

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Тамбовский государственный технический университет»

З. М. Селиванова, Т. А. Хоан

**МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ
ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ
ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ
ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Рекомендовано Научно-техническим советом ФГБОУ ВО «ТГТУ»
в качестве монографии



Тамбов
• Издательство ФГБОУ ВО «ТГТУ» •
2018

УДК 681.518.3:536.2

ББК 311.1+М105

С29

Рецензенты:

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой
«Математическое моделирование и информационные технологии»
ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный университет
им. Г. Р. Державина»
А. А. Арзамасцев

Доктор технических наук, профессор кафедры
«Материалы и технология»
ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет»
П. С. Беляев

С29 **Селиванова, З. М.**

Методы и алгоритмы повышения точности информационно-измерительных систем теплофизических свойств теплоизоляционных материалов : монография / З. М. Селиванова, Т. А. Хоан. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2018. – 160 с. – 500 экз.

ISBN 978-5-8265-1882-3

Представлены математические модели, методы и алгоритмы для повышения точности информационно-измерительных систем теплофизических свойств теплоизоляционных материалов, архитектура, информационное и программное обеспечения, а также алгоритм функционирования измерительной системы.

Предназначена для аспирантов, магистрантов, студентов и специалистов, занимающихся разработкой информационно-измерительных систем.

УДК 681.518.3:536.2

ББК 311.1+М105

ISBN 978-5-8265-1882-3

© Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тамбовский государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «ТГТУ»), 2018

ВВЕДЕНИЕ

На производственных предприятиях при изготовлении теплоизоляционных материалов, а также изделий из них широко применяются информационно-измерительные системы (ИИС) для определения параметров теплофизических свойств (ТФС) выпускаемой продукции. Исследование возможностей и путей совершенствования ИИС ТФС материалов, улучшение их технических характеристик является необходимым при решении задачи повышения точности ИИС ТФС материалов. Точность определения параметров ТФС позволяет обеспечить качество выпускаемых материалов и изделий из них на производстве. Требования к обеспечению точности измерений изложены в Государственной системе обеспечения единства измерений.

В реальных условиях эксплуатации информационно-измерительных систем при воздействии внешних и внутренних факторов экспериментальным путем установлена нестабильность структурных компонентов измерительного канала (ИК) при функционировании измерительной системы. Нестабильность работы ИК обусловлена систематическими и случайными погрешностями измерений.

На показатели точности большое влияние оказывает отсутствие для существующих ИИС математических моделей, позволяющих описать процесс измерения параметров ТФС материалов, методов для повышения точности ИИС ТФС материалов, а также алгоритмов коррекции результатов измерения ТФС материалов при влиянии дестабилизирующих факторов (ДФ). В связи с этим повышение точности ИИС для определения ТФС материалов – коэффициентов тепло- и теплопроводности – является актуальной задачей.

Целью научного исследования является повышение точности ИИС ТФС материалов в результате разработки интеллектуального алгоритма коррекции результатов измерения параметров ТФС материалов на основе использования созданной математической модели процесса измерения в ИИС и информации о воздействующих ДФ.

Для достижения поставленной цели в данном исследовании решаются следующие задачи:

- выполнения анализа структуры и технических характеристик существующих ИИС ТФС материалов в целях определения воздействующих ДФ, влияющих на точность определения параметров ТФС материалов;
- разработки математических моделей структурных компонентов измерительного канала ИИС – системы измерительных преобразо-

вателей (СИП), дифференциального усилителя (ДУ), аналого-цифрового преобразователя (АЦП);

- создания математической модели процесса измерения в измерительном канале ИИС;

- разработки метода повышения точности ИИС ТФС материалов в результате устранения технического несовершенства компонентов ИИС;

- создания интеллектуального алгоритма оценки и коррекции полученных результатов измерения из-за технического несовершенства структурных компонентов ИИС ТФС материалов и ДФ;

- разработки ИИС ТФС материалов с модулями базы знаний, коррекции результатов измерений структурных компонентов измерительного канала ИИС, программным обеспечением и алгоритмом ее функционирования, реализующей разработанные метод повышения точности и алгоритм коррекции результатов измерения параметров ТФС материалов при влиянии ДФ.

При выполнении исследования применялись методы математического и физического моделирования, теории измерительных систем, дисперсионного анализа, классической теории теплопроводности.

В монографии представлены полученные следующие научные результаты.

1. Созданы математические модели структурных компонентов ИК ИИС в виде аналитических зависимостей входных и выходных сигналов, учитывающие закономерности влияния основных ДФ, которые применяются для коррекции результатов измерения СИП, ДУ и АЦП.

2. Разработана математическая модель процесса измерения в измерительном канале ИИС путем декомпозиции ИК на отдельные структурные компоненты и последовательного преобразования измерительной информации в компонентах ИК ИИС с учетом ограничений на допустимые значения полученной измерительной информации на выходе компонентов ИК системы $U_{СИП} \in U_{СИП доп}$, $U_{ДУ} \in U_{ДУ доп}$, $K_{АЦП} \in K_{АЦП доп}$, на погрешности измерений структурных компонентов ИК ИИС $\in U_{СИП} \in \delta U_{СИП доп}$, $\delta U_{ДУ} \in \delta U_{ДУ доп}$, $\delta K_{АЦП} \in \delta K_{АЦП доп}$ и с учетом полученных зависимостей влияния температуры окружающей среды T_{OC} на результаты измерения СИП, ДУ и АЦП.

3. Разработан метод повышения точности ИИС ТФС материалов, заключающийся в коррекции результатов измерения структурных компонентов измерительного канала ИИС с использованием созданных их математических моделей, полученной информации о допустимых пределах изменения их выходных измеренных значений и зако-

номерностях влияния ДФ на результаты измерения, что позволяет исключить систематические и случайные погрешности компонентов ИК ИИС и определять параметры ТФС материалов с относительной погрешностью не более 4%.

4. Создан интеллектуальный алгоритм коррекции технического несовершенства ИИС, реализующий метод повышения точности ИИС ТФС материалов, для введения поправок в результаты измерения структурных компонентов ИК ИИС с использованием их математических моделей для повышения точности преобразования измерительной информации, позволяющий определять коэффициенты тепло- и температуропроводности теплоизоляционных материалов с допустимой погрешностью.

5. Разработана структурная схема ИИС ТФС теплоизоляционных материалов, реализующая предложенный метод и интеллектуальный алгоритм коррекции значений результатов измерений структурных компонентов ИК ИИС и параметров ТФС материалов при воздействии ДФ с использованием созданных модулей алгоритмического обеспечения, коррекции, базы знаний и программного обеспечения, входящих в состав системы.

Структурно монография состоит из введения, списка используемых источников, четырех глав, заключения и приложений. Работа изложена на 160 страницах, содержит 47 рисунков, 15 таблиц и приложения. Список используемых источников включает 142 наименования.

Во **введении** обоснована актуальность темы исследования, степень ее проработанности, описана цель и задачи проведенного исследования, научная новизна и практическая значимость результатов работы, краткое содержание глав монографии.

В **первой главе** рассмотрены и проанализированы существующие информационно-измерительные системы теплофизических свойств материалов, методы неразрушающего контроля (НК) ТФС материалов. Выполнен анализ технического несовершенства современных ИИС ТФС материалов, методов повышения точности.

В результате установлено, что существующие ИИС не обеспечивают требуемого уровня точности и оперативности определения параметров ТФС материалов при проведении теплофизических измерений.

Для определения параметров ТФС теплоизоляционных материалов предпочтительным является метод воздействия на исследуемый материал линейным нагревателем с последующей регистрацией температурно-временных характеристик в области контакта измерительного зонда и исследуемого материала.

Анализ рассмотренных ИИС ТФС материалов позволил установить, что их техническое несовершенство определяют структурные компоненты измерительного канала: первичные измерительные преобразователи, дифференциальные усилители, аналого-цифровой преобразователь.

Из результатов анализа известных методов повышения точности ИИС следует, что наиболее приемлемым для ИИС ТФС теплоизоляционных материалов является метод структурной коррекции компонентов измерительного канала ИИС.

На основе анализа существующих методов повышения точности, технического несовершенства информационно-измерительных систем ТФС материалов осуществлена постановка задачи исследования.

Во **второй главе** исследуются математические модели, методы и алгоритмы для повышения точности ИИС ТФС материалов. Проведен анализ воздействующих дестабилизирующих факторов, влияющих на работоспособность компонентов измерительного канала ИИС ТФС материалов. Анализ данных проведенного измерительного эксперимента структурных компонентов ИИС ТФС материалов позволил установить, что наибольшую погрешность в результаты измерения параметров ТФС материалов λ и α (до 50%) вносят структурные компоненты измерительного канала системы при воздействии основного ДФ – температуры окружающей среды T_{oc} .

На основе созданной математической модели процесса измерения в ИИС и математических моделей структурных компонентов измерительного канала ИИС ТФС материалов создан метод повышения точности ИИС. Метод заключается в коррекции выходных сигналов с измерительных датчиков температуры (термопар), дифференциальных усилителей, аналого-цифрового преобразователя путем введения поправок в результаты измерения, полученных на основе априорных данных о допустимых значениях измерительной информации на выходе структурных компонентов измерительного канала ИИС и ее изменении при воздействии ДФ, а также коррекции параметров ТФС теплоизоляционных материалов с учетом закономерностей их изменения при влиянии ДФ.

Разработан интеллектуальный алгоритм коррекции технического несовершенства структурных компонентов ИК ИИС ТФС материалов с использованием созданных математических моделей и метода повышения точности ИИС.

В **третьей главе** рассмотрена архитектура ИИС ТФС теплоизоляционных материалов. Для создания структуры ИИС ТФС материалов предложена комплексная математическая модель, включающая

множество моделей: информационного обмена, метрологического обеспечения, дестабилизирующих факторов, измерительного зонда и переносного вычислительного блока. Разработано информационное обеспечение ИИС ТФС, включающее фреймовую модель представления знаний, информационную модель базы данных и базу знаний ИИС на их основе. Предложена структурная схема ИИС ТФС материалов и алгоритм ее функционирования с использованием разработанных интеллектуального алгоритма коррекции технического несовершенства структурных компонентов системы и базы знаний ИИС.

Выполнена оценка надежности ИИС ТФС материалов. Для повышения надежности ИИС 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. Повышение надежности информационно-измерительной системы обеспечивает достоверность получаемой измерительной информации, точность определяемых параметров теплофизических свойств материалов, что способствует повышению качества при их производстве.

На основе созданной ИИС ТФС материалов предложена интеллектуальная информационно-измерительная система (ИИИС) экологического мониторинга строительных материалов, оказывающих негативное влияние на экологическое качество продукции. Разработка системы основывается на методологическом базисе ИИИС, функционирующей в условиях неопределенности и рисков и использующих различные виды информации: нечеткую, неполную и неточную, которая представлена в базе данных и знаний системы.

Рассмотрены энергосберегающие технологии при разработке и эксплуатации ИИС ТФС теплоизоляционных материалов. Предложенные методика, критерий оптимальности и аналитическая модель, учитывающие потребление энергии на этапах изготовления материалов, сокращают до 30% энергетические затраты при определении режимных параметров техпроцесса производства теплоизоляционных материалов с помощью ИИС.

В **четвертой главе** представлены результаты экспериментальных исследований ИИС ТФС теплоизоляционных материалов и метрологический анализ результатов определения параметров ТФС материалов – коэффициентов тепло- и температуропроводности. Как показывают результаты экспериментов, относительная погрешность измерения параметров ТФС материалов составляет не более 3...4%.

В **заключении** изложены основные результаты исследования, решения поставленных задач и цель работы.

В **приложениях** к монографии представлены: данные экспериментальных исследований ИИС ТФС теплоизоляционных материалов, описание программы для реализации алгоритма коррекции технического несовершенства информационно-измерительной системы теплофизических свойств теплоизоляционных материалов.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

ИИС – информационно-измерительная система
НК – неразрушающий контроль
ТФС – теплофизические свойства
ДФ – дестабилизирующие факторы
 T_{OC} – температура окружающей среды
 V_{OC} – относительная влажность
 P – давление
 λ – коэффициент теплопроводности
 α – коэффициент температуропроводности
 $\lambda_{доп}$, $\alpha_{доп}$ – допустимые значения коэффициентов теплопроводности и температуропроводности
 ρ – плотность материала
 $P_{ДФ}$ – дестабилизирующие факторы
 $P_{ТФС}$ – коэффициенты теплофизических свойств материалов
ИО – исследуемый объект
ИЗ – измерительный зонд
ПИП – первичные измерительные преобразователи
ВИП – вторичные измерительные преобразователи
АЦП – аналого-цифровые преобразователи
ЦАП – цифрово-аналоговые преобразователи
ПМО – программно-математическое обеспечение
БП – блок питания
ПК – персональный компьютер
ЖКИ – жидкокристаллический индикатор
ИК – измерительный канал
ИМ – исследуемый материал
ЭВМ – электронно-вычислительной машины
ИС – измерительная система
САК – система автоматического контроля
СТД – система технической диагностики
СКТФП – системы контроля теплофизических параметров
ГСП – государственная система приборов
ПП – первичный преобразователь
КИС – компьютерные измерительные системы
ИД – интеллектуальный датчик
ПВБ – переносной вычислительный блок
БПР – блок принятия решений
БЗ – база знаний

ПИИ – пользовательский интеллектуальный интерфейс

П – пользователь

Э – эксперт

P_d – вероятность достоверных измерений

$P_{ВВ}$ – вероятность воздействия ДФ, не учтенных алгоритмом измерения

$P_{ВР}$ – вероятность работоспособности ИИС в условиях действия

ДФ

t – время

КК – коммутатор каналов

СДУ – система дифференциальных усилителей

ТД – термодатчик

ВБ – вычислительный блок

МК – микроконтроллер

МАО – модуль алгоритмического обеспечения

МПО – модуль программного обеспечения

Д – дисплей

БУН – блок управления нагревом

Глава 1

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ, АНАЛИЗ ИХ ТЕХНИЧЕСКОГО НЕСОВЕРШЕНСТВА И МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ

1.1. ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ

Информационно-измерительные системы широко применяются в различных отраслях промышленности для контроля и измерения параметров различных объектов, в научно-исследовательских лабораториях для проведения научных экспериментов и исследований. ИИС – это комплекс вычислительных и других технических средств, которые применяются для формирования, преобразования и обработки измерительной информации в соответствии с запросами потребителя, а также выполнения функций идентификации, контроля и диагностики [1]. ИИС воспринимает измеряемые величины от исследуемого объекта, преобразует, обрабатывает их и при выходе выдает пользователям требуемую количественную информацию об исследуемом объекте. Отличие ИИС от систем автоматического управления и информационных заключается в том, что на входе систем вычислительных, связи и управления можно получать информацию от других систем. Формируемая измерительная информация ИИС применяется в системах принятия решений [2].

Основными техническими средствами, составляющими ИИС, являются: измерительный канал, специализированные вычислительные и связующие устройства, устройства выдачи информации и необходимые программы для того, чтобы реализовать функцию управления в системе и решать измерительные и вычислительные задачи в ИИС [3].

В соответствии с выполняемыми функциями ИИС подразделяются на следующие виды: системы технической диагностики (СТД), автоматического контроля (САК), измерительные (ИС) и др. В САК, СТД измерительная система входит как подсистема [3].

Измерительной системой является комплекс измерительных средств, при этом устройства техники вычислительной, а также все вспомогательные устройства, которые объединены каналами связи, служат для формирования информации измерительной о всех физических величинах, характеризующих свойства определенного объекта,

в форме, которая используется для автоматической обработки информации и передачи или использования во всех автоматических системах управления [3]. ИИС представляют собой специфические разновидности средств измерений, по назначению ИИС делятся на контролирующие, измерительные, управляющие. По количеству каналов ИИС подразделяют на одно-, двух-, трех- и многоканальные.

Измерительный канал ИИС называется наиболее обширной структурной единицей, для которой метрологические характеристики могут нормироваться. Канал является измерительным средством, по которому один преобразуемый сигнал проходит последовательно. Датчики (термопары, термометры сопротивления), усилители, аналого-цифровые преобразователи и цифро-аналоговые преобразователи – основные структурные компоненты измерительного канала, точность которых определяет точность ИК. Измерительный канал является простым, если реализует прямые измерения какой-либо величины, и сложным, если реализует измерения совокупные, совместные и косвенные, в которых простые измерительные каналы проводят первичные измерения.

Системы автоматического контроля включаются в комплект сложного радиоэлектронного оборудования и применяются для определения известных параметров и их зависимостей от воздействующих факторов технологических процессов. Задачей САК является отнесение объекта к одному из возможных качественных состояний [3, 4].

Система технической диагностики – это комплекс множества возможных информаций и сигналов о состоянии технических систем и алгоритмы их сопоставления [3]. Элементы любого технического объекта обычно либо в состоянии работоспособном, либо в состоянии неработоспособном. Определение состояния элемента и локализация неисправностей называются задачей СТД. Системы технической диагностики подразделяют на диагностические (предназначены для определения технического состояния объекта в текущий момент времени) и прогнозирующие системы, которые на основе результатов проверки на более ранних стадиях контроля прогнозируют будущее состояние объекта.

Более подробно рассмотрим известные существующие информационно-измерительные системы. Представлена ИИС для регистрации теплофизических параметров, структурная схема которой приведена на рис. 1.1 [5]. Последовательный опрос каналов при возможности компенсации температуры холодного спая данная ИИС регистрирует аналоговые сигналы термопар, а также при поочередном опросе каналов регистрирует сигналы термометров сопротивления. ИИС создана по модульному правилу на основе современных известных стандартов

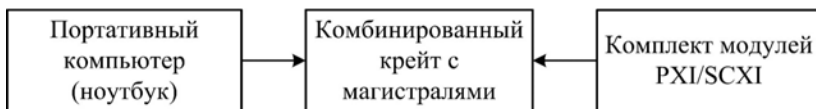


Рис. 1.1. Структурная схема информационно-измерительной системы для регистрации теплофизических параметров объектов

на измерительно-управляющее оборудование. ИИС может усовершенствоваться установкой нужных модулей, заменой модулей или используемого программного обеспечения [6].

Повышение требований к точности измерений объектов и их быстрой реакции, увеличение числа диапазонов измеряемых параметров привело к созданию компьютерных измерительных систем (КИС) и их модификации – приборам виртуальным [7].

Компьютерно-измерительная система представляет собой микро-ЭВМ со встроенной в нее измерительной платой. В состав КИС входит компьютер, который работает в режиме реального масштаба времени, т.е. в режиме on-line. Персональные компьютеры в составе КИС в настоящее время играют роль не только вычислительных средств, но и используются как основные измерительные приборы [7].

Отметим, что существует два способа построить КИС. Первый способ с последовательной, а второй – с параллельной архитектурой. На рисунке 1.2 представлена структурная схема КИС, которая отражает последовательную и параллельную архитектуру построения. Некоторые элементы КИС подключены к внутренней шине персонального компьютера, в качестве внешних устройств компьютера – внешняя память, печатающее устройство, дисплей и схема измерительная, которая состоит из коммутатора, аналого-цифрового преобразователя (АЦП), цифроаналогового преобразователя (ЦАП), интерфейсного модуля (ИМ), блока программно-управляемых образцовых мер напряжения и частоты.

При необходимости ЦАП вырабатывает необходимые управляющие сигналы, например, к магистрали приборного интерфейса прибор подключает интерфейсный модуль.

Способы повышения точности измерений реализуются программными методами на основе применения КИС со значительными вычислительными возможностями. Например, учет и измерение нестабильности частоты кварцевого генератора: сигнал с датчика температуры поступает на варикап, генератор выполняет функции настройки на заданную частоту.

КИС позволяет анализировать в процессе эксперимента измерительную информацию, а также выбирать алгоритм ее обработки

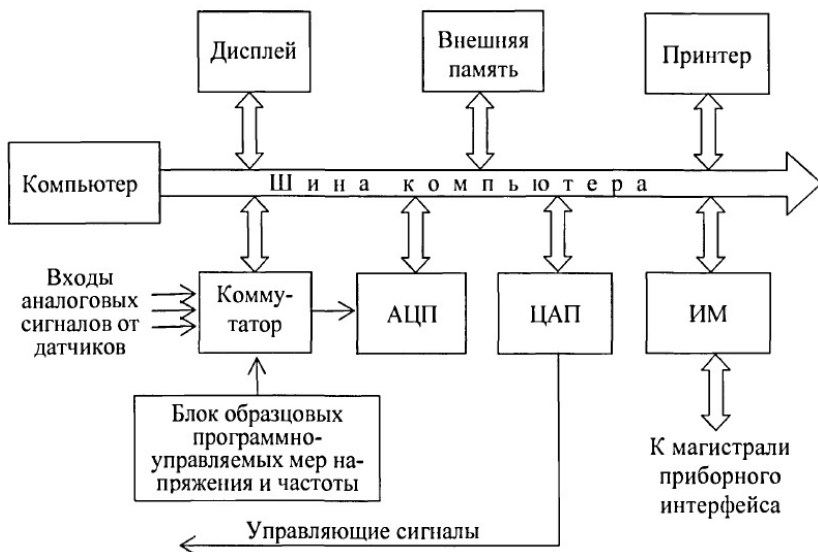


Рис. 1.2. Структурная схема компьютерных измерительных систем

в соответствии с полученными данными на основе имеющихся значительных вычислительных возможностей. Оператор, наблюдая на дисплее полученную во время эксперимента гистограмму, констатирует сглаженную форму и выпавшие результаты, предполагает присутствие дрейфа контролируемого параметра, погрешности или выбросов. Статистические программы применяются для удаления выбросов. Вывод о наличии дрейфа формируется методом тренда, а математическая зависимость, описывающая дрейф, создается методом наименьших квадратов. В результате совместного использования измерительных приборов и устройств вычислительной техники осуществляется автоматизация измерений.

В качестве основных встроенных образцовых мер напряжения в КИС всегда применяются стабилитроны, что является одним из эффективных способов стабилизации опорного напряжения.

Отметим, что в КИС предусматривается необходимость определения функций в зависимости от различных параметров виртуального прибора, это сопротвление переключателей, дрейф нуля и, конечно, коэффициенты передачи различных структурных элементов от температуры. С помощью непрерывного контроля температуры блоков необходимо автоматически корректировать возникающие погрешности измерения.

В сравнении с микропроцессорными устройствами, КИС имеет определенные достоинства: возможность решения определенного круга прикладных задач измерения; изучение и обработка сигналов; сбор данных с датчиков.

Таким образом, при большом фонде определенных прикладных компьютерных программ реализуются большие вычислительные возможности КИС, которые позволяют реализовывать определенное количество способов. Отметим, что для повышения точности и эффективности измерений, а также возможности оперативной передачи при исследуемых данных измерений, т.е. по компьютерным сетям, это, конечно, сети Интернет, они дают возможности определенных решений данных измерительных задач при создании компьютерных программ; и возможности использования внешней и, конечно, внутренней памяти большой емкости.

В работе [8] приведена информационно-измерительная система, которая включает в себя электронный блок регистрации и накопления информации, реализуемый на основе микроконтроллера или компьютера, управляющего пульта, устройства коммутации дискретных сигналов, преобразователей аналого-цифровых, табло индикации, средства накопления и переноса информации и комплекта первичных преобразователей. Решение задачи повышения точности измерения является отличительной особенностью рассматриваемой ИИС. Для этого в цепь аналоговых преобразователей включены блоки коррекции уровней и нормализаторов сигналов, автоматических калибраторов каналов, а блоки подстройки коэффициента преобразования сигнала при учете непрямолинейности градуировочной характеристики и блоки нормализаторов сигналов подключены в цепь дискретных преобразователей.

Рассмотрим существующие системы, которые применяются для контроля теплофизических параметров (СКТФП) [9, 10]. СКТФП базируются на государственной системе приборов (ГСП). ГСП позволяет формировать обслуживающие и измерительные автоматические системы, которые состоят из блоков типовых электрических средств. Пример структурной схемы системы контроля на основе ГСП приведен на рис. 1.3.

На рисунке 1.3 введены следующие обозначения: ПП – первичный преобразователь; $A_{\text{физ}}$ – измеряемая физическая величина; $A_{\text{эл}}$ – электрический сигнал; л. с. – линия связи; $A_{\text{рег}}$ – регулирующая величина; КС – контроль свойств; АСУ – автоматизированная система управления. Измеряемые величины $A_{\text{физ}}$ регистрируются датчиками Д и по линиям связи поступают в прибор комплекса КС (мост, потенциометр) и затем в АСУ.



Рис. 1.3. Структурная схема системы контроля на основе ГСП

Рассмотренная СКТФП имеет некоторые недостатки: к одному прибору комплекса КС можно подсоединить только до 12 измерительных датчиков; ограничения на всю длину линии связи; значительное время одного цикла опроса всех датчиков.

Все это делает работу СКТФП сложной; неудобной при использовании архива.

На основе приборов ТМ5200 предприятия «ЭЛЕМЕР», структурная схема которых показана на рис. 1.4, разрабатываются и изготавливаются на производстве все электронные цифровые приборы. Приборы применяются для контроля технологических параметров – влажности, давления, а также при контроле и измерении температуры [9, 10].

В приборе ТМ5200 восемь измерительных каналов. Основным недостатком системы на базе приборов организации «ЭЛЕМЕР» является сходство с системами на основе применения ГСП.

При анализе приведенных ИИС для определения параметров теплофизических свойств [5], компьютерно-измерительных систем установлено, что отсутствие специальных измерительных зондов является значительным недостатком КИС для контроля теплофизических

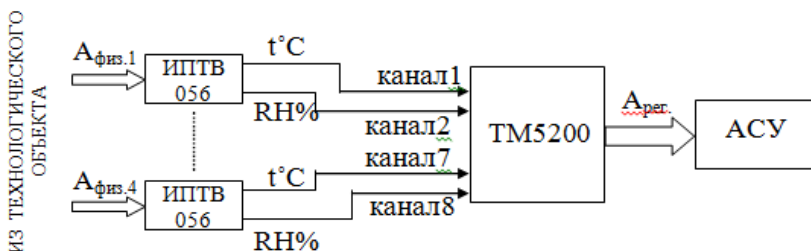


Рис. 1.4. Структурная схема СКТФП с использованием прибора ТМ5200

свойств материалов, которые применяют методы контроля ТФС материалов с учетом особенностей исследуемых материалов, а также разработки баз знаний для рассматриваемой предметной области.

На рисунке 1.5 представлена структурная схема ИИС теплофизических свойств материалов, применяемых в строительной и химической промышленности, авиации, энергетике, приборостроении. В ИИС реализован принцип теплофизических измерений, заключающийся в активном тепловом воздействии измерительного зонда на исследуемый материал, записи температурно-временных зависимостей в плоскости их контакта и последующей их обработке с помощью микроконтроллера ИИС в соответствии с математической моделью теплопроводности двух неограниченных полумассивов с мгновенным линейным источником тепла в плоскости их контакта [11].

В состав ИИС входят: блок управления нагревом (БУН), система измерительных преобразователей (СИП), измерительный канал и переносной вычислительный блок (ПВБ), включающий: микропроцессор (МП), базу знаний (БЗ), блок принятия решений (БПР), жидкокристаллический индикатор (ЖКИ). ПВБ предназначен для регистрации информации о воздействующих дестабилизирующих факторах; синтеза алгоритма измерений, структуры ИИС в зависимости от измерительной ситуации; формирования алгоритма управления измерениями и осуществления последовательности измерительных процедур. С помощью пользовательского интерфейса (ПИ) пользователь (П) взаимодействует с компьютером. Компьютер (К) обрабатывает и хранит экспериментальные данные, принимает решения на основе информации из проведенных экспериментов и базы знаний при синтезе измерительных процедур и представляет выходную информацию о параметрах ТФС материалов (коэффициентов тепло- и температуропроводности λ , α) в виде, удобном для пользователя [12].

В работах [13 – 24] описаны способы, методы и приборы, которые осуществляют неразрушающий контроль параметров теплофизических свойств твердых материалов, системы микропроцессорные и инфор-

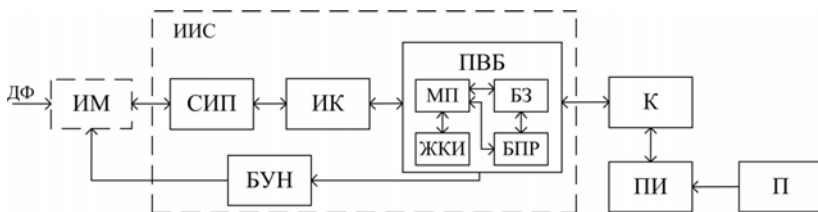


Рис. 1.5. Структурная схема ИИС ТФС материалов

мационно-измерительные, предназначенные для определения ТФС материалов.

Рассмотрим пример приборов измерения теплопроводности материалов. Известна установка для измерения теплопроводности ИТЭМ-1, которая предназначена для экспресс-измерений теплопроводности металлов, сплавов, полупроводников и теплоизоляторов. Диапазон измерения теплопроводности от 0,2 до 80,0 Вт/(м·К) [23].

Известен прибор для определения теплопроводности ИТЭМ-1М, который предназначен для экспресс-измерений теплопроводности металлов, сплавов, полупроводников и теплоизоляторов. Диапазон измерения теплопроводности от 0,1 до 100,0 Вт/(м·К) [24].

Представлено устройство для измерения теплопроводности твердых изотропных материалов в стационарном тепловом режиме ИТ-20, которое рекомендуется для использования в промышленности при проведении теплофизических исследований в лабораторных и заводских условиях. Диапазон измерения теплопроводности от 0,2 до 1,5 Вт/(м·К) [13].

Предложен прибор ИТС-2 для комплексного измерения теплопроводности, температуропроводности и удельной теплоемкости твердых материалов (плотностью не менее 800 кг/м³), подлежащих механической обработке. Диапазон измерения теплопроводности от 0,5 до 5,0 Вт/(м·К) [13].

Недостаток таких приборов заключается в том, что они предназначены для работы с материалами, обладающими достаточно высокой теплопроводностью.

Прибор измерения теплопроводности ИТС-1 (рис. 1.6) предназначен для определения методом стационарного теплового потока по ГОСТ 7076–99 [24] термического сопротивления и теплопроводности большого класса строительных и теплоизоляционных материалов. ИТС-1 имеет следующие преимущества: компактная и эргономичная конструкция, обеспечение эффективной стабилизации температур нагревателя и холодильника благодаря высокоточному измерительному тракту и использованию специальных алгоритмов обработки сигналов. Прибор обеспечивает эффективную стабилизацию температур нагревателя и холодильника, возможна самодиагностика и автоматизированная калибровка по эталонам. Прибор позволяет определить теплопроводность в диапазоне 0,02...0,50 Вт/(м·К) при средней температуре объекта 12...43 °С.

Так же известны приборы для измерения теплопроводности материалов строительных, которые применяются в промышленном оборудовании и трубопроводах ИТП-МГ4 «100» (рис. 1.7), ИТП-МГ4 «250» (рис. 1.8) и ИТП-МГ4 «Зонд» (рис. 1.9) для тепловой изоляции. Диапа-



Рис. 1.6. Прибор для измерения теплопроводности ИТС-1



Рис. 1.7. Измеритель теплопроводности ИТП-МГ4 «100»



Рис. 1.8. Измеритель теплопроводности ИТП-МГ4 «250»



Рис. 1.9. Измеритель теплопроводности ИТП-МГ4 «Зонд»

зон измерения теплопроводности 0,02...1,50 Вт/(м·К) (для ИТП-МГ4 «100», ИТП-МГ4 «250»); 0,03...1,00 Вт/(м·К) (для ИТП-МГ4 «Зонд») [25]. Данные приборы обеспечивают при автоматическом регулировании температуру нагревателя и холодильника и их термостатирование в процессе испытаний на основе определения термического сопротивления и теплопроводности материалов при средней температуре образца от +15 до +42,5 °С. Недостаток этих приборов заключается в невозможности определения теплофизических свойств теплоизоляционных материалов при высоких температурах.

С развитием методов и структуры измерительных средств НК ТФС материалов и возникновением разновидностей измерительных систем (ИС) улучшались принципы действия измерительных систем, рассматривались вопросы увеличения точности и оперативности, проводился учет и коррекция влияющих дестабилизирующих факторов.

1.2. АНАЛИЗ ТЕХНИЧЕСКОГО НЕСОВЕРШЕНСТВА СОВРЕМЕННЫХ ИИС ТФС МАТЕРИАЛОВ

При проектировании ИИС ТФС материалов измерение параметров теплофизических свойств материалов в производственных условиях и определение дестабилизирующих факторов, влияющих на результаты измерения ИИС, являются важной задачей, при решении которой

обеспечивается измерение ТФС материалов с допустимой погрешностью.

Анализ дестабилизирующих факторов выполняется для определения ДФ, которые способствуют возникновению технического несовершенства составляющих компонентов ИИС. В результате анализа ДФ разрабатываются способы, позволяющие уменьшить погрешность измерений структурных компонентов ИИС и, следовательно, повысить точность информационно-измерительной системы [26].

Информационно-измерительная система теплофизических свойств материалов включает следующие основные блоки и устройства: ИЗ – измерительный зонд, включающий систему измерительных преобразователей; МК – микроконтроллер; БПР – блок принятия решений; ВУ – вычислительное устройство; БЗ – база знаний.

На измерительный зонд (термозонд) влияют следующие ДФ: помехи, воздействующие на датчики температуры; факторы окружающей среды – влажность, давление и температура; контактное термосопротивление в области контакта исследуемого материала и термозонда; влияние шероховатости исследуемого материала, теплоемкости нагревателя, теплоотдачи в системе «термозонд – исследуемый материал»; нарушение местоположения датчиков температуры в измерительном зонде.

Электрический сигнал называется помехой в электрической цепи системы измерительных преобразователей (СИП), если он отличается от полезного сигнала [27]. Внутренние источники шумов формируют помеху, которая возникает в результате теплового шума в элементах электрической цепи при действии термоэффекта, собственных шумов полезных сигналов в их источниках, а также гальванического взаимодействия при контакте участков цепи. Излучения от внешних источников оказывают влияние на работоспособность ИИС. Возникающие электрические и магнитные поля в результате действия помех формируют при преобразовании полезного сигнала паразитную разность потенциалов и способствуют протеканию токов по компонентам и измерительным цепям из-за присутствия резистивных, емкостных и индуктивных связей.

Воздействующие дестабилизирующие факторы на СИП и результаты измерения ТФС материалов учитываются и корректируются алгоритмическими и инструментальными методами. Применение алгоритмических методов заключается в отбраковке аномальных измерений, нелинейной и линейной фильтрации и др. К инструментальным методам относятся: регулировка величины сопротивления устройства экранирования, применение соответствующего кабеля, изоляция, заземление и др.

Теплоемкость является важным ДФ, влияющим на измерительный зонд и результаты измерения. В качестве линейного источника тепла применяется проволока, которая разогревается импульсами электрического тока [27].

Применяется условие при оценке влияния теплоемкости нагревателя на создание нестационарного температурного поля в исследуемом материале:

$$(q_n/q_d) < \delta_n,$$

где δ_n – погрешность, при которой не учитывается влияние теплоемкости нагревателя; q_n – теплота, поглощаемая нагревателем единичной длины, Дж/м; q_d – количество теплоты, выделяемое во время импульса на участке источника единичной длины.

Первичное распределение температур в исследуемом материале нарушается термоприемником в процессе измерения температуры в системе «термозонд – исследуемый материал» [28]. При этом возможна методическая погрешность измерения температуры, что приведет к отличию действительной температуры исследуемого материала от температуры, определяемой термодатчиком.

Теплоотвод от рабочего конца термоэлектрического термометра намного сокращается при установке термоэлектрического термометра на исследуемом материале по всей длине соприкосновения термоэлектродов с поверхностью материала вдоль изотермы, что позволяет уменьшить погрешность измерения в результате теплоотвода.

Контактные термические сопротивления влияют на работоспособность измерительного зонда, воздействуют на создание температурного поля в системе «термозонд – исследуемый материал» и погрешность измерения параметров ТФС материалов [29]. Термическое сопротивление создается определенным пограничным слоем, который отделяет исследуемый материал от области теплофизических измерений, что приводит к нарушению условий теплообмена. При контакте исследуемых материалов с различными или одинаковыми свойствами создаются также контактные термические сопротивления. Полученное значение отношения термического сопротивления контролируемого объекта к контактному термическому сопротивлению характеризует точность измерения ТФС материалов. Точность контроля ТФС материалов при заданных условиях повышается при большей величине этого отношения. Указанное отношение имеет большую величину для исследуемых объектов с низкой теплопроводностью при одинаковых воздействующих дестабилизирующих факторах, одного размера, по сравнению с объектами с большой теплопроводностью.

Замена газовой прослойки в контактных поверхностях в системе «измерительный зонд – исследуемый материал» и их обработка более проводящим веществом является известным методом уменьшения контактного термосопротивления.

Важный влияющий фактор, который воздействует на измерительный зонд при проведении измерений, – это изменение влажности окружающей среды. Отсюда следует, что необходим контроль влажности окружающей среды при определении параметров теплофизических свойств выпускаемого продукта на производстве для обеспечения его качества [30].

Температура окружающей среды является основным дестабилизирующим фактором, который увеличивает погрешность измерения теплофизических свойств исследуемых материалов [31]. В результате проведения теплофизических экспериментов установлено влияние высоких и низких температур на результаты измерения теплопроводности твердых материалов: теплопроводность возрастает при уменьшении температуры и становится меньше с ростом температуры.

Измерительные электрические цепи ИИС и аналого-цифровой преобразователь также подвергаются воздействию как внешних, так и внутренних факторов и помех, отличающихся между собой по механизму воздействия на электрическую измерительную цепь, источнику возникновения и форме помехи.

Помехи классифицируются по их форме следующим образом: флуктуационные, регулярные и импульсные [26]. Импульсные помехи – это случайно появляющиеся импульсы. Помехи называют импульсными, если они появляются случайно и имеют различную форму.

Если помеха является непрерывным случайным процессом с нормальной вероятностью распределения, то это флуктуационная помеха.

Наведенные помехи с частотой сети и ее гармоник называют регулярными помехами.

По источнику проникновения в электрическую измерительную цепь помехи бывают внешние и внутренние. Флуктации тока, например, в резисторах и полупроводниковых приборах определяют внутренние помехи. Промышленные и атмосферные помехи называют внешними. Электрические установки формируют индустриальные помехи. Электризация частиц в атмосфере и разряды молний создают атмосферные помехи.

Помехи по механизму воздействия на электрическую цепь бывают следующих видов [32]: из-за ухудшения изоляции возникают сигналы на входе – кондуктивные помехи; из-за емкости, формирующейся между окружающими телами и измерительной цепью, возникают на входе емкостные (электрические) наводки. Для уменьшения погреш-

ности измерения в ИИС выполняется экранирование линий связи и устройств измерения в результате действия емкостных наводок.

Так как в измерительных электрических цепях формируются электромагнитные связи данных цепей с другими электрическими цепями, то возникают электромагнитные наводки. Электромагнитное экранирование и скручивание линий связи применяются для устранения электромагнитных наводок [33].

Размещение измерительных цепей, имеющих различный уровень сигнала, на незначительном расстоянии, наличие паразитных связей через общий источник питания или коммутатор приводят к появлению перекрестных помех. Применение помехозащищенных линий связи, специальных конструкций с правильно выполненным монтажом и микроэлектронных элементов с повышенной помехоустойчивостью позволяет устранить перекрестные помехи в цифровых устройствах и блоках.

В термоэлектрических цепях появляются паразитные термоЭДС (помехи постоянного тока), которые определяются имеющимися заземленными контурами и электропитанием. Для подавления кратковременных помех из-за первичной электрической сети питания ИИС применяется сетевой фильтр и по цепям вторичного электропитания устраняются помехи.

Аналого-цифровой преобразователь также вносит погрешность в результаты измерения параметров ТФС материалов. В результате аналого-цифрового преобразования формируется погрешность, равная сумме погрешностей квантования результата измерения и аналогового преобразования. Для коррекции или устранения указанных погрешностей результатов измерения используются адаптивные процедуры и итеративные алгоритмы [34], для реализации которых выполняется обеспечение сходимости результата усреднения к истинному значению измеряемой величины, а также применяется цифроаналоговый преобразователь в измерительной цепи обратной связи.

Применение ИИС в реальных условиях производства требует необходимого учета и коррекции воздействующих факторов (помех и шумов): шумов от разводки питания, излучения магнитного и электрического полей (внешние и внутренние помехи); температуры, влажности, давления окружающей среды (факторы климатические); ударов, вибрации, ускорения (факторы механические) [35 – 37].

Выбор способа крепления компонентов ИИС, введение конструктивных элементов, которые увеличивают жесткость, для повышения собственных резонансных частот элементов конструкции; сокращение массы и габаритных размеров; выбор конструктивных элементов и материалов, устойчивых к механическим воздействиям обеспечивают устойчивость ИИС к механическим воздействиям.

В условиях производства изделий и материалов применение ИИС осложняется значительным изменением температуры окружающей среды. В конструкции ИИС следует избегать высокой плотности компоновки, в составе ИИС надо применять электронные компоненты и устройства, которые используются при различных температурных диапазонах; использовать конструктивные, теплопроводящие и теплоотводящие элементы для обеспечения на участках передачи теплоты незначительное тепловое сопротивление.

При хранении и передаче цифровой информации необходим ввод информационной избыточности. Выбор оптимальной конструкции цепей электропитания, выполнение экранирования линий электрической связи и элементов, качественное изготовление печатных плат способствуют требуемой помехозащищенности ИИС.

Проведенный анализ влияющих факторов на ИИС позволил установить причины технического несовершенства современных ИИС ТФС материалов.

В результате анализа воздействующих дестабилизирующих факторов при эксплуатации ИИС можно сделать вывод, что при устранении технического несовершенства ИИС ТФС материалов необходимо разработать метод повышения точности ИИС, для этого контролировать и вводить коррекцию результатов измерения структурных компонентов измерительного канала ИИС: измерительного зонда, усилителя, АЦП, т.е. выполнять коррекцию результатов измерения в автоматическом режиме с учетом влияющих ДФ: температуры и влажности, при которых проводится измерение.

В результате экспериментальных исследований установлено, что воздействием остальных указанных выше ДФ можно пренебречь, так как оно незначительно.

Для уменьшения погрешности измерения структурных компонентов ИИС предлагаются методы, позволяющие повысить точность определения ТФС материалов и изделий на 3...5%.

Необходимо создать интеллектуальный алгоритм коррекции полученных результатов измерения параметров теплофизических свойств материалов в целях уменьшения погрешности измерений с помощью информационно-измерительной системы с учетом влияющих факторов.

1.3. МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ

Исследование ТФС материалов и проверка качества готовых изделий в различных режимах работы осуществляется в результате про-

ведения теплофизических экспериментов и применения соответствующих методов неразрушающего контроля [13 – 22, 38 – 44]. Теплофизические свойства материалов исследуются тогда, когда их использование связано с изменением тепловых процессов. Материалы и изделия характеризуются параметрами, определяющими качество изделий. Методы неразрушающего контроля основаны на регистрации температурного поля в системе «измерительный зонд – исследуемый объект» и позволяют определять ТФС изделий без нарушения их целостности и эксплуатационных характеристик. Теоретический подход к вопросам неразрушающего контроля при тепловом воздействии основывается на решении краевых задач теплопроводности при описании тепловых процессов с помощью математического аппарата, для решения которых применяется аппарат математической физики [45 – 49].

Корректность построения теоретической модели и выбор соответствующего метода решения задачи определяют точность результатов, получаемых теоретическим путем. Известно, что аналитические методы называются наиболее точными методами, но при решении задач НК ТФС материалов данные методы реализуются не в полной мере [38, 40, 50 – 52].

В настоящее время существуют различные способы для экспериментального определения параметров ТФС материалов. Можно классифицировать такие методы следующим образом:

- по тепловому режиму: методы нестационарные и стационарные;
- по типу контролируемых величин: комплексный метод измерения коэффициентов температуропроводности и теплопроводности, метод определения коэффициента теплопроводности и т.д.

По условиям измерения все способы и реализующие их измерительные средства делятся на: контактные и бесконтактные методы. В экспериментальной исследовательской теплофизике количество контактных методов значительно больше, чем количество бесконтактных, но в настоящее время наблюдается увеличение числа бесконтактных методов и их реализующих измерительных средств, так как они имеют быстроедействие, многопараметрический характер испытаний, возможность дистанционного управления и контроля технологическими процессами [53 – 56].

Стационарные и нестационарные методы рассмотрены в работах [55 – 75]. Закон теплопроводности Фурье для стационарного теплового потока [47, 57 – 75] реализован в стационарных методах, т.е. в процессе проведения измерения величина и направление теплового потока, проходящего через исследуемый объект, сохраняются устойчивыми.

Различаются существующие стационарные методы [3, 59] по способам учета и компенсации тепла, по формам и размерам исследуемых объектов, расположением элементов нагрева, устройством измерительных зондов и ячеек, способам записи результатов измерения и их обработки [57, 58, 65]. Недостатки таких методов называются длительностью процедуры измерений, узкий диапазон температурный, и неудобное определение материалов ТФС, при сохранности неразрушающего контроля.

В настоящее время нестационарные методы становятся основными методами контроля теплофизических свойств исследуемых объектов. Из теории измерения параметров теплофизических свойств объектов следует, что нестационарные методы по получению измерительных данных об исследуемых объектах и несложным измерительным устройствам, считаются вполне надежными. Способы контроля теплофизических свойств объектов нестационарные, по сравнению со стационарными, меньше требуют тепловую защиту, времени и энергозатрат при проведении эксперимента.

Нестационарные методы определения ТФС материалов [45, 57 – 62, 66, 76] базируются на использовании нестационарного теплового потока в теории теплопроводности. Можно разделить методы нестационарные следующим образом [56, 64, 77]:

- методы квазистационарного и регулярного теплового режима;
- методы, в которых параметры нестационарного температурного поля определяются на первой стадии его формирования.

Кондратьев Г. М. и его ученики предложили методы регулярного теплового режима [71, 72]. Сущностью таких методов является рассмотрение процесса охлаждения (или нагревания) тела в среде с постоянной температурой, когда начальное состояние тела практически не влияет на результаты. Методы двух температурно-временных точек, акалориметра и лямбдакалориметра и т.д. созданы с использованием теории регулярного теплового режима. Преимуществами данных методов являются абсолютность, высокая точность эксперимента и простой вид формулы для обработки экспериментальных результатов. Недостатки метода: эксперимент при температуре внешней среды в течение эксперимента постоянной соответствует теоретическим исследованиям; необходимо обеспечивать большое значение коэффициента теплоотдачи.

Методы квазистационарного теплового режима [49, 70] происходят при нагревании определенных тел, при которых устанавливается постоянный временной поток тел. Сущность методов состоит в измерении перепада температур между двумя точками (например, между боковой поверхностью и центром цилиндрического образца) в процес-

се нагрева системы с постоянной скоростью. Методы квазистационарного теплового режима применяются при температуре от -200 до $+3000$ °С для определения коэффициента температуропроводности твердых тел. Преимущества квазистационарных методов: позволяют определять теплофизические свойства в большом интервале температур, простые математические соотношения для обработки экспериментальных данных. Основные недостатки методов: длительность эксперимента, требование качественной торцевой тепловой изоляции для соответствия образца принятой терминологии «неограниченная пластина». Эти методы не рекомендуется применять для НК ТФС материалов [78, 79].

Наибольшим соответствующим для оперативного и быстрого НК ТФС материалов считаются методы, в которых в первой стадии формирования нестационарного температурного поля измеряются параметры ТФС объектов. Рассмотрим методы контроля ТФС исследуемых объектов без нарушения их целостности при измерении параметров ТФС материалов [74, 75].

С помощью методов теплового импульса определения ТФС материалов в нестационарной области разогрева измеряются параметры ТФС материалов [80 – 83].

Исходное тепловое состояние объекта имеет большое значение в данных методах. Возникновение импульсного теплового изменения внутри объекта при проведении исследования наблюдается более очевидно, если до начала проведения исследования объект имеет равномерное температурное поле. К этим методам относятся: методы кратковременного линейного источника тепла, мгновенного плоского источника тепла, постоянного и цилиндрического источников тепла, и т.д. Особенность этих методов заключается в том, что для проведения опыта не надо изготавливать образцы по заданной определенной форме и размеру, а только требуется небольшая обработка контролируемого объекта для размещения измерительного устройства. Далее исследуемый объект нагревается потоком тепла нагревателем, реализуется снятие информации о тепловой процедуре и на ее основе по заданному математическому алгоритму определяют значение теплофизических параметров. К недостаткам импульсных методов определения ТФС материалов относится наличие сведений о параметрах ТФС образцовой меры и значительной мощности применяемого источника тепла.

По методам неразрушающего контроля ТФС материалов широко реализуются методы, которые основаны на импульсном тепловом действии линейного источника тепла. В этих методах исследуемый материал представляет собой полубесконечный образец, отделенный плос-

костью, на поверхности которого расположены линейный тепловой источник и термодатчики [84].

Контролируемый объект изолирован от теплового воздействия окружающей среды. На его поверхности размещается импульсный линейный источник тепла. Контактные рабочие спай термодатчиков расположены на заданном расстоянии от источника тепла. После подачи теплового импульса необходимой мощности определяется значение времени I при достижении разности между избыточными температурами в двух находящихся на разном расстоянии от линейного источника тепла точках поверхности исследуемого объекта некоторого, заранее требуемого и заданного значения.

Измерение выполняется при заданной мощности источника тепла.

Нахождение времени I происходит с помощью непрерывного сравнения термоЭДС E_{T1} термодатчика, находящейся в точке a_1 , и увеличенной в n раз значение термоЭДС E_{T2} термодатчика в контролируемой точке a_2 , а величина времени I определяется в случае достижения равенства $E_{T1} = nE_{T2}$.

Момент формирования экстремума термограммы нагрева появляется гораздо позже, чем значение времени, соответствующее равенству $E_{T1} = nE_{T2}$. По этой причине улучшается оперативность и снижаются незафиксированные тепловые потери. Это значительно увеличивает точность метода неразрушающего контроля теплофизических свойств. Отличительными особенностями этого метода неразрушающего контроля являются быстрдействие, относительно небольшая погрешность определения искомых теплофизических свойств в результате снижения потерь тепла в проводимом эксперименте, которая достигается в результате автоматизации процесса измерения.

Повышение точности данного метода НК ТФС материалов можно достичь путем устранения погрешности от возмущения второго термометризатора и требованием по размещению его в определенном фиксированном месте поверхности исследуемого объекта [70], если в моменты времени сразу после подачи теплового импульса проводить измерение температуры в одной точке на поверхности исследуемого объекта.

Вышеописанные методы имеют основное преимущество: они абсолютные и допустимо их применение при градуировке тепловых эталонов, употребляемых для методов сравнения при определении теплофизических коэффициентов.

Для увеличения области реализации вышеописанных методов предлагается применение теплового эталона в контакте с исследуемым объектом, материал которого имеет определенную точность и устойчивые теплофизические характеристики [15].

Рассмотрим метод неразрушающего контроля свойств материалов, который заключается:

- в импульсном нагреве линейным нагревателем поверхности объекта контроля;
- фиксации температуры в заданных точках контроля, находящихся на требуемом расстоянии от линии воздействия источника тепла;
- определении мощности воздействующего тепла;
- фиксации среднеинтегрального значения температуры с начала формирования импульса нагрева и до времени определения максимального значения термограммы;
- определении момента времени, когда значение температуры при наступлении ее максимума сравнивается со значением среднеинтегральной температуры [22].

Преимуществом является то, что относительная погрешность измерения температуры в рассмотренном методе значительно меньше, нежели в других существующих методах.

В работе [85] рассмотрен метод неразрушающего контроля теплофизических свойств исследуемых объектов на основе применения импульсного плоского теплового источника. Эталонный и исследуемый полубесконечные объекты приводятся в контакт и доводятся до состояния термической статики при неизменной начальной температуре. Вслед за этим происходит подача теплового импульса от источника тепла, заранее размещенного на эталонном объекте с определенным заранее расстоянием от плоскости контакта тел, и в ранее заданные моменты времени регистрируют значения температуры по одному из сечений.

В работах [82, 85, 86] рассмотрены импульсно-динамические методы определения теплофизических характеристик. Особенностью этих методов является то, что во время эксперимента записывается информация об измерениях в дискретной форме (число или частота импульсов), и это разрешает довольно просто преобразовать измерительную информацию в цифровую форму, что способствует простой реализации методов измерения на основе процессорных устройств. Недостатки таких методов представляются тем, что в них почти не учитывается влияние конечных конструктивных характеристик нагревателя, его теплоемкости, теплоемкости термодатчиков, не полноценного применения исходной измерительной информации, собранной в процессе проведения теплофизического эксперимента (используется только отдельные точки термограмм), очень узкий диапазон контроля ТФС.

Методы, в которых используются в качестве источников энергии линейные или плоские импульсные источники тепла, оказывающие воздействие на исследуемый объект, имеют основной недостаток в том, что при исследовании теплофизических материалов увеличивается погрешность результатов измерения, вызываемая симметричностью тепловых потоков от источника к контролируемому материалу и к изолятору на его поверхности. Таким образом, рассмотренные абсолютные способы допустимо применять только для ограниченного класса материалов [87].

Кроме методов неразрушающего контроля, применяющих плоские и линейные импульсные источники тепла, используются и методы с применением точечных импульсных источников, которые рассмотрены в работах [14, 88, 89]. К недостатку этих методов относится необходимость графической обработки результатов измерения для нахождения контролируемых параметров.

Проведение измерений на участках термограмм, где тепловой процесс переходит к стадии стабилизации, может способствовать повышению точности методов контроля теплофизических характеристик [90].

Рассмотрены существующие методы определения параметров ТФС материалов, их преимущества и недостатки. Для неразрушающего контроля ТФС теплоизоляционных материалов широко применяется метод теплового воздействия линейным нагревателем на исследуемый материал с последующей регистрацией температурно-временных характеристик в области контакта измерительного зонда и исследуемого материала. Преимуществом метода является меньшая относительная погрешность измерений температуры, по сравнению с другими методами.

1.4. АНАЛИЗ МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ИИС ТФС МАТЕРИАЛОВ

Основные методы, повышающие точность измерений, представлены в рекомендациях [91] «РМГ 64–2003. Государственная система обеспечения единства измерений. Обеспечение эффективности при управлении технологическими процессами. Методы и способы повышения точности измерений».

К данным методам относятся следующие.

1. При доминирующих инструментальных составляющих погрешности измерений способ, заключающийся в применении более точного измерительного средства на менее точное устройство, называется эффективным. Отметим, что данный способ не всегда применяется, так как выбор более точных средств измерений часто ограничен,

а величина стоимости измерительных средств с ростом их точности тоже возрастает.

2. Для снижения относительной погрешности представляется способ выбора измерительных средств, в которых для верхнего предела измерений нормированы приведенные погрешности таким образом, чтобы в последней трети диапазона определялись требуемые измеряемые величины.

3. Способ, заключающийся в применении средств измерений при ограничении условий, применяется, когда воздействующие дестабилизирующие величины (температура окружающего воздуха, параметры питания, воздействующие вибрации и т.д.) заметно влияют на результаты измерений.

4. Способ «Индивидуальная градуировка средств измерений» успешно реализуется в ИИС и позволяет уменьшить систематические составляющие погрешности приборов измерений на основе использования в результатах измерений поправок, сформированных в данных индивидуальной градуировки. Индивидуальная градуировка позволяет снизить систематическую погрешность для всего диапазона измерений, которая приобретает значение, равное погрешности обратного хода для точек, заданных во время градуировки.

5. При доминировании случайной составляющей погрешности измерений способ, заключающийся в усреднении результатов при проведении многократных наблюдений, является наиболее эффективным способом ее снижения.

Сущность этого способа заключается в том, что за некоторый постоянный интервал времени измерения реализуют несколько наблюдений, дальше с помощью вычислительного блока рассчитывают среднее значение измеряемой величины и значение среднего квадратического отклонения результата измерения.

6. Способ снижения трудоемкости измерений в результате применения автоматизации измерительных процедур. Такой способ устраняет субъективные погрешности, которые возникают в процессе обработки диаграмм, позволяет выполнять анализ информации и других операций, которые ранее выполнял человек.

7. Способ контроля исправности измерительных средств при их эксплуатации. Такая процедура позволяет исключить или снизить метрологические отказы измерительных приборов.

8. Разработка или совершенствование методик выполнения измерений. Этот способ называется единственно эффективным способом повышения точности при доминировании методических составляющих погрешностей измерений. Можно усовершенствовать методики

выполнения измерений путем изменения алгоритма обработки результатов измерений.

9. Применение способа сравнения с мерой является одним из наиболее эффективных способов снижения систематической составляющей погрешности средств измерений. Этот способ заключается в том, что компаратор выполняет сравнение контролируемой физической величины с величиной, воспроизводимой мерой, а искомую физическую величину определяют по номинальному значению меры и по показаниям компаратора. Разновидности способа сравнения с мерой представляют собой методы замещения, противопоставления и компенсации. Чем меньше отличие измеряемой величины, воспроизводимой мерой, от измеряемой, тем выше точность каждого из этих методов.

Способ называется нулевым, если при измерениях достигаются нулевые показания компаратора, а если нет, то называется дифференциальным. При этом учитывается, что меры, используемые при дифференциальных способах, имеют меньшую стоимость и большую точность, по сравнению с теми, которые используются при нулевых способах.

Способ «Применение тестовых способов», используемый в различных измерительных системах, позволяет уменьшить систематические и квазисистематические погрешности и базируется на определении параметров статической функции преобразования с помощью дополнительных преобразований тестов, связанных с измеряемой величиной.

При использовании тестовых способов суммарная погрешность средства измерений включает следующие погрешности:

- преобразования тестов;
- квантования аналого-цифрового преобразователя;
- от высокочастотных шумов в схеме измерительного средства;
- динамическую, позволяющую изменять измеряемые величины при использовании тестов; вычислительного устройства.

10. Для автоматической коррекции погрешности средств измерений в ряде измерительных преобразователей электрических и неэлектрических величин применяется способ обратного преобразования. Для выполнения этого способа реализуют обратный преобразователь, реальная статическая функция преобразования которого соответствует функции, обратной номинальной характеристике преобразования средства измерений. Такой способ считается эффективным, только если прямой преобразователь менее точен по сравнению с обратным.

11. Способ «Использование информационной избыточности» для повышения точности измерений основывается на состоянии измерения, при котором измерительная информация более требуется для выполнения функций управления предметом. Примеры использования этого способа: применение дополнительных средств измерений в ИИС для измерения одной и той же величины и усреднение их показаний; использование зависимостей измеряемых величин, определенных характеристиками контролируемого объекта, при увеличении точности результатов измерений и устранении погрешностей при контроле некоторых параметров, являющихся отличными от других величин погрешностей.

Рассмотрены основные методы, позволяющие повысить точность измерений в ИИС, среди которых наиболее предпочтителен метод автоматической коррекции погрешностей измерений.

Как показывает анализ существующих информационно-измерительных систем и их технического несовершенства, методов неразрушающего контроля параметров ТФС материалов и повышения точности ИИС, задача исследования возможностей и путей улучшения технических характеристик ИИС (за счет коррекции технического несовершенства ее элементов при математической обработке результатов измерений) является актуальной.

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

Для достижения поставленной цели исследования необходимо создание алгоритмического обеспечения ИИС ТФС материалов и решение следующих задач:

- провести анализ структуры и характеристик существующих ИИС ТФС материалов в целях определения факторов, влияющих на точность определения параметров теплофизических свойств материалов;
- определить допустимые пределы изменения погрешностей структурных компонентов ИИС, при которых измерение параметров ТФС исследуемых материалов осуществляется с требуемой точностью;
- установить соответствующие поправки в результаты измерения структурных компонентов и параметров ТФС для исключения систематической и случайной погрешностей;

- разработать математическую модель процесса измерения ИИС, учитывающую погрешность измерений, обусловленную ДФ;
- разработать математические модели структурных компонентов измерительного канала ИИС;
- разработать метод повышения точности ИИС в результате устранения технического несовершенства структурных компонентов ИИС;
- разработать интеллектуальный алгоритм оценки и коррекции полученных результатов измерения из-за технического несовершенства структурных компонентов ИИС и ДФ;
- разработать ИИС ТФС материалов с модулями базы знаний, коррекции результатов измерений структурных компонентов измерительного канала ИИС и программным обеспечением и алгоритмом ее функционирования, реализующую разработанные метод повышения точности и алгоритм коррекции результатов измерения параметров ТФС материалов при воздействующих ДФ;
- осуществить экспериментальные исследования созданного опытного образца ИИС, структурных компонентов системы для проверки адекватности разработанных математических моделей и оценки точности измерения ИИС ТФС материалов.

Глава 2

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ, МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

2.1. ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ И ЗАДАЧИ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ИИС ТФС МАТЕРИАЛОВ

Информационно-измерительные системы предназначены для определения теплофизических свойств материалов, применяемых во многих отраслях промышленности: строительной, химической промышленности, авиации, энергетике и т.д. В информационно-измерительных системах необходимо обеспечить достоверность передачи информации при определении физических параметров исследуемых материалов. Эффективность функционирования ИИС в основном определяется показателем точности контроля ТФС материалов [92]. Исследование возможностей и путей повышения точности ИИС теплофизических свойств материалов – одна из самых важных и актуальных задач совершенствования ИИС ТФС материалов.

Устранение технического несовершенства информационно-измерительных систем для контроля параметров теплофизических свойств материалов (λ и α – коэффициентов тепло- и температуропроводности) в результате повышения точности функционирования ИИС позволит повысить качество исследуемых материалов и изделий из них.

При разработке ИИС ТФС материалов необходимо учитывать весь комплекс воздействующих на ИИС факторов, которые могут привести к нарушению работоспособности информационно-измерительной системы при ее эксплуатации. Поэтому важно разработать ИИС с учетом дестабилизирующих факторов, что позволит уменьшить, устранить или учитывать влияние воздействующих ДФ на результаты измерения определяемых параметров ТФС материалов с помощью ИИС.

В существующих ИИС ТФС материалов и изделий из них качество работы и метрологический уровень системы оцениваются, как правило, по полученной погрешности результатов измерения параметров ТФС материалов (коэффициентов тепло- и температуропроводности). Следовательно, при разработке ИИС ТФС материалов, проведении контроля ТФС в условиях производства и полевых условиях необхо-

димо определить ДФ и провести их анализ. Это является важной задачей, решение которой позволит обеспечить заданный метрологический уровень определения ТФС материалов.

При разработке ИИС необходимо классифицировать ДФ, выделить основные факторы, которые вносят большую составляющую в погрешность измерения параметров ТФС материалов. Структурирование дестабилизирующих факторов позволит создать базу данных ДФ для рассматриваемой предметной области на основе формализации информации о дестабилизирующих факторах.

На основе анализа ДФ определяются методы уменьшения составляющих общей погрешности блоков и устройств ИИС. В основном используются методы автоматической коррекции результатов измерения с использованием имеющихся в базе знаний ИИС аппроксимирующих зависимостей определяемых параметров ТФС материалов от ДФ.

В таблице 2.1 представлена классификация воздействующих дестабилизирующих факторов на структурные компоненты ИИС и планируемые способы устранения их воздействия на результаты измерения ТФС материалов.

Выполненный анализ воздействующих ДФ на исследуемый материал, структурные компоненты ИИС: измерительный зонд, включающий систему измерительных преобразователей (хромель-копелевых термопар), дифференциальный усилитель, аналого-цифровой преобразователь, вычислительный блок, включающий микроконтроллер, позволяет сформировать направления разработки математических моделей процесса измерения, оценки точности ИИС, структурных компонентов измерительного канала ИИС с учетом влияющих ДФ.

Как показывают результаты анализа воздействующих на ИИС дестабилизирующих факторов, наибольший вклад в погрешность измерения параметров ТФС материалов вносят доминирующие факторы – температура и влажность окружающей среды.

На рисунке 2.1 представлена функциональная схема процесса измерения в ИИС ТФС материалов с обозначением структурных компонентов системы, являющихся определяющими в процессе измерения параметров ТФС материалов, входных воздействий, параметров и воздействующих дестабилизирующих факторов. Системы измерительных преобразователей – термопар – регистрируют физическую величину (температура T) от исследуемого объекта и преобразуют ее в электрический сигнал $U_{\text{СИП}}$. Далее сигнал подается на дифференциальный усилитель, где усиливается сигнал $K U_{\text{СИП}}$ (K – коэффициент усиления дифференциального усилителя). Аналого-цифровой преобразователь преобразует получаемый сигнал $K U_{\text{СИП}}$ в двоичный код, откуда передается в микроконтроллер для измерения, регистрации и обработки

2.1. Классификация воздействующих ДФ и помех на структурные компоненты ИИС и способы устранения их воздействия на результаты измерения

Воздействующие помехи и ДФ на структурные компоненты ИИС	Структурные компоненты	Способы устранения помех и ДФ на результаты измерения ТФС материалов
Температура ОС	ИИС	Автоматическая коррекция результатов измерения по математическим моделям структурных компонентов и аппроксимирующим зависимостям, включение в цепь СИП, ДУ
Давление ОС		Автоматическая коррекция результатов измерения по аппроксимирующим зависимостям
Влажность ОС		Автоматическая коррекция результатов измерения по аппроксимирующим зависимостям
Изменение теплоемкости нагревателя	ИЗ	Использовать условие $(q_n/q_d) < \delta_n$
Изменение теплоотдачи в области измерения	ИЗ	Учет тепловых потерь
Шероховатость объекта ИМ	ИЗ	Автоматическая коррекция результатов измерения по аппроксимирующим зависимостям
Теплоотвод по электродам термодатчика	ИЗ	Термоэлектрический термометр рекомендуется устанавливать по всей длине соприкосновения термоэлектродов с поверхностью подложки ИЗ

Воздействующие помехи и ДФ на структурные компоненты ИИС	Структурные компоненты	Способы устранения помех и ДФ на результаты измерения ТФС материалов
Контактные термические сопротивления	ИЗ	Автоматическая коррекция результатов измерения по аппроксимирующим зависимостям. Тщательная обработка соприкасающихся поверхностей в области контакта ИЗ и ИМ, замена газовой прослойки между ними более проводящим веществом
<p>Помехи:</p> <p>а) по форме: импульсные, флукационные и регулярные;</p> <p>б) по источникам происхождения: внутренние (флуктуации тока в резисторах, полупроводниковых приборах) и внешние (индустриальные и атмосферные);</p> <p>в) по источникам и механизму проникновения в измерительную цепь: кондуктивные, электрические наводки, электромагнитные наводки, перекрестные, помехи постоянного тока, помехи из-за наличия заземленных контуров</p>	АЦП, СИП	Электромагнитное экранирование, специальные конструкции, рациональный монтаж

Продолжение табл. 2.1

Воздействующие помехи и ДФ на структурные компоненты ИИС	Структурные компоненты	Способы устранения помех и ДФ на результаты измерения ТФС материалов
Помехи, связанные с электропитанием	ИИС	Вводится сетевой фильтр в целях подавления кратковременных помех
Погрешность, вносимая АЦП	АЦП	Применить адаптивные измерительные процедуры
Механические (удары, вибрации, ускорения)	ИИС	Уменьшение габаритных размеров, подбор конструктивных материалов, увеличение собственных резонансных частот элементов конструкции, выбор способа крепления радиоэлектронных изделий
Климатические (температура, влажность, давление)	ИИС	Использование радиоэлектронных изделий, рассчитанных на работу в широком диапазоне температур, применение теплоотводящих и теплопроводящих конструктивных элементов
Внешние и внутренние помехи (шумы от разводки питания, излучение электрического и магнитного полей)	ИИС	Тщательная проработка трассировки печатных плат, выбор конструкции цепей питания, экранирование элементов и линий связи, введение информационной избыточности при передаче и хранении цифровой информации

Воздействующие помехи и ДФ на структурные компоненты ИИС	Структурные компоненты	Способы устранения помех и ДФ на результаты измерения ТФС материалов
Климатические (температура, влажность, давление)	ИИС	Использование радиоэлектронных изделий, рассчитанных на работу в широком диапазоне температур, применение теплоотводящих и теплопроводящих конструктивных элементов
Внешние и внутренние помехи (шумы от разводки питания, излучение электрического и магнитного полей)	ИИС	Тщательная проработка трассировки печатных плат, выбор конструкции цепей питания, экранирование элементов и линий связи, введение информационной избыточности при передаче и хранении цифровой информации

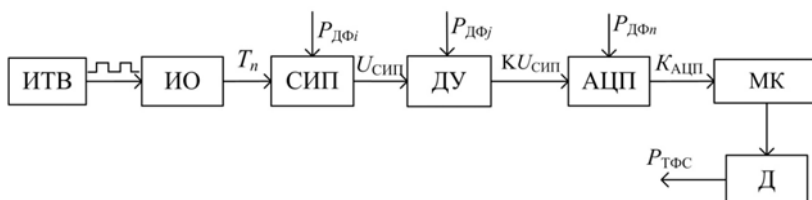


Рис. 2.1. Функциональная схема процесса измерения в ИИС ТФС материалов:

- ИТВ – источник теплового воздействия на исследуемый объект;
 $P_{ДФi}$ – воздействующие факторы на СИП (температура окружающей среды, влажность, контактное сопротивление);
 $P_{ДФj}$ – воздействующие факторы на дифференциальный усилитель (температура окружающей среды, нестабильность напряжения питания, изменение сопротивления нагрузки);
 $P_{ДФn}$ – воздействующие факторы на АЦП (помехи, шумы) [93]

в соответствии с алгоритмом функционирования ИИС и представления информации о теплофизических свойствах (коэффициентах тепло- и температуропроводности исследуемого объекта (ИО), λ и α соответственно) на дисплее (Д) пользователю.

Для повышения точности и эффективности предлагаются следующие основные направления совершенствования ИИС:

- разработка математической модели оценки точности ИИС ТФС материалов при воздействии ДФ;

- создание математической модели процесса измерения ИИС ТФС материалов;

- разработка математической модели ИИС ТФС материалов, функционирующей при воздействии ДФ;

- создание информационной модели ИИС ТФС материалов, учитывающей влияние ДФ и обеспечивающей повышение точности измерения;

- разработка метода повышения точности измерения ТФС материалов, заключающегося в коррекции технического несовершенства структурных компонентов измерительного канала ИИС ТФС материалов при проведении измерения;

- разработка базы данных и знаний ИИС, содержащих информацию о методах и алгоритмах измерения, исследуемых классах материалов, воздействующих ДФ, с учетом накопленного опыта пользователя и теоретических знаний экспертов;

- создание интеллектуального алгоритма оценки и коррекции полученных результатов измерения параметров ТФС материалов с учетом ДФ;

- осуществление экспериментальных исследований опытного образца ИИС, структурных компонентов системы для проверки адекватности разработанных математических моделей и оценки точности измерения ИИС.

Для повышения точности и эффективности функционирования предложены основные направления совершенствования ИИС ТФС материалов.

Для решения задачи исследования на основе анализа структуры, экспериментальных данных и технических характеристик существующих ИИС ТФС материалов для устранения их технического несовершенства с учетом основных направлений совершенствования ИИС необходимо разработать математическую модель оценки точности функционирования ИИС, учитывающую погрешность измерений, обусловленную воздействующими ДФ, что позволит повысить точность ИИС ТФС материалов.

2.2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ ТОЧНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ИИС ТФС МАТЕРИАЛОВ

В рассматриваемой информационно-измерительной системе теплофизических свойств твердых материалов точность системы оценивается по полученной погрешности результатов измерения параметров ТФС материалов (коэффициентов тепло- и температуропроводности). ИИС ТФС материалов включает следующие основные структурные компоненты: измерительный зонд, измерительный канал, устройство обработки измерительной информации (УОИИ) на базе микроконтроллера, блок питания (БП) [94].

При разработке ИИС определены дестабилизирующие факторы, которые вносят наибольшую составляющую в погрешность измерения параметров ТФС материалов и влияют на работоспособность ИИС из-за погрешностей, вносимых ИЗ (системой измерительных преобразователей (СИП)), ИК (дифференциальным усилителем, аналого-цифровым преобразователем), исследуемым материалом (из-за контактного сопротивления, шероховатости поверхности), помехами климатическими (температурой окружающей среды T_{OC} , влажностью W), механическими (из-за вибрации).

Функционирование ИИС при воздействии дестабилизирующих факторов в формализованном виде можно представить зависимостью

$$z = F(y, x, v) + Q, \quad y \in Y, \quad x \in X, \quad v \in V, \quad (2.1)$$

где z – вектор выходных параметров ИИС (параметров ТФС материалов); y – вектор входных неуправляемых параметров (сигналы с выходов компонентов ИК); x – вектор входных управляемых параметров (мощность теплового воздействия на исследуемый материал); v – вектор случайных сигналов (T_{OC} , W); Q – вектор воздействующих помех при функционировании ИИС.

Для оценки точности функционирования ИИС использован расчетно-аналитический метод. На основе соотношения (2.1) разработана математическая модель, которая устанавливает зависимость между выходными параметрами точности результатов измерения ТФС материалов и входными параметрами точности, которые вносят погрешность в результаты измерения параметров ТФС:

$$z_n = f(y_{n1}, y_{n2}, \dots, y_{nm}), \quad (2.2)$$

где z_n – номинальное значение выходных параметров ИИС; $y_{n1}, y_{n2}, \dots, y_{nm}$ – параметры точности компонентов ИИС (СИП, ИК).

Выходные параметры ИИС измеряются с погрешностью Δz_n , так как параметры компонентов ИИС вносят погрешности $\Delta y_{n1}, \Delta y_{n2}, \dots, \Delta y_{nm}$:

$$z = z_n + \Delta z_n = f[(y_{n1} + \Delta y_{n1}), (y_{n2} + \Delta y_{n2}), \dots, (y_{nm} + \Delta y_{nm})]. \quad (2.3)$$

Разложим соотношение (2.3) в ряд Тейлора [95], учитывая только члены первого порядка, поскольку погрешности y_n и z_n незначительны по сравнению с величинами входных и выходных параметров:

$$z = f_1(y_{n1}, y_{n2}, \dots, y_{nm}) + \sum_{j=1}^m \left(\frac{\partial f_1}{\partial y_j} \right) \Delta y_j. \quad (2.4)$$

Из выражения (2.3) следует, что абсолютная погрешность результатов измерения в ИИС: $\Delta z_n = z - z_n$. Тогда

$$\Delta z_n = \sum_{j=1}^m \left(\frac{\partial f_1}{\partial y_j} \right) \Delta y_j = \sum_{j=1}^m C_j \Delta y_j, \quad (2.5)$$

где C_j – весовой коэффициент погрешности компонентов ИИС, влияющих на точность выходных параметров ИИС.

Относительная погрешность, по которой оценивается точность ИИС, определяется на основе выражения (2.5):

$$\delta = \frac{\Delta z_n}{z} = \sum_{j=1}^m C_j \frac{\Delta y_j}{y}.$$

На основе экспериментальных данных ИИС получены аналитические зависимости математической модели (2.2) выходных параметров точности z_n от входных параметров Δy_{nm} .

Разработана математическая модель оценки точности ИИС, которая устанавливает зависимость между выходными параметрами точности результатов измерения ТФС материалов и входными параметрами точности, которые вносят погрешность в результаты измерения параметров ТФС.

На показатель точности существенное влияние оказывает отсутствие для существующих ИИС математических моделей, позволяющих описать процесс измерения ТФС материалов, а также алгоритма коррекции результатов измерения ТФС материалов при воздействии дестабилизирующих факторов.

2.3. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ИЗМЕРЕНИЯ В ИИС ТФС МАТЕРИАЛОВ

Точность функционирования ИИС в основном определяются показателями точности и оперативности определения параметров ТФС материалов [94, 96]. На эти показатели большое влияние оказывает отсутствие для существующих ИИС математических моделей, позволяющих описать процесс измерения ТФС материалов и выбрать оптимальный режим работы ИИС в зависимости от конкретной измерительной ситуации.

Рассмотрим структуру ИИС ТФС материалов. В состав ИИС входят: компьютер, измерительный канал, включающий систему измерительных преобразователей, дифференциальный усилитель, аналого-цифровой преобразователь; переносной вычислительный блок (ПВБ), блок принятия решений, база знаний. ПВБ предназначен для регистрации информации о воздействующих ДФ, синтеза алгоритма измерений в ИИС в зависимости от измерительной ситуации, выполнения последовательности измерительных процедур, управления измерениями. Компьютер обрабатывает и хранит экспериментальные данные, принимает решения на основе информации проведенных экспериментов и базы знаний при синтезе измерительных процедур и представляет выходную информацию о параметрах ТФС материалов в виде, удобном для пользователя.

На основе анализа структуры и технических характеристик структурных компонентов ИИС ТФС материалов для устранения их технического несовершенства с учетом основных направлений совершенствования ИИС разработать математическую модель процесса измерения в ИИС, что позволит повысить точность ИИС ТФС материалов.

Математическая модель процесса измерения в ИИС ТФС материалов. Анализ архитектуры ИИС позволяет представить *обобщенную модель* ИИС (D) с учетом составляющих структурных компонентов и связей информационного обмена следующим образом:

$$D = \langle S, C_K, \Phi_{\text{ИИДФ}} \rangle, \quad (2.6)$$

где $S = \{S_{\text{СИП}}, S_{\text{ДУ}}, S_{\text{АЦП}}, S_{\text{МК}}\}$ – множество структурных компонентов, участвующих в процессе формирования измерительной информации от системы первичных измерительных преобразователей ($S_{\text{СИП}}$), усиления измерительного сигнала в дифференциальном усилителе ($S_{\text{ДУ}}$), в процессе аналого-цифрового преобразования ($S_{\text{АЦП}}$), обработки измерительной информации в микроконтроллере ($S_{\text{МК}}$);

$C_K = \{C_{СИП-ДУ}, S_{ДУ-АЦП}, S_{АЦП-МК}\}$ – множество связей информационного обмена между структурными компонентами системы; $\Phi_{ИИДФ} = \{\Phi_{ИИСИП}, \Phi_{ИИДУ}, \Phi_{ИИАЦП}\}$ – множество формируемой измерительной информации (ИИ) в СИП, ДУ, АЦП с учетом воздействия ДФ.

На основе созданной обобщенной модели системы (2.6) разработана *математическая модель процесса измерения ИИС* с учетом алгоритма функционирования системы, входных и выходных сигналов основных структурных компонентов системы и зависимостей между ними при воздействии дестабилизирующих факторов [97 – 99]. Для создания математической модели ИИС выполнен анализ как известных зависимостей при математическом описании СИП, ДУ, АЦП, так и полученных экспериментальным путем. На рисунке 2.2 представлена структурная схема процесса измерения в ИИС ТФС материалов с обозначением структурных компонентов системы, которые оказывают основное влияние на точность измерения параметров ТФС материалов, входных воздействий ($T_n, U_{СИП}, U_{ДУ}, K_{АЦП}$), параметров и воздействующих дестабилизирующих факторов ($P_{ДФi}, P_{ДФN}, P_{ДФd}$).

Постановка задачи разработки математической модели процесса измерения в ИИС. На основе полученной экспериментальным путем и известной информации о методе измерения ТФС материалов, входных и выходных сигналах структурных компонентов ИИС, допустимых значениях погрешности измерения $\Delta\lambda_{доп}, \Delta\alpha_{доп}$ требуется сформировать подмножество структурных компонентов S ИИС, которое обеспечивает выполнение ограничений на показатели точности определения ТФС материалов, т.е.

$$\Delta y_\lambda(S \setminus x_{nX}, P_{nP}, b_{nB}) \leq \Delta y_{\lambda, доп}; \quad \Delta y_\alpha(S \setminus x_{nX}, P_{nP}, b_{nB}) \leq \Delta y_{\alpha, доп}, \quad (2.7)$$

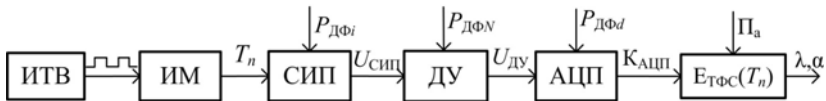


Рис. 2.2. Структурная схема процесса измерения в ИИС ТФС материалов:

ИТВ – источник теплового воздействия на исследуемый материал (ИМ);
 P_a – погрешность аппроксимации; T_n – температура в момент контроля n ;
 $E_{ТФС}$ – информация о параметрах ТФС материалов:
 коэффициентах тепло- и температуропроводности (λ и α соответственно)

где $\Delta y_\lambda(S \setminus x_{nX}, P_{nP}, b_{nB})$; $\Delta y_\alpha(S \setminus x_{nX}, P_{nP}, b_{nB})$ – соответственно погрешность при измерении λ и α , которая обеспечивается группой структурных компонентов S измерительной системы; x_{nX} – входные сигналы структурных компонентов системы; b_{nB} – параметры компонентов системы.

В общем виде математическую модель процесса измерения с учетом ограничений на показатели точности (2.7) можно представить в виде системы зависимостей

$$\begin{cases} y_1(T) = f_1(x_1, x_2, \dots, x_{nX}; P_1, P_2, \dots, P_{nP}; b_1, b_2, \dots, b_{nB}), \\ y_2(T) = f_2(x_1, x_2, \dots, x_{nX}; P_1, P_2, \dots, P_{nP}; b_1, b_2, \dots, b_{nB}), \\ \dots \\ y_{ny}(T) = f_F(x_1, x_2, \dots, x_{nX}; P_1, P_2, \dots, P_{nP}; b_1, b_2, \dots, b_{nB}), \end{cases} \quad (2.8)$$

где $y_1(T), y_2(T), \dots, y_{ny}(T)$ – выходные сигналы подсистем; x_1, x_2, \dots, x_{nX} – входные сигналы структурных компонентов системы; P_1, P_2, \dots, P_{nP} – дестабилизирующие факторы; b_1, b_2, \dots, b_{nB} – параметры компонентов системы.

При формализации математического описания ИИС ТФС материалов представим измерительную систему подсистемами СИП, ДУ, АЦП с входными сигналами, параметрами, воздействующими дестабилизирующими факторами и выходными сигналами подсистем. В результате математическую модель процесса измерения в ИИС ТФС материалов можно представить в виде системы соотношений

$$\begin{cases} U_{СИП}(Tt) = f_1(T_1, T_2, \dots, T_n; P_{ДФ1}, P_{ДФ2}, \dots, P_{ДФi}; B_1, B_2, \dots, B_{mi}, t), \\ U_{ДУ}(T) = f_2(U_{СИП1}, U_{СИП2}, \dots, U_{СИПj}; P_{ДФ1}, P_{ДФ2}, \dots, P_{ДФN}; B_1, B_2, \dots, B_b, t), \\ K_{АЦП}(T) = f_3(U_{ДУ1}, U_{ДУ2}, \dots, U_{ДУk}; P_{ДФ1}, P_{ДФ2}, \dots, P_{ДФd}; B_1, B_2, \dots, B_c, t), \\ E_{ТФС}(T_n) = f_4(T_{k1}, T_{k2}, \dots, T_{kn}; \Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_a; B_1, B_2, \dots, B_T, t), \end{cases} \quad (2.9)$$

где $U_{СИП}$ – суммарное напряжение с выхода СИП; T_1, T_2, \dots, T_n – температура рабочих спаев датчиков температурных термопар; $P_{ДФ1}, P_{ДФ2}, \dots, P_{ДФi}$ – воздействующие факторы на СИП (температура окружающей среды, шероховатость исследуемой поверхности объекта, влажность, контактное сопротивление); B_1, B_2, \dots, B_{mi} – параметры тер-

мопар (чувствительность, линейность характеристики, класс точности, предел допустимых отклонений температуры); t – время; $U_{\text{ДУ}}$ – выходное напряжение с выхода дифференциального усилителя; $U_{\text{СИП1}}, U_{\text{СИП2}}, \dots, U_{\text{СИП}n}$ – выходные значения сигналов, поступающие на вход усилителя; $P_{\text{ДФ1}}, P_{\text{ДФ2}}, \dots, P_{\text{ДФ}n}$ – воздействующие факторы на усилитель (температура окружающей среды, нестабильность напряжения питания, изменение сопротивления нагрузки); B_1, B_2, \dots, B_b – параметры усилителя (коэффициенты усиления, входное и выходное сопротивление); $K_{\text{АЦП}}$ – выходное значение кода, пропорциональное сигналам, поступающим на вход АЦП с выхода дифференциального усилителя; $U_{\text{ДУ1}}, U_{\text{ДУ2}}, \dots, U_{\text{ДУ}k}$; $P_{\text{ДФ1}}, P_{\text{ДФ2}}, \dots, P_{\text{ДФ}k}$ – воздействующие факторы на АЦП (помехи, шумы); B_1, B_2, \dots, B_c – параметры АЦП (статические и динамические); $E_{\text{ТФС}}$ – выходные параметры теплофизических свойств исследуемого объекта (ИО) (коэффициенты тепло- и температуропроводности соответственно λ и α); $T_{k1}, T_{k2}, \dots, T_{kn}$ – температура в точках контроля объекта измерительным зондом; $\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_a$ – погрешности аппроксимации зависимости λ и α от температуры в точках контроля объекта; B_1, B_2, \dots, B_T – константы, определяемые при градуировке измерительной системы.

Математическая модель процесса измерения температуры системой измерительных преобразователей в модели (2.9) имеет вид [100]

$$U_{\text{СИП}}(T) = \sum_{i=1}^n H_{1i} T^2 + H_{2i} T + H_{3i}, \quad (2.10)$$

где n – число датчиков температуры СИП; H_i – коэффициенты аппроксимирующей функции; T – температура.

Математическая модель процесса преобразования измерительной информации дифференциальным усилителем в модели (2.9) представлена соотношением

$$U_{\text{ДУ}}(T) = U_{\text{СИП}} K_{\text{ДУ}} + \Delta U_{\text{ДУДФ}}, \quad (2.11)$$

где $K_{\text{ДУ}}$ – коэффициент усиления дифференциального усилителя; $\Delta U_{\text{ДУДФ}} = U_{\text{ДУ}}(T) - \tilde{U}_{\text{ДУ}} T_{\text{ОС}}$ – погрешность работы усилителя при воздействии дестабилизирующих факторов.

Математическая модель процесса преобразования измерительной информации в АЦП в модели (2.9) приведена в следующем виде [101]:

$$K_{\text{АЦП}}(T) = \frac{U_{\text{ДУ}}uL}{h} + \delta K_{\text{АЦП}}, \quad (2.12)$$

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

Таким образом, применяя модели (2.10) – (2.12), в математической модели процесса измерения в ИИС (2.9), осуществляется повышение точности определения параметров ТФС материалов.

Создана математическая модель процесса измерения ИИС, состоящая из измерительных подсистем структурных компонентов системы, отличающаяся учетом погрешностей измерения структурных компонентов системы при воздействии ДФ, которые измеряются и корректируются в процессе измерения. Точность и адекватность предложенной математической модели процесса измерения подтверждена результатами экспериментальных исследований опытного образца ИИС теплофизических свойств материалов.

На основе использования созданной математической модели процесса измерения в ИИС и информации о воздействующих дестабилизирующих факторах необходимо разработать алгоритм коррекции результатов измерения параметров ТФС материалов для повышения точности функционирования ИИС.

2.4. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КАНАЛА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ИИС ТФС МАТЕРИАЛОВ

Точное функционирование информационно-измерительных систем осуществляется при обеспечении точности структурных компонентов измерительного канала. Для анализа и оценки точности ИК необходимо выполнить математическое моделирование ИК ИИС.

2.4.1. Математическая модель измерительного канала ИИС ТФС материалов

ИИС, предназначенная для определения параметров теплофизических свойств теплоизоляционных материалов, включает следующие компоненты измерительного канала: систему измерительных преобразователей (СИП), коммутатор аналоговых сигналов (КАС), дифференциальный усилитель (ДУ), аналого-цифровой преобразователь (АЦП),

блок формирования тепловых воздействий (БФТВ), микроконтроллер [92]. Структурная схема измерительного канала ИИС ТФС исследуемых материалов (ИМ) приведена на рис. 2.3.

Математическая модель ИК ИИС [102] представляет собой описание преобразования линейным стационарным оператором измерительной информации в ИК, поступающей с СИП на усилитель и на вход МК:

$$z(t) = \int_0^t C(t - \tau)y(\tau)d\tau + V_{ДФ}(t), \quad (2.13)$$

где $z(t)$ – сигнал на выходе ИК; $C(t - \tau)$ – функция веса компонентов ИК; $y(\tau)$ – входной сигнал ИК; $V_{ДФ}(t)$ – аддитивная составляющая сигнала $z(t)$, зависящая от воздействующих дестабилизирующих факторов – температура окружающей среды, которая является стационарным случайным эргодическим процессом.

Необходимо обеспечить прием и обработку информации, поступающей с датчиков СИП, усилителя и АЦП в достоверном виде с минимальной погрешностью. Как показывают результаты метрологического анализа результатов измерения структурных компонентов ИК, доминирующим компонентом, который вносит наибольшую погрешность в результаты измерения ИИС, является усилитель. На рисунке 2.4 приведены зависимости $U_{\text{вых ДУ}} = f(T_{\text{ОС}})$ при измерении ИИС параметров ТФС линолеума.

На основе исследования усилителя ИК ИИС предложена функциональная модель ДУ ИК – зависимость выходного напряжения ДУ $U_{\text{вых ДУ}}$ от воздействующих входных параметров ДУ и внешних дестабилизирующих факторов:

$$U_{\text{вых ДУ}} = f(U_{\text{вх}}, D, \Delta K, N, R_{\text{вх}}, R_{\text{вых}}, R_{\text{н}}, U_{\text{п}}, F_{\text{н}}, I), \quad (2.14)$$

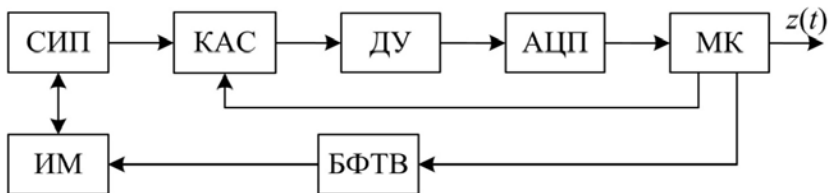


Рис. 2.3. Структурная схема ИК ИИС ТФС материалов

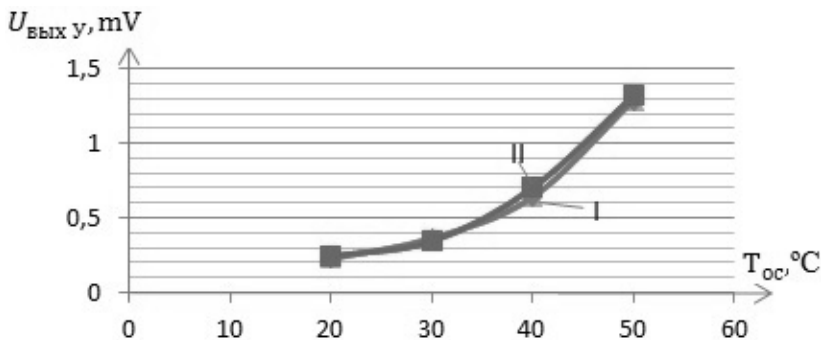


Рис. 2.4. Экспериментальная (I) и аппроксимирующая (II) зависимости:

$$U_{\text{ВЫХ } y} = 0,13 \cdot 10^{-2} (T_{OC})^2 - 5,51 \cdot 10^{-2} T_{OC} + 0,83$$

где $U_{\text{ВХ}} = \{U_{\text{ВХ}i}\}$, $i=1, n$ – множество измерительных входных сигналов; $D = \{D_i\}$, $i=1, m$ – множество воздействующих дестабилизирующих факторов (температура окружающей среды T_{OC} и влажность); ΔK – нестабильность коэффициента усиления; N – «дрейф» нуля ДУ; $R_{\text{ВХ}}$ – входное сопротивление ДУ; $R_{\text{ВЫХ}}$ – выходное сопротивление ДУ; $R_{\text{н}}$ – нестабильность сопротивления нагрузки; $U_{\text{п}}$ – нестабильность напряжения питания усилителя; $F_{\text{н}}$ – нестабильность выходного напряжения усилителя; I – искажения в усилителе, зависящие от указанных параметров и дестабилизирующих факторов.

При проектировании усилителя в ИК ИИС ТФС материалов необходимо учитывать основные дестабилизирующие факторы, влияющие на процесс преобразования измерительной информации в усилительных устройствах (2.14) и в ИК ИИС.

Разработана математическая модель ИК ИИС, которая представляет собой описание преобразования линейным стационарным оператором измерительной информации в ИК, поступающей с СИП на усилитель, АЦП и на вход МК.

Предложена функциональная модель дифференциального усилителя ИК – зависимость выходного напряжения ДУ $U_{\text{ВЫХ ДУ}}$ от воздействующих входных параметров ДУ и внешних дестабилизирующих факторов.

Созданные математическая модель (2.13) и функциональная модель (2.14) ДУ ИК ИИС позволяют выполнить анализ преобразования информации в измерительном канале системы при воздействии ДФ.

2.4.2. Математическая модель преобразования информации в ИК ИИС ТФС материалов

При разработке ИИС ТФС материалов, проведении контроля параметров ТФС исследуемых материалов необходимо учитывать воздействующие дестабилизирующие факторы ($P_{ДФ}$), которые приводят к неустойчивости структурных компонентов измерительного канала ИИС ТФС материалов и влияют на погрешность результатов измерения. Поэтому важной является задача разработки измерительного канала ИИС с адаптацией к дестабилизирующим факторам, что позволит уменьшить влияние воздействующих ДФ и повысить точность измерений структурных компонентов измерительного канала ИИС [91, 103].

Основными структурными компонентами измерительного канала ИИС ТФС материалов (рис. 2.5), которые вносят большую составляющую в погрешность измерения, являются: система измерительных преобразователей (СИП) и система дифференциальных усилителей (СДУ). Основные дестабилизирующие факторы, которые влияют на точность измерения компонентов: температура окружающей среды (T_{OC}), влажность (W). Значения этих ДФ определяются перед началом измерения.

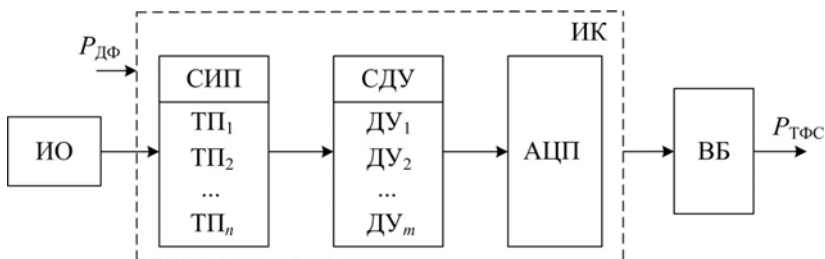


Рис. 2.5. Основные структурные компоненты измерительного канала ИИС ТФС материалов:

ИО – исследуемый объект; ТП₁, ТП₂, ..., ТП_n – термопары; n – число термопар;

ДУ₁, ДУ₂, ..., ДУ_m – дифференциальные усилители; m – число ДУ;

АЦП – аналого-цифровой преобразователь; ВБ – вычислительный блок

Математическая модель процесса измерения в ИК ИИС ТФС материалов представлена в виде

$$K_{\text{ИК}}(T) = \frac{\left[\left(\sum_{i=1}^n H_{1i} T^2 + H_{2i} T + H_{3i} \right) K_{\text{ДУ}} + \Delta U_{\text{ДУ ДФ}} \right] uL}{h} + \delta K_{\text{АЦП}}. \quad (2.15)$$

Математическая модель ИК ИИС ТФС материалов (2.15) будет иметь следующий вид:

$$K_{\text{ИК}}(T) = \frac{\left[(U_{\text{СИП}} + \Delta U_{\text{СИП}}) K_{\text{ДУ}} + \Delta U_{\text{ДУ ДФ}} \right] uL}{h} + \delta K_{\text{АЦП}}, \quad (2.16)$$

где $\Delta U_{\text{СИП}} = \tilde{U}_{\text{СИП}} - \tilde{U}_{\text{СИП } T_{\text{ОС}}}$ – погрешность работы термпар при воздействии дестабилизирующих факторов.

По экспериментальным данным получены зависимости выходного напряжения СИП от температуры окружающей среды $U_{\text{СИП } T_{\text{ОС}}} = f(T_{\text{ОС}})$ и аппроксимирующие зависимости $\tilde{U}_{\text{СИП } T_{\text{ОС}}} = f(T_{\text{ОС}})$ для коррекции $U_{\text{СИП } T_{\text{ОС}}}$:

– при $U_{\text{СИП}} = 0,5$ мВ

$$\tilde{U}_{\text{СИП } T_{\text{ОС}}} = f(T_{\text{ОС}}) = 6,56 \cdot 10^{-2} T_{\text{ОС}} + 0,4873; \quad (2.17)$$

– при $U_{\text{СИП}} = 1$ мВ

$$\tilde{U}_{\text{СИП } T_{\text{ОС}}} = f(T_{\text{ОС}}) = 6,56 \cdot 10^{-2} T_{\text{ОС}} + 0,9871; \quad (2.18)$$

– при $U_{\text{СИП}} = 1,5$ мВ

$$\tilde{U}_{\text{СИП } T_{\text{ОС}}} = f(T_{\text{ОС}}) = 6,56 \cdot 10^{-2} T_{\text{ОС}} + 1,4872; \quad (2.19)$$

– при $U_{\text{СИП}} = 2$ мВ

$$\tilde{U}_{\text{СИП } T_{\text{ОС}}} = f(T_{\text{ОС}}) = 6,56 \cdot 10^{-2} T_{\text{ОС}} + 1,9874. \quad (2.20)$$

Также получены аппроксимирующие зависимости выходного напряжения ДУ от $T_{\text{ОС}}$ для теплоизоляционных материалов – полиметилметакрилата (ПММ) (2.21), минераловатных плит (2.22), войлока (2.23), рипора (2.24):

$$\tilde{U}_{\text{дУ}} = f(T_{\text{ОС}}) = -0,15 \cdot 10^{-2} (T_{\text{ОС}})^2 + 0,12 T_{\text{ОС}} - 1,28; \quad (2.21)$$

$$\tilde{U}_{\text{дУ}} = f(T_{\text{ОС}}) = -0,18 \cdot 10^{-2} (T_{\text{ОС}})^2 + 0,15 T_{\text{ОС}} - 1,64; \quad (2.22)$$

$$\tilde{U}_{\text{дУ}} = f(T_{\text{ОС}}) = -0,17 \cdot 10^{-2} (T_{\text{ОС}})^2 + 0,14 T_{\text{ОС}} - 1,51; \quad (2.23)$$

$$\tilde{U}_{\text{дУ}} = f(T_{\text{ОС}}) = -0,24 \cdot 10^{-2} (T_{\text{ОС}})^2 + 0,19 T_{\text{ОС}} - 2,35. \quad (2.24)$$

Разработанная математическая модель преобразования информации в ИК ИИС ТФС материалов (2.16), зависимости $U_{\text{СИП } T_{\text{ОС}}} = f(T_{\text{ОС}})$ и аппроксимирующие зависимости $\tilde{U}_{\text{СИП } T_{\text{ОС}}} = f(T_{\text{ОС}})$ для коррекции $U_{\text{СИП } T_{\text{ОС}}}$ (2.17) – (2.20), зависимости выходного напряжения СДУ от $T_{\text{ОС}}$ (2.21) – (2.24) используются для разработки математических моделей структурных компонентов измерительного канала ИИС ТФС материалов.

2.4.3. Математические модели структурных компонентов ИК ИИС ТФС материалов

На основе экспериментальных исследований измерительного канала разработаны математические модели структурных компонентов ИК ИИС ТФС материалов: системы измерительных преобразователей, дифференциального усилителя и АЦП. Предложенные математические модели применяются для устранения технического несовершенства и повышения точности ИИС ТФС материалов.

2.4.3.1. Математическая модель системы измерительного преобразователя

Суммарное напряжение на выходе СИП $U_{\text{СИП}}$ является функциональной зависимостью от температуры рабочего и холодного спаев термопар [100] и ряда воздействующих факторов:

$$U_{\text{СИП}} = f(T_{\text{РС}}, T_{\text{ХС}}, \delta_{T_{\text{ОС}}}, \delta_{\text{сл}}, t), \quad (2.25)$$

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

На рисунке 2.6 представлены графики зависимостей выходного напряжения СИП от температуры в области контакта измерительного зонда и исследуемого материала с учетом воздействия дестабилизирующих факторов.

Математическая модель СИП в выражении (2.25) получена аппроксимацией экспериментальной зависимости и представлена в виде уравнения регрессии:

$$\tilde{U}_{\text{СИП}} = f(T) = 2,71 \cdot 10^{-5}(T)^2 + 0,04T + 0,005 + \Delta U_{\text{СИП}}, \quad (2.26)$$

где T – температура измеряемая; $\Delta U_{\text{СИП}} = \tilde{U}_{\text{СИП}} - \tilde{U}_{\text{СИП}T_{\text{OC}}}$.

Температура T определяется по номинальным статическим характеристикам преобразования применяемой термопары хромель–копель, приведенным в ГОСТ Р8.585–2001 «ГСИ. Термопары».

Получены экспериментальные зависимости выходного напряжения СИП от температуры окружающей среды $U_{\text{СИП}T_{\text{OC}}} = f(T_{\text{OC}})$ при различных значениях термоЭДС, представленные на рис. 2.7.

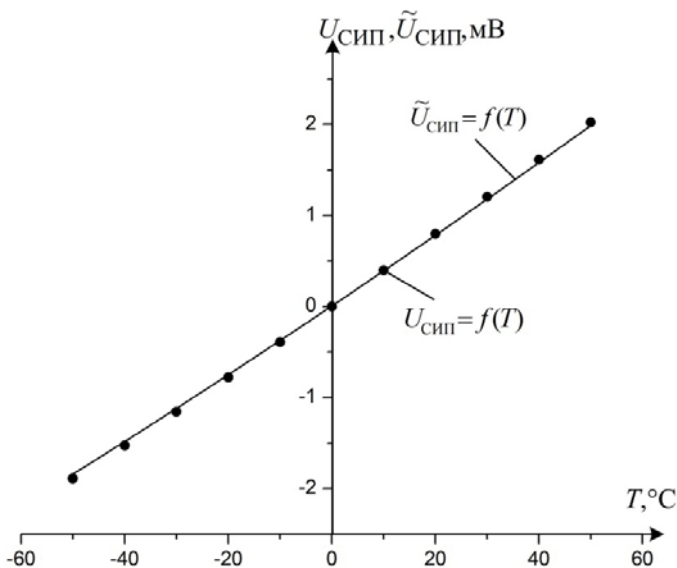


Рис. 2.6. Графики экспериментальной зависимости выходного напряжения СИП от измеряемой температуры $U_{\text{СИП}} = f(T)$ и аппроксимирующей $\tilde{U}_{\text{СИП}} = f(T)$

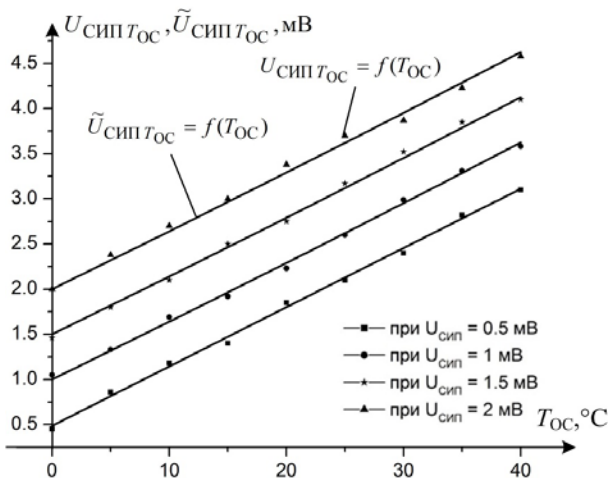


Рис. 2.7. Графики экспериментальной зависимости выходного напряжения СИП от температуры окружающей среды $U_{СИП T_{OC}} = f(T_{OC})$ и аппроксимирующей $\tilde{U}_{СИП T_{OC}} = f(T_{OC})$

Математическая модель СИП (2.26) и аппроксимирующие зависимости $\tilde{U}_{СИП T_{OC}} = f(T_{OC})$ (2.17) – (2.20) применяются в алгоритме коррекции СИП при воздействии ДФ.

2.4.3.2. Математическая модель дифференциального усилителя

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

$$U_{\text{вых. ДУ}} = f(U_{\text{вх}}, P_{\text{ДФ}}, \Delta U_{\text{п}}, \Delta R_{\text{н}}, \Delta R_{\text{вх}}, \Delta K_{\text{и}}),$$

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

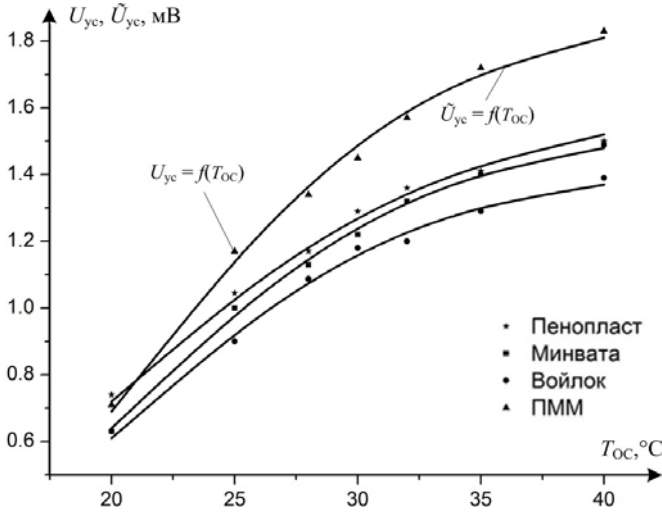


Рис. 2.8. Графики экспериментальной зависимости выходного напряжения усилителя от температуры окружающей среды $U_{\text{ДУ}}(T) = f(T_{\text{OC}})$ и аппроксимирующей $\tilde{U}_{\text{ДУ}}(T) = f(T_{\text{OC}})$

На рисунке 2.8 приведены экспериментальные и аппроксимирующие зависимости выходного напряжения усилителя от T_{OC} при определении ТФС теплоизоляционных материалов.

Математическая модель процесса преобразования измерительной информации $U_{\text{СИП}}$ усилителем в модели (2.25) представлена соотношением

$$U_{\text{ДУ}}(T) = U_{\text{СИП}} \cdot 980 + 0,61. \quad (2.27)$$

Математическая модель усилителя (2.27) и аппроксимирующие зависимости $\tilde{U}_{\text{ДУ}}(T_{\text{OC}}) = f(T_{\text{OC}})$ (2.21) – (2.24) применяются в алгоритме коррекции усилителя при воздействии ДФ.

2.4.3.3. Математическая модель аналого-цифрового преобразователя

Математическая модель процесса преобразования измерительной информации в АЦП в выражении (2.25) приведена в следующем виде [104]:

$$K_{\text{АЦП}}(T) = \frac{U_{\text{ДУ}} u L}{h} + \delta K_{\text{АЦП}}, \quad (2.28)$$

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

Среднеквадратическое значение шума (ошибки) квантования определяется по формуле

$$\delta_{\text{кв}} = \frac{F}{\sqrt{c}},$$

где F – вес наименьшего значащего разряда; c – число разрядов.

Тогда

$$\delta_{\text{кв}} = \frac{1}{16} = 0,062.$$

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

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

где A_{max} – максимальная амплитуда входного напряжения.

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

Создана математическая модель АЦП в соответствии с выражением (2.28) и рассчитанными значениями параметров аналого-цифрового преобразования измерительных сигналов с выхода дифференциального усилителя, в качестве которых применяются дифференциальные усилители (ДУ):

$$K_{\text{АЦП}}(T) = \frac{U_{\text{ДУ}}(t)}{3 \cdot 10^{-5}} + 0,062, \quad (2.29)$$

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

Математическая модель АЦП (2.29) применяется в алгоритме коррекции АЦП при воздействии ДФ.

Адекватность разработанных математических моделей подтверждается степенью соответствия цели исследования – повышение точности ИК ИИС ТФС материалов, на основе сравнения данных экспериментальных исследований ИИС при определении коэффициентов

тепло- и температуропроводности и полученных при использовании для их определения созданных математических моделей. Для проверки адекватности использовался метод математической статистики – оценка по средним значениям откликов ИИС $y(T)$ и модели $y'(T)$ (2.1). Сравнение результатов оценки математического ожидания и дисперсии откликов модели и ИИС подтверждают их сходимость, что свидетельствует об адекватности созданных моделей.

Предлагается решение вопроса адаптации компонентов ИК ИИС для условий эксплуатации системы при воздействии дестабилизирующих факторов с использованием созданных математических моделей процесса измерения в ИИС, структурных компонентов измерительного канала, которые реализованы в алгоритме коррекции технического несовершенства структурных компонентов измерительного канала ИИС ТФС материалов.

2.5. КОМПЛЕКСНЫЙ МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ДЕСТАБИЛИЗИРУЮЩИХ ФАКТОРОВ

Информационно-измерительная система для определения теплофизических свойств материалов в реальных условиях эксплуатации функционирует при воздействии дестабилизирующих факторов [94]. Как показывают результаты экспериментальных исследований ИИС и расчета относительной погрешности результатов измерений параметров ТФС материалов – коэффициентов тепло- и температуропроводности (λ , α), дестабилизирующие факторы увеличивают погрешность измерений от 10 до 50% [105 – 107]. Поэтому важной является задача разработки ИИС для определения ТФС материалов, устойчивой к воздействию ДФ в результате разработки комплексного метода повышения точности информационно-измерительной системы.

Постановка задачи разработки комплексного метода повышения точности информационно-измерительной системы для определения ТФС материалов при воздействии ДФ. На основе полученной экспериментальным путем и известной информации о методе измерения ТФС материалов, входных и выходных сигналах структурных компонентов ИИС, допустимых значениях погрешности измерения коэффициентов тепло- и температуропроводности $\Delta\lambda_{\text{доп}}$, $\Delta\alpha_{\text{доп}}$ требуется обеспечить выполнение ограничений на показатели точности структурных компонентов ИИС и параметров ТФС материалов.

При разработке ИИС выявлены дестабилизирующие факторы, которые определяют наибольшую составляющую в погрешности измерения параметров ТФС материалов и в итоге влияют на точность ИИС. Основная погрешность вносится измерительным каналом (системами измерительных преобразователей и дифференциальных усилителей, аналого-цифровым преобразователем), помехами климатическими (температурой окружающей среды (T_{OC}), влажностью (W)), исследуемым материалом (из-за контактного сопротивления, шероховатости поверхности). Погрешность измерений термопар в составе СИП обусловлена нарушением температурного режима «холодного» спая, внешними ДФ (T_{OC}), случайной погрешностью, связанной с особенностями изготовления термопар (теплоемкость нагревателя, чувствительность, паразитные термоЭДС).

Разработан комплексный метод повышения точности информационно-измерительной системы для определения параметров теплофизических свойств материалов, основанный на использовании созданных математических моделей оценки точности функционирования ИИС и измерительного канала, включающих модели оценки точности структурных компонентов системы и точности определяемых параметров – коэффициентов тепло- и температуропроводности. Метод заключается в контроле и коррекции результатов измерения выходных сигналов структурных компонентов ИК на соответствие допустимым значениям и параметров ТФС по аппроксимирующим зависимостям при воздействии дестабилизирующих факторов, полученных аналитическим методом и на основе экспериментальных данных [107].

Блок-схема алгоритма реализации комплексного метода повышения точности ИИС для определения параметров ТФС материалов представлена на рис. 2.9.

Для подтверждения результатов реализации разработанного комплексного метода повышения точности ИИС для определения параметров ТФС материалов выполнен расчет погрешности измерительного канала ИИС [95, 100, 102, 109]. Погрешность измерительного канала $\delta_{ИК}$ определяется погрешностью преобразования измерительных сигналов датчиками температуры – термопарами СИП, операционными усилителями, входящими в состав ДУ, АЦП, т.е. относительная погрешность измерения будет равна сумме погрешностей структурных компонентов ИК ИИС:

$$\delta_{ИК} = \delta_{СИП} + \delta_{ДУ} + \delta_{АЦП}$$

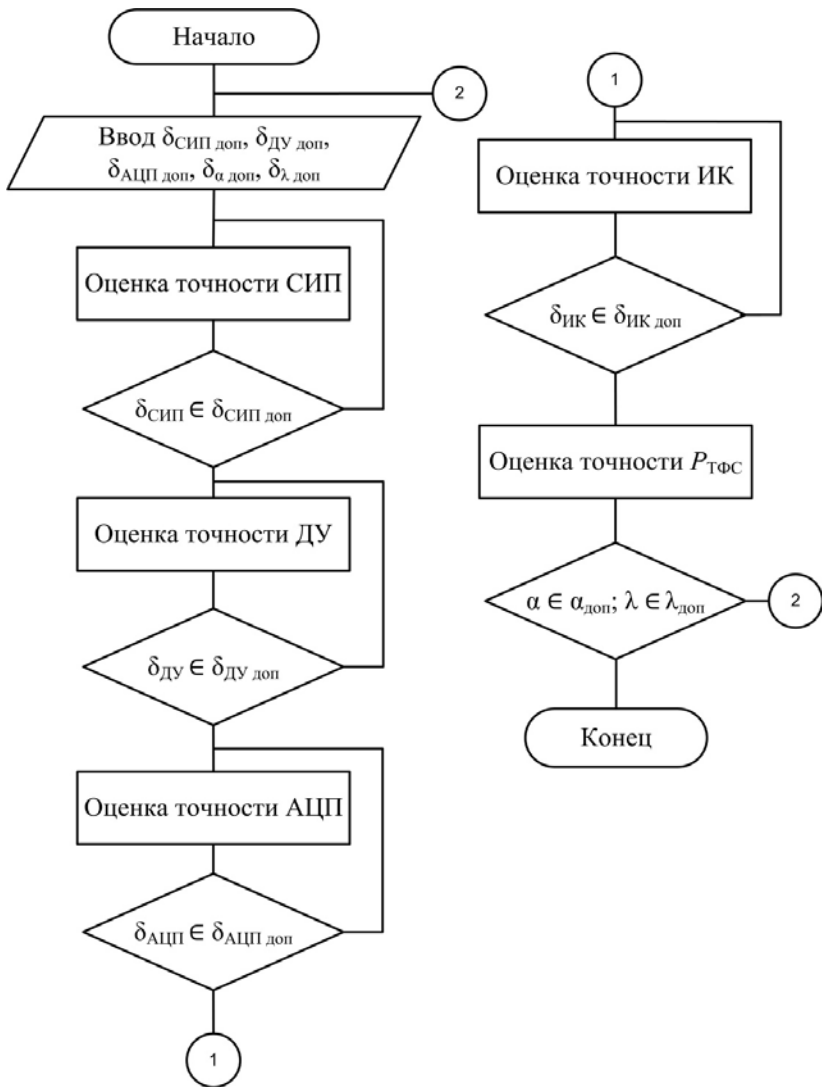


Рис. 2.9. Блок-схема реализации комплексного метода повышения точности ИИС ТФС материалов

где $\delta_{СИП}$ – погрешность системы измерительных преобразователей;
 $\delta_{ДУ}$ – погрешность усилителя; $\delta_{АЦП}$ – погрешность АЦП.

Относительная погрешность термоэлектрического преобразователя ТП $\delta_{ТП} = 1,5\%$; относительная погрешность дифференциального усилителя $\delta_{ДУ} = 0,61\%$; относительная погрешность АЦП $\delta_{АЦП} = \pm 0,4\%$. Относительная погрешность ИК ИИС ТФС материалов

$$\delta_{ИК И(в)} = \pm 1,89\%.$$

Проведены исследования ТФС теплоизоляционных материалов при воздействии на измерительный зонд ИИС температуры окружающей среды. На рисунках 2.10, 2.11 представлены зависимости $\lambda = f(T_{OC})$ и $\alpha = f(T_{OC})$ исследуемых материалов при воздействии температур от -60 до $+60$ °С.

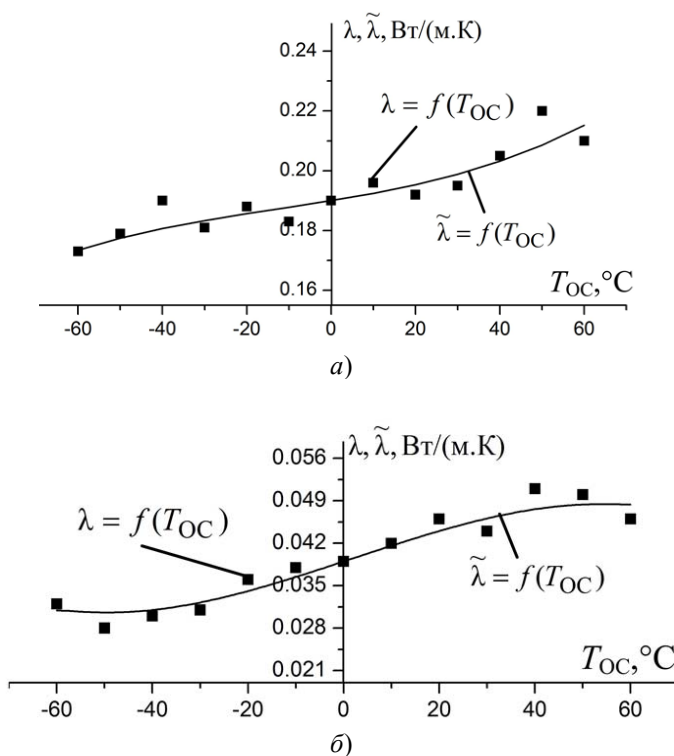


Рис. 2.10. Экспериментальные зависимости теплопроводности исследуемых материалов от воздействия температур:

a – ПММ; *б* – войлок; *в* – линолеум; *г* – минвата; *д* – рипол

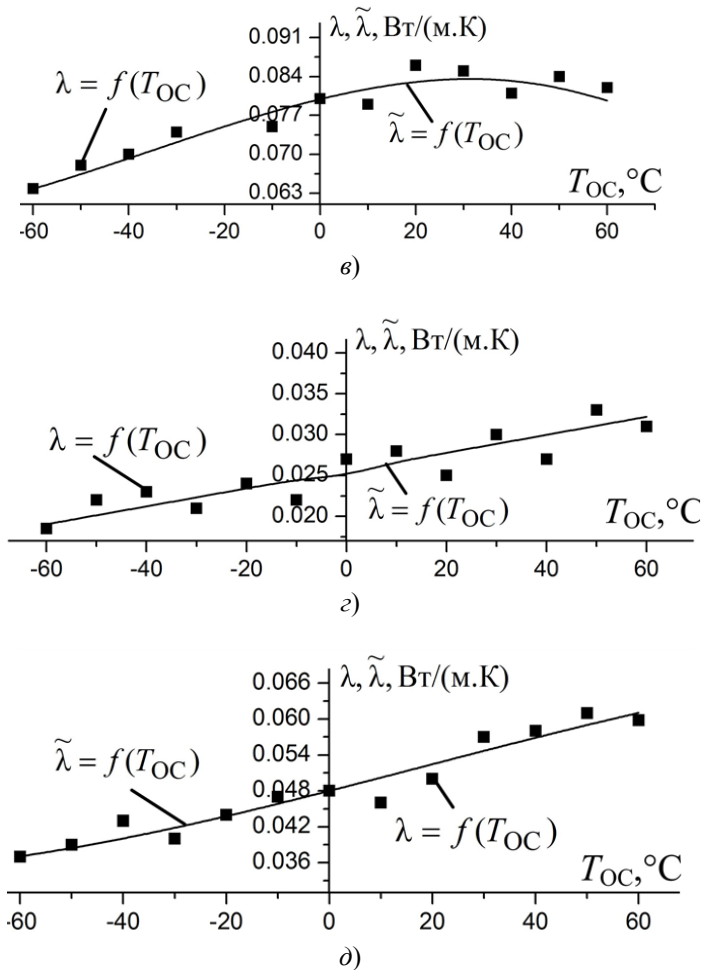
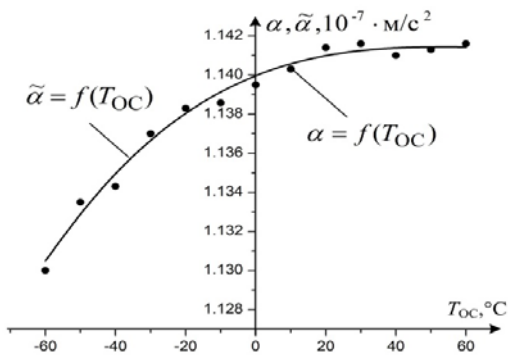


Рис. 2.10. Продолжение

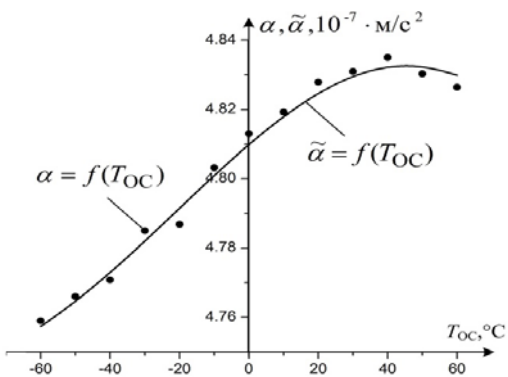
Получены аппроксимирующие зависимости $\tilde{\lambda} = f(T_{OC})$ исследуемых теплоизоляционных материалов по экспериментальным данным, приведенные на рис. 2.10, которые имеют следующий вид:

а) для ПММ

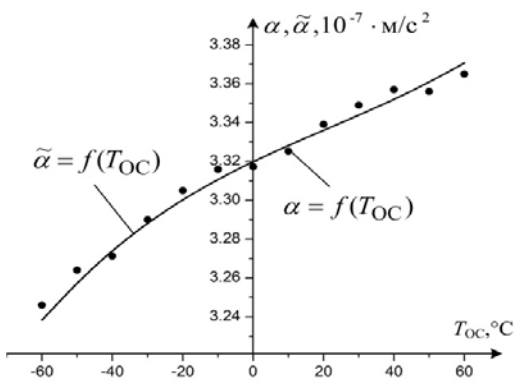
$$\tilde{\lambda} = f(T_{OC}) = 3,35 \cdot 10^{-8} (T_{OC})^3 + 1,203 \cdot 10^{-6} (T_{OC})^2 + 2,28 \cdot 10^{-4} T_{OC} + 0,19; \quad (2.30)$$



a)

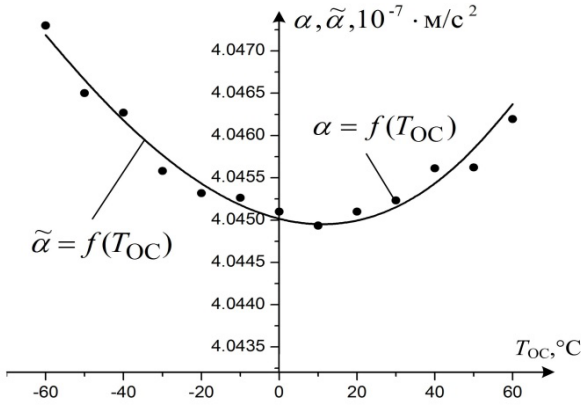


б)

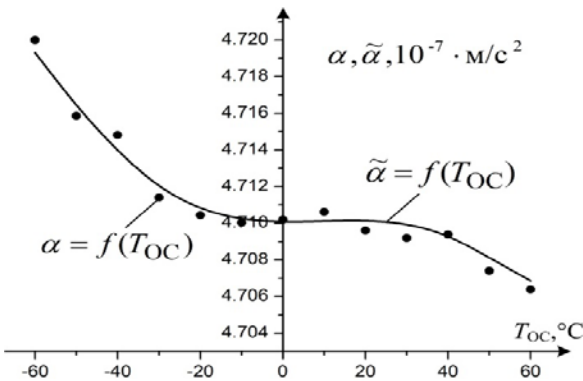


в)

Рис. 2.11. Экспериментальные зависимости температуропроводности исследуемых материалов от воздействия температур:
 а – ПММ; б – войлок; в – линолеум; г – минвата; д – рипор



з)



д)

Рис. 2.11. Продолжение

б) для войлока

$$\tilde{\lambda} = f(T_{OC}) = -2,17 \cdot 10^{-8} (T_{OC})^3 - 2,30 \cdot 10^{-6} (T_{OC})^2 + 2,11 \cdot 10^{-4} T_{OC} + 0,08 ; \quad (2.31)$$

в) для линолеума

$$\tilde{\lambda} = f(T_{OC}) = -5,56 \cdot 10^{-9} (T_{OC})^3 + 2,91 \cdot 10^{-7} (T_{OC})^2 + 2,20 \cdot 10^{-4} T_{OC} + 0,048 ; \quad (2.32)$$

г) для минваты

$$\tilde{\lambda} = f(T_{OC}) = -3,310 \cdot 10^{-8} (T_{OC})^3 + 1,843 \cdot 10^{-7} (T_{OC})^2 + 2,64 \cdot 10^{-4} T_{OC} + 0,039 ; \quad (2.33)$$

д) для рипора

$$\tilde{\lambda} = f(T_{OC}) = 2,77 \cdot 10^{-8} (T_{OC})^3 + 7,59 \cdot 10^{-8} (T_{OC})^2 + 7,79 \cdot 10^{-4} T_{OC} + 0,025. \quad (2.34)$$

Получены аппроксимирующие зависимости $\tilde{\alpha} = f(T_{OC})$ исследуемых теплоизоляционных материалов по экспериментальным данным, приведенные на рис. 2.11, которые имеют следующий вид:

а) для ПММ

$$\tilde{\alpha} = f(T_{OC}) = 0,56 \cdot 10^{-15} (T_{OC})^3 - 1,12 \cdot 10^{-13} (T_{OC})^2 + 0,71 \cdot 10^{-11} T_{OC} + 1,14 \cdot 10^{-7}; \quad (2.35)$$

б) для войлока

$$\tilde{\alpha} = f(T_{OC}) = 7,17 \cdot 10^{-15} (T_{OC})^3 - 4,55 \cdot 10^{-13} (T_{OC})^2 + 8,63 \cdot 10^{-11} T_{OC} + 4,81 \cdot 10^{-7}; \quad (2.36)$$

в) для линолеума

$$\tilde{\alpha} = f(T_{OC}) = 6,69 \cdot 10^{-15} (T_{OC})^3 - 4,31 \cdot 10^{-13} (T_{OC})^2 + 8,71 \cdot 10^{-11} T_{OC} + 3,32 \cdot 10^{-7}; \quad (2.37)$$

г) для минваты

$$\tilde{\alpha} = f(T_{OC}) = 1,34 \cdot 10^{-16} (T_{OC})^3 + 4,94 \cdot 10^{-14} (T_{OC})^2 - 1,16 \cdot 10^{-12} T_{OC} + 4,04 \cdot 10^{-7}; \quad (2.38)$$

д) для рипора

$$\tilde{\alpha} = f(T_{OC}) = 3,54 \cdot 10^{-15} (T_{OC})^3 + 9,93 \cdot 10^{-15} (T_{OC})^2 + 5,72 \cdot 10^{-12} T_{OC} + 4,71 \cdot 10^{-7}. \quad (2.39)$$

Применение комплексного метода повышения точности ИИС ТФС материалов позволяет уменьшить погрешность измерительного канала до 1,89%.

Предложенный комплексный метод повышения точности функционирования ИИС в результате контроля, коррекции выходных параметров структурных компонентов измерительного канала на соответствие допустимым значениям и результатов измерения параметров ТФС материалов при влияния ДФ по полученным аппроксимирующим зависимостям обеспечивает погрешность определения коэффициентов тепло- и температуропроводности материалов, как показывают результаты экспериментов, не более 3...4%.

2.6. МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ПАРАМЕТРОВ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Предложен метод повышения точности информационно-измерительной системы, позволяющий обеспечить допустимую погрешность структурных компонентов измерительного канала и параметров теплофизических свойств теплоизоляционных материалов в результате применения созданных математических моделей для их коррекции в процессе измерения при воздействии дестабилизирующих факторов.

Точность определения параметров теплофизических свойств материалов позволяет обеспечить качество выпускаемых материалов и изделий из них на производственных предприятиях. Требования к обеспечению точности измерений изложены в Государственной системе обеспечения единства измерений [91].

В реальных условиях эксплуатации информационно-измерительных систем при воздействии внешних и внутренних факторов экспериментальным путем установлена нестабильность структурных компонентов измерительного канала при функционировании измерительной системы [105]. Нестабильность работы ИК обусловлена систематическими и случайными погрешностями измерений. В связи с этим важно решение задачи повышения точности ИИС для определения ТФС материалов – коэффициентов тепло- и температуропроводности.

Постановка задачи:

1. Определить допустимые пределы изменения погрешностей структурных компонентов ИК ИИС $\delta_{ТП} \in \delta_{ТП\text{ доп}}$, $\delta_{ДУ} \in \delta_{ДУ\text{ доп}}$, $\delta_{АЦП} \in \delta_{АЦП\text{ доп}}$, при которых измерение параметров ТФС исследуемых материалов осуществляется с требуемой точностью $\lambda \in \lambda_{\text{доп}}$, $\alpha \in \alpha_{\text{доп}}$.

2. Установить соответствующие поправки A_j в результаты измерения структурных компонентов и параметров ТФС для исключения систематической и случайной погрешностей.

3. Создать интеллектуальный алгоритм введения поправок в результаты измерения структурных компонентов ИК ИИС с использованием их математических моделей для повышения точности преобразования измерительной информации.

Для решения поставленной задачи на основе анализа структуры и характеристик ИИС ТФС материалов, априорной информации, экспериментальных данных, полученных при определении ИИС параметров ТФС теплоизоляционных материалов, необходимо разработать метод

повышения точности ИИС в результате устранения технического несовершенства структурных компонентов измерительного канала ИИС при воздействии дестабилизирующих факторов – температуры и влажности окружающей среды, шероховатости поверхности исследуемых материалов, нестабильности источника питания и др.

Решение задачи повышения точности измерений ИИС включает следующее: проводится анализ поставленной цели, измерительной задачи, применяемого метода измерений, воздействующих ДФ, определяются методические и инструментальные погрешности и их вид – систематические или случайные погрешности измерений, компонентов ИК и параметров ТФС материалов; оценивается вклад составляющих погрешности измерений и определяются доминирующие из них. Оценка погрешностей измерения выполнена расчетно-экспериментальным методом.

Уравнение преобразования измерительной информации в ИИС при контроле температуры T (в области контакта измерительного зонда ИИС и исследуемого материала) при частотно-импульсном тепловом воздействии на ИМ линейным нагревателем ИЗ и измерении параметров ТФС материалов имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} Q_{\text{ИИС}} &= F[U_{\text{ТП}} = f(k_{\text{ТП}}T); U_{\text{ДУ}} = f(k_{\text{ДУ}}U_{\text{ТП}}); \\ K_{\text{АЦП}} &= f(k_{\text{АЦП}}U_{\text{ДУ}}), P_{\text{ДФ}}], \end{aligned} \quad (2.40)$$

где $Q_{\text{ИИС}}$ – выходные определяемые параметры ИИС ТФС материалов (коэффициенты тепло- и температуропроводности – λ и α); $U_{\text{ТП}}$ – формируемая термоЭДС на выходе термопары (ТП); $k_{\text{ТП}}$ – коэффициент преобразования ТП; $U_{\text{ДУ}}$ – напряжение на выходе дифференциального усилителя (ДУ); $k_{\text{ДУ}}$ – коэффициент усиления ДУ; $K_{\text{АЦП}}$ – цифровой код на выходе аналого-цифрового преобразователя; $k_{\text{АЦП}}$ – коэффициент преобразования АЦП; $P_{\text{ДФ}}$ – воздействующие ДФ на компоненты ИК ИИС.

Относительная погрешность результатов измерения на выходе структурных компонентов, которые указаны в уравнении преобразования (2.40):

$$\delta_i = (x_{\text{ин}} - x_{\text{ин}}) / x_{\text{ин}} = \Delta x_i / x_{\text{ин}}, \quad (2.41)$$

где $x_{\text{ин}}$, $x_{\text{ин}}$ – соответственно измеренное и номинальное значения выходного параметра структурного компонента ИК ИИС; Δx_i – абсолютная погрешность результатов измерения на выходе структурных компонентов.

Так как параметры ТФС материалов измеряются косвенным путем, то погрешность, которая вносится каждым i -м компонентом ИК (2.41) в результат измерения $Q_{\text{ИИС}}$, определяется по методике обработки косвенных измерений:

$$\frac{\Delta Q_{\text{ИИС}i}}{Q_{\text{ИИС}}} = \frac{1}{Q_{\text{ИИС}}} \frac{\partial F}{\partial x_{\text{ин}}} \Delta x_{\text{ин}}. \quad (2.42)$$

Вклад относительной погрешности каждого структурного компонента ИК ИИС определяется коэффициентом влияния L_i :

$$L_i = \left(\frac{\Delta Q_{\text{ИИС}i}}{Q_{\text{ИИС}}} \right) / \delta_i = \frac{\partial F}{\partial x_{\text{ин}}} \frac{x_{\text{ин}}}{Q_{\text{ИИС}}}. \quad (2.43)$$

Абсолютная погрешность ИИС ТФС материалов определяется при суммировании аддитивной Δ_a и мультипликативной Δ_m составляющих погрешности:

$$\Delta = \Delta_a + \Delta_m = \frac{1}{Q_{\text{ИИС}\gamma}} \sum_{i=1}^{\gamma} N_i P_{\text{ДФ}i} + \sum_{i=1}^l L_i \delta_i, \quad (2.44)$$

где N_i – коэффициент влияния для аддитивных погрешностей,

$$N_i = \frac{\partial F}{\partial P_{\text{ДФ}i}}; \quad \gamma, l – \text{число коэффициентов влияния.}$$

Определяемые аддитивные погрешности ИИС (2.42) и (2.43) включают систематические и случайные. Результаты измерений структурных компонентов ИК ИИС (2.40) – первичного измерительного преобразователя (термопары), дифференциального усилителя, аналого-цифрового преобразователя, представлены соотношениями:

$$x_{\text{ТП}_n} = x_{\text{ТП}_n} + B_{\text{ТП}i} + C_{\text{ТП}i}; \quad (2.45)$$

$$x_{\text{ДУ}_n} = x_{\text{ДУ}_n} + B_{\text{ДУ}i} + C_{\text{ДУ}i}; \quad (2.46)$$

$$x_{\text{АЦП}_n} = x_{\text{АЦП}_n} + B_{\text{АЦП}i} + C_{\text{АЦП}i}, \quad (2.47)$$

где $x_{\text{ТП}_n}, x_{\text{ТП}_n}$ – измеренные и номинальные значения результатов измерений ТП; $x_{\text{ДУ}_n}, x_{\text{ДУ}_n}$ – измеренные и номинальные значения ре-

зультатов измерений ДУ; $x_{\text{АЦП}_n}, x_{\text{АЦП}_n}$ – измеренные и номинальные значения результатов измерений АЦП; $B_{\text{ТП}_i}, C_{\text{ТП}_i}, B_{\text{ДУ}_i}, C_{\text{ДУ}_i}, B_{\text{АЦП}_i}, C_{\text{АЦП}_i}$ – систематическая и случайная погрешности измерений структурных компонентов: ТП, ДУ, АЦП.

Для исключения и учета влияния систематических погрешностей компонентов ИК ИИС (2.45) – (2.47) предлагаются два способа: на основе априорной и экспериментальной информации рассчитать поправки и учитывать их в результатах измерений; определить интервалы систематических погрешностей, которые не предоставляется возможным учесть или исключить, чтобы оценить их вклад в общую погрешность результатов измерения. Мультипликативная погрешность складывается из относительных погрешностей структурных компонентов ИК ИИС.

Наличие систематических погрешностей можно установить в результате анализа графика полученных результатов измерения в течение заданного промежутка времени. Если присутствуют отклонения от равномерного участка графика, то это свидетельствует о присутствии систематической составляющей погрешности. Присутствие систематической погрешности в результатах измерений из-за воздействия ДФ определяется с использованием теории дисперсионного анализа (критерия Фишера) [110]. Для этого выполняют многократные серийные измерения, каждая из которых соответствует заданным значениям ДФ.

Проведенные n измерений разбивают на k партий ($k > 3$) по r_i результатов измерений ($kr_i = n$) в каждой партии. После этого определяется наличие систематических расхождений между результатами измерений для разных партий. Результаты в партиях распределены в соответствии с нормальным законом распределения [110, 111]. Наличие случайных погрешностей в какой-либо партии характеризуется рассеянием результатов наблюдений.

Средняя сумма дисперсий результатов измерений, рассчитанных для каждой партии, является характеристикой совокупности случайных погрешностей [105]:

$$\sigma^2 = \frac{1}{n-k} \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^r (x_{ij} - \bar{x}_j); \quad \bar{x}_j = \frac{1}{r_j} \sum_{i=1}^r x_{ij}, \quad (2.48)$$

где x_{ij} – результат i -го измерения в j -й партии; \bar{x}_j – среднее значение полученного результата партии измерений; k – число партий измерений; r – число результатов измерений.

Предлагается исключение постоянных систематических погрешностей измерения путем введения поправок (величин, одноименным измеряемым) в результаты измерения на основе их коррекции по аппроксимирующим зависимостям выходных сигналов структурных компонентов ИК ИИС при воздействии ДФ, полученным экспериментальным путем. При введении поправки A_j результат измерения на выходе структурных компонентов ИК (2.45) – (2.47) будет представлен в следующем виде:

$$\begin{aligned}x_{\text{ТП}_n} &= x_{\text{ТП}_n} + B_{\text{ТП}_i} + A_{\text{ТП}_i}; \\x_{\text{ДУ}_n} &= x_{\text{ДУ}_n} + B_{\text{ДУ}_i} + A_{\text{ДУ}_i}; \\x_{\text{АЦЦ}_n} &= x_{\text{АЦЦ}_n} + B_{\text{АЦЦ}_i} + A_{\text{АЦЦ}_i}.\end{aligned}\tag{2.49}$$

Если $A_i = -B_i$, то систематическая погрешность исключается из результата измерения. При этом надо отметить, что поправку необходимо вводить отдельно для каждой составляющей систематической погрешности. Так как поправки вводятся по аппроксимирующим зависимостям выходных сигналов от воздействующих ДФ, то точность вводимых поправок определяется точностью аппроксимации. Вследствие этого случайные погрешности результата измерения накапливаются, и его дисперсия увеличивается [110].

Результат измерений x_j при введении поправок B_j , где $j = 1, 2, \dots, r$, определяется по формуле

$$x_j = x_i + \sum_{j=1}^r A_j.\tag{2.50}$$

Дисперсия результата измерений при введении поправки

$$\sigma^2 = D_{\text{БП}}^2 + \sum_{j=1}^r D_{A_j}^2,\tag{2.51}$$

где $D_{\text{БП}}^2$ – оценка дисперсии результата измерений без поправки; $D_{A_j}^2$ – оценка дисперсии j -й поправки.

Отсюда следует, что результат измерения уточняется, но при этом возрастает разброс за счет роста дисперсии.

При проведении измерений выходных сигналов структурных компонентов ИК ИИС НК ТФС материалов (2.49) значение измеренной величины будет равно

$$u = \bar{x}_1 \pm t_p D, \quad (2.52)$$

где \bar{x}_1 – оценка среднего арифметического неисправленного результата измерений; t_p – коэффициент Стьюдента.

На рисунке 2.12 представлена зависимость вероятности распределения погрешности результатов измерения $P(x)$ с учетом их поправки.

После введения поправки $A \pm t_p D_A$ результат измерения выходных сигналов структурных компонентов ИК ИИС ТФС материалов с учетом (2.50) – (2.52) определяется по формуле

$$u = (\bar{x}_1 + A) \pm t_p D_{\bar{x}} = \bar{x} \pm t_p D_{\bar{x}}, \quad (2.53)$$

где $D_{\bar{x}} = \sqrt{(D_{\text{БП}}^2 + D_A^2)}$; \bar{x} – оценка среднего арифметического исправленного результата измерений.

До и после введения поправки доверительные значения погрешности результатов измерения выходных сигналов структурных компонентов ИК ИИС будут соответственно равны:

$$C_1 = B_1 + t_p D; \quad C_2 = B_2 + t_p D_{\bar{x}}. \quad (2.54)$$

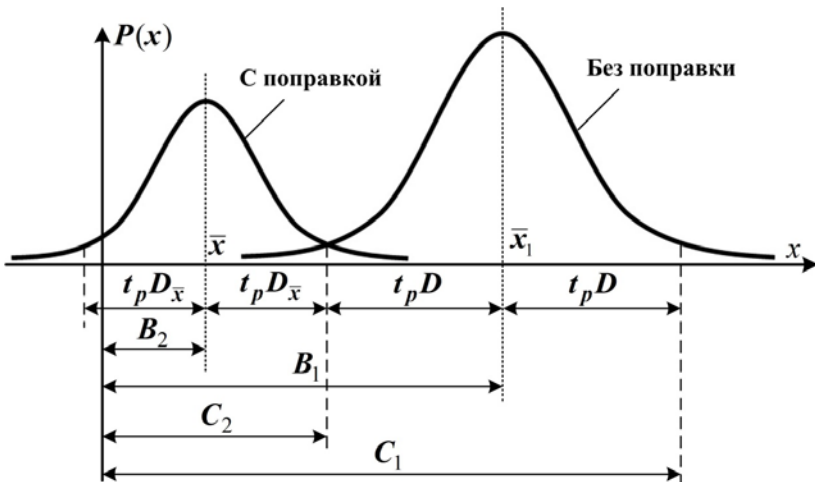


Рис. 2.12. Зависимость вероятности распределения погрешности результатов измерения $P(x)$ с учетом их поправки

В алгоритме коррекции, реализующем предлагаемый метод повышения точности ИИС, процедура реализации поправки вводится до наступления момента равенства погрешности выходных сигналов компонентов ИК и параметров ТФС материалов заданным их доверительным интервалам [112]. Погрешность результатов измерений зависит от точности установления поправки (2.53), (2.54).

Предложенный метод повышения точности ИИС ТФС материалов основан на известном способе структурной коррекции [110] и заключается в контроле измеренных значений выходных сигналов на выходе структурных компонентов измерительного канала ИИС в процессе измерения параметров ТФС материалов, сравнении их с допустимыми значениями, которые определяются перед каждым измерением по характеристикам преобразования структурных компонентов ИК, полученным расчетно-экспериментальным методом.

Метод повышения точности ИИС позволяет исключить систематические и случайные погрешности структурных компонентов ИК ИИС, обусловленные техническим несовершенством как самих компонентов, так и воздействием внешних и внутренних факторов в результате применения интеллектуального алгоритма автоматической коррекции погрешностей структурных компонентов ИК. Научная новизна метода обусловлена, в отличие от известных методов, применением для коррекции точных математических моделей компонентов ИК ИИС при воздействии ДФ, полученных на основе априорных и расчетно-экспериментальных зависимостей.

Разработаны математические модели для коррекции структурных компонентов ИК ИИС ТФС материалов [106, 112].

Математическая модель преобразования измерительной информации термопарой (СИП) получена аппроксимацией полученной экспериментальной зависимости (2.17) – (2.20):

$$\tilde{U}_{СИП} = f(T_{и}) = 2,71 \cdot 10^{-5} (T)^2 + 0,04T + 0,005 + \Delta U_{СИП},$$

где $\tilde{U}_{СИП}$ – значение термоЭДС на выходе термопары; T – измеренная температура; $\Delta U_{СИП} = \tilde{U}_{СИП} - \tilde{U}_{СИП T_{ос}}$.

В результате расчета усилителя и проведенных экспериментальных исследований создана математическая модель процесса преобразования измерительной информации $U_{СИП}$ дифференциальным усилителем (2.21) – (2.24):

$$U_{ДУ}(T) = U_{СИП} \cdot 980 + 0,61,$$

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

Создана математическая модель АЦП с рассчитанными значениями параметров аналого-цифрового преобразования измерительных сигналов с выхода ДУ (2.29)

$$K_{\text{АЦП}}(T) = \frac{U_{ДУ}(t)}{3 \cdot 10^{-5}} + 0,062,$$

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

Интеллектуальный алгоритм в процедуре коррекции результатов измерения структурных компонентов ИИС использует математические модели, учитывает текущую, априорную и вспомогательную информацию о свойствах исследуемых материалов, условия измерений, требования к результатам измерения, предъявляемые ограничения, которые представлены в базе знаний ИИС, характеризуется свойством адаптации в соответствии с изменяющимися условиями функционирования.

Созданный метод и интеллектуальный алгоритм коррекции для повышения точности ИИС применяются в информационно-измерительной системе ТФС материалов, что позволяет повысить метрологический уровень измерений, точность определения коэффициентов тепло- и температуропроводности.

На рисунке 2.13 представлена структурная схема ИИС, реализующая метод и интеллектуальный алгоритм коррекции для повышения точности измерения ТФС материалов. ИИС включает следующие основные компоненты: ТП₁, ТП₂, ..., ТП_{*i*} – датчики контроля температуры (термопары) в плоскости контакта исследуемого материала и измерительного зонда, *i* – число термопар; ДУ₁, ДУ₂, ..., ДУ_{*m*} – дифференциальные усилители, *m* – число ДУ; АЦП; ВБ – вычислительный блок, в состав которого входят: МК – микроконтроллер; МАО – модуль алгоритмического обеспечения; БЗ – база знаний; МПО – модуль программного обеспечения; модули коррекции (1 – 3) результатов измерения структурных компонентов ИИС; модули расчета и коррекции λ и α ; Д – дисплей; БУН – блок управления нагревом.

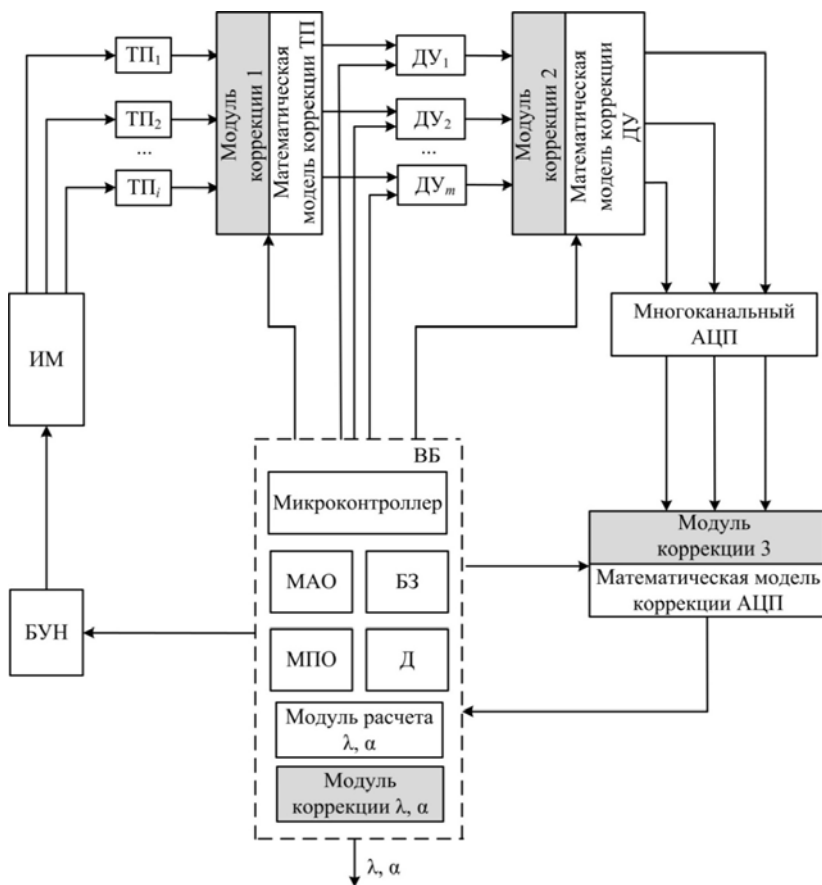


Рис. 2.13. Структурная схема ИИС ТФС материалов, реализующая метод и интеллектуальный алгоритм коррекции для повышения точности ИИС

Микроконтроллер обрабатывает измерительную информацию, поступающую с первичных измерительных преобразователей; выполняет функции управления режимами работы ИИС и нагрева исследуемых материалов в процессе измерения; осуществляет контроль измерительных сигналов на выходе структурных компонентов измерительного канала и погрешности измерения; реализует интеллектуальный алгоритм коррекции значений выходных сигналов компонентов измерительного канала при воздействии ДФ по полученным аппроксимирующим зависимостям на соответствие их установленным допусти-

мым значениям; выполняет статистическую обработку и метрологический анализ результатов измерений.

Разработано программное обеспечение ИИС [113] для реализации метода и алгоритма коррекции технического несовершенства ИИС ТФС теплоизоляционных материалов.

Для оценки точности функционирования ИИС ТФС материалов проведены экспериментальные исследования системы при воздействии основных дестабилизирующих факторов, воздействующих на структурные компоненты ИИС: неоднородности ТП, погрешности чувствительности из-за отклонения характеристики ТП от номинальной статической характеристики, влияния паразитных термоЭДС, изменения температуры холодных спаев ТП, температуры и влажности окружающей среды. Влияние данных факторов на погрешность результатов измерения коэффициентов тепло- и температуропроводности выявлено на основе экспериментальных данных в процессе разработки ИИС параметров ТФС теплоизоляционных материалов.

На рисунке 2.14 представлены результаты экспериментальных исследований ИИС: зависимости коэффициента теплопроводности исследуемых материалов от выходного напряжения дифференциального усилителя $\lambda = f(U_{\text{ДУ}})$.

На рисунке 2.15 приведены зависимости относительной погрешности коэффициента теплопроводности от погрешности структурных компонентов измерительного канала ИИС ТФС материалов.

Как показывает анализ результатов экспериментальных исследований измерительного канала ИИС ТФС теплоизоляционных материалов, относительная суммарная погрешность измерительного канала при воздействии ДФ составляет до 40%, в том числе вклад погрешности термопары составляет 23,9%, дифференциального усилителя – 9,72%, аналого-цифрового преобразователя – 6,37%. При воздействии ДФ относительная погрешность определения коэффициента теплопроводности возрастает до 50%, при этом вклад погрешности термопар составляет 29,88%, дифференциального усилителя – 12,15%, АЦП – 7,97%.

На основе экспериментальных данных получены аппроксимирующие зависимости относительной погрешности коэффициента теплопроводности от погрешности структурных компонентов измерительного канала, которые используются для прогнозирования погрешности определения λ :

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

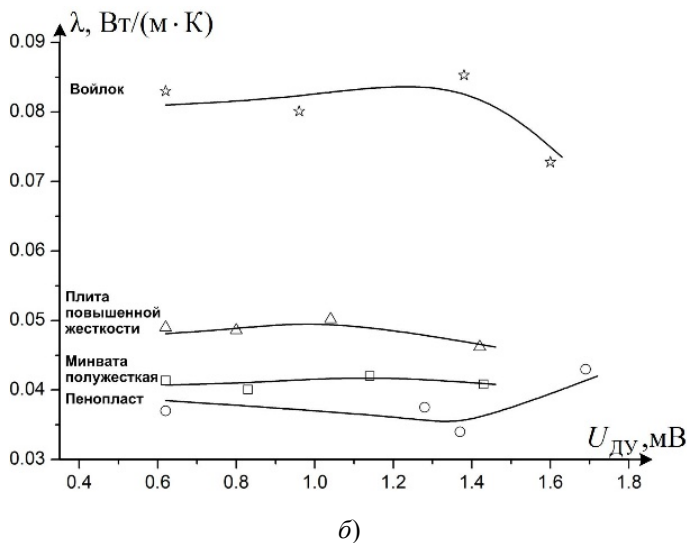
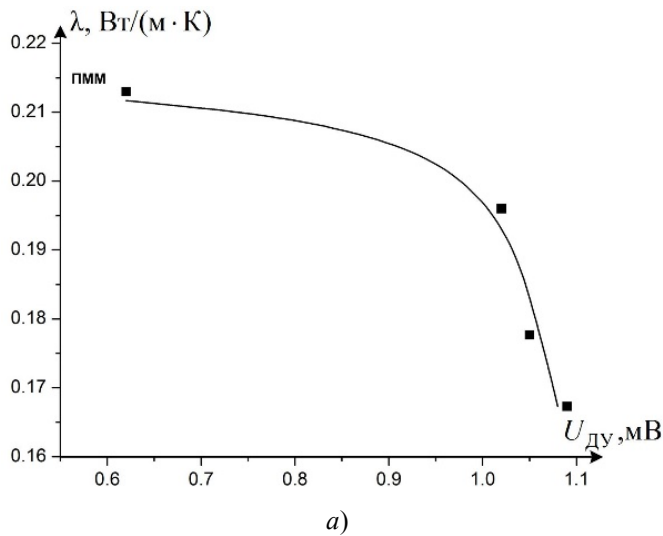
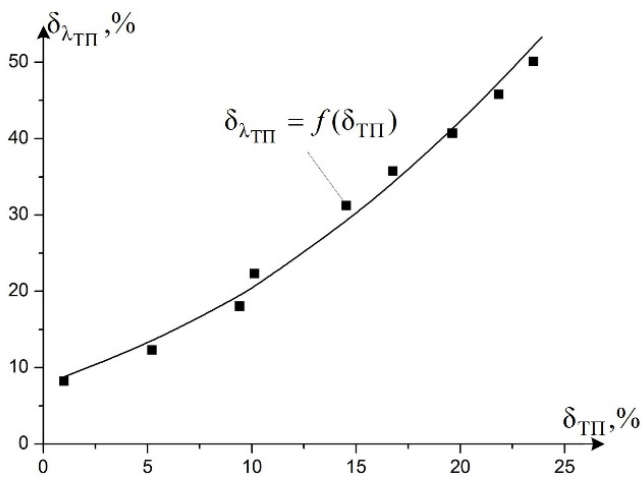


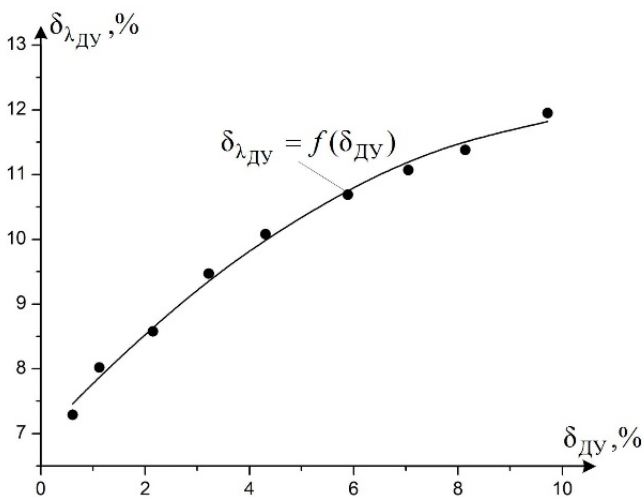
Рис. 2.14. Зависимости коэффициента теплопроводности исследуемых материалов:

a – ПММ; *б* – войлока, плиты повышенной жесткости, полужесткой минваты, пенопласта от выходного напряжения дифференциального усилителя

$$\lambda = f(U_{ДУ})$$



a)



b)

Рис. 2.15. Зависимости относительной погрешности коэффициента теплопроводности от погрешности структурных компонентов измерительного канала:

a – термопары; б – дифференциального усилителя; в – АЦП

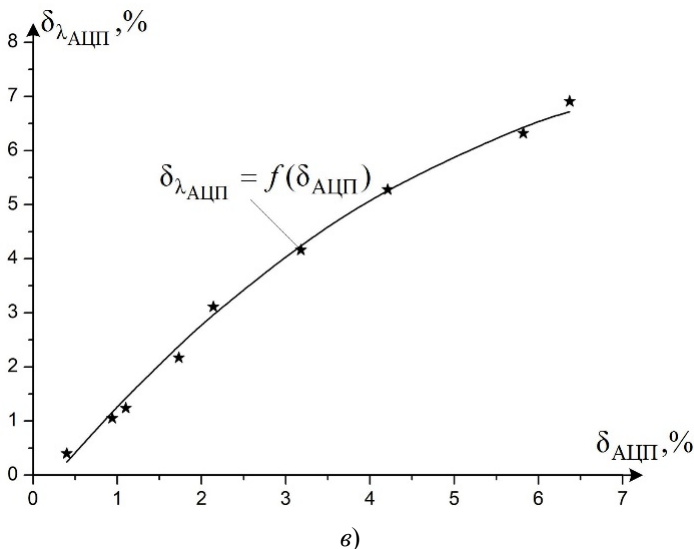


Рис. 2.15. Продолжение

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

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

На основе экспериментальных данных выполнен расчет погрешности измерительного канала ИИС ТФС теплоизоляционных материалов в результате реализации в ИИС интеллектуального алгоритма коррекции технического несовершенства ИИС при воздействии ДФ [109, 112]. Рассчитаны относительные погрешности структурных компонентов ИК ИИС: термоэлектрического преобразователя ТП, $\delta_{ТП} = 1,5\%$; дифференциального усилителя, $\delta_{ДУ} = 0,61\%$; АЦП, $\delta_{АЦП} = \pm 0,4\%$. Тогда среднеквадратическое отклонение случайной составляющей погрешности ИК ИИС ТФС материалов будет равно $\sigma[\delta_{сл}] = \pm 0,963\%$. Предельно допускаемое значение погрешности ИК ИИС рассчитывается по формуле $\delta_{ИК_{н(в)}} = \pm K_n \sigma[\delta_{сл}]$. Распределение суммарной погрешности для числа измерений больше четырех стремится к нормальному

$$(K_n = 1,96): \delta_{ИК_{н(в)}} = \pm(1,96 \cdot 0,963) = \pm 1,89\%.$$

Таким образом, принимается значение нижней (верхней) границы доверительного интервала, в котором с вероятностью $P = 0,95$ находится погрешность ИК ИИС ТФС материалов: $\delta_{\text{ИК н(в)}} = \pm 1,89\%$.

На рисунках 2.16 – 2.18 представлены результаты экспериментов по оценке влияния погрешности структурных компонентов ИК ИИС при воздействии ДФ на результаты определения коэффициентов тепло- и температуропроводности теплоизоляционных материалов до и после применения алгоритма коррекции технического несовершенства ИИС.

Как показывает анализ графических зависимостей на рис. 2.16 – 2.18, полученных по данным экспериментов, в результате применения алгоритма коррекции выходных параметров структурных компонентов ИК ИИС, относительная погрешность определения коэффициентов тепло- и температуропроводности теплоизоляционных материалов – около 4%. При этом максимальный вклад погрешности компонентов ИК в суммарную погрешность определения λ следующий: термопара – 2,39%, дифференциальный усилитель – 0,97%, АЦП – 0,64%.

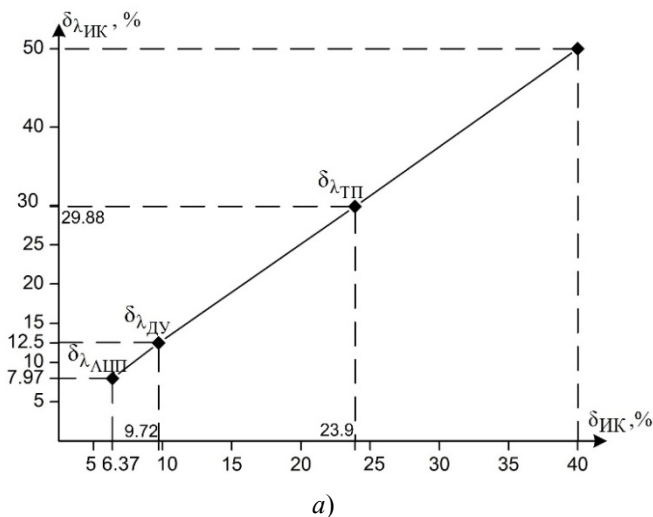


Рис. 2.16. График зависимости погрешности определения теплопроводности $\delta_{\lambda_{\text{ИК}}}$ (а) и температуропроводности $\delta_{\alpha_{\text{ИК}}}$ (б) исследуемых материалов от погрешности структурных компонентов измерительного канала $\delta_{\text{ИК}}$ при воздействии ДФ до коррекции результатов измерения ТФС материалов $\delta_{\lambda_{\text{ИК}}} = f(\delta_{\text{ИК}})$, $\delta_{\alpha_{\text{ИК}}} = f(\delta_{\text{ИК}})$

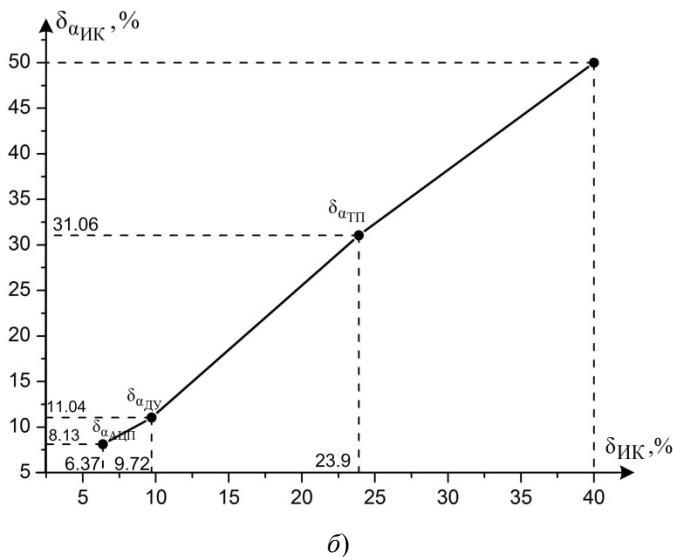


Рис. 2.16. Продолжение

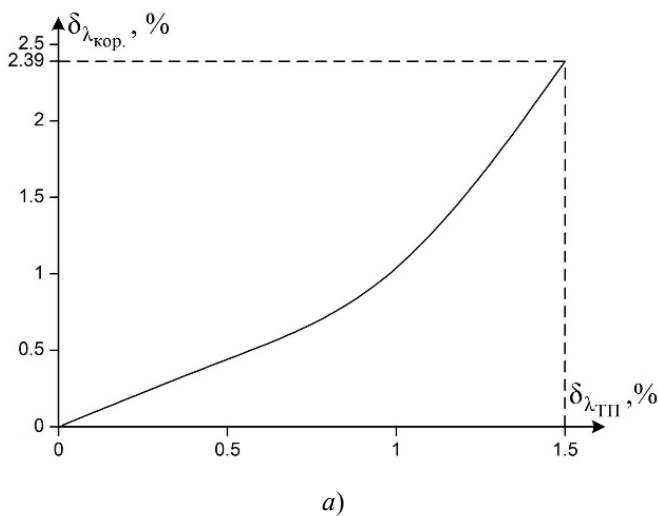
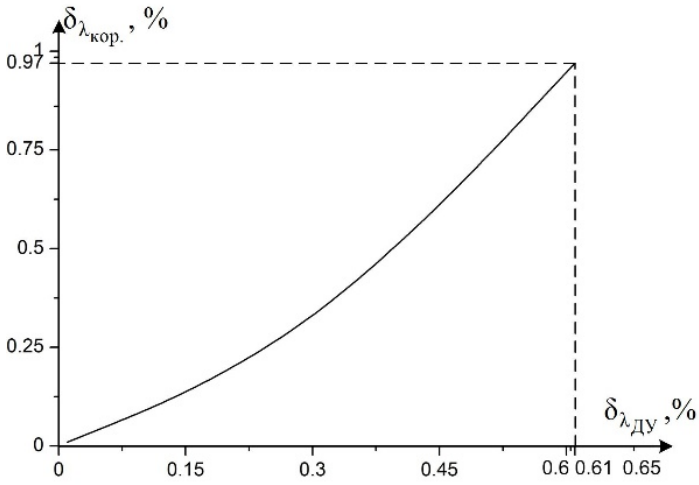
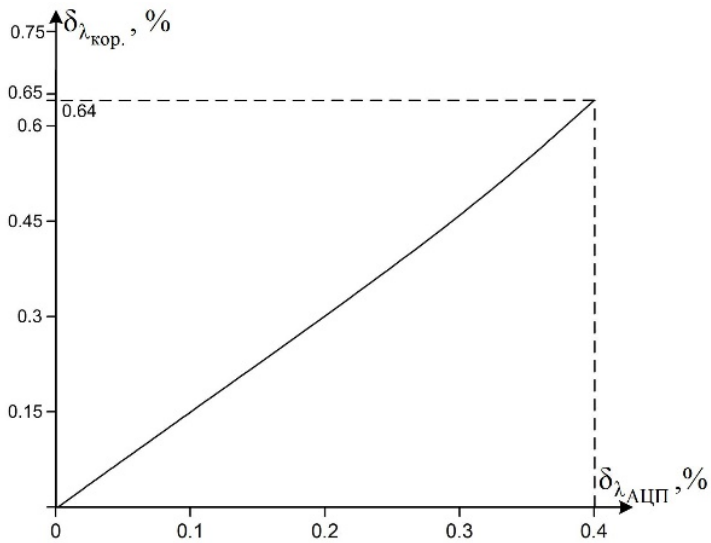


Рис. 2.17. Зависимости относительной погрешности определения λ теплоизоляционных материалов (войлока) от погрешности терморпары (а), дифференциального усилителя (б), АЦП (в)



б)



в)

Рис. 2.17. Продолжение

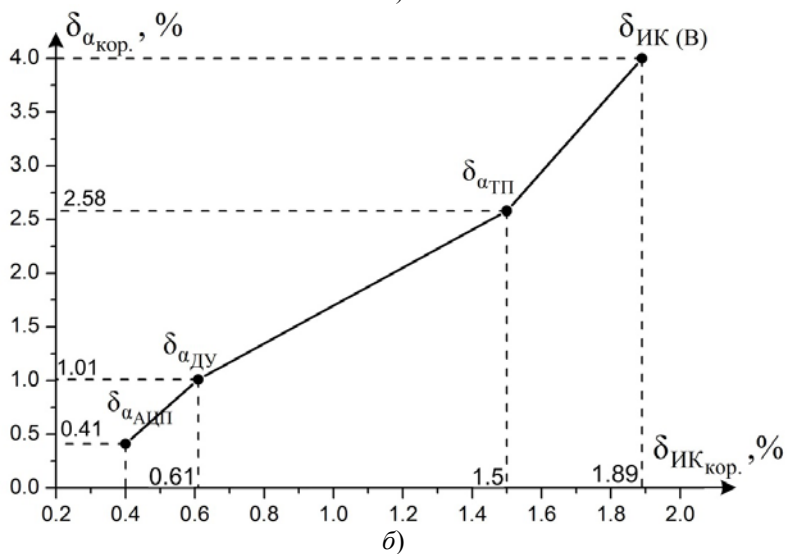
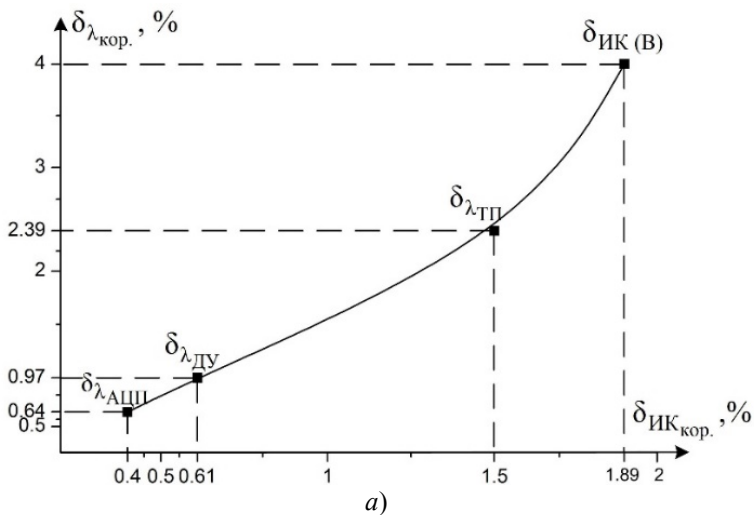


Рис. 2.18. График зависимости вклада в относительную погрешность определения λ , α погрешностей структурных компонентов ИК ИИС в результате их коррекции на воздействие ДФ $\delta_{\lambda_{\text{кор}}} = f(\delta_{\text{ИКкор}})$ (а),

$\delta_{\alpha_{\text{кор}}} = f(\delta_{\text{ИКкор}})$ (б), $\delta_{\text{ИК(B)}}$ – значение погрешности верхней границы доверительного интервала

2.2. Результаты метрологической обработки теплофизических измерений теплоизоляционных материалов

Исследуемый материал	Эталонные и справочные значения		Измеренные значения		Относительная погрешность измерения	
	$\alpha \cdot 10^{-7}$ м ² /с	λ , Вт/(м·К)	$\alpha \cdot 10^{-7}$ м ² /с	λ , Вт/(м·К)	δ_{α} , %	δ_{λ} , %
Полимер-модифицированный материал	1,09	0,195	1,12	0,20	3,67	2,56
Рипор	4,61	0,028	4,76	0,029	3,25	3,57
Минвата полужесткая	3,93	0,04	4,05	0,0413	3,05	3,25
Войлок	4,65	0,08	4,80	0,083	3,22	3,75
Пенопласт	7,30	0,037	7,58	0,0384	3,83	3,78

Проведены экспериментальные исследования ИИС НК ТФС материалов и определены относительные погрешности результатов измерений коэффициентов тепло- и температуропроводности теплоизоляционных материалов (табл. 2.2).

В результате метрологического анализа установлено, что относительная погрешность результатов измерений составляет не более 4%, что соответствует требованиям, предъявляемым к измерительным средствам для определения параметров теплофизических свойств теплоизоляционных материалов.

Таким образом, разработан метод повышения точности ИИС ТФС материалов на основе использования точных математических моделей компонентов ИК ИИС, полученных на основе априорных и расчетно-экспериментальных зависимостей, для коррекции систематических и случайных погрешностей структурных компонентов ИК ИИС при воздействии ДФ.

Создан интеллектуальный алгоритм, реализующий метод повышения точности ИИС ТФС материалов, позволяющий в результате целенаправленной коррекции результатов измерения структурных

компонентов и выходных параметров ИИС определять коэффициенты тепло- и температуропроводности теплоизоляционных материалов с допустимой погрешностью.

Выполнена метрологическая оценка ИИС ТФС материалов. Точность определения коэффициентов тепло- и температуропроводности теплоизоляционных материалов повысилась в 12,5 раз в результате применения в ИИС метода и алгоритма коррекции структурных компонентов ИИС на воздействие ДФ. Относительная погрешность измерения составляет не более 4%, что соответствует требованиям, предъявляемым к измерительным средствам данного назначения.

2.7. АЛГОРИТМ КОРРЕКЦИИ ТЕХНИЧЕСКОГО НЕСОВЕРШЕНСТВА ИИС ТФС МАТЕРИАЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ И МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ

Обеспечение точности получаемой измерительной информации при воздействии дестабилизирующих факторов ($P_{ДФ}$) в информационно-измерительной системе теплофизических свойств материалов ($P_{ТФС}$) – коэффициентов тепло- и температуропроводности (λ и α) является необходимым при обеспечении достоверности измерительной информации [10].

Решение задачи повышения точности информационно-измерительных систем теплофизических свойств материалов осуществляется в результате разработки алгоритма коррекции технического несовершенства структурных компонентов системы на основе использования созданных математических моделей процесса измерения в информационно-измерительной системе, структурных компонентов измерительного канала и информации о воздействующих дестабилизирующих факторах. Предлагается интеллектуальный алгоритм коррекции и устранения технического несовершенства ИИС ТФС материалов для повышения точности измерений при контроле λ и α .

Представлен структурный состав и информационный обмен между составляющими компонентами системы, а также алгоритм коррекции результатов измерения ТФС материалов при воздействии дестабилизирующих факторов. Созданы модули алгоритмического обеспечения и аналого-цифровой коррекции компонентов измерительного канала ИИС, реализуемые с помощью разработанного программного модуля и базы знаний. На рисунке 2.19 представлены структурные компоненты ИИС ТФС материалов, результаты измерений которых корректируются в процессе измерения.

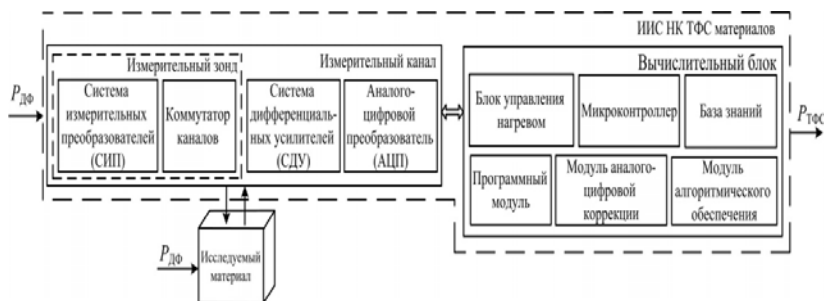


Рис. 2.19. Структурные компоненты ИИС ТФС материалов

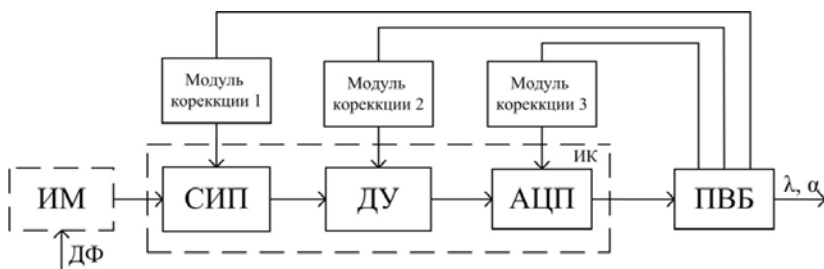


Рис. 2.20. Функциональная схема коррекции погрешности измерительного канала ИИС ТФС материалов

На рисунке 2.20 представлена функциональная схема с модулями коррекции погрешностей структурных компонентов измерительного канала ИИС ТФС материалов при воздействующих дестабилизирующих факторах: системы измерительных преобразователей, дифференциального усилителя, аналого-цифрового преобразователя.

Предлагаются алгоритмы коррекции нестабильности структурных компонентов ИК ИИС ТФС материалов [104], которые представлены на рис. 2.21.

Разработан алгоритм коррекции технического несовершенства аналого-цифрового преобразователя. Разработанный алгоритм отличается от существующих применением при его реализации модулей аналого-цифровой (рис. 2.22) и цифровой коррекции (рис. 2.23) компонентов ИК ИИС ТФС материалов, что существенно повышает точность передачи и преобразования измерительной информации в ИК.

На рисунке 2.22 функциональное назначение элементов следующее: МХ7705 – 16-разрядный АЦП; МАХ6602 – обеспечивает опорное напряжение 2,5 В для МХ 7705; МАХ6627 – измеряет температуру окружающей среды.

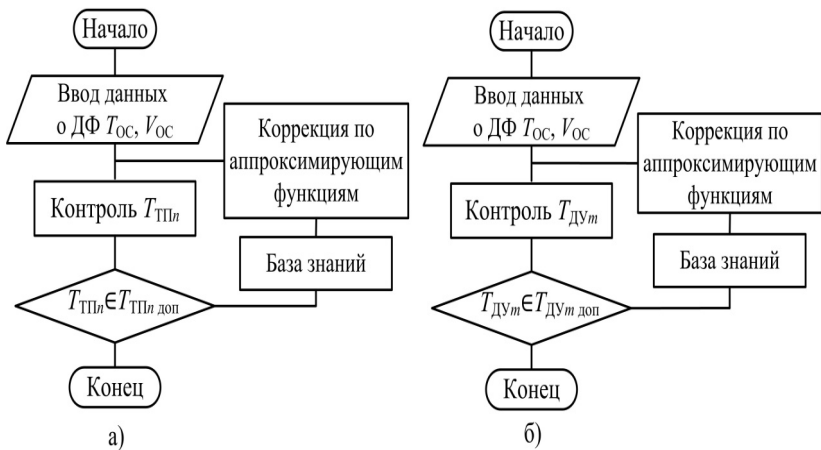


Рис. 2.21. Алгоритмы коррекции нестабильности СИП (а) и ДУ (б) ИК ИИС ТФС материалов

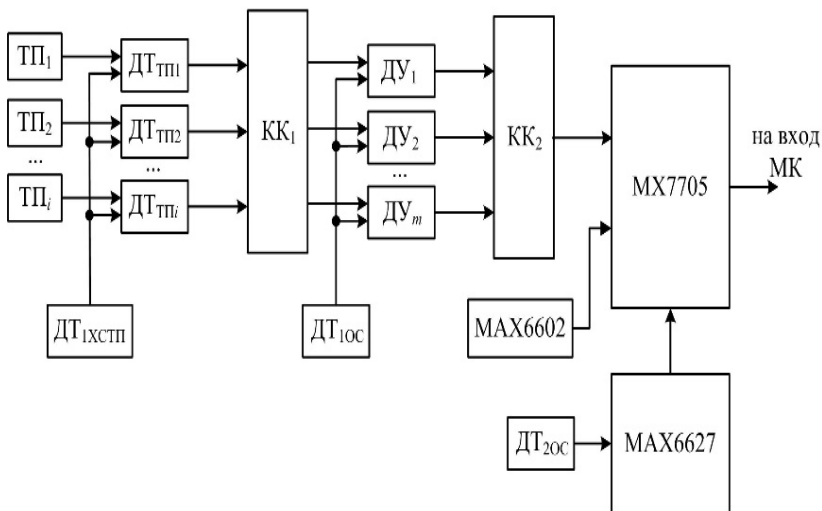


Рис. 2.22. Структурная схема модуля аналого-цифровой коррекции ИК ИИС ТФС материалов

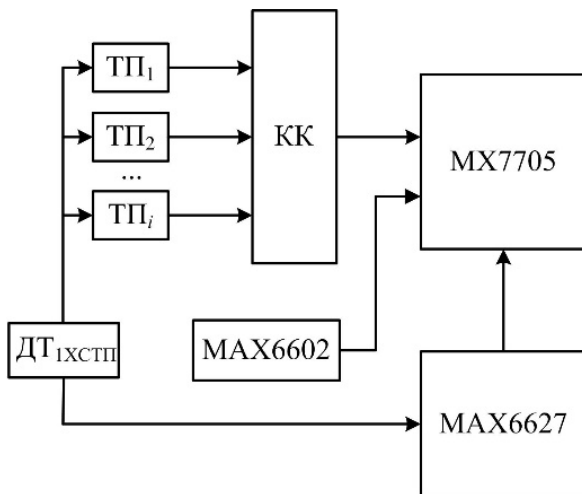


Рис. 2.23. Структурная схема цифровой коррекции ИК ИИС ТФС материалов

На рисунке 2.23 элементы схемы выполняют следующие функции: МХ7705 включает встроенный прецизионный усилитель с программируемым коэффициентом усилителя, благодаря которому АЦП воспринимает сигналы микровольтового уровня с термопар. МАХ6602 – обеспечивает опорное напряжение 2,5 В для МХ7705. МАХ6627 измеряет сигнал с полупроводникового датчика температуры холодных спаев термопар, который представляет собой диодное включение интегрального *n-p-n*-транзистора.

Разработан алгоритм преобразования измерительной информации структурных компонентов ИИС, ее коррекции и результатов измерения параметров ТФС материалов при воздействии дестабилизирующих факторов, приведенный на рис. 2.24.

Предложен алгоритм коррекции технического несовершенства компонентов измерительного канала ИИС ТФС материалов по математическим моделям и аппроксимирующим функциям и определяемых коэффициентов тепло- и температуропроводности, блок-схема которого представлена на рис. 2.25.

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

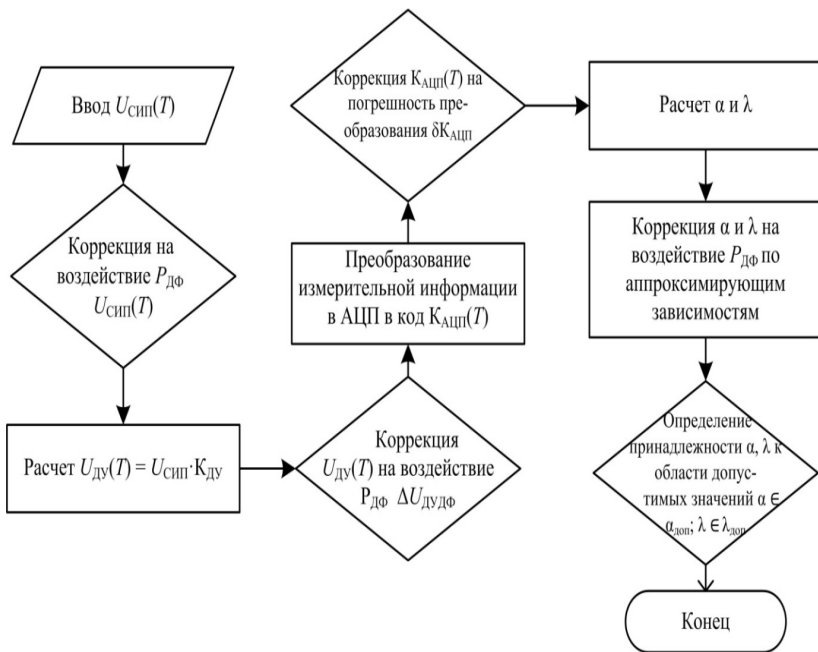


Рис. 2.24. Блок-схема алгоритма преобразования измерительной информации структурных компонентов ИИС, ее коррекции и результатов измерения параметров ТФС материалов

Создан интеллектуальный алгоритм коррекции технического несовершенства структурных компонентов измерительного канала ИИС ТФС материалов с учетом воздействия дестабилизирующих факторов и закономерностей их влияния на результаты измерения на выходе структурных компонентов и параметров ТФС материалов – коэффициентов тепло- и температуропроводности, позволяющий повысить точность определения коэффициентов тепло- и температуропроводности. Относительная погрешность измерения составляет не более 4%.

Таким образом, для повышения точности и эффективности функционирования предложены основные направления совершенствования ИИС ТФС материалов:

- разработана математическая модель оценки точности ИИС, устанавливающая зависимость между выходными параметрами точности результатов измерения ТФС материалов и входными параметрами точности, которые вносят погрешность в результаты измерения параметров ТФС;

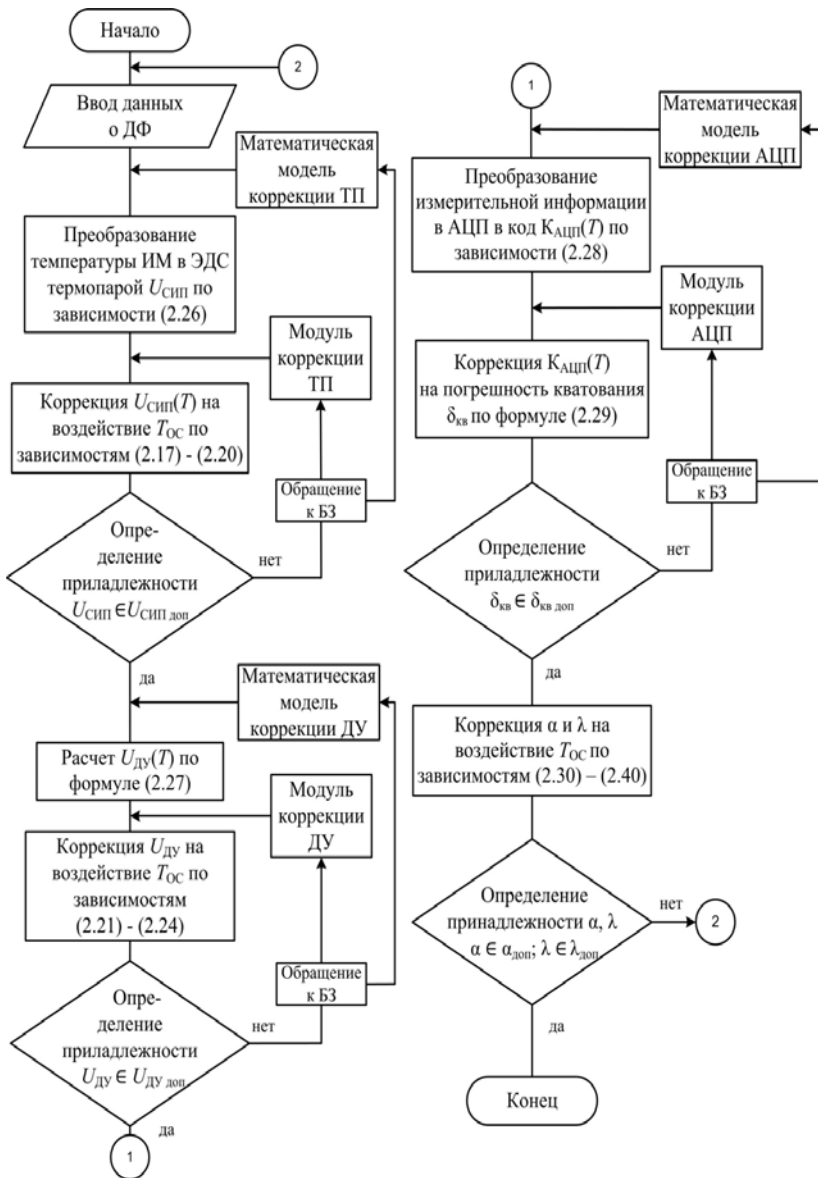


Рис. 2.25. Блок-схема интеллектуального алгоритма коррекции структурных компонентов измерительного канала ИИС и параметров ТФС материалов

– разработана математическая модель процесса измерения в измерительном канале ИИС путем декомпозиции ИК на отдельные структурные компоненты и последовательного преобразования измерительной информации в компонентах ИК ИИС с учетом ограничений на допустимые значения полученной измерительной информации на выходе компонентов ИК системы $U_{СИП} \in U_{СИП \text{ доп}}$, $U_{ДУ} \in U_{ДУ \text{ доп}}$, $K_{АЦП} \in K_{АЦП \text{ доп}}$, на погрешности измерений структурных компонентов ИК ИИС $\delta U_{СИП} \in \delta U_{СИП \text{ доп}}$, $\delta U_{ДУ} \in \delta U_{ДУ \text{ доп}}$, $\delta K_{АЦП} \in \delta K_{АЦП \text{ доп}}$ и с учетом полученных зависимостей влияния температуры окружающей среды T_{OC} на результаты измерения СИП, ДУ и АЦП;

– разработана математическая модель ИК ИИС, которая представляет собой описание преобразования линейным стационарным оператором измерительной информации в ИК, поступающей с СИП на усилитель и на вход МК;

– предложена функциональная модель дифференциального усилителя ИК – зависимость выходного напряжения ДУ $U_{\text{вых ДУ}}$ от воздействующих входных параметров ДУ и внешних дестабилизирующих факторов;

– созданы математическая модель (2.13) и функциональная модель (2.14) ДУ ИК ИИС, которые позволяют выполнить анализ преобразования информации в измерительном канале системы при воздействии ДФ;

– разработана математическая модель СИП (2.26) и аппроксимирующие зависимости $\tilde{U}_{СИП T_{OC}} = f(T_{OC})$ (2.17) – (2.20), которые применяются в алгоритме коррекции СИП при воздействии ДФ;

– предложена математическая модель усилителя (2.27) и аппроксимирующие зависимости $\tilde{U}_{УС T_{OC}} = f(T_{OC})$ (2.21) – (2.24), которые используются в алгоритме коррекции усилителя при воздействии ДФ;

– разработана математическая модель АЦП (2.29), которая применяется в алгоритме коррекции АЦП при воздействии ДФ;

– адекватность разработанных математических моделей структурных компонентов ИК ИИС подтверждается степенью соответствия цели исследования – повышение точности ИК ИИС ТФС материалов, на основе сравнения данных экспериментальных исследований ИИС при определении коэффициентов тепло- и температуропроводности и полученных при использовании для их определения созданных математических моделей;

– разработан комплексный метод повышения точности информационно-измерительной системы для определения параметров теплофизических свойств материалов, основанный на использовании созданных математических моделей оценки точности функционирования ИИС и измерительного канала, включающих модели оценки точности структурных компонентов системы и определяемых параметров – коэффициентов тепло- и температуропроводности. Метод заключается в контроле и коррекции результатов измерения выходных сигналов структурных компонентов ИК на соответствие допустимым значениям и параметров ТФС по аппроксимирующим зависимостям при воздействии дестабилизирующих факторов, полученных аналитическим методом и на основе экспериментальных данных;

– предложен метод повышения точности ИИС ТФС материалов, который основан на известном способе структурной коррекции, и заключается в контроле измеренных значений выходных сигналов на выходе структурных компонентов измерительного канала ИИС в процессе измерения параметров ТФС материалов, сравнении их с допустимыми значениями, которые определяются перед каждым измерением по характеристикам преобразования структурных компонентов ИК, полученным расчетно-экспериментальным методом.

Метод повышения точности ИИС позволяет исключить систематические и случайные погрешности структурных компонентов ИК ИИС, обусловленные техническим несовершенством как самих компонентов, так и воздействием внешних и внутренних факторов в результате применения интеллектуального алгоритма автоматической коррекции погрешностей структурных компонентов ИК. Научная новизна метода, в отличие от известных методов, обусловлена применением для коррекции точных математических моделей компонентов ИК ИИС при воздействии ДФ, полученных на основе априорных и расчетно-экспериментальных зависимостей;

– создан интеллектуальный алгоритм коррекции технического несовершенства структурных компонентов измерительного канала ИИС ТФС материалов с учетом воздействия дестабилизирующих факторов и закономерностей их влияния на результаты измерения на выходе структурных компонентов и параметров ТФС материалов – коэффициентов тепло- и температуропроводности, позволяющий повысить точность определения коэффициентов тепло- и температуропроводности. Относительная погрешность измерения составляет не более 4%.

Интеллектуальный алгоритм в процедуре коррекции результатов измерения структурных компонентов ИИС использует математические модели, учитывает текущую, априорную и вспомогательную информацию о свойствах исследуемых материалов, условия измерений, требования к результатам измерения, предъявляемые ограничения, которые представлены в базе знаний ИИС, характеризуется свойством адаптации в соответствии с изменяющимися условиями функционирования. В алгоритме коррекции, реализующем предлагаемый метод повышения точности ИИС, процедура реализации поправки вводится до наступления момента равенства погрешности выходных сигналов компонентов ИК и параметров ТФС материалов заданным их доверительным интервалам.

Глава 3

АРХИТЕКТУРА ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

3.1. ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИИС ТФС МАТЕРИАЛОВ

Исследование основных структурных компонентов, технических характеристик и направлений совершенствования ИИС показывает, что для повышения точности систем необходимо разработать информационное обеспечение ИИС. Информационное обеспечение осуществляется с применением созданной базы знаний в специализированном программно-аппаратном блоке. Измерительная система использует разработанную базу знаний для формирования требуемых данных, обработки и формализации данных, формирования новых знаний на основе имеющихся и т.д. Порядок выполнения указанных процедур зависит от специфики языка представления знаний и вида представления знаний в ИИС. Любой известный метод представления знаний является комплексом объединенных средств образного определения знаний и управления данными знаниями.

3.1.1. Информационная модель базы данных ИИС ТФС материалов

Информационное обеспечение ИИС в общем виде можно представить в виде структурной схемы компонентов информационного обеспечения, представленной на рис. 3.1.

Структурная схема представляет информацию, сформированную в базе знаний системы. Информационное обеспечение ИИС ТФС материалов содержит информацию о:

- исследуемых материалах;
- периодичности получения информации об ИМ;
- структуре обработки получаемой информации об ИМ;
- времени и видах представления результатов;
- программном и алгоритмическом обеспечении;

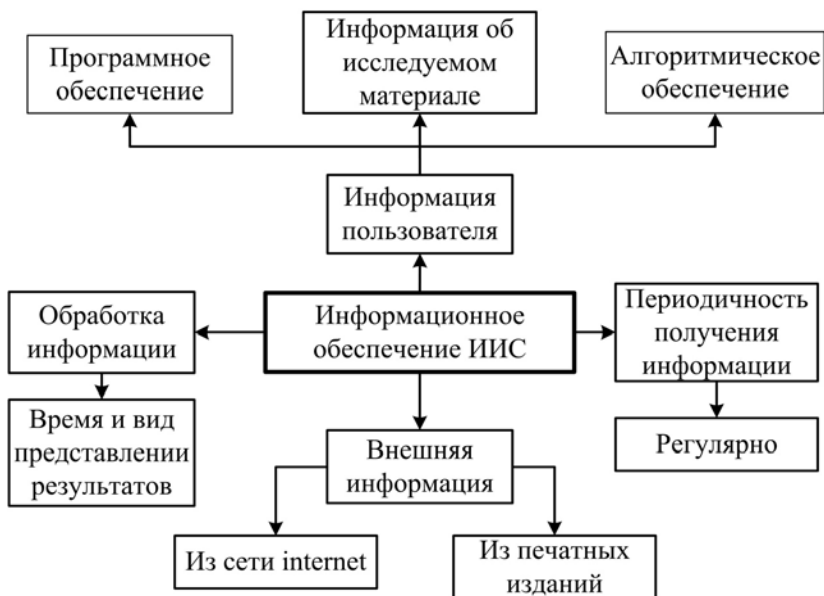


Рис. 3.1. Структурная схема компонентов информационного обеспечения ИИС ТФС материалов

– методах повышения точности результатов измерения (математические модели процесса измерения, структурных компонентов измерительного канала ИИС, аппроксимирующие зависимости, по которым реализован алгоритм коррекции, допустимые значения контролируемых параметров);

– методах метрологического анализа.

Для информационного обеспечения ИИС ТФС материалов при обмене информацией между структурными компонентами ИИС сформированы информационные каналы, используемые при создании базы знаний ИИС.

Информационная модель базы данных (БД) ИИС в стандарте IDEF1x представлена на рис. 3.2. При проектировании базы данных применялись модели, которые были созданы с использованием CASE – средства Erwin Data Modeler.

Разработанное информационное обеспечение ИИС ТФС материалов создано на основе сбора, хранения, обработки и проведения анализа информации.

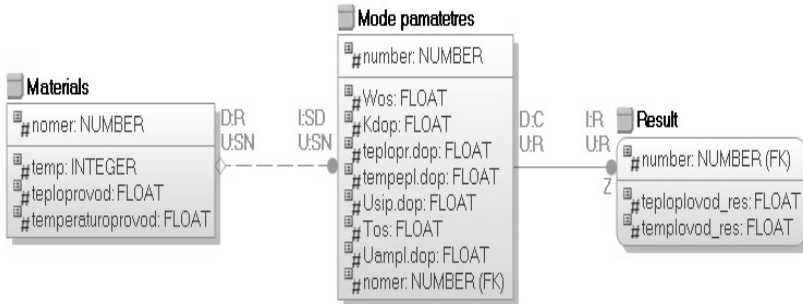


Рис. 3.2. Информационная модель базы данных ИИС ТФС материалов

Созданы информационное обеспечение ИИС ТФС теплоизоляционных материалов, информационная модель базы данных на основе сбора, хранения, обработки и анализа информации, которые позволяют принимать оперативные решения по извлечению требуемой информации при проектировании и эксплуатации ИИС ТФС материалов.

На основе структурной схемы компонентов информационного обеспечения (рис. 3.1) создана база знаний ИИС ТФС материалов.

3.1.2. Фреймовая модель представления знаний в ИИС ТФС материалов

База знаний ИИС ТФС теплоизоляционных материалов содержит необходимую априорную и апостериорную информацию, необходимую для измерения и контроля параметров ТФС материалов в рассматриваемой предметной области, метрологического анализа результатов измерений, принятия решения от момента идентификации исследуемого материала до получения конечного результата.

В базе знаний формируется и хранится информация о классах материалов (диапазонах коэффициентов тепло- и теплопроводности материалов, плотности, теплоемкости и др.), режимных параметрах измерительной ситуации, допустимых значениях режимных параметров, методах неразрушающего контроля ТФС материалов и их параметрах, методах метрологического анализа, аппроксимирующих зависимостях для проведения коррекции влияния дестабилизирующих факторов (температура окружающей среды, влажность) на структурные компоненты ИИС и другая информация.

База знаний является важной составляющей информационной части ИИС, которая имеет организованное иерархическое структури-

рование и состоит из единой системы связанных между собой фреймов. Фреймы базы знаний содержат слоты, включающие не только конкретные значения содержащихся параметров, свойств исследуемых материалов, но и названия процедур, по которым возможно получить данные значения, следуя заданному алгоритму.

В настоящее время фреймы являются активной и перспективной используемой формой представления знаний благодаря своей универсальности и гибкости [114]. Фрейм в любом виде – это минимально необходимая информация, которая точно определяет класс исследуемого материала. Структурная единица фрейма называется слотом, а фрейм с заполненными слотами называется фреймом-экземпляром.

База знаний ИИС ТФС материалов включает:

- сведения об исследуемых материалах;
- исходные данные, такие как температура окружающей среды, влажность в помещении;
- математические модели, позволяющие определить информацию на выходе структурных компонентов ИИС, и аппроксимирующие зависимости, по которым проводится коррекция на влияние дестабилизирующих факторов;
- информацию о допустимых значениях результатов измерения на выходе структурных компонентов измерительного канала ИИС и определяемых параметрах ТФС материалов;
- информацию о методах определения параметров ТФС материалов, методах метрологического обеспечения, определения погрешностей измерения, допустимых значениях погрешностей измерения;
- сведения о режимных параметрах проведения теплофизических измерений;
- сведения об алгоритмическом и реализующем его программном обеспечении.

Предлагается структура фреймовой модели базы знаний ИИС ТФС материалов, которая представлена на рис. 3.3.



Рис. 3.3. Структурная схема фреймовой модели представления базы знаний ИИС ТФС теплоизоляционных материалов

В базе знаний представлены структуры фреймов «Дестабилизирующие факторы», «Исследуемые материалы», «Режимные параметры», «Алгоритмическое обеспечение», «Программное обеспечение».

Фрейм-экземпляр «Исследуемые материалы» содержит информацию о структуре, плотности, коэффициентах тепло- и температуропроводности исследуемых материалов. Фрейм-экземпляр «Дестабилизирующие факторы» включает данные о диапазонах изменения температуры и влажности окружающей среды в помещении. Фрейм «Режимные параметры» содержит информацию о параметрах мощности теплового воздействия линейным нагревателем на исследуемый материал, длительности и скважности импульсов теплового воздействия, их количестве. На рисунке 3.4 представлена структура фрейма «Алгоритмическое обеспечение».

Фрейм-экземпляр «Алгоритмическое обеспечение» включает в себя слоты «Математические модели», «Аппроксимирующие зависимости», «Метод определения параметров ТФС материалов», «Метрологический эксперимент».

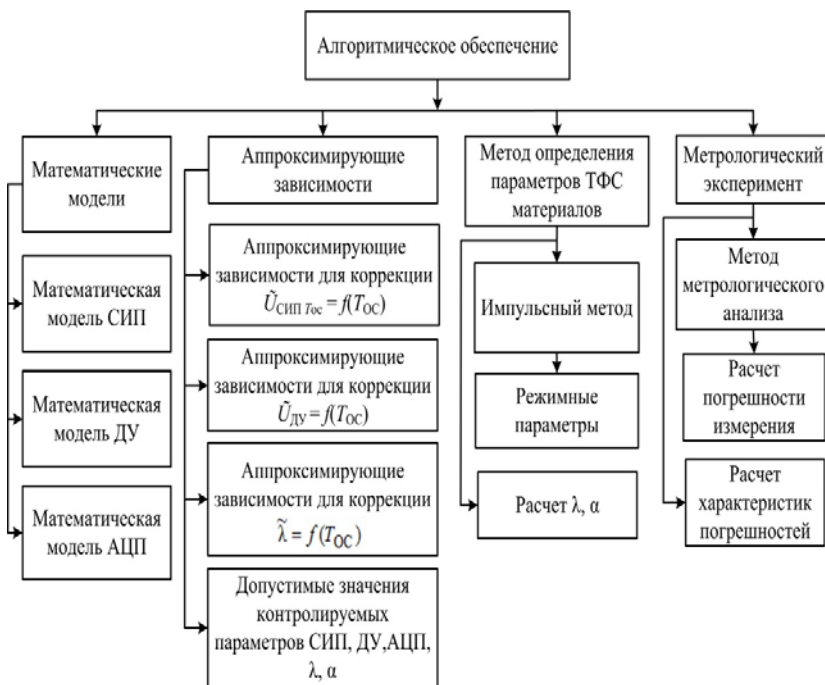


Рис. 3.4. Структура фрейма «Алгоритмическое обеспечение»

Слот «Математические модели» включает в себя математические модели преобразования измерительной информации структурных компонентов ИК ИИС: термопар (СИП), дифференциального усилителя, АЦП с рассчитанными значениями параметров аналого-цифрового преобразования измерительных сигналов с выхода ДУ.

Слот «Аппроксимирующие зависимости» включает аппроксимирующие зависимости, по которым реализован алгоритм коррекции технического несовершенства структурных компонентов измерительного канала ИИС ТФС материалов, если в процессе измерения контролируемые параметры измерительного канала ИИС не принадлежат к области их допустимых значений.

Слот «Метод определения параметров ТФС материалов» состоит из слотов «Импульсный метод», «Режимные параметры», «Расчет коэффициентов тепло- и температуропроводности». Слот «Импульсный метод» включает информацию о режимных параметрах реализации нестационарного импульсного метода контроля параметров ТФС исследуемых теплоизоляционных материалов. Слот «Метрологический эксперимент» содержит информацию о методах метрологического анализа, математические зависимости для расчета погрешностей и характеристик погрешностей с использованием экспериментальных данных при определении коэффициентов тепло- и температуропроводности теплоизоляционных материалов.

Информация о структуре системы хранится в базе знаний в виде фрейма-образца. На их основании формируются фреймы-экземпляры, предназначенные для отражения фактических знаний, опираясь на поступающие знания. Представление информации осуществляется путем простого назначения слотам фрейма возможных измерительных ситуаций (табл. 3.1 – 3.4).

В процессе измерения полученная измерительная информация корректируется, в результате чего повышается ее достоверность. Для некоторых информационных параметров выделена функциональная возможность опроса пользователя для дополнительного контроля качества полученной измерительной информации.

Созданная структура фреймовой модели базы знаний ИИС ТФС теплоизоляционных материалов содержит необходимую информацию в виде фреймов-экземпляров, которая используется для реализации алгоритма функционирования ИИС и составляет основу для построения информационной модели базы знаний ИИС.

3.1. Фрейм-образцы для исследуемых теплоизоляционных материалов

Имя слота	Размерность	Значение		
		ПММ	Рипор	Войлок
Температура	°С	20	20	20
Влажность	%	10	10	10
Теплоемкость	ккал/(кг·°С)	0,42	0,15	0,45
Плотность	кг/м ³	1180	30	150
Измеренное значение теплопроводности	Вт/(м·К)	0,195	0,028	0,08
Измеренное значение температуропроводности	10 ⁻⁷ ·м ² /с	1,09	4,61	4,65
Допустимое значение теплопроводности	Вт/(м·К)	(0,1872... 0,2028)	(0,02688... 0,02912)	(0,0768... 0,0832)
Допустимое значение температуропроводности	10 ⁻⁷ ·м ² /с	(1,0464... 1,1136)	(4,4256... 4,7944)	(4,464... 4,836)
Допустимое значение погрешности измерения	%	0...4	0...4	0...4
Температура	°С	20	30	25
Влажность	%	10	–	15
Теплоемкость	ккал/(кг·°С)	0,16	0,45	–
Плотность	кг/м ³	300	1100	125
Измеренное значение теплопроводности	Вт/(м·К)	0,04	0,14	0,038
Измеренное значение температуропроводности	10 ⁻⁷ ·м ² /с	3,93	3,2	7,28

Имя слота	Размерность	Значение		
		ПММ	Рипор	Войлок
Допустимое значение теплопроводности	Вт/(м·К)	(0,0384... 0,0416)	(0,1344... 0,1456)	(0,03648... 0,03952)
Допустимое значение температуропроводности	$10^{-7} \cdot \text{м}^2/\text{с}$	(3,7728... 4,0872)	(3,072... 3,328)	(6,9888... 7,5712)
Допустимое значение погрешности измерения	%	0...4	0...4	0...4

3.2. Значения слотов «Аппроксимирующие зависимости СИП», «Допустимые значения» – Фрейм «Алгоритмическое обеспечение»

Слот «Аппроксимирующие зависимости СИП»		Слот «Допустимые значения»	
Значения выходного напряжения системы измеряемых преобразователей $U_{СИП}$ (мВ)	Зависимости $U_{СИП} = f(T_{OC})$ при $T_{OC} = [10...40] \text{ } ^\circ\text{C}$	Допустимые значения выходного напряжения системы измеряемых преобразователей $U_{СИП \text{ доп}}$ при корректировке по аппроксимирующим функциям (мВ)	Допустимые значения выходного напряжения усилителя $U_{УС \text{ доп}}$ при корректировке по аппроксимирующим функциям (мВ)
[0; 0,05)	$U_{СИП \text{ } T_{OC}} = 6,56 \times 10^{-2} T_{OC} - 0,01$	[0,6532; 2,6332)	[640,1; 2580,5)
(0,05; 0,15]	$U_{СИП \text{ } T_{OC}} = 6,56 \times 10^{-2} T_{OC} + 0,09$	(0,7143; 2,6943]	(700; 3640,4]

Слот «Аппроксимирующие зависимости СИП»		Слот «Допустимые значения»	
(0,15; 0,25]	$U_{СИП T_{OC}} = 6,56 \cdot 10^{-2} T_{OC} + 0,19$	(0,7751; 2,7752]	(759,6; 2700,06]
(0,25; 0,35]	$U_{СИП T_{OC}} = 6,56 \cdot 10^{-2} T_{OC} + 0,288$	(0,8360; 2,8160]	(819,32; 2759,72]
(0,35; 0,45]	$U_{СИП T_{OC}} = 6,56 \cdot 10^{-2} T_{OC} + 0,39$	(0,8968; 2,8768]	(878,86; 2819,26]
(0,45; 0,55]	$U_{СИП T_{OC}} = 6,56 \cdot 10^{-2} T_{OC} + 0,49$	(1,0188; 2,9988]	(938,1; 2878,5]
(0,55; 0,65]	$U_{СИП T_{OC}} = 6,56 \cdot 10^{-2} T_{OC} + 0,59$	(1,080; 3,060]	(998,4; 2938,82]
(0,65; 0,75]	$U_{СИП T_{OC}} = 6,56 \cdot 10^{-2} T_{OC} + 0,69$	(1,141; 3,121]	(1058,4; 2998,84]
(0,75; 0,85]	$U_{СИП T_{OC}} = 6,56 \cdot 10^{-2} T_{OC} + 0,789$	(1,202; 3,1819]	(1118,34; 3058,74]
(0,85; 0,95]	$U_{СИП T_{OC}} = 6,56 \cdot 10^{-2} T_{OC} + 0,88$	(1,2621; 3,2421]	(1177,88; 3118,28]
(0,95; 1,05]	$U_{СИП T_{OC}} = 6,56 \cdot 10^{-2} T_{OC} + 0,99$	(1,324; 3,3039]	(1236,88; 3177,28]
(1,05; 1,15]	$U_{СИП T_{OC}} = 6,56 \cdot 10^{-2} T_{OC} + 1,09$	(1,3851; 3,3651]	(1297,44; 3237,84]

Слот «Аппроксимирующие зависимости СИП»		Слот «Допустимые значения»	
(1,15; 1,25]	$U_{СИП\ T_{OC}} = 6,56 \cdot 10^{-2} T_{OC} + 1,19$	(1,4458; 3,4258]	(1357,46; 3297,86]
(1,25; 1,35]	$U_{СИП\ T_{OC}} = 6,56 \cdot 10^{-2} T_{OC} + 1,29$	(1,5068; 3,4868]	(1416,88; 3357,28]
(1,35; 1,45]	$U_{СИП\ T_{OC}} = 6,56 \cdot 10^{-2} T_{OC} + 1,39$	(1,5672; 3,5471]	(1476,66; 3417,06]
(1,45; 1,55]	$U_{СИП\ T_{OC}} = 6,56 \cdot 10^{-2} T_{OC} + 1,49$	(1,6292; 3,6091]	(1535,85; 3476,24]
(1,55; 1,65]	$U_{СИП\ T_{OC}} = 6,56 \cdot 10^{-2} T_{OC} + 1,59$	(1,6901; 3,6701]	(1596,58; 3536,98]
(1,65; 1,75]	$U_{СИП\ T_{OC}} = 6,56 \cdot 10^{-2} T_{OC} + 1,69$	(1,751; 3,7309]	(1656,36; 3596,76]
(1,75; 1,85]	$U_{СИП\ T_{OC}} = 6,56 \cdot 10^{-2} T_{OC} + 1,79$	(1,751; 3,7309]	(1715,9; 3656,3]
(1,85; 1,95]	$U_{СИП\ T_{OC}} = 6,56 \cdot 10^{-2} T_{OC} + 1,88$	(2,5478; 3,7878]	(1771,74; 3712,14]
(1,95; 2,0]	$U_{СИП\ T_{OC}} = 6,56 \cdot 10^{-2} T_{OC} + 1,98$	(1,872; 3,852]	(1834,87; 3775,26]

**3.3. Значения слота «Математические модели» –
Фрейм «Алгоритмическое обеспечение»**

Имя слота	Математические модели	Допустимые значения погрешности, %
Система измерительных преобразователей	$U_{СИП} = 2,71 \cdot 10^{-5}(T)^2 + 0,04T + 0,005 + \Delta U_{СИП}$	0...1,5
Дифференциальный усилитель	$U_{yc}(T) = U_{СИП} \cdot 980 + 0,61$	0...0,61
Аналого-цифровой преобразователь	$K_{АЦП}(T) = \left(\frac{U_{yc}(T) = (U_{yc} uL)}{h} \right) + \delta K_{АЦП}$	0...0,4

**3.4. Значения слотов «Аппроксимирующие зависимости ДУ»,
«Аппроксимирующие зависимости для коррекции λ» –
Фрейм «Алгоритмическое обеспечение»**

Имя слота	Материал	Значение
Слот «Аппроксимирующие зависимости ДУ»	ПММ	$\tilde{U}_{ДУ} = -0,15 \cdot 10^{-2}(T_{OC})^2 + 0,125T_{OC} - 1,28$
	Рипор	$\tilde{U}_{ДУ} = -0,24 \cdot 10^{-2}(T_{OC})^2 + 0,19T_{OC} - 2,35$
	Минвата полужесткая	$\tilde{U}_{ДУ} = -0,18 \cdot 10^{-2}(T_{OC})^2 + 0,15T_{OC} - 1,64$
	Войлок	$\tilde{U}_{ДУ} = -0,17 \cdot 10^{-2}(T_{OC})^2 + 0,14T_{OC} - 1,51$
	Линолеум	$\tilde{U}_{ДУ} = 0,13 \cdot 10^{-2}(T_{OC})^2 - 5,51 \cdot 10^{-2}T_{OC} + 0,83$
	Пенопласт	$\tilde{U}_{ДУ} = -0,19 \cdot 10^{-2}(T_{OC})^2 + 0,19T_{OC} - 2,13$

Имя слота	Материал	Значение
Слот «Аппроксимирующие зависимости для коррекции λ »	ПММ	$\tilde{\lambda} = 3,35 \cdot 10^{-8}(T_{OC})^3 + 1,203 \cdot 10^{-6}(T_{OC})^2 +$ $+ 2,28 \cdot 10^{-4}T_{OC} + 0,19;$ $\tilde{\alpha} = f(T_{OC}) = 0,56 \cdot 10^{-15}(T_{OC})^3 -$ $- 1,12 \cdot 10^{-13}(T_{OC})^2 + 0,71 \cdot 10^{-11}T_{OC} +$ $+ 1,14 \cdot 10^{-7}$
	Рипор	$\tilde{\lambda} = 2,77 \cdot 10^{-8}(T_{OC})^3 + 7,59 \cdot 10^{-8}(T_{OC})^2 +$ $+ 7,79 \cdot 10^{-4}T_{OC} + 0,025;$ $\tilde{\alpha} = f(T_{OC}) = 3,54 \cdot 10^{-15}(T_{OC})^3 +$ $+ 9,93 \cdot 10^{-15}(T_{OC})^2 + 5,72 \cdot 10^{-12}T_{OC} +$ $+ 4,71 \cdot 10^{-7}$
	Минвата полужесткая	$\tilde{\lambda} = -3,310 \cdot 10^{-8}(T_{OC})^3 +$ $+ 1,843 \cdot 10^{-7}(T_{OC})^2 + 2,64 \cdot 10^{-4}T_{OC} +$ $+ 0,039;$ $\tilde{\alpha} = f(T_{OC}) = 1,34 \cdot 10^{-16}(T_{OC})^3 +$ $+ 4,94 \cdot 10^{-14}(T_{OC})^2 - 1,16 \cdot 10^{-12}T_{OC} +$ $+ 4,04 \cdot 10^{-7}$
	Войлок	$\tilde{\lambda} = -2,17 \cdot 10^{-8}(T_{OC})^3 -$ $2,30 \cdot 10^{-6}(T_{OC})^2 + 2,11 \cdot 10^{-4}T_{OC} + 0,08;$ $\tilde{\alpha} = f(T_{OC}) = 7,17 \cdot 10^{-15}(T_{OC})^3 -$ $- 4,55 \cdot 10^{-13}(T_{OC})^2 + 8,63 \cdot 10^{-11}T_{OC} +$ $+ 4,81 \cdot 10^{-7}$
	Линолеум	$\tilde{\lambda} = -5,56 \cdot 10^{-9}(T_{OC})^3 + 2,91 \cdot 10^{-7}(T_{OC})^2 +$ $+ 2,20 \cdot 10^{-4}T_{OC} + 0,048;$ $\tilde{\alpha} = f(T_{OC}) = 6,69 \cdot 10^{-15}(T_{OC})^3 -$ $- 4,31 \cdot 10^{-13}(T_{OC})^2 + 8,71 \cdot 10^{-11}T_{OC} + 3,32 \cdot 10^{-7}$

Имя слота	Материал	Значение
Слот «Аппроксимирующие зависимости для реакции λ »	Пенопласт	$\tilde{\lambda} = 3,01 \cdot 10^{-8} (T_{OC})^3 + 6,98 \cdot 10^{-8} (T_{OC})^2 + 8,01 \cdot 10^{-4} T_{OC} + 0,036;$ $\tilde{\alpha} = f(T_{OC}) = 9,24 \cdot 10^{-15} (T_{OC})^3 - 6,61 \cdot 10^{-13} (T_{OC})^2 + 5,94 \cdot 10^{-11} T_{OC} + 7,29 \cdot 10^{-7}$

Информационное обеспечение ИИС ТФС материалов осуществляется с использованием созданной базы знаний и базы данных. В базе знаний хранятся процедурные правила в виде фреймов, использующиеся при реализации алгоритмического обеспечения ИИС. Статическая модель базы знаний в виде диаграммы классов [115, 116], созданной на основе стандарта UML, показана на рис. 3.5.

UML (Unified Modeling Language) [115, 116] применяется для проектирования, визуализации и документирования программного обеспечения информационных систем, разработанных с использованием объектно-ориентированного подхода. UML – это именно язык, а не метод, особенностью которого является то, что словарь языка образуют графические элементы. Каждому графическому символу соответствует конкретная семантика, поэтому модель, созданная одним разработчиком, может однозначно быть понята другим, а также программным средством, интерпретирующим UML.

Фреймы классов применяются в процессе функционирования программных модулей системы. Модуль дестабилизирующих факторов использует фрейм frmDF, содержащий фреймы: температура окружающей среды (frmTemp), влажность окружающей среды (frmWet), позволяющие определить условия проведения измерения. Модуль исследуемого материала (frmMaterials) в зависимости от вида материала (frmTypeMat) позволяет определить допустимые значения коэффициентов ТФС материалов (frmDopusk): теплопроводности (frmDopTemp) и температуропроводности (frmDopTemp1), используется для сравнения с полученными результатами измерения ИИС НК ТФС теплоизоляционных материалов.

Модуль математических моделей использует фрейм frmMat-Models, содержащий фреймы, представляющие процесс преобразования информации структурных компонентов системы: системы измери-

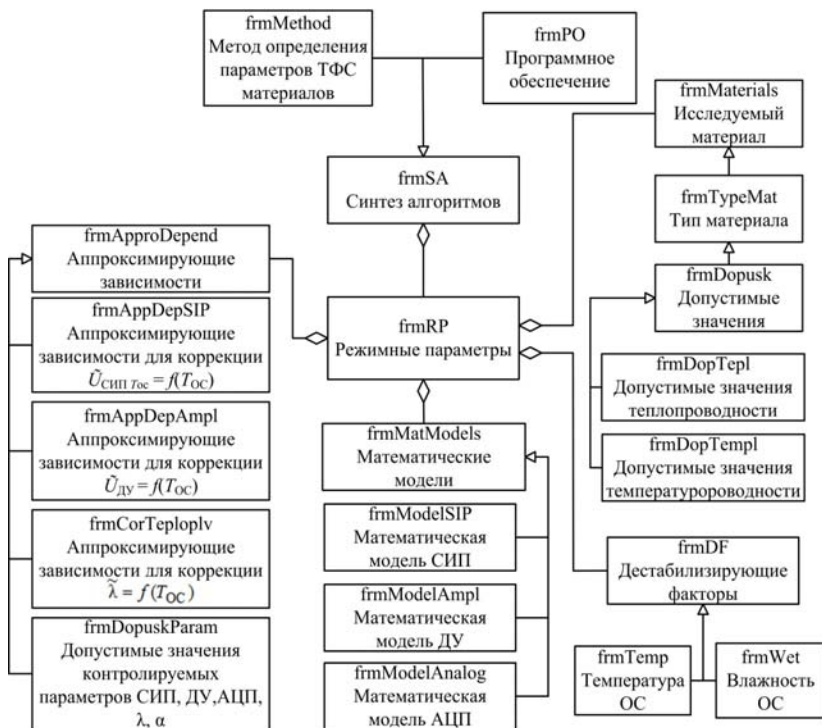


Рис. 3.5. Фреймовая модель представления знаний ИИС ТФС материалов

тельных преобразователей (*frmModelSIP*), дифференциального усилителя (*frmModelAmpl*), аналого-цифрового преобразователя (*frmModelAnalog*).

Модуль аппроксимирующих зависимостей (*frmApproDepend*) содержит аппроксимирующие зависимости СИП (*frmAppDepSIP*), ДУ (*frmAppDepAmpl*), аппроксимирующие зависимости для коррекции λ (*frmCorTempIv*) и фрейм допустимых значений контролируемых параметров (*frmDopuskParam*), используется для реализации коррекции технического несовершенства структурных компонентов ИИС ТФС материалов.

Модуль синтеза алгоритмов использует фрейм *frmSA*, содержащий фрейм метода определения параметров ТФС материалов (*frmMethod*) и фрейм программного обеспечения (*frmPO*), позволяет повысить точность определения параметров ТФС материалов – коэффициентов тепло- и температуропроводности.

Предложенная структура фреймовой модели базы знаний ИИС ТФС материалов применяется в ИИС ТФС материалов при проведении теплофизических измерений, реализации при этом созданного метода повышения точности ИИС и алгоритма технического несовершенства структурных компонентов ИК ИИС: введения поправок в результаты их измерений с использованием допустимых для них значений и в результаты определения коэффициентов тепло- и температуропроводности, указанных в соответствующих слотах фреймов базы знаний ИИС ТФС теплоизоляционных материалов.

3.2. КОМПЛЕКСНАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СОЗДАНИЯ ИИС ТФС МАТЕРИАЛОВ

Для обеспечения качества выпускаемых материалов и изделий необходимо точное определение их теплофизических свойств с использованием информационно-измерительных систем [117]. Создана комплексная математическая модель ИИС ТФС материалов с учетом дестабилизирующих факторов, включающая модели структурных компонентов ИИС, информационного обмена составляющих моделей и ДФ, позволяющая повысить точность определения параметров ТФС материалов.

Проведенные экспериментальные исследования, информация пользователя и эксперта об исследуемых материалах, оценка алгоритма функционирования ИИС и стратегических данных результатов измерения выходных параметров – коэффициентов тепло- и температуропроводности позволили создать комплексную математическую модель ИИС ТФС материалов.

Комплексная математическая модель ИИС ТФС материалов ($M_{\text{ИИС}}$) включает модели: информационного обмена (ИНО) ($M'_{\text{ИНО}}$), метрологического обеспечения (МО) ($M'_{\text{МО}}$), дестабилизирующих факторов ($M'_{\text{ДФ}}$), измерительного зонда ($M'_{\text{ИЗ}}$) и переносного вычислительного блока ($M'_{\text{ПВБ}}$):

$$M_{\text{ИИС}} = \{M'_{\text{ПВБ}}, M'_{\text{ИЗ}}, M'_{\text{ДФ}}, M'_{\text{МО}}, M'_{\text{ИНО}}\}.$$

Перечисленные модели состоят из множеств компонентов ИИС, метрологического и информационного обеспечений, воздействующих ДФ и представлены в виде следующих кортежей:

1. Модель переносного вычислительного блока

$$M'_{\text{ПВБ}} = \{V_{\text{КФ}}, V_{\text{П}}, V_{\text{мех}}, V_{\text{АЦП}}, V_{\text{ТР}}\},$$

где $V_{\text{КФ}} = \{V_{T_{\text{ОС}}}, V_P, V_W\}$ – множество климатических факторов (температура окружающей среды $T_{\text{ОС}}$, давление V_P , влажность V_W); $V_{\text{П}} = \{V_{\text{Э}}, V_{\text{Ш}}, V_{\text{ИЭ}}, V_{\text{ИМ}}\}$ – множество внешних и внутренних помех (помехи, связанные с нестабильностью электропитания, шумы от разводки питания, излучение электрического поля, излучение магнитного поля); $V_{\text{Мех}} = \{V_y, V_B, V_{\text{УС}}\}$ – множество механических помех (удары, вибрации, ускорения); $V_{\text{АЦП}} = \{V_{\text{ПП}}, V_{\text{КВ}}, V_{\text{ДВ}}, V_{\text{С}}, V_{\text{Д}}\}$ – множество погрешностей, вносимых аналого-цифровым преобразованием (погрешность преобразования АЦП, погрешность квантования, погрешность дискретизации во времени, погрешность статическая, погрешность динамическая); $V_{\text{ТР}} = \{V_{\text{ПК}}, V_{\text{ППМ}}, V_{\text{ПКЖ}}\}$ – множество факторов, обусловленных нарушением теплового режима ИИС (плотность компоновки, плотность печатного монтажа, плотность жгутовых соединений).

2. Модель интеллектуального измерительного зонда

$$M'_{\text{ИЗ}} = \{Z_{\text{ИМ}}, Z_{\text{КФ}}, Z_{\text{ПИП}}, Z_{\text{Мех}}\},$$

где $Z_{\text{ИМ}} = \{Z_{\text{RT}}, Z_{\text{У}}, Z_{\text{РТ}}, Z_{\text{ИТ}}\}$ – множество факторов, вносимых исследуемыми материалами (контактное сопротивление, шероховатость поверхности ИМ, рассеиваемое тепло с поверхности ИМ, изменение температуры материала при помещении на него термодатчика); $Z_{\text{КФ}} = \{Z_{T_{\text{ОС}}}, Z_P, Z_W\}$ – множество климатических факторов (температура окружающей среды, давление, влажность); $Z_{\text{ПИП}} = \{Z_{\text{ТН}}, Z_{\text{РЭТ}}, Z_{\text{ТПП}}, Z_{\text{ППИП}}, Z_{\text{ПТЭДС}}\}$ – множество факторов, вносимых первичным измерительным преобразователем (теплоемкость нагревателя, расположение элементов термодатчика, тепло, поглощаемое подложкой, погрешность ПИП, паразитные термоЭДС); $Z_{\text{Мех}} = \{Z_y, Z_B, Z_{\text{УС}}\}$ – множество механических помех (удары, вибрации, ускорения).

3. Модель воздействующих дестабилизирующих факторов

$$M'_{\text{ДФ}} = \{D_{\text{ИМ}}, D_{\text{АЦП}}, D_{\text{ИЗ}}, D_{\text{КФ}}, D_{\text{П}}, D_{\text{М}}\},$$

где приведены множества, отражающие ДФ: $D_{\text{ИМ}}$ – вносимые исследуемыми материалами; $D_{\text{АЦП}}$ – из-за АЦП; $D_{\text{ИЗ}}$ – вносимые ИЗ; $D_{\text{КФ}}$ – климатические факторы; $D_{\text{П}}$ – помехи различные; $D_{\text{М}}$ – механические помехи.

4. Модель метрологического обеспечения

$$M'_{\text{МО}} = \{Q_{\text{СМО}}, Q_{\text{МОИ}}, Q_{\text{ОПИ}}, Q_{\text{МХП}}\},$$

где $Q_{\text{СМО}} = \{Q_{\text{Исп}}, Q_{\text{Пов}}, Q_{\text{Атт}}, Q_{\text{К}}\}$ – множество способов метрологического обеспечения (испытание, проверка, аттестация, калибровка); $Q_{\text{МОИ}} = \{Q_{\text{ан}}, Q_{\text{МЭ}}, Q_{\text{ИМ}}\}$ – множество методов обработки информации

(аналитический, метрологического эксперимента, имитационного моделирования); $Q_{\text{ОПИ}} = \{Q_{\text{ос}}, Q_{\text{доп}}, Q_{\text{дин}}\}$ – множество определяемых погрешностей измерения (основная, дополнительная, динамическая); $Q_{\text{МХП}} = \{Q_{\text{МО}}, Q_{\text{СКП}}, Q_{\text{ДИ}}, Q_{\text{ДВ}}\}$ – множество характеристик погрешностей (математическое ожидание, средняя квадратическая погрешность, доверительный интервал, доверительная вероятность).

5. Модель информационного обмена

$$M'_{\text{ИО}} = \{J_{\text{ИП}}, J_{\text{ПМБЗ}}, J_{\text{ПМА}}, J_{\text{ПМПР}}\},$$

где $J_{\text{ИП}} = \{J_{\text{ПВБ}}, J_{\text{ИЗ}}, J_{\text{ДФ}}, J_{\text{МО}}\}$ – множество информационных потоков при обмене информацией (информация с ПВБ, информация с ИЗ, информация о ДФ, информация о метрологическом обеспечении); $J_{\text{ПМБЗ}} = \{J_{\text{ПМПО}}, J_{\text{ПМИС}}, J_{\text{ПМИК}}, J_{\text{ПМИП}}, J_{\text{ПМПР}}, J_{\text{ПМПО}}\}$ – множество программных модулей базы знаний ИИС (предметной области, измерительной ситуации, измерительного канала, измерительной процедуры, принятия решений, метрологического обеспечения); $J_{\text{ПМА}} = \{J_{\text{ПМИЗ}}, J_{\text{ПМПВБ}}, J_{\text{ПМПР}}\}$ – множество программных модулей, реализующих алгоритм функционирования ИИС (измерительного зонда, переносного вычислительного блока, принятия решений); $J_{\text{ПМПР}} = \{J_{\text{ПММИМ}}, J_{\text{ПМПИС}}, J_{\text{ПМКЭ}}\}$ – множество программных модулей, осуществляющих выбор модели исследуемого материала, параметров измерительной ситуации и позволяющих принимать решение о качестве и эффективности ИИС при воздействии ДФ.

Проведена оценка созданной комплексной математической модели ИИС. Аналитическим методом определены доминирующие ДФ, вносящие максимальную погрешность в состав полной погрешности результатов измерения параметров ТФС материалов. Вклад каждого ДФ в общую погрешность для систематической погрешности определяется математическими ожиданиями составляющих компонент. Порядок выделения доминант заключается в следующем. После определения вклада каждой компоненты для вероятностной характеристики $\Delta\theta_i[\Delta\Phi_i]$ случайного фактора $\Delta\Phi_i$ производится их упорядочивание. После этого из рассмотрения исключаются все компоненты с малыми значениями $\Delta\theta_i$, суммарный вклад которых в $\Delta\theta_i[\Delta\Phi_i]$ меньше установленного. Определены основные факторы, дестабилизирующие работу блоков системы, что приводит к погрешности результатов измерения [92].

Работоспособность ИИС и достоверность результатов измерения можно оценить некоторым количественным показателем, в котором сконцентрированы внешние ДФ, влияющие на результаты измерений. Показателем качественной работоспособности ИИС является функциональная надежность, которая используется для повышения достоверности результатов определения ТФС материалов. При воздействии

на ИИС дестабилизирующих факторов вероятность достоверных измерений ($P_{\text{д}}$), определяется следующим образом: $P_{\text{д}} = P_{\text{вф}}P_{\text{вр}}$, где $P_{\text{вф}}$ – вероятность воздействия ДФ, не учтенных алгоритмом измерения; $P_{\text{вр}}$ – вероятность работоспособности ИИС в условиях действия ДФ.

С помощью показательной функции $P_{\text{вф}}$, которая в значительной степени отображает функцию распределения усредненных случайных воздействий на результаты измерения, осуществляется коррекция результатов измерения.

Таким образом, применение комплексной математической модели с учетом воздействующих ДФ на ИИС позволяет повысить точность определения ТФС материалов за счет коррекции входящих в комплексную математическую модель составляющих моделей на основе анализа погрешностей измерений системы и расширить область применения информационно-измерительных системы в результате адаптации комплексной математической модели к рассматриваемой предметной области.

3.3. СТРУКТУРНАЯ СХЕМА ИИС ТФС ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Разработанная ранее структура информационно-измерительной системы ТФС материалов [118] включает следующие основные блоки и устройства: блок обработки, управления и коррекции сигналов (БОУКС), измерительный канал (ИК) и блок питания (БП) [96, 105, 106, 119, 120]. БОУКС выполнен на базе микроконтроллера (МК) и включает устройства коррекции, управления сигналами (УКУС) и принятия решений (УПР), базы данных (БД) и знаний (БЗ), программный модуль (ПМ) и дисплей (Д), который отображает исходные данные – значения температур в заданные моменты времени и определенных точках контроля исследуемого материала, результаты расчетов коэффициентов тепло- и теплопроводности и погрешности измерений λ и α . Основные функции в ИИС выполняет вычислительный блок на базе микроконтроллера PIC18F8720, который характеризуется высоким быстродействием и большой памятью, многоканальным портом параллельного ввода-вывода информации (рис. 3.6).

Измерительный канал состоит из измерительного зонда, включающего систему измерительных преобразователей, состоящую из датчиков температуры (хромель-копелевых термопар), и нагреватель, коммутатора каналов (КК), системы дифференциальных усилителей (СДУ) и аналого-цифрового преобразователя (АЦП) [121].

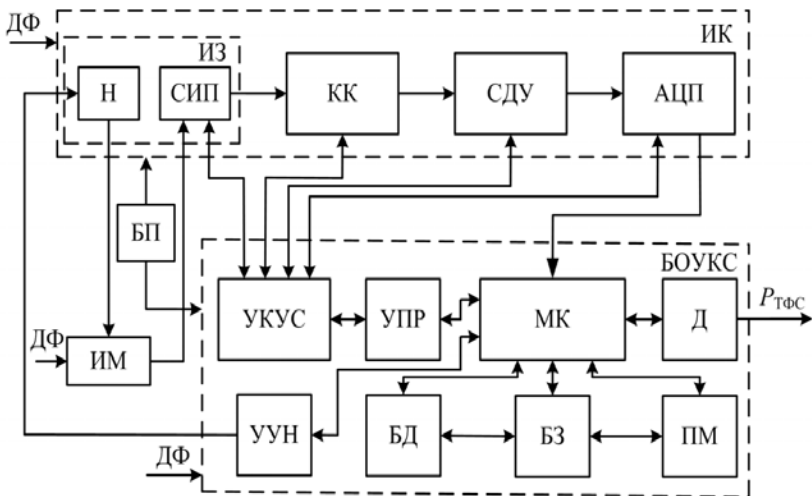


Рис. 3.6. Структурная схема ИИС ТФС материалов

Принцип действия ИИС заключается в импульсном тепловом воздействии линейного нагревателя измерительного зонда на исследуемый материал с последующей регистрацией температурно-временных характеристик в области контакта ИЗ и ИМ, данные которых записываются в базу знаний ИИС и используются для расчета определяемых параметров ТФС материалов [10, 59].

Выходные параметры ИИС ТФС материалов определяются с помощью метода при действии линейного мгновенного источника тепла в плоскости контакта двух полуограниченных тел [49]. При этом процесс распространения тепла на теплоизолированной поверхности полубесконечного в тепловом отношении тела при действии линейного источника тепла описывается решением задачи теплопроводности, которое имеет вид [108]

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

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

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

$$T(x, n) = \frac{QF}{4\pi\lambda} \sum_{i=1}^{n-1} \frac{1}{i} \exp\left(-\frac{x^2}{4\alpha\Delta t i}\right). \quad (3.1)$$

где F – частота формируемых импульсов.

На основе измеренных значений температуры $T(x, n)$ и $T(x, m)$ с использованием зависимости (3.1) определены формулы для расчета коэффициентов тепло- и температуропроводности [122]:

$$\alpha = B_1 \exp\left(B_2 \frac{T_n}{T_m}\right); \quad \lambda = \frac{1}{T_m} B_3 \ln(B_4 \alpha), \quad (3.2)$$

где B_1, B_2, B_3 – калибровочные коэффициенты.

В результате представления измеренных температур T_n и T_m с использованием математической модели АЦП для преобразования аналоговой измерительной информации в цифровой код формулы для расчета коэффициентов тепло- и температуропроводности приведены в следующем виде:

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

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

В программный модуль записаны программы измерения параметров ТФС материалов, коррекции выходных параметров структурных компонентов измерительного канала ИИС на воздействие дестабилизирующих факторов, алгоритмов функционирования ИИС. В базах данных и знаний размещена информация об используемых моделях и алгоритмах в системе, режимных параметрах функционирования ИИС и аппроксимирующих функциях для выполнения процедуры коррекции параметров компонентов измерительного канала и выходных параметров ИИС при влиянии дестабилизирующих факторов.

Структурная схема созданной ИИС ТФС материалов с модулями коррекции, реализующая созданный метод повышения точности ИИС и интеллектуальный алгоритм коррекции технического несовершенства ИИС ТФС теплоизоляционных материалов, представлена на рис. 3.7. На схеме введены следующие обозначения: ПК – персональный компьютер; ИК – измерительный канал; ИЗ – измерительный зонд; СИП – система измерительных преобразователей; ТП₁, ТП₂, ..., ТП_{*i*} – термопары; *i* – число термопар; УК₁, УК₂, УК₃ – устройства коррекции; ДТ_{1ХСТП} – датчик температуры холодных спаев термопары; К₁, К₂, ..., К_{*j*}; *j* – количество каналов передачи информации; КК – коммутатор каналов; СДУ – система дифференциальных усилителей (ДУ); ДУ₁, ДУ₂, ..., ДУ_{*m*}; *m* – число ДУ; ДТ_{1ОС}, ДТ_{2ОС} – датчики температуры окружающей среды; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; *P*_{ТФС} – параметры ТФС материалов; *P*_{дФ} – дестабилизирующие факторы; ИМ – исследуемый материал.

На рисунке 3.7 выделены структурные компоненты, которые разработаны для данной ИИС ТФС теплоизоляционных материалов. Создан интерфейс пользователя с выводом окон, в которых указана последовательность действий по выбору интерактивных технических руководств для работы с ИИС, диапазонов измерений параметров ТФС материалов, методики калибровки системы и др. Модуль алгоритмического обеспечения содержит совокупность математических методов, моделей и алгоритмов, используемых в системе для решения задачи повышения точности и достоверности измерительной информации при определении ТФС материалов. В программный модуль записаны программы алгоритмов функционирования ИИС, измерения параметров ТФС материалов, уравнения процесса измерения, коррекции выходных параметров структурных компонентов измерительного канала ИИС на воздействие дестабилизирующих факторов. Модуль аналого-цифровой

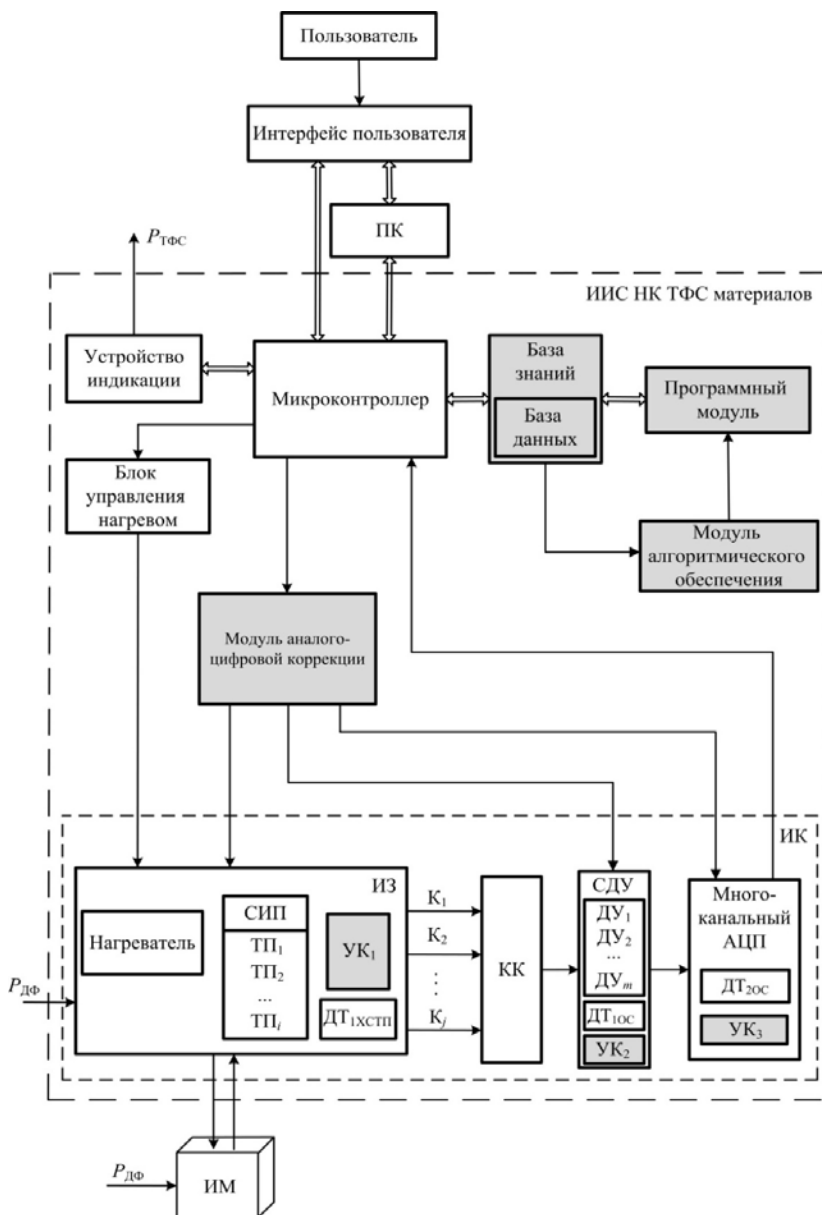


Рис. 3.7. Структурная схема ИИС ТФС теплоизоляционных материалов, реализующая созданный метод повышения точности системы

коррекции реализует функции аналого-цифровой и цифровой схемотехнической коррекции компонентов измерительного канала ИИС. В базах данных и знаний размещена информация об используемых моделях и алгоритмах в системе, режимных параметрах функционирования ИИС и аппроксимирующих функциях для выполнения процедуры коррекции параметров компонентов измерительного канала и выходных параметров ИИС при влиянии дестабилизирующих факторов. Персональный компьютер обрабатывает и хранит экспериментальные данные, принимает решения на основе измерительной информации о проведенных экспериментах и информации базы знаний при синтезе измерительных процедур и представляет выходную информацию о параметрах ТФС материалов в виде, удобном для пользователя [92].

Таким образом, создана структура ИИС ТФС теплоизоляционных материалов, содержащая разработанные модули алгоритмического обеспечения, аналого-цифровой коррекции структурных компонентов измерительного канала ИИС, базы данных и знаний, программного обеспечения, позволяющие реализовать созданный метод повышения точности ИИС и обеспечить требуемую погрешность измерений параметров ТФС теплоизоляционных материалов не более 4%.

3.4 АЛГОРИТМ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ИИС ТФС МАТЕРИАЛОВ С УЧЕТОМ КОРРЕКЦИИ ТЕХНИЧЕСКОГО НЕСОВЕРШЕНСТВА СТРУКТУРНЫХ КОМПОНЕНТОВ СИСТЕМЫ

Воздействующие дестабилизирующие факторы, которые влияют на СИП, дифференциальный усилитель и АЦП, определяют основную погрешность измерения. Алгоритм коррекции позволяет определить принадлежность выходных параметров компонентов ИИС к области допустимых значений в результате обращения к БЗ ИИС для реализации процедуры их сравнения.

Блок-схема алгоритма функционирования [123] ИИС ТФС исследуемых материалов (ИМ) и коррекции ее технического несовершенства приведена на рис. 3.8. В процессе измерения параметров ТФС материалов $P_{\text{ТФС}}$ выполняется проверка принадлежности значений измеряемых выходных значений структурных компонентов измерительного канала ИИС (системы измерительных преобразователей, дифференциального усилителя, аналого-цифрового преобразователя) к области допустимых (доп.) значений. В случае несоответствия измеренных значений на выходе контролируемых структурных компонентов ИК ИИС к данной области проводится их коррекция по аппроксимирующую

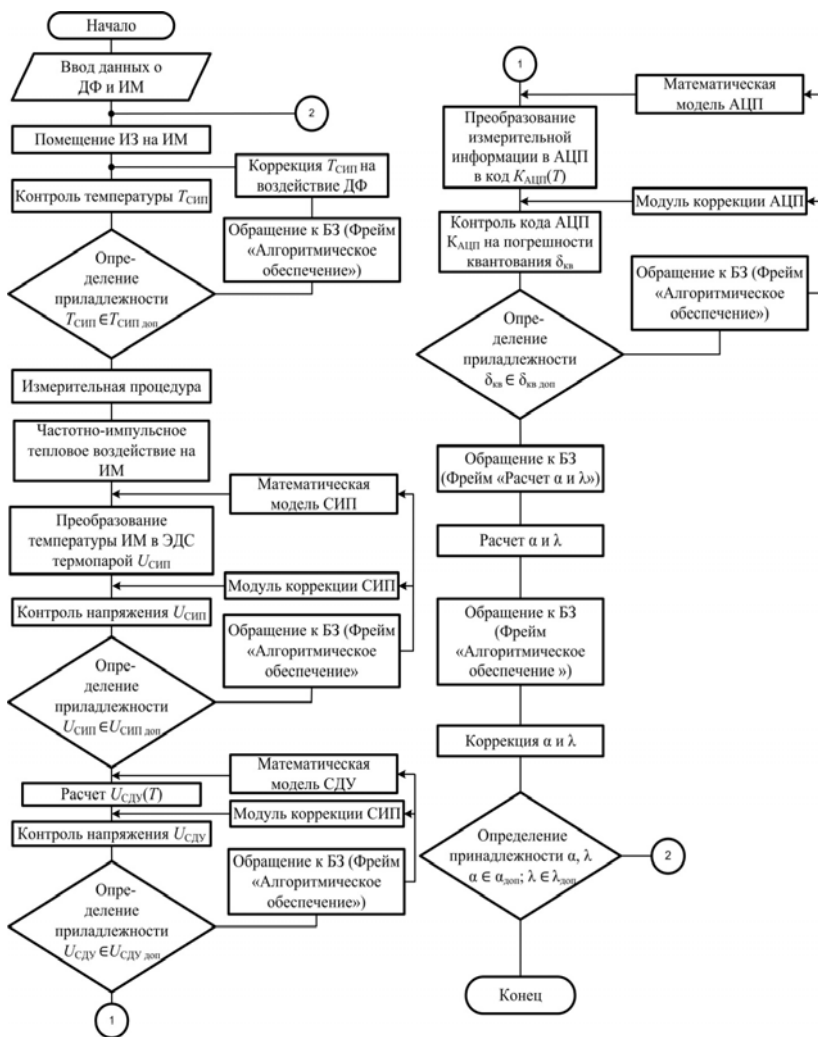


Рис. 3.8. Блок-схема алгоритма функционирования ИИС ТФС материалов и коррекции ее технического несовершенства

щим зависимостям, представленным в БЗ ИИС. Если значения определяемых параметров ТФС – коэффициентов тепло- и температуропроводности (λ , α) не соответствуют допустимым значениям ($\lambda_{доп}$, $\alpha_{доп}$), то также осуществляется их коррекция на воздействие дестабилизирующих факторов по аппроксимирующим зависимостям.

База знаний ИИС содержит информацию для реализации алгоритма функционирования ИИС, математические модели для преобразования измеряемых величин структурными компонентами измерительного канала в процессе измерения и их коррекции при влиянии ДФ, математические зависимости для реализации метода повышения точности ИИС ТФС материалов, расчета коэффициентов тепло- и температуропроводности исследуемых теплоизоляционных материалов и погрешностей их измерения [12].

Из экспериментальных исследований ИИС ТФС материалов следует, что предложенный алгоритм функционирования ИИС и коррекции ее технического несовершенства позволяет повысить точность определяемых параметров ТФС материалов. Как показывают результаты экспериментальных данных по определению коэффициентов тепло- и температуропроводности, относительная погрешность их измерений составляет не более 4%.

Разработанная ИИС ТФС теплоизоляционных материалов внедрена на промышленном предприятии и в учебный процесс вуза для изучения и применения созданных методов повышения точности измерительных средств.

3.5. ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИИС ТФС МАТЕРИАЛОВ

Разработано программное обеспечение информационных измерительных систем ТФС теплоизоляционных материалов. Сформирована информационная среда для разработки ИИС ТФС материалов, на основе которой создано программное обеспечение для реализации в ИИС разработанного алгоритмического обеспечения системы: алгоритма функционирования системы, метода повышения точности ИИС и интеллектуального алгоритма коррекции технического несовершенства структурных компонентов ИИС ТФС теплоизоляционных материалов, метрологического анализа результатов измерений в ИИС [113].

Создан программный модуль для реализации предложенных математических моделей при проектировании ИИС, что позволило повысить точность измерительного канала ИИС ТФС материалов.

Разработано программное обеспечение ИИС на языке программирования C++ при использовании компилятора CCS PCWH [113] для реализации метода и алгоритма коррекции технического несовершенства ИИС ТФС теплоизоляционных материалов.

Программное обеспечение информационных измерительных систем позволяет расширять возможности ИИС, решать задачи повышения их оперативности и точности контроля теплофизических свойств

материалов с учетом коррекции технического несовершенства структурных компонентов системы.

Для этого на промышленных предприятиях ведется пополнение базы данных, идет автоматическая обработка априорной и постаприорной информации о классах измерительных ситуаций. Все это позволяет формировать новые алгоритмы определения ТФС материалов с допустимой погрешностью.

Во время исследования ИИС ТФС материалов собраны сведения о свойствах исследуемых материалов, методах контроля и коррекции параметров ТФС материалов при воздействии ДФ. Эти данные учитывались при разработке программного обеспечения ИИС. При разработке программы функционирования ИИС необходимо реализовать процедуры: определения числа воздействующих на исследуемый материал тепловых импульсов требуемой длительности и скважности, среднеинтегрального значения температуры в области контакта измерительного зонда и исследуемого материала с коррекцией на воздействие ДФ [124, 125].

3.5.1. Описание программы для реализации интеллектуального алгоритма коррекции технического несовершенства ИИС ТФС материалов

При разработке программы для осуществления интеллектуального алгоритма коррекции технического несовершенства ИИС ТФС материалов в программе необходимо реализовать следующие процедуры.

1. Ввод данных значений: температура окружающей среды T_{OC} , вид материала.
2. Расчет выходного напряжения системы измеряемых преобразователей $U_{СИП}$.
3. Коррекция значения $U_{СИП}$ по аппроксимирующим функциям.
4. Сравнение $U_{СИП} \in U_{СИП \text{ доп}}$. Если $U_{СИП} \in U_{СИП \text{ доп}}$, то продолжается контроль следующего параметра. Если нет, то обратиться к базе знаний и продолжать корректировку.
5. Расчет выходного напряжения усилителя $U_{УС}$.
6. Коррекция значения $U_{УС}$ по аппроксимирующим функциям.
7. Сравнение $U_{УС} \in U_{УС \text{ доп}}$.
8. Если $U_{УС} \in U_{УС \text{ доп}}$, то продолжается контроль. Если нет, то обратиться к базе знаний и продолжать корректировку.
9. Определение кода АЦП $K_{АЦП}$.
10. Коррекция кода АЦП $K_{АЦП}$ на погрешность квантования.
11. Сравнение $K_{АЦП} \in K_{АЦП \text{ доп}}$.

12. Если $K_{\text{АЦП}} \in K_{\text{АЦП доп}}$, то продолжается контроль. Если нет, то обратиться к базе знаний и продолжать корректировку.

13. Расчет значения теплопроводности λ и температуропроводности α .

14. Коррекция λ по аппроксимирующим функциям.

15. Если $\lambda \in \lambda_{\text{доп}}$, $\alpha \in \alpha_{\text{доп}}$, то вернуть вызывающей программе результат α , λ . Если нет, то обратиться к базе знаний и продолжать корректировку.

Значения данных измерительной информации на выходе СИП и усилителя измерительного канала ИИС приведены в табл. 3.2.

Для выполнения указанных процедур в данной программе сформирована необходимая информация и записана в созданной базе знаний ИИС теплоизоляционных материалов:

1. Температура окружающей среды $T_{\text{OC}} = [10...40]$ °С.

2. Допустимые значения выходного напряжения системы измерительных преобразователей $U_{\text{СИП доп}}$ и допустимые значения выходного напряжения усилителя $U_{\text{УС доп}}$ при корректировке по аппроксимирующим функциям в результате воздействия ДФ (табл. 3.2).

3. Погрешность квантования АЦП изменяется в интервале $-0,062 \leq \delta_{\text{кв}} \leq 0,062$.

На основе созданных процедур коррекции технического несовершенства ИИС НК ТФС материалов и информации базы знаний ИИС разработана блок-схема программы для реализации интеллектуального алгоритма коррекции технического несовершенства ИИС ТФС теплоизоляционных материалов, приведенная на рис. 3.9.

Созданное программное обеспечение ИИС ТФС материалов позволяет реализовать алгоритм функционирования ИИС и реализацию созданного метода повышения точности ИИС и интеллектуального алгоритма коррекции технического несовершенства ИИС.

Получено свидетельство о регистрации созданной программы [143].

3.6. ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

На основе разработанной архитектуры ИИС ТФС материалов создана интеллектуальная ИИС экологического мониторинга строительных материалов.

В настоящее время проблема охраны окружающей среды является важнейшей и требует непрерывного развития и совершенствования методов и средств экологического контроля. Актуальная задача при

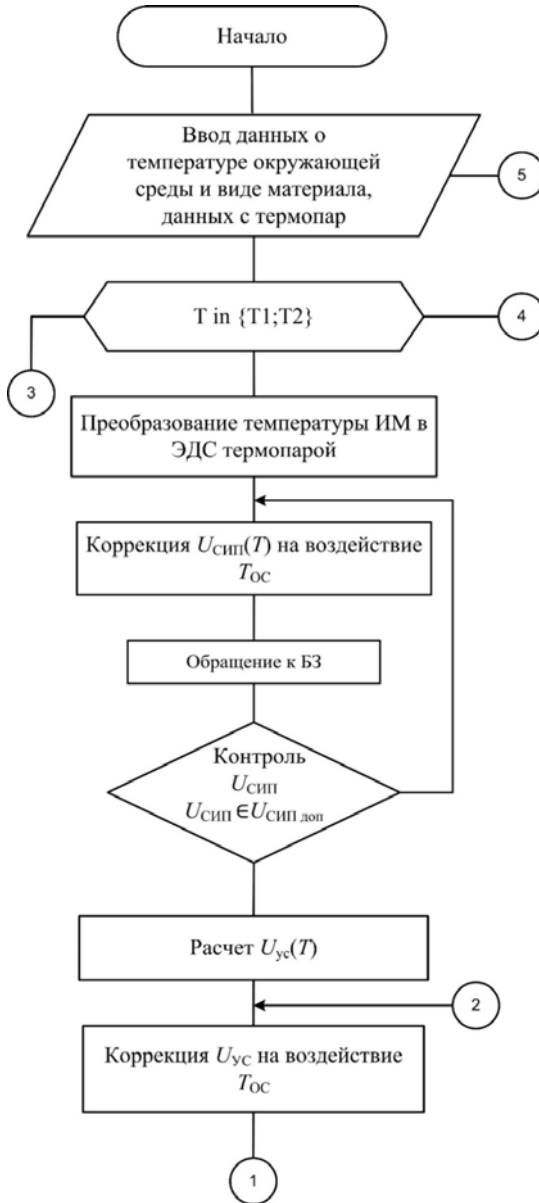


Рис. 3.9. Блок-схема программы для реализации интеллектуального алгоритма коррекции технического несовершенства ИИС ТФС теплоизоляционных материалов

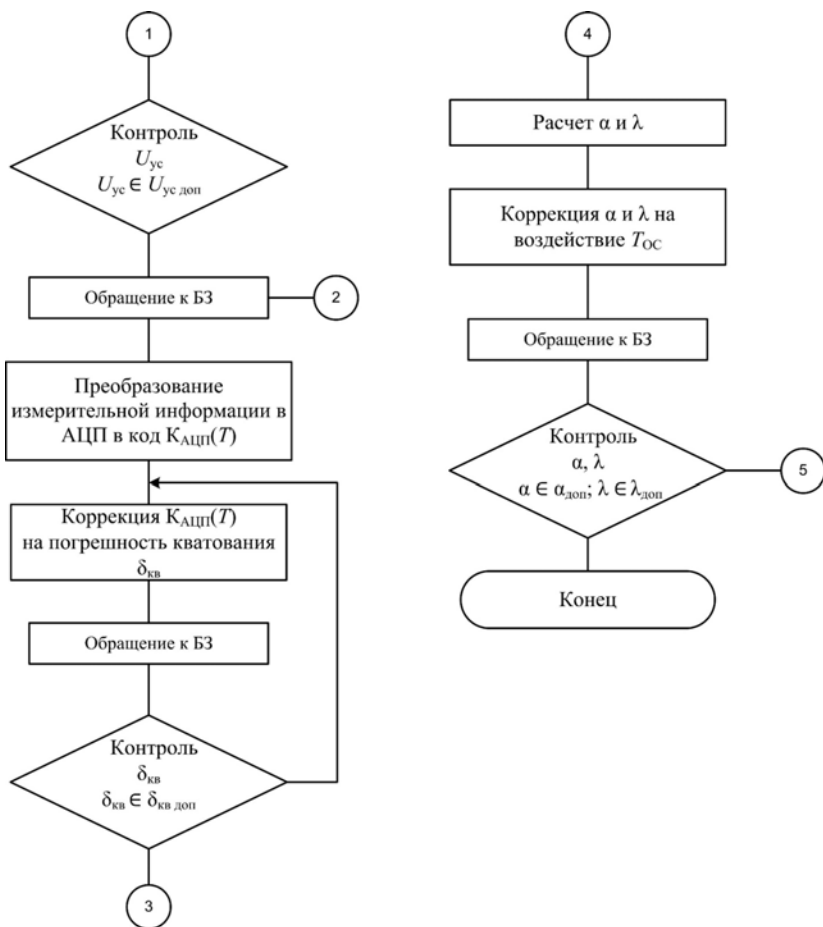


Рис. 3.9. Продолжение

создании чистой экологической среды при нахождении человека в помещении – это применение экологически чистых материалов при строительстве жилых и производственных зданий. Основным направлением решения поставленной задачи является использование чистых технологий при производстве строительных материалов и экологический мониторинг продукции.

Предлагается интеллектуальная информационно-измерительная система экологического мониторинга строительных материалов (ИИИС ЭМСМ), оказывающих негативное влияние на экологическое качество продукции. Разработка ИИИС ЭМСМ основывается на мето-

дологическом базисе ИИИС, функционирующей в условиях неопределенности и рисков и использующей различные виды информации: нечеткую, неполную и неточную, которая представлена в базе данных и знаний системы. Интеллектуальная информационно-измерительная система экологического мониторинга представляет собой распределенную систему контроля экологически важных параметров строительных материалов (СМ), включающую подсистемы обработки и анализа полученной информации об объекте контроля.

В предварительной стадии процесса мониторинга экологических объектов – СМ, решаются задачи:

- классификация объектов контроля с учетом экологических свойств СМ;
- создание концептуальной модели разработки ИИИС ЭМСМ;
- выбор целесообразного метода экологического контроля параметров СМ из разработанных и представленных в базе знаний ИИИС ЭМСМ;
- оценка параметров и свойств СМ на основе поступающей информации в процессе мониторинга на соответствие требованиям и нормам ГОСТа для контролируемого СМ с использованием встроенной в ИИИС подсистемы допускового контроля;
- формирование управляющих воздействий для коррекции режимных параметров технологического процесса изготовления СМ;
- создание структуры ИИИС ЭМСМ.

Рассмотрены виды строительных материалов:

- экологичные – дерево, камень, пробка, каучук, войлок, хлопок, натуральная кожа;
- условно экологичные – кирпич, плитка, черепица, пенобетонные блоки, алюминий;
- неэкологичные – пенопласт, теплоизоляционные плиты, линолеум, виниловые обои, бетон, железобетон.

Неэкологичные материалы имеют следующие негативные свойства: пенопласт выделяет токсическое вещество стирол; теплоизоляционные плиты включают токсические вещества – изоцианты; линолеум и виниловые обои ответственны за содержание в воздухе тяжелых металлов; бетон имеет высокую плотность и прочность, поэтому плохо пропускает воздух, что способствует усилению электромагнитных волн; железобетон в дополнение к перечисленным свойствам бетона экранирует электромагнитные излучения. Рассматриваются два вида экологических свойств СМ: радиационно-экологические (эффективная удельная активность ЕРН и эманулирующая способность материала, т.е. выделение эманации (радона, торона, актинона) из твердых веществ,

содержащих изотопы радия) и эколого-гигиенические (токсичность и канцерогенность). Естественные радионуклиды (ЕРН) – радиоактивные нуклиды, содержащиеся в СМ: радий, торий, калий [126].

Постановка задачи классификации строительных материалов. Априорная информация об исследуемых материалах представлена в виде матрицы [126]

$$A = \begin{pmatrix} q_{11}^{(d_1)}, & q_{12}^{(d_2)}, & \dots, & q_{1m}^{(d_m)} \\ q_{21}^{(d_1)}, & q_{22}^{(d_2)}, & \dots, & q_{2m}^{(d_m)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ q_{N1}^{(d_1)}, & q_{N2}^{(d_2)}, & \dots, & q_{Nm}^{(d_m)} \end{pmatrix},$$

где N – число СМ; q_i – параметр СМ, $i = 1, \dots, N$; d_i – диапазоны m параметров СМ, $i = 1, \dots, m$.

Для представленного множества СМ

$$A = \{O_i, i = 1, \dots, N\},$$

где $O_i = (q_{i1}, q_{i2}, \dots, q_{im})$, а также числа классов СМ k и интервалов значений параметров СМ по k -классам, $[q_{ls}^H, q_{ls}^B]$, $l = 1, \dots, m$, $s = 1, \dots, k$, требуется закрепить ИМ $O_i \in A$ за определенным классом K_1, K_2, \dots, K_k .

Алгоритм решения задачи классификации включает следующие этапы:

а) эксперт определяет k СМ – основных представителей классов O_1, O_2, \dots, O_k ;

б) определяются пороговые значения взвешенного евклидова расстояния для каждого класса: $d_{\text{пор}}^s = \sqrt{\sum_{l=1}^m v_{ls} (q_{ls}^B - q_{ls}^H)^2}$;

$$v_{ls} = \left(\frac{q_{ls}^B - q_{ls}^H}{2} \right)^{-2}; \quad s = 1, \dots, k;$$

в) если взвешенное евклидово расстояние не более $d_{\text{пор}}^s$, то СМ принадлежит к определенному классу, т.е. если

$$d(O_i, O_s) = \sqrt{\sum_{l=1}^m v_{ls} (q_{li} - \bar{q}_{ls})^2} \leq d_{\text{пор}}^s, \text{ то } O_i \in K_s;$$

г) если $\forall s \in \{1, 2, \dots, k\}: d(O_i, O_s) > d_{\text{пор}}^s$, то создается новый класс с $O_{k+1} = O_i$;

д) выполняется построение функции принадлежности нечетких множеств по признакам и классам, т.е. $\mu_{l,s}, l = 1, \dots, m, s = 1, \dots, k$.

Концептуальная модель проектирования ИИИС ЭМСМ [126, 127]. Для решения поставленных задач при разработке ИИИС ЭМСМ приводится описание предметной области исследования, возможных измерительных и информационных ситуаций при экологическом мониторинге СМ на концептуальном уровне. Разработанная концептуальная модель проектирования ИИИС ЭМСМ приведена на рис. 3.10.

Постановка задач выбора метода контроля экологических параметров СМ. Задаются:

– множество сведений об экологических параметрах (ЭП) СМ

$$V_{\text{ЭП}} = \{V_s^{\text{ЭП}}, s = 1, \dots, k\}; \quad (3.3)$$

– множество требований к геометрическим размерам СМ

$$V_{\text{ТР}} = \{V_{\text{н}}^{\text{ТР}}, V_{\text{м}}^{\text{ТР}}, V_{\text{ф}}^{\text{ТР}}\}, \quad (3.4)$$

где $V_{\text{н}}^{\text{ТР}}$ – нормальные размеры ИМ; $V_{\text{м}}^{\text{ТР}}$ – малые размеры ИМ; $V_{\text{ф}}^{\text{ТР}}$ – форма ИМ;

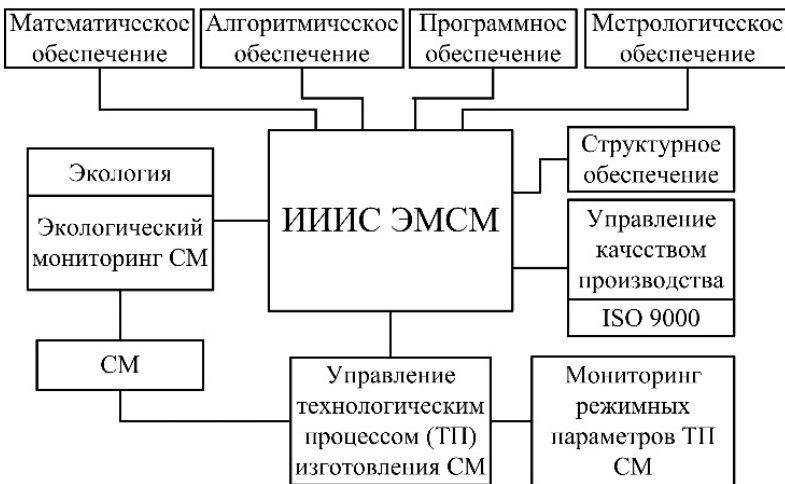


Рис. 3.10. Концептуальная модель проектирования ИИИС ЭМСМ

– множество сведений о дестабилизирующих факторах

$$V_{\text{ДФ}} = \{V_{\text{н}}^{\text{ДФ}}, V_{\text{ср}}^{\text{ДФ}}, V_{\text{в}}^{\text{ДФ}}\}, \quad (3.5)$$

где $V_{\text{н}}^{\text{ДФ}}$ – низкий уровень ДФ; $V_{\text{ср}}^{\text{ДФ}}$ – средний уровень ДФ; $V_{\text{в}}^{\text{ДФ}}$ – высокий уровень ДФ;

– множество уровней определенности (достоверности) информации о СМ

$$V_{\text{ОПР}} = \{V_{\text{ДЕТ}}, V_{\text{НЕОПР}}, V_{\text{НЕЧ}}\}, \quad (3.6)$$

где $V_{\text{ДЕТ}}$ – детерминированная информация; $V_{\text{НЕОПР}}$ – неопределенная информация; $V_{\text{НЕЧ}}$ – нечеткая информация;

– множество методов, которые могут быть использованы ИИИС ЭМСМ:

$$V_{\text{М}} = \{V_i^{\text{М}}, i = 1, \dots, k\},$$

где M_i – i -й метод контроля (МК).

На основе множеств данных (3.3) – (3.6) требуется определить метод контроля $M_{M_i} \in V_{\text{М}}$, соответствующий этим данным. Представленная задача включает частные задачи: создание множества измерительных ситуаций **Н**, разработка модели «измерительная ситуация – метод контроля» (ИС – МК), идентификация измерительной ситуации и выбор метода контроля. Первые две задачи решаются при создании базы знаний ИИИС, две вторые – перед началом проведения измерений. Множество **Н** создается с использованием декартова произведения множеств (3.3) – (3.6):

$$\mathbf{H} = V_{\text{ЭП}} \times V_{\text{ТР}} \times V_{\text{ДФ}} \times V_{\text{ОПР}} = \{h_{i, j, n, m}, i = \overline{1, k}; j \in \{\text{н, м, ф}\}, \\ n \in \{\text{н, ср, в}\}, m \in \{\text{дет, неопр, неч}\}\}$$

Элементы $h_{i, j, n, m}$ множества **Н** – это измерительные ситуации, задаваемые кортежами длины четыре:

$$h_{i, j, n, m} = \langle V_i^{\text{СВ}} \times V_j^{\text{ТР}} \times V_n^{\text{ДФ}} \times V_m^{\text{ОПР}} \rangle.$$

Построение модели ИС – МК предполагает выделение в множестве **Н** k подмножеств $H_i, i = \overline{1, k}$ таких, что для них выполняются условия:

– пересечение любой пары подмножеств $H_i \subset \mathbf{H}$, $H_j \subset \mathbf{H}$ есть пустое множество, т.е.

$$H_i \cap H_j = \emptyset, i, j = \overline{1, k}, i \neq j;$$

– любая измерительная ситуация $h_{i, j, n, m}$ является элементом одного из подмножеств

$$H_i, i = \overline{1, k}, \text{ т.е. } \bigcap_{i=1}^k H_i = \mathbf{H};$$

– для каждого подмножества H_i целесообразно использовать один конкретный метод контроля V_i^M .

В результате такого разделения множества \mathbf{H} разрабатывается модель ИС – МК в форме системы процедурных правил:

если $h_{i, j, n, m} \in H_1$, то использовать метод контроля V_1^M ,

...

если $h_{i, j, n, m} \in H_k$, то использовать метод контроля V_k^M .

Разработанные модели и решаемые задачи при математическом обеспечении ИИИС ЭМСМ определяют архитектуру ИИИС для контроля определенного вида экологических параметров СМ. Структура ИИИС ЭМСМ характеризуется универсальностью в результате применения модульной структуры ИИИС, где каждый модуль структуры формируется в результате интеллектуальной процедуры изменения конфигурации типовой структуры ИИИС. Типовая структура ИИИС ЭМ включает следующие компоненты: базу знаний, содержащую информацию о методах измерения экологических параметров СМ, моделях СМ, измерительных процедурах, аппроксимирующих зависимости для коррекции результатов измерения при влиянии внешних факторов; измерительно-вычислительное устройство на базе микроконтроллера; подсистему измерительных устройств, содержащую датчики контроля экологических параметров для соответствующей структуры ИИИС ЭМСМ. На основе концептуальной модели ИИИС ЭМСМ создана структура ИИИС ЭМСМ, представленная на рис. 3.11.

Разработан алгоритм оценки экологических параметров ($P_{ЭК}$) строительных материалов, реализованный в созданной ИИИС ЭМСМ, содержащий перечень контролируемых экологических параметров ($D_{ЭК}$) исследуемых СМ, допустимые диапазоны их нормируемых значений, указанные в соответствующих ГОСТах.



Рис. 3.11. Структурная схема ИИИС ЭМСМ

Применение созданной ИИИС экологического мониторинга строительных материалов позволит повысить точность экологического контроля параметров СМ и улучшить экологические свойства изготавливаемых СМ.

3.7. ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ТФС МАТЕРИАЛОВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ДЕСТАБИЛИЗИРУЮЩИХ ФАКТОРОВ

Нарушение работоспособности отдельных структурных компонентов измерительного канала информационно-измерительной 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. 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 ИИС ТФС материалов.

На производственных предприятиях при изготовлении теплоизоляционных, композитных, наноматериалов и других, а также изделий из них широко применяются информационно-измерительные системы для измерения параметров теплофизических свойств 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 [105]. Поэтому повышение вероятности безотказной работы информационно-измерительной системы является важной задачей.

Эффективность функционирования ИИС определяет основные характеристики: надежность, быстродействие, достоверность измерительной информации, полнота выполняемых функций, метрологические характеристики. Надежность – важнейшая характеристика ИИС. При оценке надежности учитываются: среднее время восстановления компонентов системы, вероятность восстановления в течение заданного времени, коэффициент готовности системы, средняя наработка системы на отказ, интенсивность отказов, вероятность безотказной работы [128, 129].

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

Среднее время безотказной работы $t_{ср}$ информационно-измерительной системы – основной показатель надежности ИИС. Время $t_{ср}$ зависит от надежности структурных компонентов системы. По методике оценки надежности многокомпонентных систем можно рассчитать $t_{ср}$.

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 PIC18F8720 – $N_{МК} = 175\ 000$ ч.

Проведен расчет вероятностей безотказной работы для ИИС ТФС материалов. При экспоненциальном законе распределения времени до отказа вероятность безотказной работы одного структурного компонента ИИС рассчитывается по следующей формуле [128]:

$$P_i(t) = e^{-\lambda_i t}, \quad (3.7)$$

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

Интенсивность отказов i -го компонента определяется по формуле [128]

$$\lambda_i = \frac{1}{N_i}. \quad (3.8)$$

В соответствии с формулами (3.7) и (3.8) выполнен расчет интенсивности отказов и вероятности безотказной работы структурных компонентов ИИС.

Интенсивность отказов датчика температуры

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

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

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

Интенсивность отказов коммутатора каналов

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

Вероятность безотказной работы коммутатора каналов за 2000 часов

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

Интенсивность отказов дифференциального усилителя

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

Вероятность безотказной работы дифференциального усилителя

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

Интенсивность отказов аналого-цифрового преобразователя

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

Вероятность безотказной работы аналого-цифрового преобразователя

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

Интенсивность отказов блока управления нагревом

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

Вероятность безотказной работы блока управления нагревом

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

Интенсивность отказов микроконтроллера

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

Вероятность безотказной работы микроконтроллера

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

Проведен расчет показателей надежности информационно-измерительной системы 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 [128, 129]:

$$P_{\text{ИИС}}(t) = \prod_{i=1}^{\tilde{n}} P_i(t), \quad (3.9)$$

где \tilde{n} – число последовательно соединенных структурных компонентов ИИС ТФС материалов.

В соответствии с формулой (3.9) вероятность безотказной работы ИИС ТФС материалов

$$P_{\text{ИИС}}(t) = P_{\text{СИП}}(t)P_{\text{КК}}(t)P_{\text{СДУ}}(t)P_{\text{АЦП}}(t)P_{\text{БУН}}(t)P_{\text{МК}}(t);$$

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

Как показывают расчеты, вероятность безотказной работы ИИС за 2000 ч составляет всего 0,77, что является низким показателем в

соответствии с требуемым для данного класса измерительных средств не менее 0,92.

Для повышения надежности системы используют, как правило, два основных метода самоконтроля системы: тестового контроля программным методом и аппаратного контроля. Программный метод тестового контроля использует разработанные тесты для тестируемой системы. При тестовом самоконтроле проверяются компоненты системы, осуществляющие обработку измерительной информации. При аппаратном самоконтроле применяется дополнительная измерительная аппаратура для проверки функционирования структурных компонентов системы.

Для безотказной работы основных структурных компонентов и повышения надежности ИИС предлагается применить в системе элементное резервирование, реализуемое для тех структурных компонентов измерительного канала 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. 3.12). В случае отказа СИП или ДУ автоматически подключается параллельно включенный исправный элемент. Работоспособность СИП и ДУ 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.

Вероятность безотказной работы резервной структуры (РС) компонентов ИИС при их параллельном соединении рассчитывается по следующему выражению [130, 131]:

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

где \bar{m} – число параллельно включенных структурных компонентов ИК ИИС.

Вероятность безотказной работы параллельно включенных компонентов СИП определяется по формуле

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

Вероятность безотказной работы параллельно включенных компонентов ДУ рассчитывается по выражению

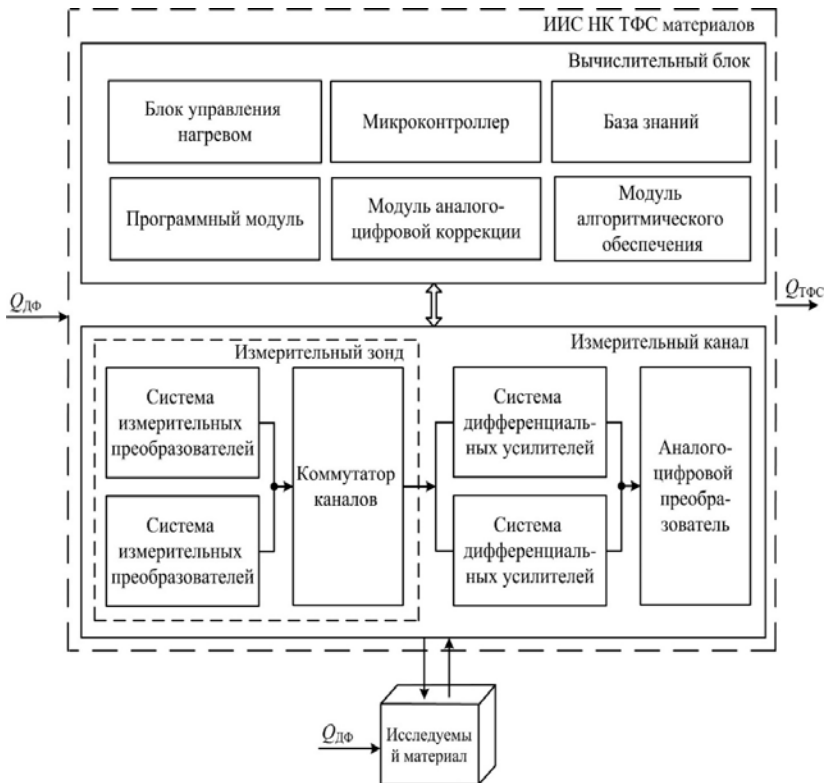


Рис. 3.12. Структурная схема ИИС ТФС материалов с резервированием структурных компонентов

$$P_{PC \text{ сду}}(t) = 1 - \prod_{i=1}^2 (1 - 0,909) = 0,992.$$

Вероятность безотказной работы ИИС ТФС материалов с параллельным резервированием системы измерительных преобразователей – датчиков температуры, и системы дифференциальных усилителей определяется следующим образом:

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

Интенсивность отказов ИИС ТФС материалов с параллельным резервированием определяется по формуле (3.8):

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

Средняя наработка до отказа ИИС 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, при параллельном резервировании структурных компонентов измерительного канала ИИС – системы измерительных преобразователей и системы дифференциальных усилителей, 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 ТФС материалов.

Проведены экспериментальные исследования ИИС ТФС материалов с параллельным резервированием структурных компонентов измерительного канала ИИС – СИП и ДУ. Выполнена обработка результатов измерения и метрологический анализ результатов измерения параметров ТФС твердых материалов информационно-измерительной системой [132]. 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. 3.5

Данные экспериментальных исследований приведены в таблице и позволяют сделать вывод, что точность определения коэффициентов тепло- и температуропроводности λ и α соответствует допустимым значениям для данного класса средств измерений с учетом погрешности метода определения ТФС материалов и изделий.

Таким образом, введение системы параллельного резервирования основных структурных компонентов измерительного канала системы и реализованного в ИИС алгоритма коррекции их технического несовершенства позволило повысить вероятность безотказной работы информационно-измерительной системы параметров теплофизических свойств материалов.

Повышение надежности информационно-измерительной системы обеспечивает достоверность получаемой измерительной информации, точность определяемых параметров теплофизических свойств материалов, что способствует повышению качества при их производстве.

3.5. Эталонные и измеренные значения λ и α материалов, погрешность измерения

Материал объекта	Эталонные значения		Измеренные значения		Относительная погрешность измерения	
	$\alpha \cdot 10^{-7}$, м ² /с	λ , Вт/(м·К)	$\alpha \cdot 10^{-7}$, м ² /с	λ , Вт/(м·К)	δ_{α} , %	δ_{λ} , %
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

3.8. ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРИ РАЗРАБОТКЕ И ЭКСПЛУАТАЦИИ ИИС ТФС МАТЕРИАЛОВ

Проблемы энергосбережения являются актуальными при разработке и применении информационно-измерительных систем теплофизических свойств материалов на производстве, так как важно не только получение качественных материалов, но и решение задачи сокращения энергозатрат [133, 134]. Предлагается методика обеспечения энергосбережения в ИИС: уменьшение токопотребления электронных компонентов, т.е. применение компонентов ИИС (измерительного зонда (ИЗ), дифференциального усилителя (ДУ), аналого-цифрового преобразователя (АЦП), микроконтроллера (МК), жидкокристаллического индикатора (ЖКИ), блока питания (БП)) с меньшим потреблением тока и отключение ИИС от электрической сети при проведении циклических измерений на производстве. При этом решается задача оптимизации сокращения энергопотребления компонентов ИИС при обеспечении точности измерения и алгоритма функционирования ИИС.

На стадии проектирования ИИС определяется аналитическая зависимость энергопотребления структурных компонентов системы [133]

$$W_{\text{ИИС}}(t) = W_i(t) \pm \Delta W_i(t), \quad (3.10)$$

где $W_i(t)$ – потребление энергии компонентами системы, $i \in \{\text{ИЗ, ДУ, АЦП, МК, ЖКИ, БП}\}$; $\Delta W_i(t)$ – установленное потребление электроэнергии компонентами ИИС. Для определения оптимального значения энергопотребления ИИС вводится критерий оптимальности, комплексно учитывающий потери мощности компонентов ИИС и точности контроля ТФС материалов:

$$F(E_{\text{ИИС}}, t) = [v_1 \cdot \Pi_{\text{м}}(t, M, P_{\text{ДФ}}) + v_2 \cdot \Pi_{\text{т}}(t, M)] \rightarrow \min_{t, M}, \quad (3.11)$$

где $E_{\text{ИИС}}$ – энергосбережение в ИИС; t – время; v_1, v_2 – весовые коэффициенты; $\Pi_{\text{м}}$ – потери мощности компонентов ИИС; $\Pi_{\text{т}}$ – потери точности контроля; M – методы определения энергосбережения ИИС; $P_{\text{ДФ}}$ – воздействующие факторы на ИИС.

Получена зависимость энергосбережения $E_{\text{ИИС}}$ при анализе потребляемой мощности используемых компонентов ИИС, приведенная на рис. 3.13.

В настоящее время на предприятиях существует проблема экономии энергетических ресурсов как в процессе производства теплоизоляционных материалов (минеральных плит), так и при определении их теплофизических свойств информационно-измерительными системами [122, 133]. Технологический процесс производства минераловатных плит очень сложен и включает следующие операции: подготовка исходного сырья; составление сырьевой смеси нужного минерального, фракционного состава и влажности; получение расплава смеси; получение минераловатного волокна (обработка, распределение, получение

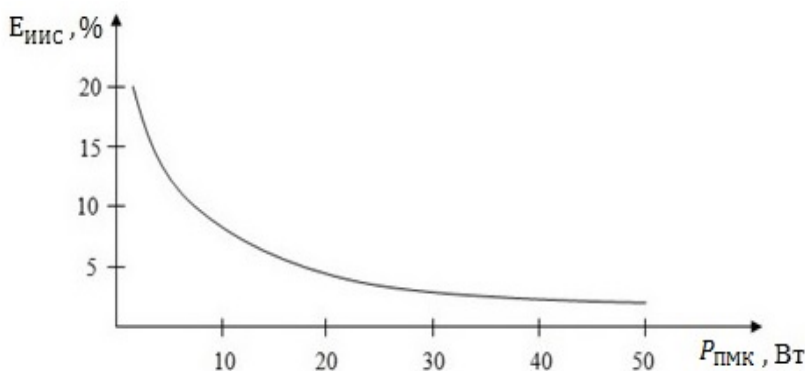


Рис. 3.13. Зависимость энергосбережения ИИС от потребляемой мощности компонентов системы $W_{\text{ИИС}} = f(P_{\text{ПМК}})$

формы волокна); контроль режимных параметров; производство изделий из минераловатного волокна; формирование минераловатных плит с заданной теплопроводностью λ [122].

Анализ процесса производства показывает, что решающее влияние на качество продукции и энергозатраты оказывают следующие процессы – это поддержание требуемой температуры окружающей среды T_{OC} и относительной влажности W в помещении, плавка компонентов (C), получение волокна в центрифуге $S_{ц}$, термообработка (Тер.). С точки зрения энергоэффективности, необходимо использовать частотно-регулируемый привод для управления частотой вращения вентиляторов в устройстве климат-контроля при поддержании необходимого уровня T_{OC} и W . Высокую эффективность с точки зрения экономии энергоресурсов можно получить с применением регулируемого привода для турбин центрифуги ($S_{ц}$ до 7000 об./мин). Подобный путь оптимизации процесса производства позволит увеличить КПД двигателя в момент малых нагрузок до 50%, что приведет к экономии энергии до 10%. При ускоренном проведении физико-химических процессов для получения компонентов (C и Тер.) при плавке и термообработке используются печи с применением парового нагрева, что сопровождается существенным уровнем нагрева (до 1500 °С) и повышенным давлением. Повысить энергоэффективность процесса термообработки и плавки компонентов можно путем замены парового нагрева электрическим нагревом, а также внедрением автоматизированных систем управления процессом термообработки и плавки (более точная регулировка процесса нарастания температуры и давления в печи).

Функциональную зависимость, учитывающую затраты энергии на всех стадиях производства, можно представить в виде аналитической модели

$$W_{E_{п}} = f(W_{BC}, W_C, W_{C_d}, W_{C_{св}}, W_W, W_{T_{OC}}, W_{S_{ц}}, W_{Тер}), \quad (3.12)$$

где $W_{E_{п}}$ – затраты энергии при производстве минват; W_{BC} – затраты энергии при получении сырья требуемой влажности, фракционного и химического состава; W_C – затраты энергии при получении компонентов требуемой концентрации (C); W_{C_d} – затраты энергии при получении модифицирующих добавок нужной концентрации (C_d); $W_{C_{св}}$ – затраты энергии при достижении требуемой концентрации связующего компонента ($C_{св}$); W_W – затраты энергии при поддержании необхо-

димой влажности окружающей среды; $W_{\text{ТОС}}$ – энергозатраты при поддержании температуры окружающей среды; $W_{\text{Тер}}$ – затраты энергии при термообработке; $W_{\text{Сц}}$ – затраты энергии при получении волокна в центрифуге.

Предложенные методика на основе применения аналитической зависимости (3.10), критерий оптимальности (3.11) и модель (3.12) значительно сокращают энергозатраты при контроле параметров технологического процесса производства материалов ИИС ТФС материалов.

Оценка энергосбережения ИИС ТФС материалов выполнена с использованием критерия энергоэффективности системы:

$$K_3 = f(M, W_i, \Delta W_i).$$

Применение предложенных энергосберегающих технологий при разработке и эксплуатации ИИС в результате сокращения затрат энергии позволяет получить энергосбережение до 30%. Достоверность энергосбережения в ИИС и техпроцессе производства теплоизоляционных материалов подтверждена результатами экспериментальных исследований при эксплуатации ИИС ТФС материалов.

Таким образом, при разработке архитектуры ИИС получены следующие результаты:

1. Создано информационное обеспечение ИИС ТФС теплоизоляционных материалов, информационная модель базы данных на основе сбора, хранения, обработки и анализа информации, которые позволяют принимать оперативные решения по извлечению требуемой информации при проектировании и эксплуатации ИИС ТФС материалов.

2. Предложена структура фреймовой модели базы знаний ИИС ТФС материалов применяется в ИИС ТФС материалов при проведении теплофизических измерений, реализации при этом созданного метода повышения точности ИИС и алгоритма технического несовершенства структурных компонентов ИК ИИС: введения поправок в результаты их измерений с использованием допустимых для них значений, и в результаты определения коэффициентов тепло- и температуропроводности, указанных в соответствующих слотах фреймов базы знаний ИИС ТФС теплоизоляционных материалов.

3. Применение созданной комплексной математической модели ИИС с учетом воздействующих ДФ позволяет повысить точность определения ТФС материалов за счет коррекции входящих в комплекс-

ную математическую модель составляющих моделей на основе анализа погрешностей измерений системы и расширить область применения информационно-измерительных систем в результате адаптации комплексной математической модели к рассматриваемой предметной области.

4. Создана структура ИИС ТФС теплоизоляционных материалов, содержащая разработанные модули алгоритмического обеспечения, аналого-цифровой коррекции структурных компонентов измерительного канала ИИС, базы данных и знаний, программного обеспечения, позволяющие реализовать созданный метод повышения точности ИИС и обеспечить требуемую погрешность измерений параметров ТФС теплоизоляционных материалов.

5. Предложен алгоритм функционирования ИИС и коррекции ее технического несовершенства позволяет повысить точность определяемых параметров ТФС материалов. Как показывают результаты экспериментальных данных по определению коэффициентов тепло- и температуропроводности, относительная погрешность их измерений составляет не более 4%.

6. Разработано программное обеспечение ИИС ТФС материалов, реализующее алгоритм функционирования ИИС и созданные методы повышения точности ИИС и интеллектуальный алгоритм коррекции технического несовершенства ИИС. Получено свидетельство о регистрации созданной программы.

7. Применение созданной интеллектуальной ИИС экологического мониторинга строительных материалов позволяет повысить точность экологического контроля их параметров и улучшить экологические свойства изготавливаемых материалов.

8. Выполнена оценка надежности ИИС ТФС материалов при воздействии дестабилизирующих факторов. Как следует из анализа результатов расчетов, при параллельном резервировании структурных компонентов ИК ИИС – системы измерительных преобразователей и системы дифференциальных усилителей, 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 ТФС материалов.

9. Применение предложенных энергосберегающих технологий при разработке и эксплуатации ИИС в результате сокращения затрат энергии позволяет получить энергосбережение до 30%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В монографии представлены результаты начного исследования, которое заключается в повышении точности ИИС ТФС материалов на основе разработанного метода и интеллектуального алгоритма коррекции технического несовершенства структурных компонентов, позволяющих обеспечить допустимую погрешность структурных компонентов измерительного канала и параметров теплофизических свойств теплоизоляционных материалов в результате применения созданных математических моделей для их коррекции в процессе измерения при воздействии дестабилизирующих факторов.

Как показывает анализ существующих информационно-измерительных систем и их технического несовершенства, методов неразрушающего контроля параметров ТФС материалов и повышения точности ИИС, задача исследования возможностей и путей улучшения технических характеристик ИИС (за счет коррекции технического несовершенства ее элементов при математической обработке результатов измерений) является актуальной. Анализ рассмотренных ИИС ТФС материалов позволил установить, что их техническое несовершенство определяют структурные компоненты измерительного канала: первичные измерительные преобразователи, дифференциальные усилители, аналого-цифровой преобразователь. Из результатов анализа известных методов повышения точности ИИС следует, что наиболее приемлемым для ИИС ТФС теплоизоляционных материалов является метод структурной коррекции компонентов измерительного канала ИИС.

Для повышения точности и эффективности функционирования предложены основные направления совершенствования ИИС ТФС материалов:

– разработана математическая модель оценки точности ИИС, устанавливающая зависимость между выходными параметрами точности результатов измерения ТФС материалов и входными параметрами точности, которые вносят погрешность в результаты измерения параметров ТФС;

– разработана математическая модель процесса измерения в измерительном канале ИИС путем декомпозиции ИК на отдельные структурные компоненты и последовательного преобразования измерительной информации в компонентах ИК ИИС с учетом ограничений на допустимые значения полученной измерительной информации на выходе компонентов ИК системы $U_{СИП} \in U_{СИП \text{ доп}}$, $U_{ДУ} \in U_{ДУ \text{ доп}}$, $K_{АЦП} \in K_{АЦП \text{ доп}}$, на погрешности измерений структурных компонентов

ИК ИИС $\delta U_{\text{СИП}} \in \delta U_{\text{СИП доп}}$, $\delta U_{\text{ДУ}} \in \delta U_{\text{ДУ доп}}$, $\delta K_{\text{АЦП}} \in \delta K_{\text{АЦП доп}}$ и с учетом полученных зависимостей влияния температуры окружающей среды T_{OC} на результаты измерения СИП, ДУ и АЦП;

– создана математическая модель ИК ИИС, которая представляет собой описание преобразования линейным стационарным оператором измерительной информации в ИК, поступающей с СИП на усилитель и на вход МК; разработана математическая модель СИП (2.26) и аппроксимирующие зависимости $\tilde{U}_{\text{СИП } T_{\text{OC}}} = f(T_{\text{OC}})$, которые применяются в алгоритме коррекции СИП при воздействии ДФ;

– предложена математическая модель усилителя и аппроксимирующие зависимости $\tilde{U}_{\text{УС } T_{\text{OC}}} = f(T_{\text{OC}})$, которые используются в алгоритме коррекции усилителя при воздействии ДФ;

– разработана математическая модель АЦП (2.37), которая применяется в алгоритме коррекции АЦП при воздействии ДФ.

Адекватность разработанных математических моделей структурных компонентов ИК ИИС подтверждается степенью соответствия цели исследования – повышение точности ИК ИИС ТФС материалов, на основе сравнения данных экспериментальных исследований ИИС при определении коэффициентов тепло- и температуропроводности и полученных при использовании для их определения созданных математических моделей.

Разработан комплексный метод повышения точности информационно-измерительной системы для определения параметров теплофизических свойств материалов, основанный на использовании созданных математических моделей оценки точности функционирования ИИС и измерительного канала, включающих модели оценки точности структурных компонентов системы и точности определяемых параметров – коэффициентов тепло- и температуропроводности. Метод заключается в контроле и коррекции результатов измерения выходных сигналов структурных компонентов ИК на соответствие допустимым значениям и параметров ТФС по аппроксимирующим зависимостям при воздействии дестабилизирующих факторов, полученных аналитическим методом и на основе экспериментальных данных.

Предложен метод повышения точности ИИС ТФС материалов, который основан на известном способе структурной коррекции и заключается в контроле измеренных значений выходных сигналов на выходе структурных компонентов измерительного канала ИИС в процессе измерения параметров ТФС материалов, сравнении их с допустимыми значениями, которые определяются перед каждым измерением по характеристикам преобразования структурных компонентов ИК,

полученным расчетно-экспериментальным методом. Метод повышения точности ИИС позволяет исключить систематические и случайные погрешности структурных компонентов ИК ИИС, обусловленные техническим несовершенством как самих компонентов, так и воздействием внешних и внутренних факторов в результате применения интеллектуального алгоритма автоматической коррекции погрешностей структурных компонентов ИК. Научная новизна метода, в отличие от известных методов, обусловлена применением для коррекции точных математических моделей компонентов ИК ИИС при воздействии ДФ, полученных на основе априорных и расчетно-экспериментальных зависимостей.

Создан интеллектуальный алгоритм коррекции технического несовершенства структурных компонентов измерительного канала ИИС ТФС материалов с учетом воздействия дестабилизирующих факторов и закономерностей их влияния на результаты измерения на выходе структурных компонентов и параметров ТФС материалов – коэффициентов тепло- и температуропроводности, позволяющий повысить точность определения коэффициентов тепло- и температуропроводности. Относительная погрешность измерения составляет не более 4%. Интеллектуальный алгоритм в процедуре коррекции результатов измерения структурных компонентов ИИС использует математические модели, учитывает текущую, априорную и вспомогательную информацию о свойствах исследуемых материалов, условия измерений, требования к результатам измерения, предъявляемые ограничения, которые представлены в базе знаний ИИС, характеризуется свойством адаптации в соответствии с изменяющимися условиями функционирования. В алгоритме коррекции, реализующем предлагаемый метод повышения точности ИИС, процедура реализации поправки вводится до наступления момента равенства погрешности выходных сигналов компонентов ИК и параметров ТФС материалов заданным их доверительным интервалам.

Разработана ИИС ТФС материалов с модулями базы знаний, коррекции, алгоритмическим, программным обеспечением и алгоритм ее функционирования, реализующая разработанные метод повышения точности и интеллектуальный алгоритм коррекции результатов измерения ИК ИИС и параметров ТФС материалов при воздействии ДФ. Созданное информационное обеспечение ИИС ТФС теплоизоляционных материалов, информационная модель базы данных на основе сбора, хранения, обработки и анализа информации, которые позволяют принимать оперативные решения по извлечению требуемой информации при проектировании и эксплуатации ИИС ТФС материалов. Предложенная структура фреймовой модели базы знаний ИИС ТФС мате-

риалов применяется в ИИС ТФС материалов при проведении теплофизических измерений, реализации при этом созданного метода повышения точности ИИС и алгоритма технического несовершенства структурных компонентов ИК ИИС: введения поправок в результаты их измерений с использованием допустимых для них значений, и в результаты определения коэффициентов тепло- и температуропроводности, указанных в соответствующих слотах фреймов базы знаний ИИС ТФС теплоизоляционных материалов.

Таким образом, создана структура ИИС ТФС теплоизоляционных материалов, содержащая разработанные модули алгоритмического обеспечения, аналого-цифровой коррекции структурных компонентов структурных компонентов измерительного канала ИИС, базы данных и знаний, программного обеспечения, позволяющие реализовать созданный метод повышения точности ИИС и обеспечить требуемую погрешность измерений параметров ТФС теплоизоляционных материалов. Предложенный алгоритм функционирования ИИС и коррекции ее технического несовершенства позволяет повысить точность определяемых параметров ТФС материалов. Как показывают результаты экспериментальных данных по определению коэффициентов тепло- и температуропроводности, относительная погрешность их измерений составляет не более 4%. Созданное программное обеспечение ИИС ТФС материалов позволяет реализовать алгоритм функционирования ИИС и созданные методы повышения точности ИИС и интеллектуального алгоритма коррекции технического несовершенства ИИС.

Выполнена оценка надежности ИИС ТФС материалов при воздействии дестабилизирующих факторов. Как следует из анализа результатов расчетов, при параллельном резервировании структурных компонентов ИК ИИС – системы измерительных преобразователей и системы дифференциальных усилителей, 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 ТФС материалов.

Теоретическая значимость исследования, представленного в монографии, обусловлена созданным алгоритмическим обеспечением ИИС ТФС материалов: математические модели процесса измерения и структурных компонентов ИК ИИС; метод повышения точности функционирования ИИС в результате контроля, коррекции выходных параметров структурных компонентов измерительного канала на соответствие допустимым значениям и результатов измерения параметров ТФС материалов при влиянии ДФ по полученным аппроксимирующим зависимостям, что позволяет обеспечить погрешность определения

параметров ТФС материалов, как показывают результаты экспериментов, не более 3...4%.

Практическая значимость проведенного исследования заключается в устранении технического несовершенства структурных компонентов измерительного канала ИИС для повышения точности измерительной системы, применении разработанного программного обеспечения для реализации метода повышения точности ИИС и интеллектуального алгоритма коррекции результатов измерения структурных компонентов ИК ИИС при определении параметров ТФС материалов

Полученные результаты рекомендуется применять при проектировании и эксплуатации в реальных условиях информационно-измерительных систем теплофизических свойств твердых материалов. При дальнейшей разработке ИИС ТФС материалов и повышении ее точности следует учесть методические и инструментальные погрешности вычислительного блока ИИС на базе микроконтроллера при влиянии дестабилизирующих факторов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Парахуда, Р. Н. Информационно-измерительные системы : письменные лекции / Р. Н. Парахуда, Б. Я. Литвинов. – СПб. : СЗТУ, 2002. – 74 с.
2. Цапенко, М. П. Измерительные информационные системы: Структуры и алгоритмы, системотехническое проектирование : учеб. пособие / М. П. Цапенко. – 2-е изд., переп. и доп. – М. : Энергоавтомиздат, 1985. – 440 с.
3. Раннев, Г. Г. Информационно-измерительная техника и электроника : учебник / Г. Г. Раннев, В. А. Суругина, В. И. Калашников и др. – 3-е изд., стер. – М. : Академия, 2009. – 512 с.
4. Системы автоматического контроля: назначение, структурная схема с дискретным контролем, принцип действия [Текст]. – Краткое описание [Электронный ресурс]. – URL : <http://tigach.narod.ru/26-30.41.html> – Загл. с экрана (дата обращения: 12.04.2015).
5. Основы построения информационно-измерительных систем / Н. А. Виноградова, В. В. Гайдученко, А. И. Карядин и др. ; под ред. В. Г. Свиридова. – М. : Изд-во МЭИ, 2004. – 268 с.
6. Щербань, И. В. Измерительно-информационные системы : учеб. пособие / И. В. Щербань. – Ростов н/Д : ЮФУ, 2008. – 80 с.
7. Компьютерно-измерительные системы [Текст]. – Краткое описание [Электронный ресурс]. – URL : http://plasma.karelia.ru/~ekostq/PUBLIC/IntSrIzm_NEW/page2/page6.html – Загл. с экрана (дата обращения: 18.06.2014).
8. Рубичев, Н. А. Моделирование измерительных информационных систем / Н. А. Рубичев // Мир транспорта. – 2012. – Т. 10, № 4(42). – С. 20 – 27.
9. Обзор систем контроля теплофизических [Текст]. – Краткое описание [Электронный ресурс]. – URL : <http://www.molod.mephi.ru/2002/original/503.doc> – Загл. с экрана (дата обращения: 26.03.2014).
10. Селиванова, З. М. Интеллектуализация информационно-измерительных систем неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов : монография / З. М. Селиванова. – М. : Изд-во «Машиностроение-1», 2006. – 184 с.
11. Селиванова, З. М. Информационно-измерительная система неразрушающего контроля теплофизических характеристик материалов / З. М. Селиванова // Электронная техника : межвузов. сб. науч. тр. – Ульяновск, 2004. – С. 41 – 44.

12. Селиванова, З. М. База знаний теплофизических характеристик материалов для информационно-измерительной системы / З. М. Селиванова, Д. И. Колбасин, А. Ю. Любимов // Информационные системы и процессы : сб. науч. тр. – Тамбов; М.; СПб.; Баку; Вена : Изд-во «Нобелистика», 2008. – Вып. 7. – С. 39 – 43.

13. А. с. № 1140565 СССР, МКИ ООШ25/18. Способ определения теплофизических характеристик материалов / В. Н. Чернышов и др. – № 3612879/24-25 ; заявл. 29.06.83 ; опубл. 15.10.84, Бюл. № 6. – 6 с.

14. А. с. № 1377695 СССР, МКИ G01N25/18. Способ неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов [Текст] / Т. И. Чернышова, В. Н. Чернышов. – № 4055693/31-25; заявл. 14.04.86; опубл. 29.02.88. – Бюл. № 8.

15. А. с. № 1124209 СССР, МКИ G 01 N 25/18. Способ неразрушающего контроля ТФХ материалов и устройство для его осуществления [Текст] / В. Н. Чернышов, Т. И. Чернышова. – № 3549461/18-25 ; заявл. 09.02.83 ; опубл. 15.11.84, Бюл. № 42.

16. А. с. № 2027172 РФ, МКИ G 01 N 25/18. Способ комплексного определения теплофизических характеристик материалов и устройство для его осуществления [Текст] / С. В. Пономарев, С. В. Мищенко, Е. И. Гликин, А. Е. Бояринов, А. А. Чуриков, А. Г. Дивин, С. В. Моргалыникова, Б. И. Герасимов, С. В. Петров ; заявл. 06.05.1991 ; опубл. 20.01.1995, Бюл. № 25.

17. Селиванова, З. М. Измерительно-вычислительная система «Термис-М» / З. М. Селиванова, М. Е. Беспалов // Актуальные вопросы охраны окружающей среды : сб. докл. обл. науч. конф. – Тамбов, 1987. – С. 45–46.

18. Селиванова, З. М. Измерительно-вычислительная система с веером моделей для определения теплофизических свойств твердых материалов / З. М. Селиванова // Математическое моделирование и оптимизация систем переменной структуры : межвуз. сб. науч. тр. – Тамбов, 1989. – С. 163 – 165.

19. Селиванова З. М. Универсальный теплофизический прибор с автоматическим вводом программ / З. М. Селиванова, О. Н. Поликарпов // Теплофизика релаксирующих систем : сб. тр. всесоюзн. совещ. – Тамбов, 1990. – С. 90–91.

20. Селиванова, З. М. Способ определения теплопроводности винилискожи-НТ : краткие тез. докл. 1 науч. техн. конф. ТГТУ / З. М. Селиванова. – Тамбов, 1994. – С. 105–106.

21. Селиванова, З. М. Микропроцессорные системы контроля : учеб. пособие / З. М. Селиванова, Ю. Л. Муромцев, В. Н. Чернышов. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2004. – 96 с.

22. Селиванова, З. М. Метод и измерительно-вычислительная система неразрушающего контроля теплофизических свойств твердых материалов : дис. ... канд. техн. наук: 05.11.13 / З. М. Селиванова. – Тамбов, 2001. – 222 с.

23. Измеритель теплопроводности ИТЭМ-1 [Текст]. – Краткое описание [Электронный ресурс]. – URL : <http://www.kip-guide.ru/info/6682-78> – Загл. с экрана (дата обращения: 01.06.2015).

24. Измерители теплопроводности [Текст]. – Краткое описание [Электронный ресурс]. – URL : <https://www.interpribor.ru/measuring-the-thermal-conductivity-its-1> – Загл. с экрана (дата обращения: 01.06.2015).

25. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий : справочник. В 2 кн. / под ред. В. В. Клюева. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1986. – 313 с.

26. Селиванова, З. М. Анализ дестабилизирующих факторов, воздействующих на адаптивную измерительно-вычислительную систему неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов и готовых изделий / З. М. Селиванова // Информационные технологии в проектировании микропроцессорных систем : тез. докл. Междунар. конф. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2000. – С. 94 – 96.

27. Методы электрических измерений / Л. Г. Журавин, М. А. Мариненко, Е. И. Семенов, Э. И. Цветков. – Л. : Энергоатомиздат, 1990. – 288 с.

28. Кулаков, М. В. Технологические измерения и приборы для химических производств / М. В. Кулаков. – М. : Машиностроение, 1974. – 424 с.

29. Варфоломеев, Б. Г. Оценка погрешности определения теплофизических характеристик материалов, обусловленной контактным термосопротивлением / Б. Г. Варфоломеев, В. Н. Грошев, З. М. Селиванова // Теплофизические проблемы промышленного производства : кр. тез. докл. Междунар. совещ. семинара молодых ученых. Тамб. ин-т хим. машиностр. – Тамбов, 1992. – С. 53 – 55.

30. Григорьев, А. С. Комплексное определение теплофизических свойств и влажности твердых материалов / А. С. Григорьев, Ю. Л. Муромцев, З. М. Селиванова // Теплофизика релаксирующих систем : кр. тез. докл. Междунар. совещ. семинара молодых ученых. Всесоюзн. совещ. Тамб. ин-т хим. машиностр. – Тамбов, 1990. – С. 106.

31. Селиванова, З. М. Метод уменьшения погрешности измерения теплофизических свойств твердых материалов при воздействии низких и высоких температур / З. М. Селиванова // Методы и средства измерения физических величин : тез. докл. 4 всерос. науч. техн. конф. Сб. в 6 ч. – Н. Новгород : Нижегородский гос. техн. ун-т, 1999. – Ч. 4. – 5 с.

32. Левченко, А. А. Алгоритм интегральной коррекции погрешности измерительных каналов автоматизированных измерительных комплексов / А. А. Левченко, И. В. Шарипова // Труды одесского политехнического университета. – Одесса : Одес. нац. политехн. ун-т, 2006. – № 2. – С. 178 – 180.

33. Схемотехника электронных систем. Микропроцессоры и микроконтроллеры / В. И. Бойко и др. – СПб. : БХВ-Петербург, 2004. – 464 с.

34. Цветков, Э. И. Алгоритмические основы измерений / Э. И. Цветков. – Л. : Энергоатомиздат, 1992. – 254 с.

35. Отт, Г. У. Методы подавления шумов и помех в электронных схемах / Г. У. Отт ; под ред. М. В. Гальперина ; пер. с англ. – М. : Мир, 1979. – 318 с.

36. Микропроцессоры / В. Д. Вернер, Н. В. Воробьев, А. В. Горячев и др. ; под ред. Л. Н. Преснухина. – М. : Высш. шк., 1986. – 383 с.

37. Хоровиц, П. Искусство схемотехники / П. Хоровиц, У. Хилл ; пер. с англ. – изд. 2-е. – М. : Изд-во БИНОМ, 2014. – 704 с.

38. Вавилов, В. П. Тепловые методы неразрушающего контроля : справочник / В. П. Вавилов. – М. : Машиностроение, 1991. – 240 с.

39. А. с. № 1081507 СССР, МКИ G 01 N 25/18. Способ определения тепло- и температуропроводности материалов / В. Н. Чернышов и др. – № 3568145/18-25 ; заявл. 28.04.83 ; опубл. 23.03.84, Бюл. № 11. – 4 с.

40. Системы автоматизации теплофизического эксперимента : учеб. пособие / Н. А. Виноградова, А. И. Карякин, В. Н. Леньшин и др. ; под ред. В. Г. Свиридова. – М. : Издательский дом МЭИ, 2007. – 252 с.

41. Муромцев, Ю. Л. Тепловой метод неразрушающего контроля свойств твердых материалов / Ю. Л. Муромцев, В. Н. Чернышов, В. А. Попов. – Тамбов : Тамб. ин-т хим. машиностроения, 1985. – 14 с.

42. Варганов, И. С. Современное состояние и основные проблемы тепловых методов неразрушающего контроля / И. С. Варганов, Г. Т. Лебедев, В. В. Конков // Промтеплотехника. – 1983. – Т. 5, № 3. – С. 80 – 93.

43. Потапов, А. И. Неразрушающий контроль конструкций из композиционных материалов / А. И. Потапов, Ф. Т. Пеккер. – Л. : Машиностроение, 1978. – 240 с.

44. Тепловые методы неразрушающего контроля изделий и элементов радиоэлектроники // Измерения, контроль, автоматизация. – 1979. – № 5. – С. 13 – 24.

45. Беляев, Н. М. Методы нестационарной теплопроводности / Н. М. Беляев, А. А. Рядно. – М. : Высш. шк., 1978. – 328 с.

46. Диткин, В. А. Интегральные преобразования и операционное исчисление / В. А. Диткин, А. П. Прудников. – М. : Наука, 1974. – 542 с.
47. Карслоу, Г. Теплопроводность твердых тел / Г. Карслоу, Д. Егер. – М. : Наука, 1964. – 487 с.
48. Краячич, А. В. Исследование и разработка информационно-измерительной системы для непрерывного мониторинга состояния прочности сложных механических конструкций : дис. ... канд. техн. наук: 05.11.16 / А. В. Краячич. – М., 2008. – 203 с.
49. Лыков, А. В. Теория тепло- и массопереноса / А. В. Лыков. – М. : Госэнергоиздат, 1963. – 536 с.
50. Бекешко, Н. А. Расчет нестационарного температурного поля металлической пластины при активных методах теплового контроля / Н. А. Бекешко // Дефектоскопия. – 1975. – № 2. – С. 64 – 68.
51. Вавилов, В. П. Аналитические расчеты температурных полей при тепловом контроле сложных изделий / В. П. Вавилов, В. И. Горбунов // Дефектоскопия. – 1974. – № 2. – С. 100 – 105.
52. Коздоба, Л. А. Методы решения нелинейных задач теплопроводности / Л. А. Коздоба. – М. : Наука, 1975. – 228 с.
53. Дульнев, Г. Н. Комплекс методик, программ и аппаратуры для автоматизации теплофизических исследований / Г. Н. Дульнев, Г. Н. Лукьянов // Инж.-физ. журн. – 1981. – Т. 40, № 4. – 717 с.
54. Кузнецов, Н. Д. Сборник задач и вопросов по теплотехническим измерениям и приборам / Н. Д. Кузнецов, В. С. Чистяков. – М. : Энергия, 1978. – 215 с.
55. Пак, В. Метод точного измерения стационарной температуры поверхности твердого тела контактными термоприемниками / В. Пак, А. И. Калинин // Заводская лаборатория. – 1976. – Т. 42, № 11. – С. 1371–1372.
56. Шлыков, Ю. П. Контактный теплообмен / Ю. П. Шлыков, Е. А. Гарин. – Л. : Энергия, 1963. – 144 с.
57. Платунов, Е. С. Теплофизические измерения в монотонном режиме / Е. С. Платунов. – Л. : Энергия, 1973. – 143 с.
58. Теплофизические измерения и приборы / Е. С. Платунов и др. – Л. : Энергия, 1973. – 256 с.
59. Раннев, Г. Г. Интеллектуальные средства измерений : учебник / Г. Г. Раннев. – М. : Академия, 2011. – 272 с.
60. Шевельков, В. А. Теплофизические характеристики изоляционных материалов / В. А. Шевельков. – М.; Л. : Госэнергоиздат, 1958. – 96 с.
61. Екимов, К. А. Программно-аппаратные средства интеллектуальных измерительных систем : учеб. пособие / К. А. Екимов, С. Ф. Подрядчиков. – Петрозаводск : Изд-во ПетрГУ, 2016. – 53 с.

62. Теплопроводность твердых тел : справочник / А. С. Охотин, Р. П. Боровикова, Т. В. Нечаева и др. ; под ред. А. С. Охотина. – М. : Энергоатомиздат, 1984. – 320 с.
63. Динамика теплообмена комбинированного тепломера / Н. А. Ярышев, Т. В. Смирнова, Н. Н. Заровская, Г. А. Васильев // Измерительная техника. – 1990. – № 2. – С. 15–16.
64. Шрамков, А. Я. Контрольно-измерительная техника : сб. ст. / под ред. А. Я. Шрамкова. – Львов : Изд-во Львовского ун-та, 1983. – Вып. 34. – 146 с.
65. Филиппов, П. И. Приложение теории теплопроводности к теплофизическим измерениям / П. И. Филиппов. – Новосибирск, 1973. – 64 с.
66. Чудновский, А. Ф. Теплофизические характеристики дисперсных материалов / А. Ф. Чудновский. – М. : Физгиз, 1962. – 456 с.
67. Курепин, В. В. Приборы для теплофизических измерений с прямым отсчетом. Приборы для теплофизических измерений с прямым отсчетом / В. В. Курепин, В. М. Козин, Ю. В. Левочкин // Промышленная теплотехника. – 1982. – Т. 20, № 6. – С. 91 – 97.
68. Кулаков, М. В. Измерение температуры поверхности твердых тел / М. В. Кулаков, Б. И. Макаров. – М. : Энергия, 1979. – 96 с.
69. Волькенштейн, В. С. Скоростной метод определения теплофизических характеристик материала / В. С. Волькенштейн. – М. : Энергия, 1971. – 145 с.
70. Лыков, А. В. Теория теплопроводности / А. В. Лыков. – М. : Высш. шк., 1967. – 599 с.
71. Кондратьев, Г. М. Регулярный тепловой режим / Г. М. Кондратьев. – М. : Гостехиздат, 1954. – 408 с.
72. Кондратьев, Г. М. Тепловые измерения / Г. М. Кондратьев. – М.-Л. : Машгиз, 1956. – 253 с.
73. Коротков, П. А. Динамические контактные измерения тепловых величин / П. А. Коротков, Г. Е. Лондон. – Л. : Машиностроение, 1974. – 222 с.
74. Шнейдер, П. Инженерные проблемы теплопроводности / П. Шнейдер. – М. : Изд-во Литературы, 1960. – 478 с.
75. Ярышев, Н. А. Теоретические основы измерения нестационарных температур / Н. А. Ярышев. – Л. : Энергия, 1967. – 298 с.
76. Пелецкий, В. Э. Высокотемпературные исследования тепло- и электропроводности твердых тел / В. Э. Пелецкий, Д. Л. Тимрот, В. Ю. Воскресенский. – М. : Энергия, 1971. – 192 с.
77. Методы определения теплопроводности и температуропроводности / А. Г. Шашков, Г. М. Волохов, Т. Н. Абраменко, В. П. Козлов. – М. : Энергия, 1973. – 336 с.

78. Волохов, Г. М. Некоторые приборы для исследования теплофизических характеристик / Г. М. Волохов, А. Г. Шашков, Ю. Е. Фрайман // Инж.-физ. журн. – 1967. – Т. 13, № 15. – С. 663 – 689.
79. Исаченко, В. Л. Теплопередача / В. Л. Исаченко, В. А. Осипова, А. С. Сукомед. – М. : Энергоиздат, 1991. – 415 с.
80. Камья, Ф. Н. Импульсная теория теплопроводности / Ф. Н. Камья. – М. : Энергия, 1972. – 271 с.
81. Козлов, В. П. Методы неразрушающего контроля при исследовании теплофизических характеристик твердых материалов / В. Н. Козлов, А. В. Станкевич // Инж.-физ. журн. – 1984. – Т. 47, № 2. – С. 250 – 255.
82. Импульсно-динамический метод неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов и информационно-измерительная система его реализации / Ю. Л. Муромцев, В. Н. Чернышов, З. М. Селиванова и др. // Материалы, элементы и устройства функциональной электроники : межвуз. сб. тр. – Воронеж, 1992. – С. 86 – 96.
83. Методы определения теплопроводности и температуропроводности / под ред. А. В. Лыкова. – М. : Энергия, 1973. – 336 с.
84. А. с. № 678332 СССР, МКИ G 01 K 3/02. Устройство для измерения среднеинтегрального значения температуры среды [Текст] / В. В. Власов, Ю. С. Шаталов, А. В. Трофимов, С. В. Пономарев, А. К. Паньков, Е. Н. Зоотов, А. А. Чуриков, Н. П. Федоров. № 2499783/18-10 ; заявл. 24.06.1977 ; опубл. 05.08.1979, Бюл. № 29. – 4 с.
85. Фесенко, А. И. Частотно-импульсный метод определения теплофизических характеристик твердых материалов / А. И. Фесенко, С. Маташков // Инж.-физ. журн. – 1998. – Т. 7, № 44. – С. 336 – 441.
86. Клебанов, М. Г. Неразрушающий экспресс-контроль теплофизических характеристик твердых материалов с использованием точечного источника тепла / М. Г. Клебанов, Т. А. Фесенко // Вестник ТГТУ. – 2000. – Т. 6. – С. 208 – 220.
87. Шаталов, Ю. С. Функционально-интегральные управления теплофизических характеристик / Ю. С. Шаталов. – М. : Наука, 1996. – 256 с.
88. Козлов, В. П. Физико-математические модели для теорий неразрушающего контроля теплофизических свойств / В. П. Козлов, Н. А. Абдельразак, Н. И. Юрчук // Инж.-физ. журн. – 1995. – Т. 69. – С. 1011 – 1021.
89. А. с. № 832433 СССР, МКИ G 01 N 25/18. Способ определения теплофизических свойств материалов [Текст] / З. А. Сапожников, Г. М. Серых. № 1779566/26-25 ; заявл. 03.05.1972 ; опубл. 30.01.1975, Бюл. № 4. – С. 87–88.

90. Платунов, Е. С. Средства измерения теплопроводности и теплоемкости в области средних, низких и криогенных температур / Е. С. Платунов // Инж.-физ. журн. – 1987. – Т. 6. – С. 987 – 994.
91. РМГ 64–2003. Государственная система обеспечения единства измерений. Обеспечение эффективности при управлении технологическими процессами. Методы и способы повышения точности измерений. – Введ. 2005-01-01. – М. : Изд-во стандартов, 2004. – 17 с.
92. Хоан, Т. А. Математическое моделирование измерительного канала информационно-измерительной системы / Т. А. Хоан, З. М. Селиванова // Актуальные проблемы энергосбережения и энергоэффективности в технических системах : 2-я Междунар. конф. с элементами науч. шк. – Тамбов : Изд-во Першина Р. В., 2015. – С. 183–184.
93. Хоан, Т. А. Информационно-измерительная система алгоритмической обработки информации / Т. А. Хоан // Биотехнические, медицинские и экологические системы и комплексы «Биомедсистемы – 2014» : матер. XXVII Всерос. науч.-техн. конф. студентов, молодых ученых и специалистов. – Рязань, 2014. – С. 23 – 26.
94. Селиванова, З. М. Математическая модель оценки точности функционирования информационно-измерительной системы при воздействии дестабилизирующих факторов / З. М. Селиванова, Т. А. Хоан // Актуальные проблемы энергосбережения и энергоэффективности в технических системах : 2-я Междунар. конф. с элементами науч. шк. – Тамбов : Изд-во Першина Р. В., 2015. – С. 164–165.
95. Кабанов, Д. А. Статистический эксперимент при анализе точности РЭА : учеб. пособие / Д. А. Кабанов, Ю. Я. Коротков. – Н. Новгород : ГПИ им. Жданова, 1984. – 66 с.
96. Selivanova, Z. M. An intelligent data-measuring system for determining the thermal properties of materials and products / Z. M. Selivanova, A. A. Samokhvalov // Measurement Technique. – 2012. – No. 9. – P. 1049 – 1056.
97. Муромцев, Д. Ю. Прогнозирование и компенсация возмущения в системах оптимального управления / Д. Ю. Муромцев, С. В. Артемова, А. Н. Грибков // Вестник Тамб. гос. техн. ун-та. – 2003. – Т. 9, № 4. – С. 632 – 637.
98. Павлов, В. И. Оптимизация функционирования измерительных систем / В. И. Павлов, В. В. Аксенов, Т. В. Белова // Известия Томского политехнического университета. – 2010. – № 11. – С. 65 – 68.
99. Советов, Б. Я. Моделирование систем : учебник / Б. Я. Советов, С. А. Яковлев. – 4-е изд. стер. – М. : Высш. шк., 2005. – 343 с.
100. ГОСТ Р 8.585–2001. Термопары. Номинальные статические характеристики преобразования. – Введ. 2001-11-21. – М. : Изд-во стандартов, 2002. – 77 с.

101. Опадчий, Ю. Ф. Аналоговая и цифровая электроника : учебник для вузов / Ю. Ф. Опадчий, О. П. Глудкин, А. И. Гуров. – М. : Радио и связь, 2002. – 768 с.

102. МИ 222–81. Методика расчета метрологических характеристик измерительных каналов информационно-измерительных систем по метрологическим характеристикам компонентов. – М. : Изд-во стандартов, 1981. – 23 с.

103. Туз, Ю. М. Структурные методы повышения точности измерительных устройств / Ю. М. Туз. – Киев : Вища школа, 1976. – 266 с.

104. Хоан, Т. А. Разработка измерительного канала информационно-измерительной системы теплофизических свойств материалов с адаптацией к дестабилизирующим факторам / Т. А. Хоан, З. М. Селиванова // Биотехнические, медицинские и экологические системы и комплексы «Биомедсистемы–2016» : матер. XXIX Всерос. науч.-техн. конф. студентов, молодых ученых и специалистов. 9–10 декабря 2016. – Рязань, 2016. – С. 334 – 338.

105. 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.

106. Selivanova, Z. M. Increasing the Accuracy of Data-Measuring Systems for the Nondestructive Testing of the Thermal Properties of Solids / Z. M. Selivanova, T. A. Khoan // Measurement Techniques. – 2015. – Vol. 58. – No. 9. – P. 1010 – 1015.

107. Селиванова, З. М. Комплексный метод повышения точности информационно-измерительной системы для определения теплофизических свойств материалов при воздействии дестабилизирующих факторов / З. М. Селиванова, Т. А. Хоан // Измерительная техника. – 2017. – № 5. – С. 44 – 48.

108. Пат. 2301996. Российская Федерация, С1, МПК G 01 N 25/00. Способ неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов и изделий / Муромцев Ю. Л., Селиванова З. М. – № 2005130834/28 ; заявл. 04.10.2005 ; опубл. 27.06.2007, Бюл. № 18.

109. РД 153-34.0-11.201–97. Методика определения обобщенных метрологических характеристик измерительных каналов ИИС и АСУТП по метрологическим характеристикам агрегатных средств измерений. – Введ. 1999-02-11. – М. : СПО ОРГРЭС, 1999. – 16 с.

110. Сергеев, А. Г. Метрология: учеб. пособие / А. Г. Сергеев, В. В. Крохин. – М. : Логос, 2001. – 408 с.

111. Глазкова, В. В. Оценка точности вычисления нижних граничных значений вероятностей состояний функционирования слож-

ных систем / В. В. Глазкова, Д. Ю. Муромцев, В. Н. Шамкин // Вестник ТГТУ. – 2016. – Т. 22, № 3. – С. 340 – 349.

112. Селиванова, З. М. Математические модели и алгоритм для совершенствования информационно-измерительной системы неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов / З. М. Селиванова, Т. А. Хоан // Вестник ТГТУ. – 2016. – Т. 22, № 4. – С. 520 – 534.

113. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016663500, Рос. Фед. Программа для реализации алгоритма коррекции технического несовершенства информационно-измерительной системы неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов / Т. А. Хоан, З. М. Селиванова ; зарег. 08.12.2016.

114. Минский, М. Фреймы для представления знаний / М. Минский ; пер. с англ. – М. : Энергия, 1979. – 152 с.

115. Боггс, У. UML и Rational Rose / У. Боггс, М. Боггс. – М. : Лори, 2008. – 600 с.

116. Джарратано, Д. Экспертные системы: принцип разработки и программирования / Д. Джарратано, Г. Райли. – М. : Вильямс, 2006. – 1152 с.

117. Selivanova, Z. M. Matematiceskaya model of information and measuring system of nondestructive control of heatphysical properties materials / Z. M. Selivanova, T. A. Joán // Materials of the XI International scientific and practical conference «Conduct of modern science». Mathematics. Modern information technologies. Sheffield. Science and education LTD: ENGLAND. – 2015. – Vol. 22. – P. 43 – 46.

118. Селиванова, З. М. Метод повышения точности информационно-измерительной системы параметров теплофизических свойств теплоизоляционных материалов / З. М. Селиванова, Т. А. Хоан // Вестник ТГТУ. – 2017. – Т. 23, № 1. – С. 12 – 24.

119. Селиванова, З. М. Разработка базы знаний информационно-измерительных систем контроля температуры / З. М. Селиванова, В. В. Третьяков // Вопросы современной науки и практики. Университет имени В. И. Вернадского. – 2012. – Т. 4, № 42. – С. 75 – 84.

120. Селиванова, З. М. Моделирование и оптимизация параметров измерительного канала информационно-измерительных систем / З. М. Селиванова, В. В. Третьяков // Вестник ТГТУ. – 2012. – Т. 18, № 1. – С. 65 – 73.

121. Хоан, Т. А. Проектирование виртуального интеллектуального измерительного электронного прибора теплофизических свойств материалов в среде LABVIEW / Т. А. Хоан, М. А. Х. Хамза // Радиоэлектроника. Проблемы и перспективы развития : Первая Всерос. студ. науч. конф. – Тамбов : Изд-во Першина Р. В., 2016. – С. 116–117.

122. Селиванова, З. М. Интеллектуальная информационно-измерительная система мониторинга режимных параметров технологического процесса производства минераловатных плит / З. М. Селиванова, К. С. Стасенко // Вестник Тамб. гос. техн. ун-та. – 2013. – Т. 19, № 1. – С. 52 – 60.

123. Селиванова, З. М. Комплексный алгоритм коррекции технического несовершенства информационно-измерительной системы неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов / З. М. Селиванова, Т. А. Хоан // Актуальные проблемы энергосбережения и энергоэффективности в технических системах : тез. докл. 3-й Междунар. конф. с элементами науч. шк. – Тамбов : Изд-во Першина Р. В., 2016. – С. 133–134.

124. Селиванова, З. М. Микропроцессорная система для качественной оценки свойств твердых материалов / З. М. Селиванова, Д. А. Бобаков // Тез. докл. VII науч. конф. ТГТУ. – Тамбов, 2002. – С. 101 – 104.

125. Селиванова, З. М. Измерительный зонд для неразрушающего контроля теплофизических свойств твердых материалов / З. М. Селиванова // Датчики и системы. – 2005. – № 2. – С. 34–35.

126. Хоан, Т. А. Интеллектуальная информационно-измерительная система экологического мониторинга строительных материалов / Т. А. Хоан, З. М. Селиванова // В. И. Вернадский: устойчивое развитие регионов : матер. Междунар. науч.-практ. конф. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2016. – С. 220 – 225.

127. Селиванова, З. М. Концептуальная модель построения интеллектуального измерительного электронного прибора качественных свойств материалов / З. М. Селиванова, Т. А. Хоан, М. А. Х. Хамза // Актуальные проблемы энергосбережения и энергоэффективности в технических системах : тез. докл. 3-й Междунар. конф. с элементами науч. шк. – Тамбов : Изд-во Першина Р. В., 2016. – С. 135–136.

128. ГОСТ 27.002–89. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения. – Введ. 1990-07-01. – М. : Изд-во стандартов, 1990. – 24 с.

129. 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. – С. 11 – 20.

130. Шкляр, В. Н. Надежность систем управления : учеб. пособие / В. Н. Шкляр. – Томск : Изд-во Томск. политехн. ун-та, 2009. – 126 с.

131. Полтавский, А. В. Модель отказов автоматизированных средств контроля / А. В. Полтавский, Н. К. Юрков // Надежность и качество сложных систем. – 2015. – Т. 9, № 1. – С. 63 – 67.

132. 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.

133. Селиванова, З. М. Энергосберегающие технологии при разработке и применении информационно-измерительных систем для неразрушающего контроля теплофизических свойств теплоизоляционных материалов / З. М. Селиванова, Т. А. Хоан, К. С. Стасенко // Вопросы современной науки и практики. Университет имени В. И. Вернадского. – 2014. – № 52. – С. 97 – 100.

134. Селиванова, З. М. Энергосберегающие технологии при разработке и эксплуатации информационно-измерительных систем неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов / З. М. Селиванова, Т. А. Хоан // Актуальные проблемы энергосбережения и энергоэффективности в технических системах : Междунар. конф. с элементами науч. шк. – Тамбов : Изд-во ИП Чеснокова А. В., 2014. – С. 135–136.

135. ГОСТ 17622–72. Стекло органическое техническое. Технические условия. – Введ. 1973-06-30. – М. : Изд-во стандартов, 1989. – 18 с.

136. Селиванова, З. М. Математическое моделирование и направления совершенствования информационно-измерительных систем / З. М. Селиванова, Т. А. Хоан, М. А. Х. Хамза // Математические методы в технике и технологиях : сб. тр. XXVIII Междунар. науч. конф. 24 – 26 ноября 2015 г. – Рязань : Рязан. гос. радиотехн. ун-т, 2015. – С. 328 – 332.

137. Хоан, Т. А. Микропроцессорная система с коррекцией погрешностей измерения теплофизических свойств материалов / Т. А. Хоан, З. М. Селиванова // Биотехнические, медицинские и экологические системы и комплексы «Биомедсистемы–2015» : матер. XXVIII Всерос. науч.-техн. конф. студентов, молодых ученых и специалистов. – Рязань : Рязан. гос. радиотехн. ун-т, 2015. – С. 227 – 230.

138. Метрология и радиоизмерения / В. И. Нефедов, В. И. Хамин, В. К. Битюков и др. ; под ред. проф. В. И. Нефедова. – М. : Высш. шк., 2003. – 526 с.

139. Маркин, Н. С. Основы теории обработки результатов измерений / Н. С. Маркин. – М. : Изд-во стандартов, 1991. – 176 с.

140. МИ 1317–86. ГСИ. Результаты и характеристики погрешностей измерений. Формы представления. Способы использования при испытании образцов продукции и контроля их параметров. – Введ. 1987-01-01. – М. : Изд-во стандартов, 1986. – 29 с.

141. ГОСТ Р 8.596–2002. Государственная система обеспечения единства измерений. Метрологическое обеспечение измерительных систем. Основные положения. – Введ. 2003-03-01. – М. : Изд-во стандартов, 2002. – 13 с.

142. Сергеев, А. Г. Метрология и метрологическое обеспечение : учебник / А. Г. Сергеев. – М. : Высшее образование, 2008. – 575 с.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
Список сокращений и условных обозначений	9
Глава 1. Информационно-измерительные системы теплофизических свойств теплоизоляционных материалов, анализ их технического несовершенства и методов повышения точности	11
1.1. Информационно-измерительные системы теплофизических свойств материалов	11
1.2. Анализ технического несовершенства современных ИИС ТФС материалов	20
1.3. Методы контроля теплофизических свойств материалов	25
1.4. Анализ методов повышения точности ИИС ТФС материалов	31
Глава 2. Математические модели, методы и алгоритмы для повышения точности информационно-измерительной системы теплофизических свойств теплоизоляционных материалов	36
2.1. Основные направления и задачи повышения точности ИИС ТФС материалов	36
2.2. Математическая модель оценки точности функционирования ИИС ТФС материалов	43
2.3. Математическая модель процесса измерения в ИИС ТФС материалов	45
2.4. Математическое моделирование измерительного канала для повышения точности ИИС ТФС материалов	49
2.4.1. Математическая модель измерительного канала ИИС ТФС материалов	49
2.4.2. Математическая модель преобразования информации в ИК ИИС ТФС материалов	52
2.4.3. Математические модели структурных компонентов ИК ИИС ТФС материалов	54
2.4.3.1. Математическая модель первичного измерительного преобразователя	54
2.4.3.2. Математическая модель дифференциального усилителя	56
2.4.3.3. Математическая модель аналого-цифрового преобразователя	57
2.5. Комплексный метод повышения точности информационно-измерительной системы для определения теплофизических свойств материалов при воздействии дестабилизирующих факторов	59

2.6. Метод повышения точности информационно-измерительной системы параметров теплофизических свойств теплоизоляционных материалов	67
2.7. Алгоритм коррекции технического несовершенства ИИС ТФС материалов с использованием математических моделей и методов повышения точности	85
Глава 3. Архитектура информационно-измерительной системы теплофизических свойств теплоизоляционных материалов	
3.1. Информационное обеспечение ИИС ТФС материалов	94
3.1.1. Информационная модель базы данных ИИС ТФС материалов	94
3.1.2. Фреймовая модель представления знаний в ИИС ТФС материалов	96
3.2. Комплексная математическая модель создания ИИС ТФС материалов	108
3.3. Структурная схема ИИС ТФС теплоизоляционных материалов	111
3.4. Алгоритм функционирования ИИС ТФС материалов с учетом коррекции технического несовершенства структурных компонентов системы	116
3.5. Программное обеспечение ИИС ТФС материалов	118
3.5.1. Описание программы для реализации интеллектуального алгоритма коррекции технического несовершенства ИИС ТФС материалов	119
3.6. Интеллектуальная информационно-измерительная система экологического мониторинга строительных материалов	120
3.7. Оценка надежности информационно-измерительной системы ТФС материалов при воздействии дестабилизирующих факторов	128
3.8. Энергосберегающие технологии при разработке и эксплуатации ИИС ТФС материалов	135
Заключение	140
Список использованных источников	145

Научное издание

Селиванова Зоя Михайловна
Хоан Туан Ань

**МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ
ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ
ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ
ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Монография

Редактор Л. В. Комбарова
Компьютерное макетирование М. А. Евсейчевой

ISBN 978-5-8265-1882-3



Подписано в печать 13.03.2018.
Формат 60 × 84 / 16. 9,3 усл. печ. л.
Тираж 500 экз. (1-й з-д 50). Заказ № 66А

Издательско-полиграфический центр
ФГБОУ ВО «ТГТУ»
392000, г. Тамбов, ул. Советская, д. 106, к. 14
Тел. 8(4752) 63-81-08;
E-mail: izdatelstvo@admin.tstu.ru