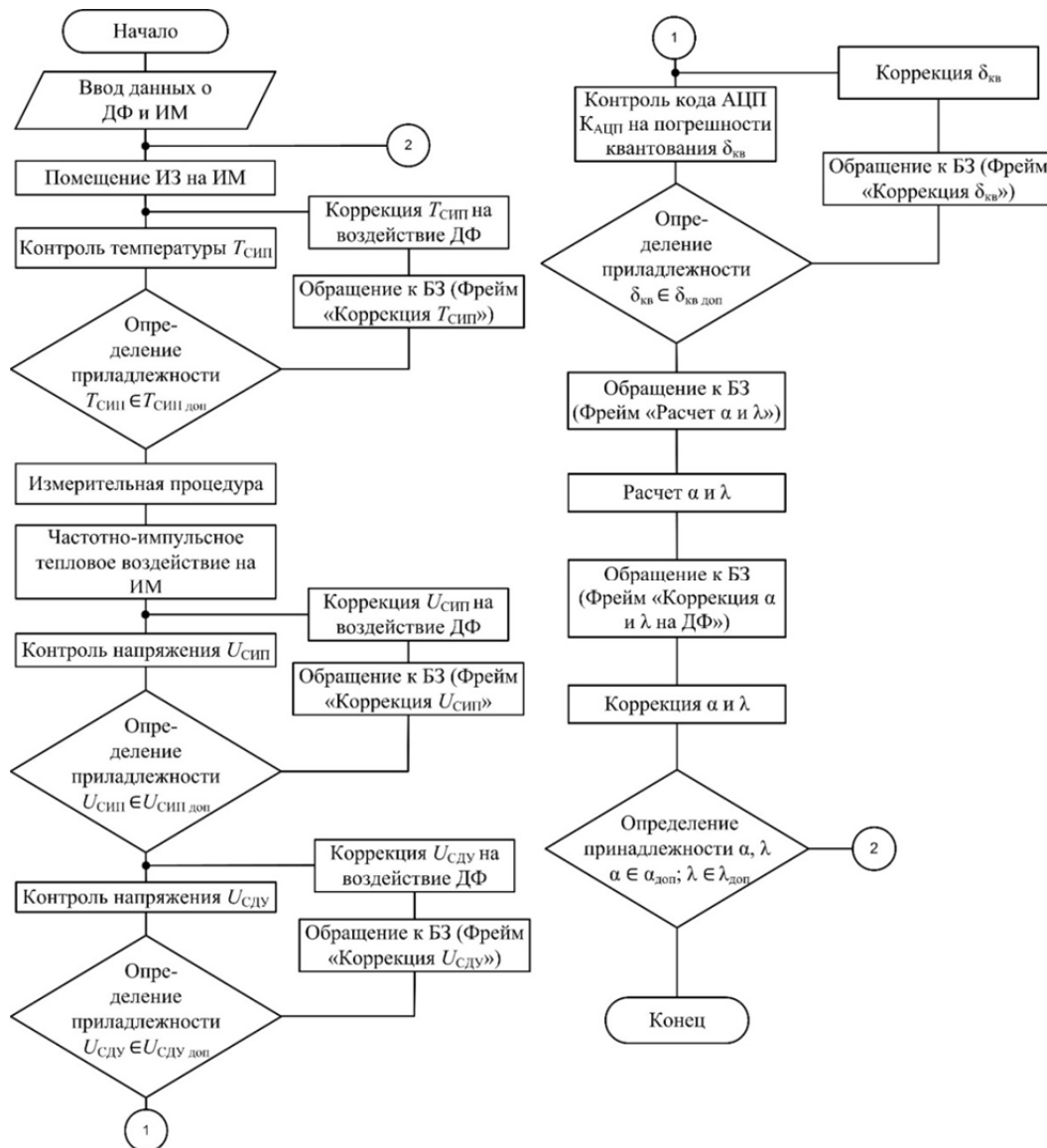


Рис. 3. Блок-схема алгоритма функционирования ИИС НК ТФС материалов и коррекции ее технического несовершенства

Проведены экспериментальные исследования ИИС НК ТФС материалов с параллельным резервированием структурных компонентов измерительного канала ИИС – СИП и СДУ. Выполнена обработка результатов измерения и метрологический анализ результатов измерения параметров ТФС твердых материалов информационно-измерительной системой [6]. Результаты определения коэффициентов тепло- и температуропроводности эталонных материалов – полиметилметакрилата (ПММ) и рипора, строительных материалов – бетона и цемента, а также относительной погрешности измерений представлены в табл. 1.

Таблица 1

Эталонные и измеренные значения λ и α материалов, погрешность измерения

Материал объекта	Эталонные значения		Измеренные значения		Относительная погрешность измерения	
	$\alpha \cdot 10^{-7}, \text{ м}^2/\text{с}$	$\lambda, \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$	$\alpha \cdot 10^{-7}, \text{ м}^2/\text{с}$	$\lambda, \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$	$\delta_{\alpha}, \%$	$\delta_{\lambda}, \%$
ПММ	1,09	0,195	1,10	0,198	1,00	1,54
Рипор	4,61	0,028	4,66	0,0283	1,08	1,07
Бетон	1,58	0,54	1,64	0,56	3,79	3,70
Цемент, затвердевший (в результате коллоидации)	0,86	0,84	0,89	0,87	3,49	3,57

Данные экспериментальных исследований ИИС и метрологического анализа результатов измерений параметров ТФС материалов позволяют сделать вывод, что точность определения коэффициентов тепло- и температуропроводности соответствует допустимым значениям для данного класса средств измерений с учетом погрешности метода определения ТФС материалов и изделий. Относительная погрешность измерения λ и α составляет не более 4 %.

Выводы

1. Предложенный алгоритм коррекции результатов измерения по аппроксимирующим зависимостям результатов определения ТФС материалов при воздействии ДФ для получения параметров ТФС материалов с допустимой погрешностью способствует повышению устойчивости системы к ошибочным измерениям, а следовательно, обеспечению надежности ИИС ТФС материалов.

2. Повышение надежности ИИС НК ТФС материалов достигнуто в результате повышения вероятности безотказной работы структурных компонентов измерительного канала системы, тестового контроля структурных компонентов ИК системы программным методом и аппаратного контроля при реализации алгоритма коррекции технического несовершенства ИИС НК ТФС материалов.

3. Введение системы резервирования основных структурных компонентов ИИС, которые в большей степени подвержены отказам в работе, позволяет повысить вероятность безотказной работы ИИС ТФС материалов с 0,77 до 0,92 и, следовательно, повысить достоверность получаемой измерительной информации, точность контроля ТФС материалов и в результате качество выпускаемой продукции.

Список литературы

1. Селиванова, З. М. Повышение точности информационно-измерительных систем неразрушающего контроля теплофизических свойств твердых материалов / З. М. Селиванова, Т. А. Хоан // Измерительная техника. – 2015. – № 9. – С. 45–48.
2. Александрович, А. Е. Проектирование высоконадежных информационно-вычислительных систем / А. Е. Александрович, Ю. В. Бородакий, В. О. Чуканов. – М. : Радио и связь, 2004. – 144 с.
3. ГОСТ 27.002–89. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200004984>
4. Шкляр, В. Н. Надежность систем управления : учеб. пособие / В. Н. Шкляр ; Томский политехнический университет. – Томск : Изд-во Томск. политехн. ун-та, 2009. – 126 с.
5. Полтавский, А. В. Модель отказов автоматизированных средств контроля / А. В. Полтавский, Н. К. Юрков // Надежность и качество сложных систем. – 2015. – № 1 (9). – С. 63–67.
6. Чернышова, Т. И. Информационно-аналитическая система оценки метрологической надежности электронных измерительных средств / Т. И. Чернышова, М. А. Каменская // Вести высших учебных заведений Черноземья. – 2011. – № 1. – С. 79–82.

Селиванова Зоя Михайловна

доктор технических наук, профессор,
кафедра конструирования радиоэлектронных
и микропроцессорных систем,
Тамбовский государственный
технический университет
(392000, Россия, г. Тамбов, ул. Советская, 116)
E-mail: Selivanova@mail.jesby.tstu.ru

Хоан Туан Ань

аспирант,
Тамбовский государственный
технический университет
(392000, Россия, г. Тамбов, ул. Советская, 116)
E-mail: futurevip1608@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Информационно-измерительная система осуществляет неразрушающий контроль и измерение параметров теплофизических свойств твердых материалов и изделий – строительных, полимерных, теплоизоляционных и других, от которых зависит качество выпускаемой продукции на производстве. Нарушение работоспособности отдельных структурных компонентов измерительного канала системы приводит к изменению достоверности получаемой измерительной информации и увеличению погрешности определяемых на ее основе параметров теплофизических свойств материалов. Данная ситуация относится к отказу информационно-измерительной системы. *Материалы и методы.* Исследование работоспособности информационно-измерительной системы и ее структурных компонентов проводится с использованием классической теории оценки надежности информационно-измерительных систем и разработанного алгоритма коррекции технического несовершенства информационно-измерительной системы. *Результаты.* Введена система параллельного резервирования основных структурных компонентов измерительного канала системы и реализован алгоритм коррекции их технического несовершенства, что позволило повысить вероятность безотказной работы информационно-измерительной системы параметров теплофизических свойств материалов. *Выводы.* Повышение надежности информационно-измерительной системы обеспечивает достоверность получаемой измерительной информации, точность определяемых параметров теплофизических свойств материалов, что способствует повышению качества при их производстве.

Ключевые слова: информационно-измерительная система, надежность, теплофизические свойства материалов, параллельное резервирование.

Selivanova Zoia Mikhailovna

doctor of technical science, professor,
sub-department of design of electronic
and microprocessor systems,
Tambov Technical State University
(392000, 116 Sovietskaia street, Tambov, Russia)

Hoang Tuan Anh

postgraduate student,
Tambov Technical State University,
(392000, 116 Sovietskaia street, Tambov, Russia)

Abstract. *Background.* Information-measuring system carries out non-destructive control and measurement of the parameters of thermal properties of solid materials and products – construction, plastic, thermal insulation and other that affect the quality of products in production. Violation of the performance of individual structural components of the measuring channel system leads to changing the reliability of the resulting measurement information and increasing uncertainty determined on the basis of its thermo-physical properties of materials parameters. This situation relates to the refusal of information-measuring system. *Materials and methods.* Research performance information measurement system and its structural components is carried out using the classical theory of evaluating the reliability of information and measurement systems and correction algorithm developed technical imperfections of information-measuring system. *Results.* Introduced system of parallel redundancy of the main structural components of measurement system channel and correction algorithm for their technical imperfections, which allowed to increase the reliabilities of information-measuring system of thermal properties of materials parameters. *Conclusions.* Improving the reliability of information-measuring system ensures the reliability of the measurement information, the accuracy of the determined parameters of thermal properties of materials that contribute to the quality in their production.

Key words: information-measuring system, reliability, thermal properties of materials, parallel redundancy.

УДК 621.396.6-027.31; 621.396:658.512.2

Селиванова, З. М.

Оценка надежности информационно-измерительной системы теплофизических свойств материалов при воздействии дестабилизирующих факторов / З. М. Селиванова, Т. А. Хоан // Надежность и качество сложных систем. – 2016. – № 4 (16). – С. 13–19. DOI 10.21685/2307-4205-2016-4-2.