

На правах рукописи

ЧЕРНЫШОВА Татьяна Ивановна

**МЕТРОЛОГИЧЕСКАЯ НАДЕЖНОСТЬ
СРЕДСТВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ
ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ
МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ**

05.11.13 – Приборы и методы контроля
природной среды, веществ, материалов и изделий

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Тамбов 2002

Работа выполнена на кафедре "Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем"
Тамбовского государственного технического университета.

НАУЧНЫЙ КОНСУЛЬТАНТ:

доктор технических наук,
профессор

Мищенко Сергей Владимирович

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

доктор технических наук,
профессор

Кондрашкова Галина Анатольевна

доктор технических наук,
профессор

Арутюнов Борис Ашотович

доктор технических наук,
профессор

Дмитриев Дмитрий Александрович

ВЕДУЩАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ: АООТ НИИ "Электромера",
г. Санкт-Петербург

Защита диссертации состоится "___" _____ 2002 г. в ___ часов на заседании диссертационного совета Д 212.260.01 Тамбовского государственного технического университета по адресу: 392000, г. Тамбов, ул. Советская, 106, ТГТУ, Большой зал.

Отзывы в двух экземплярах, скрепленные гербовой печатью, просим направлять по адресу: 392000, г. Тамбов, ул. Советская, 106, ТГТУ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета.

Автореферат разослан "___" _____ 2002 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



А. А. Чуриков

ЛР № 020851 от 27.09.99 П_лр № 020079 от 28.04.97

Подписано в печать 26.02.2002.

Гарнитура Times New Roman. Формат 60 × 84 / 16.

Бумага офсетная. Печать офсетная. Объем: 1,86 усл. печ. л.; 1,8 уч.-изд. л.

Тираж 150 экз. С. 138

Издательско-полиграфический центр
Тамбовского государственного технического университета
392000, Тамбов, Советская, 106, к. 14

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Одной из важнейших характеристик качества средств измерений (СИ) является метрологическая надежность.

Под метрологической надежностью понимают свойство СИ сохранять во времени метрологические характеристики в пределах установленных норм при эксплуатации в заданных режимах и условиях использования, техническом обслуживании, хранении и транспортировании. Следовательно, метрологическая надежность определяется характером и темпом изменения нормируемых согласно ГОСТ 8.009-84 метрологических характеристик исследуемого СИ.

Усложнение измерительной аппаратуры, повышенные требования к точности, применение качественно новых элементов, с одной стороны, и все возрастающая роль СИ в производственном процессе, с другой, ставят задачу разработки научно обоснованных методов оценки метрологической надежности проектируемых СИ в число важнейших задач теоретической и практической метрологии.

Проблема метрологической надежности СИ, вообще говоря, возникла с необходимостью установления научно обоснованных межповерочных интервалов для эксплуатируемых СИ. Само понятие метрологической надежности и стабильности было сформулировано еще в 1969 году, а ее международное признание подтверждено методическими указаниями СЭВ МС 48-77 "Стабильность и метрологическая надежность средств измерений".

В связи с ростом объема экспериментальных исследований по определению эксплуатационных характеристик новых конструкционных, электроизоляционных, тепло- и хладостойких материалов среди средств информационно-измерительной техники особое место занимают методы и средства неразрушающего контроля (НК). Широкими функциональными возможностями обладают тепловые методы неразрушающего контроля, которые позволяют определять качество исследуемых материалов и изделий по их теплофизическим свойствам (ТФС).

Алгоритмическая, структурная и конструктивная сложность средств, реализующих методы НК ТФС материалов и изделий, ставит актуальным вопрос об обеспечении необходимого уровня их метрологической надежности как на этапе проектирования, так и эксплуатации.

Практика эксплуатации СИ, в том числе и средств НК, показывает, что для них преобладающими среди общего потока отказов являются постепенные метрологические отказы, обусловленные монотонным дрейфом метрологических характеристик, приводящим к выходу их за допуски. Такие отказы могут быть выявлены только проведением метрологических проверок. Постепенные метрологические отказы характерны для блоков, составляющих измерительный канал СИ рассматриваемых типов.

Уровень метрологической надежности средств НК определяется как их структурой, так и алгоритмическим содержанием, объединяющим физико-математические модели, адекватно описывающие теплофизические процессы в контролируемых объектах, и математическое измерительное обеспечение для используемых методов неразрушающего контроля. Поэтому метрологический анализ разрабатываемых методов НК ТФС является доминирующим фактором при оценке метрологической надежности средств НК.

Среди показателей, определяющих метрологическую надежность средств НК, особо значимым является метрологический ресурс, оцениваемый временем выхода нормируемой метрологической характеристики за допустимые пределы.

Решение задачи разработки научно обоснованных методов оценки и прогнозирования метрологической надежности средств НК позволяет потребителю определить метрологическую надежность на любой момент времени их эксплуатации, правильно выбрать сроки проверок и профилактических работ, принять меры по предупреждению отказов и, в конечном итоге, проектировать средства НК с увеличенным метрологическим ресурсом.

Поэтому разработка теоретических основ оценки и повышения метрологической надежности при проектировании и эксплуатации средств НК ТФС материалов является актуальной задачей, решение которой позволит не только существенно повысить метрологический уровень разрабатываемых средств НК ТФС материалов и изделий, но и применять в практике контроля качества изготавливаемых на производстве изделий средства НК ТФС с более высоким уровнем метрологической надежности.

Связь с государственными программами и НИР. Диссертационная работа выполнялась в рамках координационного плана научно-исследовательских работ АН СССР по комплексной проблеме "Теплофизика" за 1981 – 1985 гг., шифр 1.9.19 – "Методы, средства и метрологическое обеспечение теплофизических измерений", шифр 1.9.1.10 – "Разработка методов и средств неразрушающего контроля ТФХ теплоизоляции и конструктивных элементов, промышленной аппаратуры, газопроводов, теплопроводов"; координационного плана НИР по направлению 1.3 "Физика твердого тела" на 1986 – 1990 гг., раздел "Неразрушающие физические методы контроля", шифр 1.3.10.5 – "Исследование новых методов бесконтактной термометрии с использованием ИК-светодиодов в задачах тепловой дефектоскопии и технологического контроля"; межвузовской научно-технической программы Госкомобразования РСФСР "Создание высокоэффективных методов и приборов анализа веществ и материалов" на 1990 – 1993 гг.; межвузовской научно-технической программы Госкомобразования РФ "Неразрушающий контроль и диагностика", раздел 4 "Оптические, радиоволновые и тепловые методы неразрушающего контроля" на 1994 – 1997 гг.; программы Минвуза РФ "Комплексные системы измерений, контроля и испытаний в народном хозяйстве" на 1998 – 2000 гг.; программы министерства образования РФ "Инновации высшей школы и введение интеллектуальной собственности в хозяйственный оборот", раздел "Инновационные научно-технические проекты" на 2000 г.; программы Минпромнауки РФ по финансированию научных исследований и экспериментальных разработок на возвратной основе, проект "Создание микропроцессорных приборов оперативного неразрушающего контроля термосопротивления многослойных строительных конструкций с пенополиуретановыми теплозащитными покрытиями", шифр "Теплогидрощит" на 2001 – 2002 гг.

Цель работы состоит в развитии теории метрологической надежности СИ, что требует разработки методов оценки, прогнозирования и повышения метрологической надежности СИ, а также методов оценки эффективности и достоверности прогнозирования метрологической надежности, используемых при проектировании, изготовлении и применении средств НК ТФС материалов и изделий.

Для достижения поставленной цели необходимо решение следующих задач:

- 1 Разработка теоретических основ оценки и прогнозирования метрологической надежности при проектировании СИ.
- 2 Разработка методов повышения метрологической надежности СИ на этапе их проектирования.
- 3 Разработка подхода к оценке метрологической надежности СИ при их эксплуатации.
- 4 Разработка и теоретическое обоснование рекомендаций по эксплуатации СИ с учетом характеристик их метрологической надежности.
- 5 Создание критериев оценки качества прогнозирования метрологической надежности СИ.
- 6 Разработка обобщенной методики оценки и прогнозирования метрологической надежности при проектировании и эксплуатации средств НК ТФС материалов и изделий.

7 Разработка новых контактных и бесконтактных методов и средств неразрушающего экспресс-контроля ТФС материалов и изделий с оценкой метрологической надежности в разрабатываемом для них метрологическом обеспечении.

8 Метрологический анализ разработанных средств НК ТФС материалов и изделий аналитическими методами с использованием математических моделей объектов, измерительных процедур, средств и условий измерения.

9 Проведение экспериментальных исследований, промышленных испытаний и внедрение результатов работы.

Научная новизна. Разработаны теоретические основы оценки и прогнозирования метрологической надежности при проектировании и эксплуатации СИ, базирующиеся на построении математических моделей изменения во времени метрологических характеристик СИ с использованием аппарата аналитико-вероятностного прогнозирования и с коррекцией построенных математических моделей по мере получения данных контрольных проверок, проводимых при эксплуатации СИ.

Предложены методы повышения метрологической надежности СИ, состоящие в коррекции начального запаса по точности проектируемого СИ, а также в оптимальном выборе параметров комплекствующих СИ элементов по критерию метрологической надежности.

Предложен и исследован комплекс показателей оценки качества прогнозирования метрологической надежности СИ.

Впервые предложена обобщенная методика оценки и прогнозирования метрологической надежности при проектировании и эксплуатации средств НК ТФС материалов и изделий.

Разработаны новые методы и средства НК ТФС материалов и изделий и проведена оценка их метрологической надежности на основе предложенной обобщенной методики.

Практическая ценность работы. Разработана и внедрена методика оценки и прогнозирования состояния метрологических характеристик средств НК ТФС материалов и изделий в практику проектирования и эксплуатации средств НК. Разработанная методика может быть использована при создании автоматизированного рабочего места (АРМ) проектировщика средств НК ТФС для метрологического обеспечения проектируемых СИ.

Предложены практические рекомендации по определению межповерочных интервалов и проведению проверок на этапе эксплуатации средств НК ТФС материалов и изделий с учетом характеристик метрологической надежности.

Разработаны и внедрены процессорные измерительные средства и информационно-измерительные системы для НК ТФС материалов и готовых изделий с повышенным уровнем их метрологической надежности.

Для созданных средств НК ТФС материалов и изделий разработаны новые конструкции термозондов, схемотехнические и конструктивные особенности которых позволяют улучшить метрологические свойства и метрологическую надежность проектируемых средств НК в целом.

Методы и методики исследования. Исследования, включенные в диссертацию, базируются на использовании теории точности, теории вероятностей и математической статистики, вычислительной математики, теории теплопроводности, математической физики, операционного исчисления, математической метрологии и алгоритмической теории измерений, а также на накопленном опыте и результатах работы в области создания тепловых методов НК ТФС материалов и изделий и проектирования измерительных средств, реализующих эти методы, с необходимым метрологическим обеспечением, включающим оценку метрологической надежности проектируемых средств НК при выполнении научно-исследовательских работ на базе кафедры "Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем" Тамбовского государственного технического университета (ТГТУ) и межвузовской лаборатории "Теплофизические измерения и приборы", регионального отделения "Российское общество по неразрушающему контролю и технической диагностике (РОНКТД)", а также ряда промышленных и научно-исследовательских организаций.

Реализация научно-технических результатов. Разработанные методы и созданная на их основе обобщенная методика оценки и прогнозирования состояния метрологических характеристик средств НК ТФС материалов и изделий были использованы при проектировании и внедрении следующих приборов и информационно-измерительных систем (ИИС): прибора "НК-ТФХ-82", предназначенного для оперативного технологического контроля теплозащитных свойств обшивки космических аппаратов в РКК "Энергия", ИИС "Термис", используемой в ряде проблемных лабораторий НИИ и предприятий для

экспресс-контроля ТФС строительных материалов и готовых изделий, ИИС "Экспресс-Т" и "ИТСМ-580", используемых для НК ТФС радиопрозрачных обтекателей летательных аппаратов, а также при разработке методов и микропроцессорных измерительных устройств, защищенных 28 авторскими свидетельствами и патентами на изобретения, 17 из которых внедрены в промышленных предприятиях и организациях. Суммарный экономический эффект от внедрения разработок составил 1424 тыс. рублей в год.

Результаты диссертационной работы используются в учебном процессе кафедр "Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем" ТГТУ, а также на кафедрах Воронежской архитектурно-строительной академии, Северо-западного заочного государственного технического университета и Российского химико-технологического университета им. Д. И. Менделеева.

Апробация работы. Основные научные и практические результаты исследований по теме диссертации докладывались и обсуждались на IV Всесоюзной научно-технической конференции (НТК) "Метрологическое обеспечение измерений при низких температурах" (Хабаровск, 1985 г.), Всесоюзной НТК "Автоматизация и роботизация в химической промышленности" (Тамбов, 1988 г.), Всесоюзной НТК "Методы и средства теплофизических измерений" (Севастополь, 1987 г.), Всесоюзной теплофизической конференции "Моделирование САПР, АСНИ и ГАПС" (Тамбов, 1989 г.), Всесоюзной НТК "Теплофизика релаксирующих систем" (Тамбов, 1990 г.), Всесоюзной НТК "Информационно-измерительные системы" (Санкт-Петербург, 1991 г.), Международном семинаре-совещании молодых ученых "Теплофизические проблемы промышленного производства" (Тамбов, 1992 г.), V Российской НТК с международным участием "Оптические, радиоволновые тепловые методы и средства контроля качества материалов, изделий и окружающей среды" (Севастополь, 1993 г.), Международной НТК "Неразрушающий контроль в науке и индустрии-94" (Москва, 1994 г.), II Международной теплофизической школе "Повышение эффективности теплофизических исследований технологических процессов промышленного производства и их метрологического обеспечения" (Тамбов, 1995 г.), III Международной теплофизической школе "Новое в теплофизических свойствах" (Тамбов, 1998 г.), Международной научно-технической конференции "Проектирование и эксплуатация электронных средств" (Казань, 2000 г.), IV Международной теплофизической школе "Теплофизические измерения в начале XXI века" (Тамбов, 2001 г.) и других Всесоюзных, республиканских и зональных конференциях, симпозиумах, семинарах (всего 22), а также на НТК профессорско-преподавательского состава Тамбовского государственного технического университета с 1980 по 2001 гг.

Публикации. Основные результаты диссертационной работы отражены в двух монографиях, более чем в 50 статьях и докладах, защищены 28 авторскими свидетельствами и патентами на изобретения.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы и 4 приложений. Основная часть работы изложена на 334 страницах машинописного текста, содержит 61 рисунок, 15 таблиц и 185 наименований библиографического указателя. Приложения содержат 108 страниц текста, 6 рисунков, 3 таблицы и документы об использовании результатов работы.

Автор выражает благодарность д-ру техн. наук, профессору Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета Э. И. Цветкову за многолетнее сотрудничество в области теоретической метрологии.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи работы, раскрыты научная новизна и практическая ценность, приведены результаты апробации работы. Сформулированы результаты исследований, выносимых на защиту.

В первой главе проведен анализ состояния проблемы оценки и прогнозирования метрологической надежности СИ, в том числе средств НК теплофизических свойств (ТФС) материалов и готовых изделий.

Показано, что математический аппарат общей теории надежности, разработанный для широкого класса технических устройств, не может быть применен для оценки метрологической надежности СИ.

Это обусловлено прежде всего спецификой СИ – его метрологическими свойствами, связью между показателями точности и надежности СИ. Указанное обстоятельство требует разработки принципиально новых методов решения задач оценки и прогнозирования метрологической надежности СИ с учетом монотонного изменения во времени их метрологических характеристик, приводящего к метрологическим отказам.

Среди различных групп СИ, наиболее эффективно используемых во многих отраслях промышленности в качестве информационно-измерительных средств, стремительное развитие, популярность и доступность получили средства НК ТФС материалов и изделий, обладающие широкими функциональными возможностями, экономичностью и позволяющие реализовывать достаточно сложные алгоритмы измерения. Проведен литературный обзор средств и положенных в их основу методов НК ТФС материалов и изделий. Анализ современного состояния теплофизических измерений показал, что метрологическое обеспечение существующих и вновь проектируемых средств НК ТФС не содержит анализа их метрологической исправности и метрологической надежности, что снижает эффективность практического применения указанных СИ. Все это говорит о том, что проблема оценки и прогнозирования метрологической надежности, определяемой характером и темпом изменения нормируемых метрологических характеристик СИ, и прежде всего средств НК ТФС, требует своего развития и решения.

Для разработки метода прогнозирования метрологической надежности СИ проведен литературный обзор существующих методов прогнозирования технического состояния объектов. Исследования показали, что для прогнозирования состояния метрологических характеристик СИ, и в том числе средств НК ТФС, наиболее применим математический аппарат аналитико-вероятностного прогнозирования.

В результате проведенного анализа определена область исследования, поставлены задачи исследования и определены пути их решения. Показано, что основным современным направлением исследований в области метрологической надежности средств НК ТФС материалов и изделий следует считать разработку методов, позволяющих получить адекватное математическое описание процессов изменения во времени метрологических характеристик средств НК, определяющих метрологическую надежность как при проектировании, так и эксплуатации разрабатываемых средств.

Вторая глава посвящена разработке теоретических основ оценки и прогнозирования метрологической надежности при проектировании СИ.

Определены необходимые показатели метрологической надежности СИ и сформулирована задача оценки и прогнозирования состояния метрологических характеристик, определяющих метрологическую надежность исследуемых СИ.

Показано, что при прогнозировании состояния метрологических характеристик СИ возможны две постановки задачи прогнозирования: прямая (прямое прогнозирование) и обратная (обратное прогнозирование). В результате прямого прогнозирования можно определить метрологическую исправность СИ или соответствие его метрологических характеристик допустимым значениям на некоторый момент времени эксплуатации в будущем. Идея обратной задачи прогнозирования заключается в предсказании с некоторой вероятностью момента времени пересечения реализаций случайного процесса изменения исследуемой метрологической характеристики границ поля допуска, т.е. в определении возможного времени наступления метрологического отказа.

Прогнозирование состояния метрологических характеристик СИ имеет своей конечной целью определение показателей метрологической надежности, а также повышение качества функционирования исследуемых средств, улучшение их метрологических свойств. Прогноз дается на основе изучения поведения метрологических характеристик в области контроля T_1 в дискретные моменты $t_0, t_1, \dots, t_k \in T_1$ и позволяет определить:

1 Состояние исследуемой метрологической характеристики в будущие моменты времени эксплуатации $t_{k+\gamma} \in T_2$, T_2 – область прогноза

$$S(t_{k+\gamma}) = H \left[\{ S(t_i) \}_{i=0}^k \right],$$

где S – метрологическая характеристика; $\gamma = 1, 2, \dots, m$; H – оператор прогноза (экстраполяции поведения $S(t)$ из области T_1 на область T_2).

В этом случае сравнение результатов прогноза с допустимыми позволит определить метрологическую исправность СИ на момент времени будущей эксплуатации.

2 Показатели метрологической надежности СИ в момент времени предстоящей эксплуатации, в частности, величину вероятности P сохранения метрологической исправности СИ

$$P[S(t_{k+\gamma}) \in [S_{1\text{доп}}, S_{2\text{доп}}]].$$

3 Возможное время наступления метрологического отказа или метрологический ресурс, определяемый моментом времени пересечения реализаций нестационарного случайного процесса изменения метрологической характеристики $S(t)$ границ поля допуска $[S_{1\text{доп}}, S_{2\text{доп}}]$.

В работе используется аналитико-вероятностный подход к прогнозированию метрологической надежности. Основой такого подхода является математическое моделирование нестационарных случайных процессов изменения во времени метрологических характеристик исследуемых СИ.

Прогнозирование состояния метрологических СИ осуществляется на основе:

- анализа априорных знаний (АЗ) об исследуемом СИ, определяющих поведение его метрологических характеристик в области контроля T_1 (на интервале наблюдения);
- построения функции, выражающей зависимость исследуемой метрологической характеристики $S(t)$ от времени t ;
- экстраполяции значений функции $S(t)$ на область прогноза T_2 .

Особую важность при решении задачи прогнозирования в данном случае приобретает математическое моделирование метрологических характеристик исследуемых СИ.

Предложены следующие этапы построения математической модели метрологической характеристики СИ.

На начальном этапе строится математическая модель функционирования СИ, выражающая зависимость его выходной характеристики от значений входного сигнала, а также параметров комплектующих элементов и внешних влияющих факторов:

$$y = F_1(x, \bar{\xi}, \bar{\varphi}), \quad (1)$$

где y – выходной сигнал; x – входной сигнал; $\bar{\xi} = \{\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_m\}$ – вектор параметров комплектующих элементов; $\bar{\varphi} = \{\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n\}$ – вектор параметров влияющих факторов (условий эксплуатации).

Эта модель строится на основе структурной и принципиальной схем СИ с привлечением теории графов, современных методов расчета электрических цепей, теоретических основ электротехники.

Для изучения метрологических свойств СИ необходимо иметь аналитические выражения для исследуемых метрологических характеристик. Поэтому из (1) можно получить математическую модель метрологической характеристики вида:

$$S = F_2(x, \bar{\xi}, \bar{\varphi}). \quad (2)$$

Если СИ имеет несколько метрологических характеристик, то необходимо построение соответствующего числа зависимостей вида (2).

При рассмотрении достаточно распространенного частного случая постоянства условий эксплуатации $\bar{\varphi}$ математическая модель метрологической характеристики может быть приведена к виду

$$S = F_3(x, \bar{\xi}). \quad (3)$$

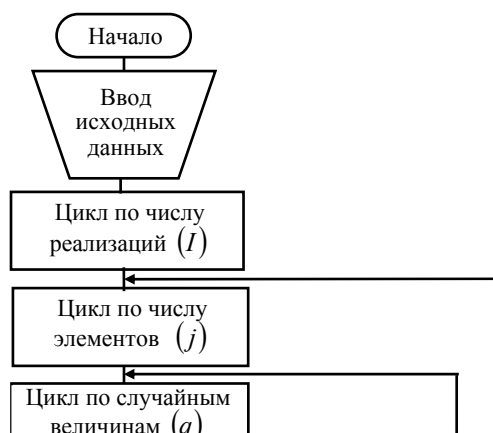


Рис. 1 Блок-схема алгоритма статистического моделирования

метрологической характеристики

Таким образом, математическая модель метрологической характеристики СИ представляет функциональную зависимость исследуемой метрологической характеристики от параметров комплектующих элементов и входного сигнала. С течением времени происходят постепенные изменения параметров элементов СИ. Эти изменения, возникающие вследствие старения и износа, носят необратимый характер и обуславливают постепенное изменение метрологической характеристики СИ, приводящее к метрологическому отказу.

В работе показано, что состояние исследуемой метрологической характеристики СИ в различных временных сечениях области эксплуатации можно определять по ее математической модели вида (3) с учетом данных об изменении параметров входящих в СИ элементов с применением статистического моделирования. При этом используется известное допущение о нормальном законе распределения параметров элементов. Алгоритм моделирования состоит из последовательного расчета характеристик закона распределения значений параметров комплектующих СИ элементов и моделирования реализаций метрологической характеристики СИ в различных временных сечениях. Блок-схема алгоритма статистического моделирования метрологической характеристики приведена на рис. 1.

Конечным результатом проведенного моделирования состояния исследуемой метрологической характеристики СИ в различных временных сечениях области контроля является совокупность данных,

характеризующих значения математического ожидания $M_S(t_i)$ метрологической характеристики в точках контроля $t_i \in T_1$ ($i = 0, \dots, \kappa$) и среднеквадратического отклонения $\sigma_S(t_i)$, $t_i \in T_1$ ($i = 0, \dots, \kappa$).

Следующим этапом является построение математической модели изменения во времени метрологической характеристики СИ, которая представляет собой совокупность аналитических зависимостей, полученных для функции изменения во времени математического ожидания $M_S(t)$ и функций $\psi_{\pm\sigma}(t)$, характеризующих изменение во времени границ отклонения возможных значений метрологической характеристики от ее математического ожидания (рис. 2):

$$\psi_{\pm\sigma}(t) = M_S(t) \pm c\sigma_S(t), \quad (4)$$

где c – постоянный коэффициент, выбираемый в зависимости от заданного уровня доверительной вероятности P и закона распределения метрологической характеристики.

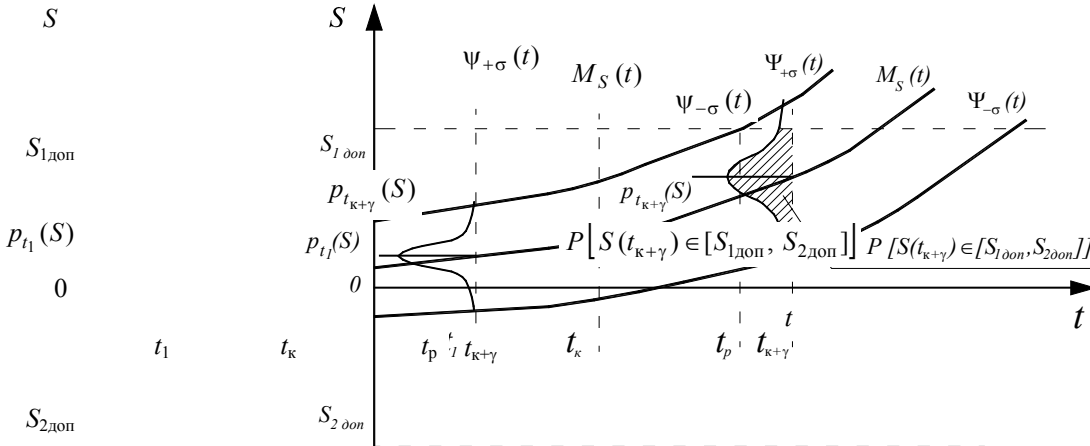


Рис. 2 Изменение во времени метрологической характеристики СИ

Показано, что для математического описания изменения во времени функций $M_S(t)$, $\psi_{\pm\sigma}(t)$ целесообразно использовать полиномиальные зависимости вида

$$S(t) = \sum_{\mu=0}^{\rho} a_{\mu} t^{\mu}, \quad \rho = 2, 3. \quad (5)$$

Экстраполяция функций $M_S(t)$ и $\psi_{\pm\sigma}(t)$ на область будущих значений времени эксплуатации СИ дает решение задачи прогнозирования метрологической надежности.

Предложены методы повышения метрологической надежности СИ на этапе проектирования.

Разработан метод повышения метрологического ресурса, основанный на коррекции запаса по точности СИ. Запас по точности Z исследуемого СИ в зависимости от характера изменения метрологической характеристики (убывания или возрастания), известного в результате проведенного прогнозирования, может быть вычислен по формулам

$$Z = |S_{1доп} - M_S(0)| \quad \text{при} \quad \frac{dS}{dt} > 0; \quad (6)$$

$$Z = |S_{2доп} + M_S(0)| \quad \text{при} \quad \frac{dS}{dt} < 0. \quad (7)$$

При этом, зная характер изменения функций $M_S(t)$, $\psi_{\pm\sigma}(t)$, можно увеличить метрологический ресурс исследуемого СИ путем коррекции начального уровня его точности таким образом, чтобы

$$\psi_{-\sigma}(0) + S_{1доп} = 0 \quad \text{при} \quad \frac{dS}{dt} > 0 \quad (8)$$

или

$$\psi_{\sigma}(0) - S_{2доп} = 0 \quad \text{при} \quad \frac{dS}{dt} < 0. \quad (9)$$

Второй метод, позволяющий повысить метрологическую надежность СИ, основан на выборе оптимальных параметров комплектующих элементов проектируемого средства, обеспечивающих максимальное или требуемое значение показателя метрологической надежности.

Задача обеспечения максимальной метрологической надежности может быть сформулирована в виде задачи отыскания максимального метрологического ресурса:

$$t_p^* = \max \left\{ \min_{i=1, \dots, l} \{t_{pi}\} \right\} \text{ при } \bar{S}(t, \bar{\varphi}) = \text{var}, \bar{\varphi} \in \Phi, y(t, \bar{\varphi}) \in A, \quad (10)$$

где $\bar{y}(t, \bar{\varphi})$ – совокупность характеристик исследуемого измерительного средства; A – область работоспособности; Φ – область значений внешних воздействий.

Соответственно, задача обеспечения требуемого уровня метрологической надежности будет рассматриваться в виде задачи обеспечения требуемого метрологического ресурса $t_{\text{зад}}$ проектируемого СИ при заданном уровне значимости g :

$$P \{t_p - t_{\text{зад}} \geq 0\} \geq 1 - g \text{ при } \bar{S}(t, \bar{\varphi}) = \text{var}, \bar{\varphi} \in \Phi, y(t, \bar{\varphi}) \in A. \quad (11)$$

В третьей главе проводится теоретическое исследование вопросов оценки метрологической надежности при эксплуатации СИ.

Показано, что математические модели изменения во времени метрологических характеристик СИ, и в том числе средств НК ТФС материалов и изделий, позволяют не только оценить показатели метрологической надежности исследуемых СИ, но и выработать рекомендации по эксплуатации рассматриваемых СИ: выбору межповерочных интервалов, необходимого числа измерений при каждой поверке, первоначального объема выборки СИ при экспериментальных исследованиях на долговременную стабильность.

Определение перечисленных параметров производится при условии проведения проверок исследуемых СИ образцовым измерительным прибором с разрешающей способностью Ω .

Используя распределения Стьюдента и χ^2 , получена система уравнений, решение которой графоаналитическим способом позволяет определить необходимое число измерений N при проведении в момент времени t_i ($i = 1, \dots, k$) проверок эксплуатируемого СИ:

$$\begin{cases} \frac{4\sigma_S^2(t_i)}{\Omega^2} = \frac{(N-1)N}{\chi_{N-1, \frac{\alpha}{2}}^2 t_{P, N-1}}; \\ \frac{4\sigma_S^2(t_i)}{\Omega^2} = \frac{(N-1)N}{\chi_{N-1, 1-\frac{\alpha}{2}}^2 t_{P, N-1}}. \end{cases} \quad (12)$$

где $t_{P, N-1}$ – коэффициент Стьюдента; $\chi_{N-1, \frac{\alpha}{2}}^2, \chi_{N-1, 1-\frac{\alpha}{2}}^2$ – критические точки распределения χ^2 .

Предложены аналитические зависимости, позволяющие определить величину межповерочного интервала Δt_i с учетом математической модели изменения во времени исследуемой метрологической характеристики СИ. При использовании для описания процесса изменения во времени метрологической характеристики зависимостей вида (5) межповерочный интервал может быть рассчитан по формулам:

$$\Delta t_i = \frac{-(a_1 + 2a_2 t_i) \pm \sqrt{(a_1 + 2a_2 t_i)^2 + 4a_2 \Omega}}{2a_2} \quad (13)$$

$$\text{и } \Delta t_i = \sqrt[3]{-Q_1 + \sqrt{Q_1^2 + Q_2^3}} + \sqrt[3]{-Q_1 - \sqrt{Q_1^2 + Q_2^3}} - \frac{1}{3} \left(\frac{a_2 + 3a_3 t_i}{a_3} \right), \quad (14)$$

где

$$Q_1 = \frac{1}{27} \left(\frac{a_2 + 3a_3 t_i}{a_3} \right)^3 - \frac{1}{6} \left(\frac{a_1 + 2a_2 + 3a_3 t_i}{a_3} \right) \times \left(\frac{a_2 + 3a_3 t_i}{a_3} \right) + \frac{1}{2} \frac{\Omega}{a_3};$$

$$Q_2 = \frac{1}{3} \left(\frac{a_1 + 2a_2 + 3a_3 t_i^2}{a_3} \right) - \frac{1}{9} \left(\frac{a_2 + 3a_3 t_i}{a_3} \right)^2; \quad a_1, a_2, a_3 - \text{постоянные коэффициенты.}$$

Для организации экспериментальных исследований СИ на долговременную стабильность решен вопрос о первоначальном объеме выборки СИ, необходимом при проведении эксперимента. В этом случае предполагается, что часть СИ выйдет из строя за время эксперимента длительностью Δt из-за внезапных отказов. С использованием распределения Стьюдента и χ^2 получена система уравнений, решение которой графоаналитическим способом позволяет определить первоначальный объем выборки N_0 :

$$\begin{cases} \frac{4\sigma_S^2(t_k)}{\Omega^2} = \frac{\bar{b} N_0 (\bar{b} N_0 - 1)}{t_{P, N-1}^2 \chi_{N-1, \frac{\alpha}{2}}^2}, \\ \frac{4\sigma_S^2(t_k)}{\Omega^2} = \frac{\bar{b} N_0 (\bar{b} N_0 - 1)}{t_{P, N-1}^2 \chi_{N-1, 1-\frac{\alpha}{2}}^2}, \end{cases} \quad (15)$$

где $\bar{\lambda}$ – интенсивность внезапных отказов; $\Delta t = t_k - t_0$ – рассматриваемый интервал времени; $\bar{b} = \frac{2 - \bar{\lambda} \Delta t}{2 + \bar{\lambda} \Delta t}$.

Разработаны два способа коррекции математической модели изменения во времени метрологической характеристики с учетом данных эксплуатации.

Сущность первого способа заключается в следующем. По измеренным в точках контроля t_i , $i=1, \dots, k$ значениям $M_S^*(t_i)$ и $\psi_{\pm\sigma}^*(t_i)$ и значениям $M_S(t_i)$ и $\psi_{\pm\sigma}(t_i)$, вычисляемым по математической модели изменения метрологической характеристики, определяется величина погрешности прогнозирования состояния метрологической характеристики на этапе проектирования

$$d_m(t_i) = M_S^*(t_i) - M_S(t_i); \quad (16)$$

$$d_{\pm\sigma}(t_i) = \psi_{\pm\sigma}^*(t_i) - \psi_{\pm\sigma}(t_i), \quad (17)$$

где $d_m(t_i)$ и $d_{\pm\sigma}(t_i)$ – составляющие погрешности прогнозирования исследуемой метрологической характеристики СИ в точках контроля t_i , $i=1, \dots, k$.

Полученные в результате аппроксимации функции изменения во времени составляющих погрешности прогнозирования $d_m(t)$ и $d_{\pm\sigma}(t)$ используются для коррекции математической модели изменения во времени метрологической характеристики СИ на интервале времени $t > t_k$:

$$M_{S_{\text{кор}}}(t) = M_S(t) + d_m(t); \quad (18)$$

$$\psi_{\pm\sigma_{\text{кор}}}(t) = \psi_{\pm\sigma}(t) + d_{\pm\sigma}(t), \quad (19)$$

где $M_{S_{\text{кор}}}(t)$ и $\psi_{\pm\sigma_{\text{кор}}}(t)$ – составляющие скорректированной математической модели процесса изменения во времени метрологической характеристики СИ.

Второй способ коррекции заключается в сведении к минимуму различий между значениями метрологической характеристики СИ, определенными по математической модели ее изменения во времени, и данными экспериментальных исследований в точках контроля t_i ($i=1, \dots, k$) введением в исходную модель корректировочных коэффициентов γ_μ . Корректировочные коэффициенты γ_μ находятся решением системы $(k+1)$ уравнений вида:

$$\begin{cases} \sum_{\mu=0}^p \gamma_\mu a_\mu t^{\mu} - S^*(t_i) = 0, \quad i=1, \dots, k; \\ \gamma_0 = 1. \end{cases} \quad (20)$$

Скорректированная математическая модель метрологической характеристики, используемая в дальнейшем для прогнозирования, запишется в виде

$$S_{\text{кор}}(t) = \sum_{\mu=0}^p \gamma_\mu a_\mu t^{\mu}. \quad (21)$$

В заключительной части третьей главы приведена обобщенная методика оценки и прогнозирования метрологической надежности при проектировании и эксплуатации средств НК ТФС материалов и изделий, блок-схема алгоритма которой представлена на рис. 3. Методика основана на разработанных теоретических положениях метода оценки и прогнозирования метрологической надежности СИ и позволяет оценить метрологическую исправность и метрологический ресурс первичных измерительных преобразователей (ПИП) и аналоговых блоков, составляющих измерительный канал средства НК, как на этапе проектирования, так и эксплуатации без проведения длительного эксперимента по определению стабильности характеристик исследуемых средств, определить необходимые при эксплуатации средств НК данные по величине межповерочных интервалов, числу измерений метрологической характеристики при проведении поверок исследуемых средств. Методика может быть применена и для других СИ аналогичной структуры.

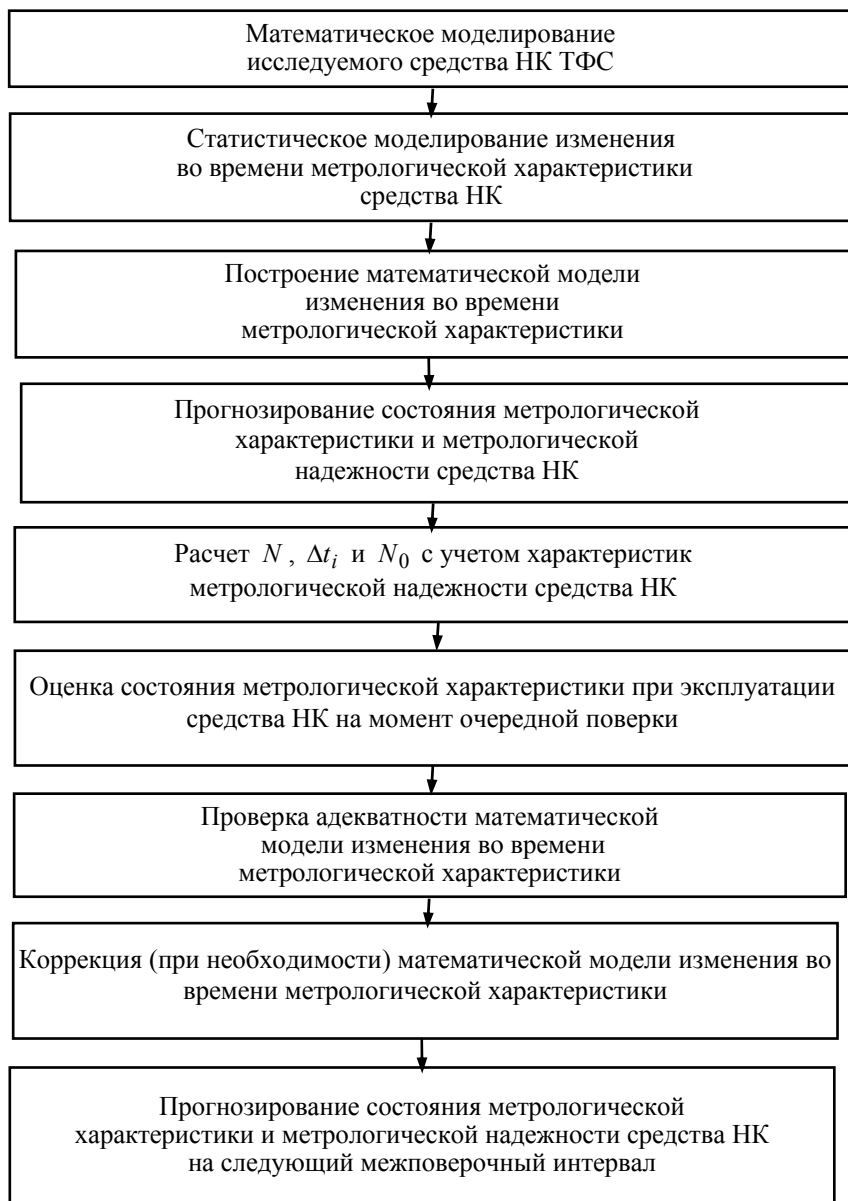


Рис. 3 Обобщенная методика оценки и прогнозирования метрологической надежности средств НК ТФС

В четвертой главе рассматриваются алгоритмы, структуры измерительных цепей и уравнения измерений комплекса ТФС материалов и изделий методами НК и проводится оценка их метрологической надежности на основе разработанного в предыдущих главах диссертации метода оценки и прогнозирования метрологической надежности СИ.

Первый раздел главы посвящен контактными методами НК ТФС, в которых осуществляется непосредственный контакт источника тепловой энергии и термоприемников с участком поверхности исследуемого объекта измерения для определения температурных полей в зоне теплового воздействия. При этом на исследуемые объекты осуществляется импульсное или частотно-импульсное тепловое воздействие. Алгоритмы и СИ реализуют как абсолютные, так и относительные методы НК ТФС, позволяют оперативно измерять весь комплекс ТФС за один эксперимент, основаны на единой методологии их организации. Показаны пути модернизации и оптимизации алгоритмов измерения по критерию повышения метрологического уровня результатов за счет варьирования точек контроля температуры и тепловых потоков, выбора температурно-временных режимов эксперимента и т.д. Для разработанных алгоритмов измерения приведены структуры измерительных цепей и уравнения измерений ТФС. Так, например, для алгоритма измерения ТФС при импульсном тепловом воздействии уравнения измерений, представляющие собой модели измерительных процедур и средств измерения, имеют вид:

$$a_j^* = \left\langle \left\langle \frac{\langle (x_1)^2 \rangle_{q_{1j}} \langle (\tau_2 - \tau_1) \rangle_{q_{2j}} \langle q_{3j} \rangle_{q_{5j}}}{\langle 4 \tau_1 \tau_2 \rangle_{q_{4j}}} \right\rangle_{q_{5j}} \times \left(\ln \left\langle \frac{\langle T_j^*(x_1, \tau_1) \rangle_{q_{6j}}}{\langle T_j^*(x_1, \tau_2) \rangle_{q_{7j}}} \right\rangle_{q_{8j}} \right)^{-1} \right\rangle_{q_{10j}}, \quad (22)$$

$$\lambda_j^* = \left\langle \left\langle \frac{\langle p \rangle_{q_{3j}}}{\langle 2\pi \tau_1 \rangle_{q_{1j}} \langle T_j^*(x_1, \tau) \rangle_{q_{2j}}} \right\rangle_{q_{3j}} \times \left\langle \exp \left\langle - \frac{\langle (x_1)^2 \rangle_{q_{4j}}}{\langle 4a_j^* \tau_1 \rangle_{q_{5j}}} \right\rangle_{q_{6j}} \right\rangle_{q_{7j}} \right\rangle_{q_{8j}}. \quad (23)$$

где p – количество тепла, выделяемого с единицы длины линейного источника тепла; x_1 – координата точки поверхности на заданном расстоянии от источника тепла; τ_1 и τ_2 – заранее заданные моменты времени контроля температур в точке x_1 ; $T(x_1, \tau_1)$ и $T(x_2, \tau_1)$ – температура в точке x_1 и x_2 в моменты времени τ_1 и τ_2 , соответственно; T_j^* , a_j^* , λ_j^* – соответственно температура, коэффициенты температуро- и теплопроводности в произвольном j -м измерительном эксперименте.

Уравнения (22) и (23) представляют процедуры косвенных измерений, в которых используются следующие результаты прямых измерений температуры $T(x, \tau)$:

$$T_j^*(x_1, \tau_1) = \left\langle T^h \left(\left\langle \left[bU(T_j(x_1, \tau)) \right]_{\Delta_k U}^h \right\rangle_{q_{1j}} \langle m_\tau \rangle_{q_{2j}} \right) \right\rangle_{q_{3j}}, \quad (24)$$

где b – коэффициент нормализации с номинальным значением b_h ; $U(T)$ – статическая характеристика преобразования датчика температуры (термоприемника); $T^h(u)$ – градуировочная характеристика термоприемника; $m_\tau = \frac{\Delta_k T}{T' b_h}$ – коэффициент масштабирования, причем $\Delta_k T$ – интервал квантования, T' – принятая единица измерения; $\langle \cdot \rangle$ – числовой результат измерительного преобразования, выполненного в цифровой форме; $q_{1j}, q_{2j}, \dots, q_{nj}$ – характеристики округления, зависящие от разрядности процессора.

Уравнения измерений и структуры измерительных цепей являются основой для анализа характеристик погрешностей результатов измерения на аналитической основе, а также для оценки

метрологической надежности проектируемых средств, реализующих разработанные методы НК ТФС исследуемых объектов.

В разделе также представлены алгоритмы, структуры измерительных цепей и уравнения измерений ТФС для частотно-импульсного вида теплового воздействия на объект исследования. Показано, что отличительной особенностью данных алгоритмов измерения является возможность получения информации о параметрах теплофизического эксперимента в дискретной форме (число- или частотно-импульсной форме), что позволяет легко преобразовывать информацию в цифровую форму, а также реализовать эти алгоритмы измерения на базе процессорных устройств.

Во втором разделе главы представлены бесконтактные методы измерений ТФС, в которых тепловое воздействие на исследуемые объекты осуществляется от подвижного точечного источника энергии (лазера).

В качестве примера приведен один из методов бесконтактного неразрушающего контроля, позволяющий исключить влияние на результаты измерения искомым ТФС тепловых потерь с поверхности исследуемых объектов в окружающую среду за счет конвективного и лучистого теплообмена и состоящий в том, что источник тепловой энергии и два термоприемника, один из которых жестко связан с источником, фокусируют на поверхность исследуемого изделия, затем перемещают их с постоянной скоростью V относительно изделия. Для двух режимов теплового воздействия осуществляют поиск и измерение таких расстояний между источником и термоприемниками, при которых исключается влияние тепловых потерь на результаты контролируемых квазистационарных температур, а искомые ТФС определяются по формулам:

$$a = \frac{V(R_1 - x_1)}{2 \ln \left[\frac{R_{x1}}{R_1} \right]}, \quad \lambda = \frac{P_{\text{ит}}}{2\pi T_1^*(x)[R_{x2} - R_{x1}]},$$

где x_1 , R_1 , R_{x1} , R_{x2} – расстояния между центром пятна нагрева и термоприемниками соответственно для двух режимов теплового воздействия (мощность источника $p_{\text{ит}}$ во втором режиме увеличивается в два раза), $T_1^*(x)$ – контролируемая первым термоприемником температура.

Разработанные и представленные в работе бесконтактные методы измерения ТФС материалов и изделий обладают высокой оперативностью и производительностью измерений, широкими функциональными возможностями, перспективой применения в различных технологических процессах для контроля качества и свойств движущихся или вращающихся объектов измерения.

В третьем разделе главы представлены контактные и бесконтактные методы определения ТФС материалов, использующие адаптивные алгоритмы измерения, приведены измерительные цепи и уравнения измерения для этих алгоритмов. Отличительной особенностью этих алгоритмов является то, что в процессе измерительного эксперимента осуществляется адаптивный поиск частоты или мощности тепловых импульсов, а иногда и того и другого, для оперативного вывода исследуемого объекта на заданный тепловой режим с полной гарантией сохранения целостности и эксплуатационных характеристик объекта. В бесконтактных методах к этому еще добавляется адаптация по скорости движения источника энергии и термоприемника над исследуемым объектом, а также по расстоянию между ними, что обеспечивает возможность контроля избыточных температур в самых энергонагруженных точках объекта и сравнения их с температурой термодеструкции исследуемых материалов, а также обуславливает наибольшую точность температурных измерений.

В заключительном разделе четвертой главы рассмотрен подход к анализу характеристик погрешностей результатов измерений ТФС материалов, основанный на использовании аналитических соотношений, содержащихся в математических моделях процедур измерений. Получение оценок характеристик погрешностей на расчетной основе предполагает использование содержащихся в математических моделях объектов и процедур измерений сведений, необходимых для синтеза аналитических соотношений. С использованием этого принципа проведен анализ погрешностей и их характеристик для процедур измерения в соответствии с разработанными методами НК ТФС материалов и изделий. Для основных типовых уравнений измерений ТФС получены структуры полной погрешности измерения. Так, например, для измерения температуры в соответствии с уравнением (24) структура полной погрешности определяется

$$\Delta T_j^* = \Delta_U T_j^* + \Delta_b T_j^* + \Delta_k T_j^* + \Delta_{01} T_j^* + \Delta_{02} T_j^*, \quad (25)$$

где $\Delta_U T_j^*$ – погрешность из-за отличия реальной статической характеристики преобразования датчика от номинальной, так как $T^H(U) = U^{H^{-1}}(T)$ – градуировочная характеристика, есть преобразование, обратное номинальному преобразованию датчика, эта составляющая включает в себя погрешность аппроксимации при реализации градуировочной характеристики на программной основе; $\Delta_b T_j^*$ – погрешность из-за отличия b от номинального значения b_n ; $\Delta_k T_j^*$ – погрешность из-за квантования; $\Delta_{01} T_j^*$ – погрешность из-за округления результата аналого-цифрового преобразования при считывании; $\Delta_{02} T_j^*$ – погрешность из-за округления конечного результата (результата обратного преобразования).

В работе приведена оценка вклада каждой компоненты в соответствующую характеристику погрешности и выделены доминанты в составе полной погрешности. Процедуры выделения доминант сводятся к следующему: после определения всех составляющих ΔT_j^* производится их упорядочивание, затем из рассмотрения исключаются все компоненты с малыми значениями ΔT_j^* , суммарный вклад которых меньше установленного. Так, в рассмотренном примере доминантами в составе полной погрешности являются $\Delta_U T_j^*$ и $\Delta_b T_j^*$.

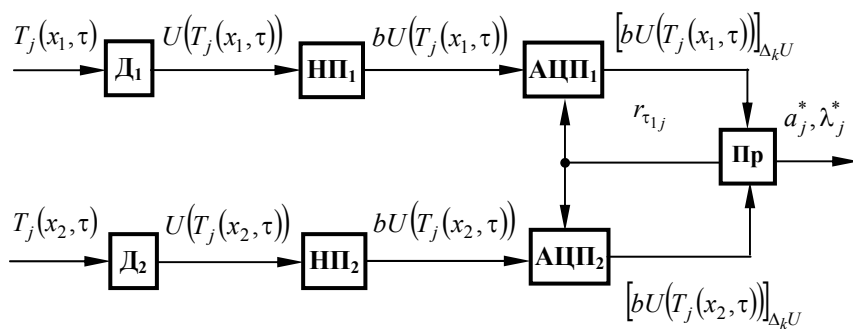


Рис. 4 Структура измерительной цепи метода НК ТФС:

Д_{1, 2} – датчики; НП₁, НП₂ – нормирующие преобразователи;

АЦП₁ и АЦП₂ – аналого-цифровые преобразователи;

r_{τ_1} – идентификатор управляющей команды, по которой в заданный момент времени τ_1 информация с АЦП₁ и АЦП₂ заносится в память процессора Пр

Исследован вопрос оценки метрологической надежности разрабатываемых средств НК ТФС на примере одного из представленных выше алгоритмов НК. На рис. 4. представлена структура измерительной цепи для алгоритма измерения, описываемого уравнениями (22) – (24).

В качестве показателя метрологической надежности был выбран метрологический ресурс t_p .

Применив разработанную и представленную в третьей главе обобщенную методику оценки состояния метрологических характеристик средств НК с использованием при математическом моделировании метрологических характеристик уравнения измерения (24) был определен метрологический ресурс спроектированного средства НК ТФС.

В качестве оцениваемой метрологической характеристики рассматривалась относительная погрешность δ , которая рассчитывалась для каждого из двух каналов в представленной на рис. 4 структурной схеме исследуемого СИ.

На рис. 5 представлены зависимости, определяющие изменение во времени относительной погрешности для каждого из измерительных каналов и позволяющие оценить с доверительной вероятностью $P = 0,997$ метрологический ресурс исследуемого средства НК, составляющий $t_p = 17\ 200$ ч.

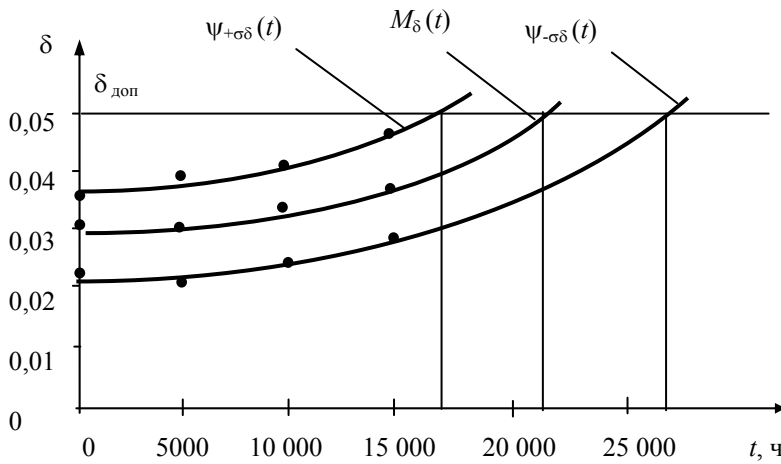


Рис. 5 Изменение во времени погрешности $\delta(t)$ измерительного канала

В пятой главе предложен и исследован комплекс критериев оценки качества прогнозирования метрологической надежности СИ, и в том числе средств НК ТФС, включающий критерии эффективности и достоверности прогнозирования.

Показано, что для решения прогнозирования метрологической надежности СИ может быть предложен критерий эффективности вида

$$K_3 = \frac{D_{T_2}(S)}{D_{T_1}(S)}, \quad (26)$$

где $D_{T_1}(S) = \{t_0, t_1, \dots, t_k, S(t_0), S(t_1), \dots, S(t_k)\}$,

$D_{T_2}(S) = \{t_{k+1}, t_{k+2}, \dots, t_{k+m}, S(t_{k+1}), S(t_{k+2}), \dots, S(t_{k+m})\}$ – исходное и полученное в результате прогнозирования множества данных; $S(t_1), \dots, S(t_{k+m})$ – величина исследуемой метрологической характеристики СИ в различных временных сечениях: $t_0, t_1, \dots, t_k, t_{k+m}$.

Для прямой и обратной задач прогнозирования метрологической надежности выражение (26) соответственно представляется в виде

$$K_3 = \frac{t_{k+1} - t_k}{\sum_{i=1}^k \Delta t_i} = \frac{\Delta t}{T_k}, \quad (27)$$

где Δt – значение $(k+1)$ -го межповерочного интервала, $\Delta t \in T_2$; T_k – интервал времени контроля и

$$K_3 = \frac{t'_{\text{отк}}}{t_{\text{отк}}}, \quad (28)$$

где $t'_{\text{отк}}$ – время наступления метрологического отказа исследуемого СИ, полученное в результате прогнозирования; $t_{\text{отк}}$ – время наступления метрологического отказа, определенное в технических условиях для исследуемого СИ.

Получены математические выражения для определения критерия эффективности при решении как прямой, так и обратной задач прогнозирования метрологической надежности СИ при условии, что математическая модель изменения во времени исследуемой метрологической характеристики может быть представлена линейной, экспоненциальной, логарифмической или полиномиальной зависимостями. Численная оценка полученных значений критериев эффективности показала, что наиболее целесообразно с точки зрения эффективности прогнозирования использование в качестве моделей изменения во времени метрологических характеристик СИ полиномиальных зависимостей.

Показано, что достоверность прогнозирования метрологической надежности СИ, оцениваемая как ошибка при проведении прогнозирования, определяется с учетом выбранного для прямой или обратной

задач прогнозирования показателя метрологической надежности, а также степени адекватности априорных знаний (АЗ) об исследуемом СИ.

Рассматривая прямую задачу прогнозирования метрологической надежности СИ как определение вероятности сохранения метрологической исправности СИ в области предстоящей эксплуатации T_2 (области прогноза) $P[S(t_{k+\gamma}) \in [S_{1\text{доп}}, S_{2\text{доп}}]]$, $t_{k+\gamma} \in T_2$ мерой достоверности результатов прогнозирования принята ошибка

$$\delta P[S(t_{k+\gamma}) \in [S_{1\text{доп}}, S_{2\text{доп}}]] = P^*[S(t_{k+\gamma}) \in [S_{1\text{доп}}, S_{2\text{доп}}]] - P[S(t_{k+\gamma}) \in [S_{1\text{доп}}, S_{2\text{доп}}]], \quad (29)$$

где $P[S(t_{k+\gamma}) \in [S_{1\text{доп}}, S_{2\text{доп}}]]$ – достоверный прогноз, соответствующий адекватным АЗ.

При решении обратной задачи прогнозирования метрологической надежности СИ мера достоверности прогноза рассматривается как ошибка, определяемая выражением

$$\delta t_{\text{отк}} = t_{\text{отк}}^* - t_{\text{отк}}, \quad (30)$$

где $t_{\text{отк}}$ – достоверный результат прогнозирования, соответствующий адекватным АЗ.

Формирование результата прогнозирования метрологической надежности как в виде $P[S(t_{k+\gamma}) \in [S_{1\text{доп}}, S_{2\text{доп}}]]$, так и в виде величины $t_{\text{отк}}$ предполагает знание изменения во времени условий эксплуатации $\bar{\varphi}(t)$ и множества значений $\{S(t_i)\}_{i=1}^k$, которые всегда имеют приближенный характер, а используемые оценки $\bar{\varphi}^*(t)$ и $\{S^*(t_i)\}_{i=1}^k$ отличаются от истинных характеристик $\bar{\varphi}(t)$ и $\{S(t_i)\}_{i=1}^k$, что влияет на достоверность прогнозирования.

Соответственно выражения (29) и (30) записываются в виде

$$\begin{aligned} \delta P[S[(t_{k+\gamma}), \bar{\varphi}(t), \{S(t_i)\}_{i=1}^k] \in [S_{1\text{доп}}, S_{2\text{доп}}]] &= \\ &= P^*[S[(t_{k+\gamma}), \bar{\varphi}(t), \{S(t_i)\}_{i=1}^k] \in [S_{1\text{доп}}, S_{2\text{доп}}]] - \\ &\quad - P[S[(t_{k+\gamma}), \bar{\varphi}(t), \{S(t_i)\}_{i=1}^k] \in [S_{1\text{доп}}, S_{2\text{доп}}]], \end{aligned} \quad (31)$$

$$\begin{aligned} \delta t_{\text{отк}}[S(t_{k+\gamma}), \bar{\varphi}(t), \{S(t_i)\}_{i=1}^k] &= t_{\text{отк}}^*[S(t_{k+\gamma}), \bar{\varphi}(t), \{S(t_i)\}_{i=1}^k] - \\ &\quad - t_{\text{отк}}[S(t_{k+\gamma}), \bar{\varphi}(t), \{S(t_i)\}_{i=1}^k]. \end{aligned} \quad (32)$$

Проведена структуризация показателя достоверности для прямой и обратной задач прогнозирования метрологической надежности СИ. Анализ полученных компонентов рассматриваемого показателя позволил определить пути повышения достоверности прогнозирования метрологической надежности СИ.

В шестой главе приведены результаты практического применения разработанного метода оценки метрологической надежности и обобщенной методики оценки и прогнозирования состояния метрологических характеристик СИ. В качестве объектов исследования выбраны аналоговые блоки, составляющие измерительные каналы СИ, реализующих контактные и бесконтактные методы НК ТФС материалов и изделий: два варианта блока ПИП, используемых в бесконтактных средствах НК, нормирующий преобразователь (НП) и аналого-импульсный преобразователь (АИП).

Таблица 1

| Типы аналоговых блоков | ПИП № 1 | ПИП № 2 | НП | АИП |
|----------------------------------|---------|---------|--------|--------|
| Метрологический ресурс t_p , ч | 28 200 | 24 100 | 22 500 | 26 500 |

Для каждого из названных блоков в соответствии с разработанной методологией построены математические модели вида (3) и (4). Экстраполяция математических моделей изменения во времени нормируемой метрологической характеристики (основной относительной погрешности) блоков позволила оценить значения показателя метрологического ресурса для них. В табл. 1 представлены сводные данные по величине метрологического ресурса для исследованных аналоговых блоков измерительного канала типовых средств НК ТФС.

Для блока НП в соответствии с разработанной обобщенной методикой оценки и прогнозирования состояния метрологических характеристик разработаны необходимые рекомендации по величине межповерочного интервала, количеству измерений при поверках и проведена коррекция математической модели его метрологической характеристики с учетом данных его реальной эксплуатации и результатов контрольных поверок.

Для СИ, реализующих контактные методы измерения ТФС объектов, разработаны оригинальные конструкции измерительных термозондов.

Повышение точности температурно-временных измерений за счет использования микротермобатарей и конструктивных особенностей предложенных вариантов зондов повышает метрологический уровень конечных результатов измерений ТФС объектов в средствах контактного НК.

Приведено подробное решение задачи повышения метрологической надежности СИ на примере исследования блока НП, входящего в измерительный канал процессорного средства НК ТФС. Показана возможность увеличения метрологического ресурса более чем на 20 % за счет оптимального выбора параметров элементов, входящих в рассматриваемый блок.

Проведенные экспериментальные исследования блоков измерительных каналов типовых средств НК ТФС объектов показали перспективность проведения исследований в области оценки метрологической надежности при разработке средств НК ТФС материалов и изделий.

В приложениях приведены результаты и анализ исследований метрологических характеристик разработанных средств НК ТФС материалов и изделий; теоретические и расчетные дополнения к основным главам диссертации; документы, подтверждающие внедрение результатов диссертационной работы.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Общим результатом работы является дальнейшее развитие теории метрологической надежности СИ.

При решении данной проблемы получены следующие результаты.

1 Разработаны теоретические основы оценки и прогнозирования метрологической надежности при проектировании СИ, базирующиеся на построении математических моделей изменения во времени метрологических характеристик СИ с использованием аппарата аналитико-вероятностного прогнозирования.

2 На основе математического моделирования СИ предложены методы повышения метрологической надежности СИ, состоящие в коррекции начального запаса по точности проектируемого средства, а также в выборе по критерию метрологической надежности оптимальных параметров элементов блоков исследуемых СИ.

3 Предложен подход к оценке метрологической надежности СИ при их эксплуатации, в основу которого положен разработанный метод оценки и прогнозирования метрологической надежности исследуемых средств с коррекцией построенных математических моделей метрологических характеристик по мере получения данных контрольных поверок, проводимых в процессе эксплуатации СИ.

4 Разработаны способы коррекции математической модели процесса изменения во времени метрологической характеристики СИ на этапе эксплуатации, что позволяет повысить достоверность и точность прогнозирования метрологической надежности указанных средств в области будущих значений времени эксплуатации.

5 Разработаны и теоретически обоснованы рекомендации по эксплуатации СИ с учетом характеристик их метрологической надежности: определение величины межповерочных интервалов, расчет необходимого числа измерений при проведении метрологических поверок СИ, определение первоначального объема выборки при экспериментальных исследованиях СИ.

6 Предложен и исследован комплекс показателей качества прогнозирования метрологической надежности СИ, включающий критерии эффективности и достоверности прогнозирования. Анализ предложенных показателей позволил выделить основные факторы, влияющие на их значения.

7 Разработана и апробирована обобщенная методика прогнозирования метрологической надежности при проектировании и эксплуатации средств НК ТФС материалов и изделий. Применение данной методики позволяет оценить и прогнозировать метрологическую исправность и метрологический ресурс средства НК как на этапе его проектирования, так и эксплуатации без проведения длительных экспериментов по определению долговременной стабильности метрологических характеристик средств НК ТФС материалов и изделий, а также решить задачу повышения метрологического ресурса средства НК на этапе его проектирования.

8 Разработан комплекс новых контактных и бесконтактных методов и реализующих их средств для неразрушающего экспресс-контроля ТФС материалов и изделий с их метрологическим анализом, включающим оценку и прогнозирование состояния метрологических характеристик, определяющих метрологическую надежность разработанных средств НК.

9 Сформулированы и решены задачи оценки метрологической надежности средств НК ТФС материалов и изделий на базе аналитических соотношений, полученных с использованием математических моделей объектов, измерительных процедур, средств и условий измерения. Для основных типовых уравнений измерений ТФС получены структуры полной погрешности измерений и проведена оценка изменения во времени характеристик погрешности, позволяющая определить показатели метрологической надежности разрабатываемых средств НК ТФС материалов и изделий.

10 Разработанный подход дает возможность выделить в структуре средств НК блоки, изменение метрологических характеристик которых оказывает доминирующее влияние на изменение показателей метрологической надежности средства НК ТФС в целом, и принять меры к повышению метрологической надежности соответствующей модернизацией выделенных блоков.

11 Проведены исследования разработанных средств НК ТФС материалов и изделий, состоящие в определении метрологического ресурса как одного из основных показателей метрологической надежности блоков измерительных каналов проектируемых средств НК ТФС. Эти исследования подтвердили корректность представленного метода оценки и прогнозирования метрологической надежности средств НК ТФС, эффективность его практического применения в области теплофизических измерений.

12 Разработанные методы и созданная на их основе обобщенная методика оценки и прогнозирования метрологической надежности средств НК ТФС материалов и изделий внедрены в различных научно-исследовательских и промышленных организациях России. Оригинальные разработки признаны изобретениями.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1 *Мищенко С. В., Цветков Э. И. Чернышова Т. И.* Метрологическая надежность измерительных средств. – М.: Машиностроение, 2001. – 96 с.

2 *Чернышова Т. И. Чернышов В. Н.* Методы и средства неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов. – М.: Машиностроение, 2001. – 240 с.

3 *Чернышова Т. И.* Определение состояния метрологических характеристик аналоговых блоков информационно-измерительных систем в процессе эксплуатации // Известия ВУЗов СССР. Приборостроение. – 1979. – № 9. – С. 17 – 21.

4 *Чернышова Т. И., Мостовой И. В.* Повышение метрологической надежности аналоговых блоков измерительных систем коррекцией их начального уровня точности // Известия ВУЗов СССР. Приборостроение. – 1980. – № 23. – С. 3 – 7.

5 *Чернышова Т. И.* Анализ точности способов определения коэффициента температуропроводности материалов по математическим моделям. – Тамбов, 1988. – 8 с. – Деп. в ВИНТИ 1988, № 4973-В88.

6 *Чернышова Т. И. Селезнев А. В.* Эффективность прогнозирования состояния метрологических характеристик аналоговых блоков измерительного канала информационно-измерительных систем // Вестник Метрологической академии. – 2000. – Вып. 6. – С. 31 – 36.

- 7 *Чернышова Т. И.* Оценка метрологической надежности при проектировании средств неразрушающего контроля теплофизических характеристик материалов // Вестник Метрологической академии. – 2001. – № 7. – С. 54 – 65.
- 8 *Чернышова Т. И., Селезнев А. В.* Определение метрологической надежности и длительности межповерочных интервалов средств измерений // Контроль. Диагностика. – 1999. – № 7 (13). – С. 7 – 9.
- 9 *Чернышова Т.И.* Повышение метрологической надежности средств неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов и изделий // Контроль. Диагностика. – 2001.– № 8 (38). – С. 40 – 43.
- 10 *Чернышова Т. И.* Оценка метрологических характеристик при проектировании процессорных теплофизических измерительных средств // Проектирование и технология электронных средств. – 2001. – № 2. – С. 8 – 12.
- 11 *Чернышова Т. И., Сысоев Э. В.* Моделирование тепловых процессов в исследуемых объектах при бесконтактном тепловом воздействии на них подвижным точечным источником тепла // Вестник ТГТУ. – 2002. – Т. 8, № 1. – С. 12 – 16.
- 12 *Чернышова Т. И., Чернышов В. Н.* Метрологический анализ результатов измерений теплофизических свойств материалов и веществ на основе математического описания объектов, процедур и условий измерений // Вестник ТГТУ. – 1998. – Т. 4, № 2 – 3. – С. 367 – 373.
- 13 *Чернышова Т. И.* Методы неразрушающего контроля теплофизических свойств для ограниченных в тепловом отношении тел. – Тамбов, 1985. – 12 с. – Деп. в ВИНТИ 1985, № 526185.
- 14 *Чернышова Т. И.* Определение функции деградации метрологических характеристик аналоговых блоков измерительных систем // Известия Ленинградского ордена Ленина электротехнического института имени В. И. Ульянова (Ленина). – 1978. – Вып. 240. – С. 39 – 43.
- 15 *Чернышова Т. И.* Инженерная методика прогнозирования метрологических характеристик аналоговых блоков информационно-измерительных систем // Известия Ленинградского ордена Ленина электротехнического института имени В. И. Ульянова (Ленина). – 1979. – Вып. 256. – С. 62 – 66.
- 16 *Чернышова Т. И.* Оценка эффективности прогнозирования метрологических характеристик аналоговых блоков информационно-измерительных систем // Техническая диагностика. – Ростов-на-Дону. – 1982. – С. 62 – 65.
- 17 *Чернышов В. Н., Чернышова Т. И.* Математическое моделирование тепловых процессов при бесконтактных методах контроля качества материалов // Межвуз. сборник. – М.: МИХМ, 1989. – С. 166 – 190.
- 18 *Чернышова Т. И., Муромцев Ю. Л., Чернышов В. Н.* Импульсно-динамический метод неразрушающего контроля ТФС материалов и ИИС для его реализации // Материалы и устройства функциональной электроники: Межвуз. сборник науч. трудов. – Воронеж. – 1993. – С. 86 – 95.
- 19 *Чернышова Т. И., Селезнев А. В.* Методика оценки метрологической надежности средств измерений // Труды ТГТУ. – 1998. – Вып. 2. – С. 122 – 126.
- 20 *Чернышова Т. И., Селезнев А. В.* Прогнозирование состояния метрологических характеристик радиоэлектронных измерительных средств на этапе их проектирования // Труды ТГТУ. – 1999. – Вып. 4. – С. 26 – 30.
- 21 *Чернышова Т. И., Селезнев А. В., Шиндяпин Д. А.* Оценка метрологической надежности средств измерений с учетом внешних дестабилизирующих факторов // Труды ТГТУ. – 2000. – Вып. 6. – С. 68 – 71.
- 22 *Чернышова Т. И., Абрамов А. М.* Математическое моделирование процессов изменения во времени метрологических характеристик средств измерений // Труды ТГТУ. – 2001. – Вып. 9. – С. 13 – 16.
- 23 *Чернышова Т.И.* Оценка метрологической надежности при проектировании и эксплуатации средств неразрушающего контроля // Проектирование и эксплуатация электронных средств: Международная научно-техническая конференция: Тез. докл. – Казань, 2000. – С. 161.
- 24 *Чернышова Т. И., Чернышов В. Н.* Моделирование тепловых процессов при бесконтактном определении теплофизических свойств материалов // Моделирование САПР, АСНИ и ГАП: Тез. докл. Всесоюз. конф. – Тамбов, 1989. – С. 117 – 118.

- 25 *Чернышов В. Н., Чернышова Т. И.* Бесконтактный способ контроля теплофизических характеристик материалов и адаптивная система для его реализации // Теплофизика релаксирующих систем: Тез. докл. X Всесоюз. теплофиз. шк. – Тамбов, 1990. – С. 104.
- 26 *Чернышова Т. И., Селезнев А. В.* Оценка метрологической надежности измерительных средств теплофизического эксперимента // Новое в теплофиз. свойствах.: Тез. докл. III Международной теплофиз. школы. – Тамбов, 1998. – С. 122 – 126.
- 27 *Чернышова Т. И.* Проектирование средств неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов с заданным уровнем метрологической надежности // Теплофизические измерения в начале XXI века: Тез. докл. IV Международной теплофиз. школы. – Тамбов, 2001. – Ч. 1. – С. 172 – 174.
- 28 А. с. 1124209 СССР, МКИ G 01 N 25/18. Способ неразрушающего контроля ТФХ материалов и устройство для его осуществления / *В. Н. Чернышов, Т. И. Чернышова.* – № 3549461/18-25; Заявл. 9.02.83; Опубл. 15.11.84, Бюл. № 42.
- 29 А. с. 1122955 СССР, МКИ G 01 N 25/18. Способ определения теплофизических характеристик материалов / *Т. И. Чернышова, В. Н. Чернышов.* – № 3610914/18-25; Заявл. 29.06.83; Опубл. 7.11.84, Бюл. № 41.
- 30 А. с. 1117512 СССР, МКИ G 01 N 25/18. Способ определения ТФХ материалов / *Т. И. Чернышова, В. Н. Чернышов.* – № 3629652/18-25; Заявл. 29.06.83; Опубл. 7.10.84, Бюл. № 37.
- 31 А. с. 1481656 СССР, МКИ G 01 N 25/18. Способ бесконтактного контроля теплофизических характеристик материалов / *Т. И. Чернышова, В. Н. Чернышов.* – № 4244740/31-25; Заявл. 13.05.87; Опубл. 23.05.89, Бюл. № 19.
- 32 А. с. 1539511 СССР, МКИ G 01 B 7/06. Способ неразрушающего контроля толщины пленочных покрытий / *В. Н. Чернышов, Т. И. Чернышова, Л. Н. Малышев и др.* – № 431950/25-28; Заявл. 26.10.87; Опубл. 30.01.90, Бюл. № 4.
- 33 А. с. 1193555 СССР, МКИ G 01 N 25/18. Способ комплексного определения теплофизических характеристик материалов без нарушения их целостности / *Т. И. Чернышова, В. Н. Чернышов.* – № 3741643/18-25; Заявл. 16.05.84; Опубл. 23.11.85, Бюл. № 43.
- 34 А. с. 1385787 СССР, МКИ G 01 N 25/18. Способ неразрушающего контроля теплофизических характеристик и устройство для его осуществления / *Т. И. Чернышова, В. Н. Чернышов, Ю. Л. Муромцев и др.* – № 3856534/25; Заявл. 2.01.85; Опубл. 1.12.87, Бюл. № 8.
- 35 А. с. 1377695 СССР, МКИ G 01 N 25/18. Способ неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов / *Т. И. Чернышова, В. Н. Чернышов, В. А. Попов.* – № 4055693/31-25; Заявл. 14.04.86; Опубл. 29.02.88, Бюл. № 8.
- 36 А. с. 1402892 СССР, МКИ G 01 N 25/18. Способ неразрушающего контроля теплофизических характеристик материалов и устройство для его осуществления / *Т. И. Чернышова, В. Н. Чернышов, Ю. Л. Муромцев.* – № 4129719/31-25; Заявл. 26.06.86; Опубл. 15.06.88, Бюл. № 22.
- 37 А. с. 1661565 СССР, МКИ G 01 B 7/06. Способ бесконтактного контроля толщины пленочных покрытий изделий и устройство для его осуществления / *Т. И. Чернышова, В. Н. Чернышов, А. П. Пудовкин и др.* – № 3468024/18-25; Заявл. 13.07.82; Опубл. 15.01.84, Бюл. № 2.
- 38 А. с. 1481656 СССР, МКИ G 01 N 25/18. Способ бесконтактного контроля теплофизических характеристик материалов / *Т. И. Чернышова, В. Н. Чернышов.* – № 4244740/31-25; Заявл. 13.05.87; Опубл. 23.05.89, Бюл. № 19.
- 39 А. с. 1504491 СССР, МКИ G 01 N 7/06. Способ бесконтактного неразрушающего контроля толщины изделий / *Т. И. Чернышова, В. Н. Чернышов, А. П. Пудовкин.* – № 4231871/24-28; Заявл. 20.04.87; Опубл. 30.08.89, Бюл. № 32.
- 40 А. с. 1661565 СССР, МКИ G 01 B 7/06. Способ бесконтактного контроля толщины пленочных покрытий изделий и устройство для его осуществления / *Т. И. Чернышова, В. Н. Чернышов, А. П. Пудовкин и др.* – № 3468024/18-25; Заявл. 13.07.82; Опубл. 15.01.84, Бюл. № 2.
- 41 А. с. 1504491 СССР, МКИ G 01 N 7/06. Способ бесконтактного неразрушающего контроля толщины изделий / *Т. И. Чернышова, В. Н. Чернышов, А. П. Пудовкин.* – № 4231871/24-28; Заявл. 20.04.87; Опубл. 30.08.89, Бюл. № 32.

42 А. с. 1663428 СССР, МКИ G 01 В 21/08. Способ неразрушающего контроля толщины пленочного покрытия изделия / *Т. И. Чернышова, В. Н. Чернышов, А. П. Пудовкин и др.* – № 4419124/28; Заявл. 03.05.88; Оpubл. 15.07.91, Бюл. № 26.

43 А. с. 1733917 СССР, МКИ G 01 В 7/06. Способ бесконтактного неразрушающего контроля толщины пленочных покрытий изделий / *Т. И. Чернышова, В. Н. Чернышов, А. П. Пудовкин.* – № 4283674/25; Заявл. 13.07.87; Оpubл. 15.01.92, Бюл. № 18.

44 А. с. 1381379 СССР, МКИ G 01 N 25/18. Способ комплексного определения теплофизических характеристик материалов и устройство для его осуществления / *Т. И. Чернышов, В. Н. Чернышов, В. А. Попов.* – № 4129717/31-25; Заявл. 26.06.86; Оpubл. 15.03.88, Бюл. № 10.

45 А. с. 1793196 СССР, МКИ G 01 В 7/06. Способ бесконтактного контроля толщины пленочных покрытий изделий и устройство для его осуществления / *Т. И. Чернышова, В. Н. Чернышов.* – № 4719557/24; Заявл. 14.07.89; Оpubл. 8.10.92, Бюл. № 5.

46 А. с. 1796884 СССР, МКИ G 01 В 7/06. Способ бесконтактного неразрушающего контроля толщины защитных покрытий изделий и устройство для его осуществления / *В. Н. Чернышов, Т. И. Чернышова.* – № 4856604/28; Заявл. 06.08.90; Оpubл. 23.02.93, Бюл. № 7.

47 А. с. 1753252 СССР, МКИ G 01 N 7/08. Способ бесконтактного неразрушающего контроля толщины пленочных покрытий изделий и устройство для его осуществления / *Т. И. Чернышова, В. Н. Чернышов.* – № 4744783/28; Заявл. 11.07.89; Оpubл. 8.04.92, Бюл. № 29.

48 А. с. 1725071 СССР, МКИ G 01 В 7/08. Способ неразрушающего контроля толщины защитных покрытий изделий и устройство для его осуществления / *Т. И. Чернышова, В. Н. Чернышов.* – № 4824119/24; Заявл. 2.04.90; Оpubл. 8.12.91, Бюл. № 13.

49 А. с. 1140565 СССР, МКИ G 01 N 25/18. Способ определения теплофизических характеристик материалов / *В. Н. Чернышов, Т. И. Чернышова.* – № 3612879/24-25; Заявл. 29.06.83; Оpubл. 15.10.84, Бюл. № 40.

50 А. с. 1388703 СССР, МКИ G 01 В 21/08. Термозонд для определения толщины покрытия изделий / *Т. И. Чернышова, В. Н. Чернышов.* – № 4123889/25-28; Заявл. 25.05.86; Оpubл. 15.04.88, Бюл. № 14.

51 Пат. 2011977 РФ. Способ бесконтактного измерения теплофизических характеристик материалов и устройство для его осуществления / *Т. И. Чернышова, В. Н. Чернышов.* – Заявл. 23.07.91; Оpubл. 30.04.94, Бюл. № 8.

52 Пат. 2084819 РФ. Способ неразрушающего контроля толщины защитных покрытий изделий и устройство для его осуществления / *В. Н. Чернышов, Т. И. Чернышова, Э. И. Цветков и др.* – Заявл. 23.03.93; Оpubл. 20.07.97, Бюл. № 20.

53 Пат. 2123179 РФ. Термозонд для неразрушающего контроля теплопроводности материалов / *Т. И. Чернышова и др.* – Заявл. 26.11.1997; Оpubл. 10.12.1998, Бюл. № 16.

54 Пат. 2166188 РФ. Бесконтактный адаптивный способ неразрушающего контроля теплофизических характеристик материалов / *Т. И. Чернышова, В. Н. Чернышов, Э. В. Сысоев.* – Заявл. 5.01.2000; Оpubл. 27.04.2001, Бюл. № 12.

55 Пат. 2168168 РФ. Способ бесконтактного контроля теплофизических характеристик материалов / *Т. И. Чернышова, В. Н. Чернышов, Э. В. Сысоев.* – Заявл. 04.08.97; Оpubл. 27.05.2001, Бюл. № 15.