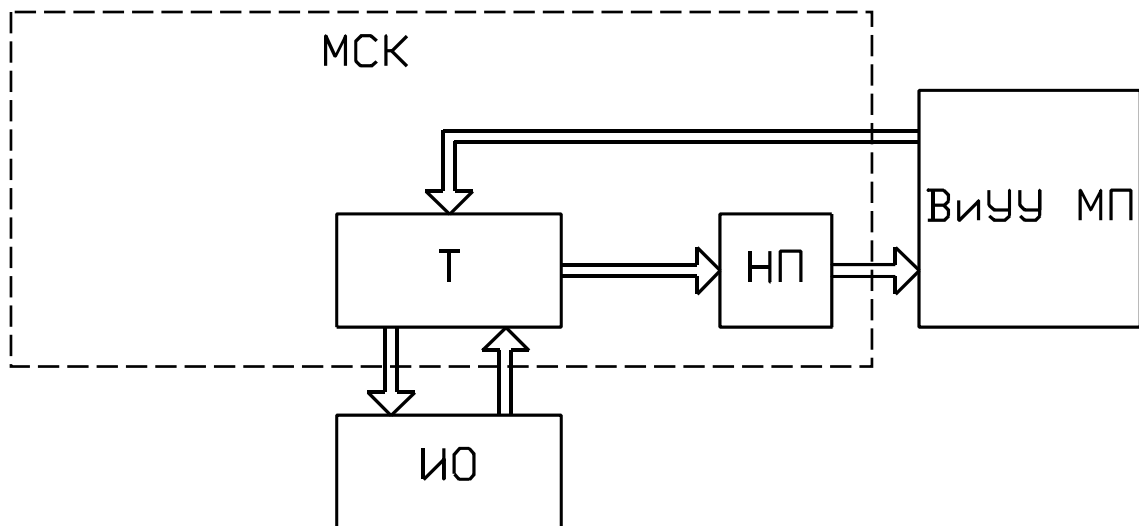


Ю.Л. МУРОМЦЕВ, В.Н. ЧЕРНЫШОВ,  
З.М. СЕЛИВАНОВА

МИКРОПРОЦЕССОРНЫЕ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ



• ИЗДАТЕЛЬСТВО ТГТУ •

Министерство образования и науки Российской Федерации

Тамбовский государственный технический университет

**Ю.Л. МУРОМЦЕВ, В.Н. ЧЕРНЫШОВ,  
З.М. СЕЛИВАНОВА**

## **МИКРОПРОЦЕССОРНЫЕ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ**

*Рекомендовано УМО по образованию в области радиотехники, электроники, биомедицинской техники и автоматизации в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности 200800 «Проектирование и технология радиоэлектронных средств» направления подготовки дипломированных специалистов 654300 «Проектирование и технология электронных средств».*

Тамбов

• Издательство ТГТУ •  
2004

УДК 536.629; 681.325.5

ББК 32-5.32.973.2

М91

Рецензент

Доктор технических наук, профессор

*Д.А. Дмитриев*

**Муромцев Ю.Л., Чернышов В.Н., Селиванова З.М.**

М91 Микропроцессорные системы контроля: Учеб. пособие. Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2004. 96 с.

В учебном пособии рассматриваются теоретические и практические вопросы разработки адаптивных микропроцессорных систем (МС) контроля. Приведен пример проектирования адаптивной микропроцессорной системы, предоставлены структурная и функциональная схемы МС, а также экспериментальные исследования МС.

Предназначено для студентов специальности 200800 «Проектирование и технология радиоэлектронных средств» при изучении теоретических курсов, выполнения лабораторного практикума, курсовых и дипломных работ по следующим дисциплинам: «Схемотехника электронных средств», «Проектирование микропроцессорных систем и микропроцессоров», «Микропроцессоры и микро-ЭВМ».

УДК 536.629; 681.325.5

ББК 32-5.32.973.2

ISBN 5-8265-0269-X

© Муромцев Ю.Л., Чернышов В.Н.,  
Селиванова З.М., 2004  
© Тамбовский государственный  
технический университет  
(ТГТУ), 2004

Учебное издание

МУРОМЦЕВ Юрий Леонидович,  
ЧЕРНЫШОВ Владимир Николаевич,  
СЕЛИВАНОВА Зоя Михайловна

МИКРОПРОЦЕССОРНЫЕ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ

Учебное пособие

Редактор В.Н. Митрофанова  
Инженер по компьютерному макетированию Т.А. Сынова

Подписано к печати 31.05.2004

Формат 60 × 84/16. Гарнитура Times. Бумага офсетная. Печать офсетная

Объем: 5,58 усл. печ. л.; 5,8 уч.-изд. л.

Тираж 100 экз. С. 157

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

**В НАСТОЯЩЕЕ ВРЕМЯ БОЛЬШОЕ ВНИМАНИЕ УДЕЛЯЕТСЯ ПРОЕКТИРОВАНИЮ И ПРАКТИЧЕСКОМУ ПРИМЕНЕНИЮ МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ СИСТЕМ КОНТРОЛЯ (МСК). ПРИ ЭТОМ РЕШАЮТСЯ ЗАДАЧИ УВЕЛИЧЕНИЯ ЧИСЛА И СЛОЖНОСТИ ВЫПОЛНЯЕМЫХ ФУНКЦИЙ, ПОВЫШЕНИЯ РОЛИ ОБРАБОТКИ ПЕРВИЧНОЙ ИНФОРМАЦИИ И ЕЕ ОТОБРАЖЕНИЯ, МАКСИМАЛЬНОЙ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ ИЗМЕРЕНИЯ. ВОЗРАСТАЕТ РОЛЬ ИСПОЛЬЗУЕМОГО В МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ СИСТЕМАХ МАТЕМАТИЧЕСКОГО И ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ. ВАЖНОЕ ЗНАЧЕНИЕ ПРИОБРЕТАЮТ ТАКИЕ СВОЙСТВА МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ СИСТЕМ, КАК АДАПТАЦИЯ К ВОЗДЕЙСТВУЮЩИМ ДЕСТАБИЛИЗИРУЮЩИМ ФАКТОРАМ (ДФ), ТОЧНОСТЬ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЯ, НАДЕЖНОСТЬ РАБОТЫ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ СОСТОЯНИЙ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ.**

Настоящее пособие посвящено решению этих проблем с использованием математического аппарата анализа и синтеза систем на множестве состояний функционирования.

Первая глава отображает структуру и классификацию МСК.

Вторая глава посвящена алгоритмическому обеспечению МСК, модели процесса измерения и стратегиям измерения.

В третьей главе представлена практическая реализация предлагаемой в пособии методики проектирования адаптивных МСК на примере разработки адаптивной микропроцессорной системы неразрушающего контроля (НК) теплофизических свойств материалов (ТФСМ). МСК НК ТФСМ, построенная на основе синтеза адаптивных стратегий, позволит осуществить НК ТФСМ в условиях неполной информации об объекте и неконтролируемых возмущений различного происхождения с допустимой для исследуемых материалов точностью.

Пособие предназначено для студентов специальности 200800 «Проектирование и технология радиоэлектронных средств» при изучении теоретических курсов, выполнения лабораторного практикума, курсовых и дипломных работ по следующим дисциплинам: «Схемотехника электронных средств», «Проектирование микропроцессорных систем и микропроцессоров», «Микропроцессоры и микроЭВМ».

Пособие может быть также использовано инженерами, аспирантами и преподавателями при проведении научных исследований.

### **1 СТРУКТУРА И КЛАССИФИКАЦИЯ МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ СИСТЕМ КОНТРОЛЯ**

---

---

**Центральное место при изложении теоретических положений занимают вопросы моделирования, функционирования и анализа свойств системы при изменяющихся состояниях функционирования.**

#### **1.1 СТРУКТУРА МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ СИСТЕМ**

**В данном разделе МС будем рассматривать как систему, понятие которой является фундаментальным в системном подходе.**

В дальнейшем под МС в системном смысле будем понимать такую совокупность составных частей – элементов, которая обладает следующими свойствами.

1 Структурность – между элементами существуют связи, по силе превосходящие связи этих элементов с элементами, не входящими в данную совокупность, что позволяет выделить ее из окружающей среды.

2 Иерархичность – каждый элемент совокупности может рассматриваться как система.

3 Коммуникативность – совокупность элементов может рассматриваться как элемент более сложной системы (взаимозависимость систем и среды).

4 Целостность – имеются качества, присущие совокупности в целом, но несвойственные ее элементам по отдельности.

Измерительная система определяется заданием системных объектов, свойств и связей. К системным объектам относят: вход, процесс, выход, обратную связь и ограничения [1, 2].

Достаточно полно методологию системного подхода отражают три основных принципа:

1) физичности – всякой системе присущи физические законы, определяющие внутренние причинно-следственные связи, ее существование и функционирование;

2) моделируемости – система представима конечным множеством моделей, каждая из которых отражает определенную грань ее сущности, выявление новых свойств не обязательно должно сопровождаться построением обобщающих моделей, а может ограничиваться наращиванием числа упрощенных моделей, взаимодействие которых обеспечивает отражение сложной системы в целом;

3) целенаправленности – сложной системе присуща функциональная тенденция, направленная на достижение некоторого состояния или на усиление (сохранение) некоторого процесса, при этом система способна противостоять внешним воздействиям.

Каждый принцип включает несколько постулатов. В частности, важным постулатом принципа моделируемости является постулат дополнительности: сложные системы, находясь в различных ситуациях, могут проявлять различные системные свойства, в том числе и альтернативные. Этот постулат будет использован далее при рассмотрении моделей МС.

Перечислим основные положения системного подхода применительно к анализу МС.

1 Объектом исследования является сложная МС.

2 Исследование МС производится с помощью математической модели процесса измерения, при этом широко используются ЭВМ для проведения имитационного эксперимента. Многие задачи анализа и синтеза МС решаются в рамках систем автоматизированного проектирования и систем автоматизации научных исследований.

3 Изучению подлежат основные свойства МС – точность, быстродействие, эффективность и др. Эти свойства должны исследоваться в различных ситуациях, которые могут встречаться в процессе реальной эксплуатации.

4 При проведении исследований исходные данные и результаты измерений должны иметь известную достоверность, выборки – представительными, термины и определения – однозначными и т.д.

5 Исследования ориентированы на решение оптимизационных задач проектирования, эксплуатации, управления, контроля и др., которые формируются и решаются как задачи оптимизаций.

**Математическая модель МС представляет собой описание ее структуры, связей, свойств и процессов изменения состояния с помощью математической символики. Наряду с моделью МС в пособии рассматривается модель процесса измерения.**

## 1.2 КЛАССИФИКАЦИЯ МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ СИСТЕМ

Существует несколько признаков классификации МС – по числу каналов, назначению, точности, степени автоматизации и т.д. Однако для излагаемого материала принципиальное значение имеет классификация МС по отношению к работе при изменяющихся состояниях функционирования. Поэтому сначала введем необходимые понятия, раскрывающие содержание множества состояний функционирования.

В первую очередь выделим два вида процессов, протекающих в МС. К процессам первого вида относятся процессы, связанные непосредственно с получением, переработкой и отображением информации при измерениях. Переменными этих процессов являются входные воздействия, выходные переменные и фазовые координаты (переменные процессы). Процессы первого вида описываются уравнениями измерений, представляющих процедуру как последовательность элементарных преобразований входно-

го воздействия. Каждое элементарное преобразование представляется аналитическим, логическим или операторным соотношением.

Например, при теплофизических измерениях основное уравнение, входящее в состав модели процессов первого вида, имеет следующий вид

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2},$$

где  $T$  – температура;  $\tau$  – время;  $x$  – пространственная координата;  $a$  – коэффициент температуропроводности.

Модели процессов первого вида характеризуются своей структурой (видом уравнений и ограничений) и параметрами.

В процессе эксплуатации могут отказывать составные части МС, изменяться условия измерения, появляться сильные непредвиденные внешние воздействия. В результате структура и параметры модели процессов первого вида могут претерпевать изменения в случайные моменты времени. Эти процессы измерения структуры МС и ее параметров второго вида [3]. Для описания процессов второго вида вводится новая переменная – переменная состояния функционирования, обозначим ее  $h$ . Множество значений этой переменной и есть множество состояний функционирования (МСФ), обозначим его  $H$ . Множество  $H$  родственно множеству состояний работоспособности сложных технических систем [4].

Таким образом, изменение переменной  $h \in H$  влечет изменение структуры или параметров модели процессов первого вида.

Модель процессов второго вида обычно представляет собой систему дифференциальных уравнений (вместе с начальными условиями) для определения вероятностных значений переменной.

Например, МС содержит три канала (датчика) и центральный блок, система может функционировать, если исправный центральный блок и один из каналов, однако эффективность работы ее при этом будет ниже.

В этом случае МСФ  $H$  содержит следующие состояния:  $h_0$  – состояние нормального функционирования (все составные части исправны);  $h_1$  – состояние, характеризующееся отказом одного канала;  $h_2$  – состояние, характеризующееся отказом двух каналов;  $h_3$  – состояние отказа трех каналов;  $h_6$  – состояние отказа центрального блока;  $h_{i,6}$  – состояние отказа  $i$  каналов ( $i = 1, 2$ ) и центрального блока. Таким образом,  $H = \{h_0; h_1; h_2; h_3; h_6; h_{1,6}; h_{2,6}\}$ , при этом в состояниях  $h_0, h_1, h_2$  МС функционирует (в  $h_1$  и  $h_2$  с пониженной эффективностью), а в состояниях  $h_3, h_6, h_{1,6}$  и  $h_{2,6}$  – МС не работает.

Введение переменной  $h$  и множества  $H$  сложной МС связано с рассмотрением следующих вопросов: декомпозиция МС на составные части – элементы и определение ее структуры; введение множеств состояний функционирования или работоспособности элементов, установление связи значений  $h$  с состояниями элементов; построение МСФ системы и проверка возможности использования множества  $H$  для построения обобщенной модели, учитывающей процессы первого и второго видов, и последующего использования этой модели в задачах анализа и синтеза МС.

При введении множества  $H$  в полной мере используется вся информация в системе и условиях ее работы. Для более полного анализа системы желательно рассматривать все возможные состояния функционирования. Если число элементов множества  $H$  велико, то необходимо исследовать систему в наиболее важных для работы состояниях. При решении задач повышения эффективности систем к ним в первую очередь относятся, так называемые, лимитирующие состояния, функционирование в которых может привести к значительному ущербу, а также наиболее вероятные состояния в процессе эксплуатации. К лимитирующим состояниям МС следует относить значения  $h$ , связанные с получением ошибочных результатов при измерениях.

Понятие элемента  $S$  сложной МС достаточно условно. Вопросы выделения и определения структур системы решаются совместно. В дальнейшем под элементом  $S$  системы будем понимать ее часть, которая для решения рассматриваемой задачи не требует дальнейшей детализации. Как правило, отказ одного или нескольких элементов сложной системы не должен приводить ее к остановке. Каждый элемент  $S$

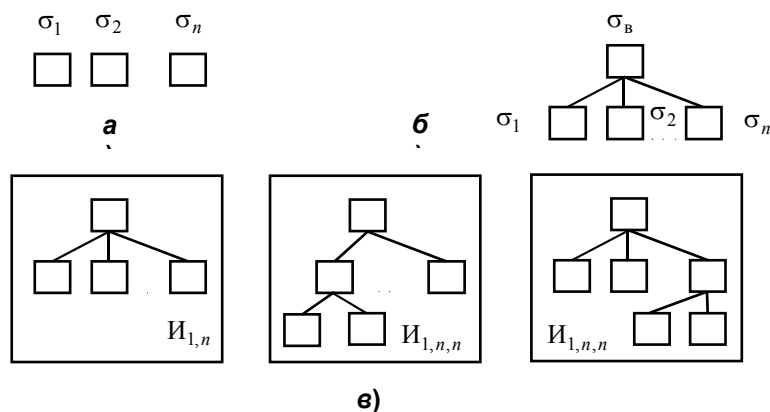
выполняет одну или несколько определенных функций. В процессе эксплуатации, вследствие различного рода причин (износ, коррозия, перегрузка, влияние внешних воздействий) и т.д., элемент частично или полностью теряет свою работоспособность, что приводит к невыполнению им соответствующих функций, снижению эффективности работы системы, и может явиться причиной больших ошибок измерения, увеличения длительности замеров, а также появления бракованных изделий и срыва выполнения важных заданий.

Важным для последующего анализа является деление МС на простые и сложные. У простых МС возможны лишь два состояния функционирования –  $h_0$  – нормальное функционирование и  $h_n$  – состояние полного отказа, т.е. для простых МС мощность множества  $H$  равна двум ( $|H| = 2$ ).

Сложные МС имеют несколько состояний функционирования, т.е.  $|H| > 2$ . При этом множество  $H$  может быть достаточно мощным. В дальнейшем предполагается, что рассматриваемые МС являются сложными.

По отношению к структуре соединения элементов МС подразделяются на системы вида совокупности и иерархические системы (рис. 1.1, а, б). Последние, в свою очередь, делятся на двухуровневые и многоуровневые.

В ряде случаев структуру удобно рассматривать как совокупность иерархий (рис. 1.1, в).



**Рис. 1.1 Структуры сложных систем:**  
а – совокупность; б – иерархия; в – совокупность иерархий

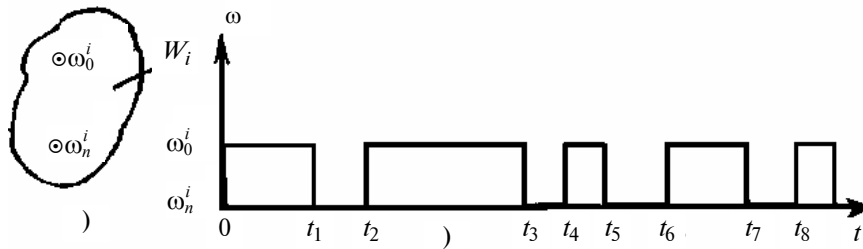
Элемент  $S_i$  структурной схемы МС находится в состоянии нормального функционирования  $W$ , когда он выполняет все необходимые (заданные) функции в соответствии с определенным оператором. Если в результате какого-либо нарушения элемент не может выполнять  $j$ -ю функцию, то данное состояние обозначим  $\bar{W}$ , через  $\bar{W}$  обозначим состояние невыполнения  $j$ -й и  $k$ -й функции и т.д. Множество состояний функционирования элемента  $S_i$  обозначим  $W_i$ . Множество  $W_i$  содержит минимум два состояния – нормальное функционирование ( $W_0$ ) и полный отказ ( $W_n$ ) (рис. 1.2, а). Элементы (части) системы, для которых  $W_i = 2$ , будем называть простейшими. Здесь  $|W_i|$  обозначает число элементов (мощность) множества  $W_i$ . Переходы элемента из одного состояния работоспособности в другое происходят в случайные моменты времени (рис. 1.2, б).

Множество  $H$  состояний функционирования системы вводится на основе множеств  $W_i, i = \overline{1, n}$  элементов и в общем случае имеет место

$$H \leq (W_1 \times W_2 \times \dots \times W_n) \cup (W_2 \times W_1 \times W_3 \times \dots \times W_n) \cup \dots \cup (W_n \times W_{n-1} \times \dots \times W_1),$$

т.е.  $H$  есть объединение декартовых произведений множеств  $W_i$  во всех возможных очередностях перемножения. Значения переменной  $h$  состояния функционирования системы здесь отличается сочетаниями и очередностью отказавших элементов. Например,

пусть  $W_1 = \{\omega_0^1, \omega_1^1\}$ ,  $W_2 = \{\omega_0^2, \omega_1^2\}$ ,



**Рис. 1.2** Множество  $W_1$  состояний работоспособности простейшего элемента (а) и процесс изменения состояний работоспособности (б):

$t_1, t_3, t_5, t_7$  – моменты отказа элемента;  $t_2, t_4, t_6, t_8$  – моменты его восстановления

тогда  $W_1 \times W_2 = \{ \langle \omega_0^1, \omega_0^2 \rangle, \langle \omega_1^1, \omega_0^2 \rangle, \langle \omega_0^1, \omega_1^2 \rangle, \langle \omega_1^1, \omega_1^2 \rangle \}$ ,

и

$$H = \{ h_0 = \langle \omega_0^1, \omega_0^2 \rangle (\text{или } \langle \omega_0^2, \omega_0^1 \rangle), h_1 = \langle \omega_0^1, \omega_1^2 \rangle, h_2 = \langle \omega_1^2, \omega_0^1 \rangle, h_{12} = \langle \omega_1^1, \omega_1^2 \rangle, h_{21} = \langle \omega_1^2, \omega_1^1 \rangle \}.$$

где  $h_0$  – состояние нормального функционирования системы;  $h_1$  – состояние нарушения  $i$ -го элемента;  $h_{ji}$  – состояние нарушения двух элементов, причем  $i$ -й отказал первым. Данное множество приведено на рис. 1.3, а.

Множества  $H$ , значения  $h$  которых отличаются сочетаниями и очередностью (размещениями) отказавших частей, обозначим  $H^A$ . Для системы из  $n$  простейших элементов мощность  $H^A$  равна

$$|H^A| = \sum_{i=0}^n \frac{n!}{(n-1)!},$$

если же  $|W_j| = 3$ ,  $i = \overline{1, n}$ , то  $|H^A| = 2n \left[ 1 + \sum_{j=1}^{n-1} \prod_{i=1}^j (2n-2i) \right] + 1$ .

Значения  $|H^A|$  для этих случаев при различном числе частей системы приведены в табл. 1.1, откуда видно, что, с увеличением  $n$  и числа состояний работоспособности элементов мощность множества  $H^A$  быстро растет, при  $n > 5$  эти множества мало пригодны для анализа систем.

Множества  $H$ , состояния  $h$  которых отличаются лишь сочетаниями отказавших элементов системы, обозначим  $H^C$ . Для системы из  $n$  элементов



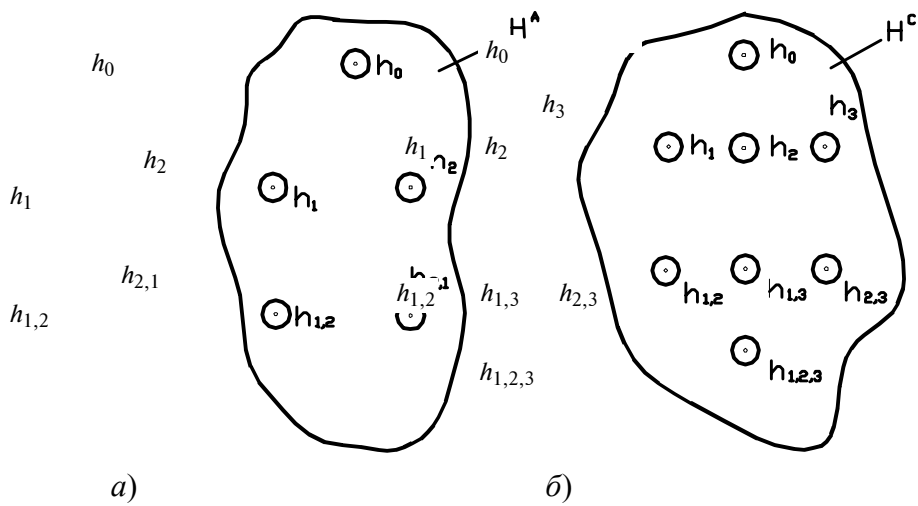


Рис. 1.3 Множества состояний функционирования  
 а –  $H^A$ ; б –  $H^C$

### 1.1 Мощности множеств $H^C$ и $H^A$ состояний функционирования системы

Число элементов системы	$ W_i =2, i=\overline{1, n}$		$ W_i =3, i=\overline{1, n}$	
	$ H^C $	$ H^A $	$ H^C $	$ H^A $
2	4	5	9	13
3	8	16	27	79
4	16	65	81	633
5	32	326	243	6331
6	64	1956	729	75973
7	128	13672	2187	1063623
8	256	104601	6561	17017969
9	512	986410	19683	306323442
10	1024	9843941	59049	$\approx 10^{10}$
15	32798	$\approx 10^{12}$	14348907	$\approx 10^{21}$
20	1044576	$\approx 10^{19}$	$\approx 3,5 \cdot 10^9$	$\approx 10^{37}$

$$H^C = W_1 \times W_2 \times \dots \times W_n = \left\{ h_0 = \langle \omega_0^1, \omega_0^2, \dots, \omega_0^n \rangle, h_1 = \langle \omega_1^1, \omega_1^2, \dots, \omega_1^n \rangle, \dots, h_{1,2,\dots,m} = \langle \omega_{1,2,\dots,m}^1, \omega_{1,2,\dots,m}^2, \dots, \omega_{1,2,\dots,m}^n \rangle \right\},$$

а мощность множества  $H^C$  равна  $|H^C| = \prod_{i=1}^n |W_i|$ .

Для системы из трех простейших элементов множество приведено на рис. 1.3, б. Зависимость мощности  $|H^C|$  от  $n$  и числа состояний элементов даны в табл. 1.1.

На рис. 1.3, 1.4 множеств состояний функционирования  $h$  располагаются по уровням следующим образом: на верхнем (первом) уровне – состояние  $h_0$  нормального функционирования системы, на втором – значения  $h$ , соответствующие нарушению одного элемента, на третьем – двух и т.д.

При рассмотрении систем из  $n$  одинаковых элементов может использоваться множество  $H^{n+1}$ , значения  $h$  которого отличаются только числом отказавших частей (рис. 1.4), очевидно, его мощность равна  $(n + 1)$ .

С целью сокращения объема вычислительных работ, вызываемых большой мощностью множеств  $H^A$  и  $H^C$ , можно вводить комбинированные множества, например, на верхних двух-трех уровнях используется  $H^A$ , а на нижних –  $H^C$  или  $H^{n+1}$ .

В общем случае будем полагать, что изменение переменной  $h$  происходит скачкообразно в произвольные моменты времени  $\tau_i$ ,  $i = 1, 2, \dots$ , в эти моменты устанавливаются значения  $h = h_{(i)}$ . Каждая реализация случайного

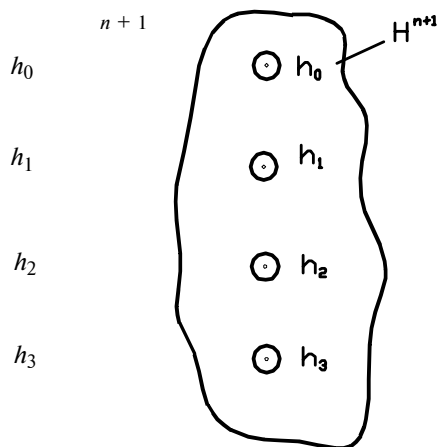


Рис. 1.4  $H^{n+1} \rightarrow H^A$

процесса  $h(t)$  представляет собой ступенчатую целочисленную функцию, поскольку, попав в некоторое состояние  $h_{(i)}$  система будет находиться в нем какое-то время. Реализация переменной  $h$  для системы, состоящей из однотипных элементов и имеющей множество состояний функционирования  $H^{n+1}$  показана на рис. 1.4.

По характеру изменения переменная  $h$  аналогична состоянию резервированной системы, соответствующему числу отказавших элементов [5] или состоянию системы массового обслуживания, которое определяется числом требований, находящихся в системе [6].

Рассмотренная переменная учитывает изменения состояний работоспособности системы. Наряду с этим можно ввести переменную, которая характеризует смену различных внешних обстоятельств и воздействий, например, переход измерения характеристик новых изделий, материалов, измерения при помехах, отклонения окружающей температуры и т.д. Изменения этой переменной могут носить как непреднамеренный (случайный), так и преднамеренный характер.

На основе множеств значений рассмотренных переменных процессов второго вида строится множество состояний функционирования (МСФ) МС. Например, двухканальная МС имеет три состояния работоспособности  $H_p = \{h_0^p, h_1^p, h_2^p\}$  (здесь  $h_0^p$  – полная работоспособность,  $h_1^p$  – отказал один канал,  $h_2^p$  – не работают оба канала) и два состояния внешних воздействий  $H_b = \{h_0^b, h_n^b\}$  (здесь  $h_0^b$  – окружающая температура постоянна,  $h_n^b$  – окружающая температура изменяется). В этом случае МСФ вида  $H^C$  (значения  $h$  отличаются сочетаниями элементов множеств  $H_b$  и  $H_p$ ) вводится следующим образом:

$$H^C = H_p \times H_b = \left\{ \langle h_0^p, h_0^b \rangle = h_0; \langle h_0^p, h_n^b \rangle = h_n; \langle h_1^p, h_0^b \rangle = h_1; \langle h_1^p, h_n^b \rangle = h_{1,n}; \langle h_2^p, h_0^b \rangle = h_{2,n} \right\},$$

где  $h_0$  – состояние полной работоспособности и постоянной окружающей температуры;  $h_1, h_2$  – состояния отказа, соответственно одного и двух каналов при постоянной окружающей температуре;  $h_{1,п}, h_{2,п}$  – состояния отказа, соответственно, одного и двух каналов при переменной окружающей температуре.

Можно использовать также другой способ введения МСФ, который заключается в использовании вместо множества  $H$  дополнительных элементов в структурной схеме МС, эквивалентно заменяющие влияние внешних воздействий.

Для решения задач анализа и синтеза МС на множестве  $H$  принципиальное значение имеет классификация МС по характеру изменения переменной  $h$  и возможности идентификации ее значений в процессе измерения. По этим признакам выделяют четыре основных класса МС и, соответственно, моделей процесса измерения.

К первому классу относят МС, состояние функционирования которых перед началом каждого измерения (в процессе измерения) известно и в процессе измерения не меняется. Обычно это быстродействующие МС, эксплуатируемые в лабораторных условиях.

В МС второго класса значения переменной  $h$  в процессе измерения также постоянно, однако значение его неизвестно, известны лишь вероятности возможных состояний, при которых производится измерение. Это могут МС для оперативного контроля в различных условиях.

К третьему классу относятся МС, для которых переменная  $h$  может изменяться на интервале времени проведения измерения, при этом текущее значение  $h$  в каждый момент времени известно. К данному классу относятся МС с хорошо развитой диагностикой и проводящие измерения, требующие продолжительного времени.

И, наконец, МС четвертого класса аналогичны третьему и отличаются тем, что изменяемое на интервале времени измерения значение переменной  $h$  не контролируется, либо его новые значения не могут быть учтены в работе МС.

## 2 МОДЕЛЬ И СТРАТЕГИИ ИЗМЕРЕНИЯ МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ СИСТЕМ КОНТРОЛЯ

---

Процесс измерения есть процесс получения информации о значениях величин, характеризующих свойства исследуемого объекта. В процессе измерения участвуют следующие субъекты: МС, объект исследования, оператор (исследователь) и окружающая среда. В предположении, что работа МС в достаточной степени автоматизирована и в ней учитываются основные параметры окружающей среды, результат измерения в основном определяется процессами, протекающими в МС и исследуемом объекте.

### 2.1 МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ИЗМЕРЕНИЯ

Для большинства процессов измерения можно выделить три временных этапа:

- 1) этап подготовки измерений, включающий прогрев МС, установку датчиков, выход на рабочий режим, а также подготовку исследуемого объекта;
- 2) этап непосредственного проведения замеров, когда первичные преобразователи МС получают необходимую информацию об объекте;
- 3) этап обработки и отображения результатов измерения.

Заметим, что иногда второй и третий этапы протекают практически одновременно.

Таким образом, в общем случае модель процесса измерения  $M$  можно представить в виде совокупности, моделей  $M_j^n$  и  $M_j^0$ ,  $j = 1; 2; 3$ , отражающих описание соответственно МС объекта исследования на этапах подготовки, проведения измерений и обработки результатов, т.е.

$$M = (M_j^u, M_j^0, j = 1, 2, 3). \quad (2.1)$$

Каждая элементарная модель  $M_j^u$  или  $M_j^0$  представляет собой описание структуры системы, связей, свойств, и процессов изменения фазовых координат с помощью математической символики. Для анализа МС наиболее существенное значение имеют процессы изменения фазовых координат в МС и объекте исследования. Поэтому в целях общности модели  $M_j^u$  и  $M_j^0, j = 1, 2, 3$ , удобно записывать как модели динамической системы [7].

Для описания динамической системы (ДС) задаются следующие переменные: вектор входных переменных (входа)  $x$ , вектор фазовых координат (переменных состояния)  $z$  и вектор выходных переменных (выхода)  $y$  такие, что:

$$x = (x_1, x_2, \dots, x_m)^T \in X = X_1 \times X_2 \times \dots \times X_m;$$

$$z = (z_1, z_2, \dots, z_n)^T \in Z = Z_1 \times Z_2 \times \dots \times Z_n;$$

$$y = (y_1, y_2, \dots, y_p)^T \in Y = Y_1 \times Y_2 \times \dots \times Y_p,$$

где  $X, Y, Z$  – множества, в которых изменяются векторы  $x, y, z$  соответственно;  $X_i (i = \overline{1, m}), Z_j (j = \overline{1, n}), Y_k (k = \overline{1, p})$  – множества значений компонент  $x_i, z_j, y_p$  векторов  $x, z, y$ ;  $X = X_1 \times X_2 \times \dots \times X_m$  – декартово (прямое произведение), т.е. вида  $x = (x_1, x_2, \dots, x_m)^T$ , причем,  $x_1 \in X_1, x_2 \in X_2, \dots, x_m \in X_m$ ;  $T$  – символ транспонирования; аналогичные определения имеют место для  $Z$  и  $Y$ .

Вектор  $z(t_0)$  фазовых координат целиком определяет состояние системы  $\Sigma$  в фиксированный момент времени  $t_0$ . Положение системы в любой момент времени  $t$  в будущем, т.е. для  $t > t_0$  единственным образом определяется вектором  $z(t_0) = z_0$  и изменением входных воздействий (траекторий)  $x(\cdot) = (x(s), S \in [t_0, t])$  и не зависит оттого, каким образом система пришла в состояние  $z_0$  (рассматриваются системы без последствия). Для таких систем имеет место следующее отображение

$$\varphi: T \times T \times Z \times X(\cdot) \rightarrow Z, \quad (2.2)$$

т.е. закон по которому каждому элементу  $(t, t_0, z, x(\cdot))$  множества  $T \times T \times Z \times X(\cdot)$ , называемого областью определения отображения, ставится некоторый элемент  $z$  множества  $Z$ , называемого областью значений отображения. Здесь  $T$  – множество значений моментов времени  $t(t_0)$  и  $X(\cdot)$  – множество траекторий изменения входного воздействия  $x(\cdot)$ .

Можно использовать также более привычную форму записи  $\varphi$  в виде оператора, называемого переходной функцией, т.е.

$$z(t) = \varphi(t, t_0, z_0, x(\cdot)). \quad (2.2a)$$

Связь между вектором переменных состояний  $z$  и контролируемым вектором выхода  $y$  задается некоторым выходным отображением

$$\psi = T \times Z \rightarrow Y, \quad (2.3)$$

ставящим в соответствие каждой паре  $(t, z)$ , называемой событием или фазой, из множества  $T \times Z$  – пространства событий или фазового пространства конкретный элемент из множества  $Y$ .

Эта зависимость между  $y$  и  $z$  может быть отражена также с помощью оператора

$$y(t) = \psi(t, z). \quad (2.3a)$$

Таким образом, динамическая система задается четверкой множеств  $T, X, Z, Y$  и двумя операторами  $\varphi, \psi$ , т.е.

$$\Sigma = (T, X, Z, Y, \varphi, \psi). \quad (2.4)$$

Ее общая схема представлена на рис. 2.1.

Для иллюстрации оператора  $\varphi$  приведем простейший пример. Пусть ДС представляет собой  $RL$ -цепь (рис. 2.2). Переменными в данной системе являются напряжения  $U_1, U_R, U_2 = U_L$  и ток  $J$ . Выделим вход  $x$ , выход  $y$ , фазовую координату  $z$ , пусть

$$x = U_1, \quad y = U_2, \quad z = J.$$

Запишем для цепи модель динамики в виде дифференциального уравнения:

$$\frac{dJ(t)}{dt} = \frac{1}{L} U_L(t) = \frac{1}{L} (U_1(t) - U_R(t)) = \frac{R}{J} J(t) + \frac{1}{L} U_1(t);$$

$$U_2(t) = U_1(t) - U_R(t) = U_1(t) - RJ(t)$$

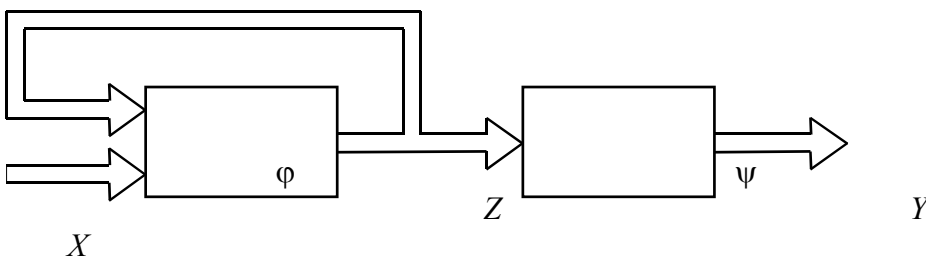
или, используя обозначения системных переменных,

$$z(t) = az(t) + bx(t), \quad y(t) = cz(t),$$

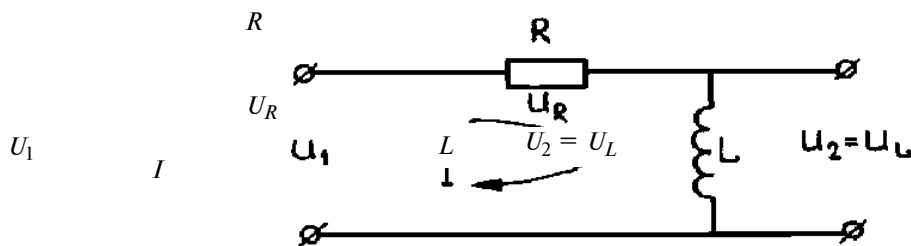
здесь  $a = -R/L, \quad b = 1/L, \quad c = L,$

$$y(t) = x(t) - c_1 z(t).$$

Сопоставим решение данного дифференциального уравнения с оператором  $\varphi$  в форме (2.2a) и (1.2), т.е.:



**Рис. 2.1** Общая схема динамической системы



**Рис. 2.2 RL-цепь**

$$z(t) = e^{a(t-t_0)} z_0 + b \int_{t_0}^t e^{a(t-s)} x(s) ds = z(t);$$

$$z(t) = \varphi(t, t_0, z_0, x(\cdot));$$

$$\varphi: T \times T \times Z \times X(\cdot) \rightarrow Z.$$

**НАИБОЛЕЕ ПОЛНО ИЗУЧЕНЫ ЛИНЕЙНЫЕ ДС, УПРАВЛЕНИЯ КОТОРЫХ ИМЕЮТ ВИД:**

$$z(t) = A(t)z(t) + B(t)x(t);$$

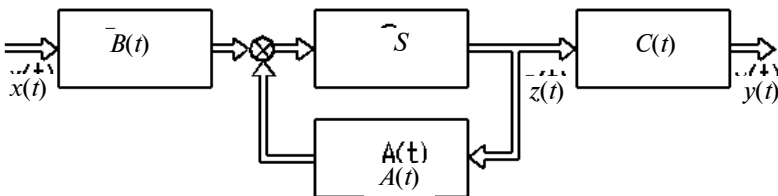
$$y(t) = C(t)z(t), \tag{2.5}$$

где

$$A(t) = \begin{pmatrix} a_{11}(t) & \dots & a_{1n}(t) \\ a_{21}(t) & \dots & a_{2n}(t) \\ \dots & \dots & \dots \\ a_{n1}(t) & \dots & a_{nn}(t) \end{pmatrix}; \quad B(t) = \begin{pmatrix} b_{11}(t) & \dots & b_{1m}(t) \\ b_{21}(t) & \dots & b_{2m}(t) \\ \dots & \dots & \dots \\ b_{n1}(t) & \dots & b_{nm}(t) \end{pmatrix}; \quad C(t) = \begin{pmatrix} c_{11}(t) & \dots & c_{1n}(t) \\ c_{21}(t) & \dots & c_{2n}(t) \\ \dots & \dots & \dots \\ c_{p1}(t) & \dots & c_{pn}(t) \end{pmatrix}.$$

Структурная схема линейной ДС приведена на рис. 2.3. Для нее оператор  $\varphi$  определяется матрицами  $A(t)$  и  $B(t)$ , а оператор  $\psi$  – матрицей  $C(t)$ . Если эти матрицы не зависят от времени, то систему называют линейной стационарной.

Часто линейные ДС используются как аппроксимация для нелинейных систем.



**Рис. 2.3 Схема линейной динамической системы**

Во многих случаях элементарные модели  $M_j^0$  описываются дифференциальными уравнениями в частных производных с соответствующими граничными условиями. Например, при контроле теплофизических свойств материалов распределение температуры внутри исследуемого объекта при импульсном тепловом воздействии от линейного источника описывается решением краевой задачи в виде:

$$\frac{dT(x, z, \tau)}{d\tau} = a \left( \frac{d^2 T(x, z, \tau)}{dx^2} + \frac{d^2 T(x, z, \tau)}{dz^2} \right);$$

$$(\tau > 0; x, z > 0);$$

$$dT(x, z, \tau) = 0; \quad T(x, z, \tau) \rightarrow 0 \quad \text{при} \quad x, z \rightarrow \infty;$$

$$\frac{dT(x, z, \tau)}{dz} = \begin{cases} -\frac{q_0 \delta(\tau)}{\lambda}, & \text{при} \quad x=0, \quad z=0; \\ 0, & \text{при} \quad x=0, \quad z=0; \end{cases}$$

$$\left. \frac{dT(x, z, \tau)}{dz} \right|_{x=0} = 0,$$

где  $x, z$  – координаты;  $\tau$  – время;  $T$  – температура;  $\delta(\tau)$  – дельта-функция (функция Дирака);  $q_0$  – плотность теплового потока с единицы длины линейного источника.

Модели процесса измерения строятся для решения конкретных задач анализа и синтеза МС.

Разработанная модель процесса измерения должна позволять оценивать параметры разрабатываемой МС – погрешность результата измерения, быстродействие, выбирать режимы работы, решать задачи синтеза – определять необходимое число каналов, расположение датчиков и т.д. Для определения точности в модели должны учитываться законы распределения погрешностей, возникающих при функционировании составных частей.

Модель процесса измерения (МПИ) разрабатывается в следующей последовательности.

1 Формулируются задачи исследования, в которых требуется использование МПИ, исходя из этого выдвигаются требования к МПИ (точность, быстродействие и т.д.). Указывается, как предполагается использовать МПИ – решением прямой задачи моделирования, обратной задачи и т.д.

2 Определяется состав МПИ, т.е. состав субъектов, участвующих в процессе измерения, и этапы процесса измерения, т.е. определяются элементарные модели, образующие МПИ (см. (2.1)).

3 Разрабатываются частные модели  $M_j^n, M_j^0, j = 1, 2, 3$ , т.е. выбирается вид модели, и рассчитываются их параметры.

4 Разрабатывается алгоритм решения всей МПИ на ЭВМ и составляется соответствующая программа.

5 Производится проверка адекватности модели и работы по коррекции МПИ.

Существенным недостатком многих известных моделей процесса измерения является то, что они описывают изменение только вектора фазовых координат и не отражают изменения, происходящие в МС при нарушении работоспособности ее составных частей и непредвиденных внешних воздействиях. Это приводит к снижению реальной эффективности работы проектируемых МС, появлению непредвиденных искаженных результатов измерений и т.д.

## 2.2 СТРАТЕГИИ ИЗМЕРЕНИЯ НА МНОЖЕСТВЕ СОСТОЯНИЙ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ

Будем полагать, что измерение составляет часть процедуры вычисления вектора  $\hat{\Theta}$  измеряемых параметров (третья стадия работы МС) на основе информации об изменении контролируемой (выходной) величины  $\hat{y}(t), t \in [t_{0i}, t_{ki}]$ , получаемой на второй стадии. Под стратегией измерения на множестве  $H$  понимается способ формирования конечного результата в зависимости от характера учета значений переменной состояния функционирования  $h$  на временном интервале  $T_i = [t_{0i}, t_{ki}]$ . Наиболее существенно учитывать изменения  $h$  на второй стадии процесса измерения, поэтому в дальнейшем под интервалом  $T_i$  будем понимать продолжительность второй стадии.





жестве состояний функционирования исследуются возможные ситуации, которые могут иметь место в процессе реальной эксплуатации, и для этих ситуаций заранее синтезируются алгоритмы работы МС.

Основным недостатком рассматриваемых МС является сложное математическое обеспечение, оно требует больших затрат на разработку.

### 2.2.2 НЕКОРРЕКТИРУЕМАЯ СТРАТЕГИЯ

Стратегия измерения называется некорректируемой, если на временном интервале измерения  $T_i$  значения переменной  $h$  не идентифицируются и, следовательно, расчет вектора параметров производится без учета фактической траектории  $h(\cdot)$ , которая имела место на интервале  $T_i$ . Вместе с тем, алгоритм расчета параметров разрабатывается с учетом возможных значений переменной  $h$ , обычно это наиболее вероятные значения состояний функционирования. Некорректируемую стратегию обозначим  $S_{нк}$ . Структурная схема системы, использующей стратегию  $S_{нк}$ , не содержит блока идентификации переменной состояний функционирования (см. рис. 2.4).

Расчет вектора параметров при стратегии  $S_{нк}$  производится в соответствии с операторным соотношением

$$\widehat{\vartheta} = S_{нк}(t, x(\cdot), y(\cdot) / F_{H(\cdot)}), \quad t \in T_i, \quad (2.7)$$

где  $F_{H(\cdot)}$  – реквизиты процесса измерения, соответствующие возможным траекториям  $h(\cdot) \in H(\cdot)$ ,  $S_{нк} : R \times R^{n_x} \times R^{n_y} \rightarrow R^{n_\vartheta}$ .

Оператор  $S_{нк}$  предполагает получение результатов измерения, учитывающих вероятные значения  $h$ . Одним из путей достижения является представление результатов измерения в виде интервальных значений, которым с задаваемой вероятностью принадлежат действительные значения параметров  $\vartheta$  [9].

Измерительные системы со стратегией  $S_{нк}$  уступают системам с  $S_k$  по точности, но не требуют создания специальных датчиков для идентификации значений  $h$ . Стратегия  $S_{нк}$  обычно используется в мобильных МС для получения приближенных значений измеряемых параметров.

### 2.2.3 КОМБИНИРОВАННАЯ СТРАТЕГИЯ

Комбинированная стратегия (обозначим  $S_{км}$ ) представляет собой некоторый компромисс между стратегиями  $S_k$  и  $S_{нк}$ . В основе стратегии  $S_{км}$  лежит разбиение множества состояний функционирования  $H$  на непересекающиеся подмножества  $H, H_1, H_2, \dots, H_k$ . Если значения текущих состояний  $h(t)$ ,  $t \in T_i$  находятся в пределах одного подмножества  $H_j \in H$ , то МС с  $S_{км}$  функционирует в соответствии со свойствами некорректируемой стратегии, если же значение переменной  $h$  выходит за пределы подмножества  $H_j$ , то производится коррекция, как при стратегии  $S_k$ .

Структурная схема МС со стратегией  $S_{км}$  аналогична схеме (см. рис. 2.4). Однако здесь блок идентификации фиксирует не каждое значение  $h$ , а принадлежность  $h$  к подмножеству  $H_j, j = 1, \dots, k$ .

Расчет вектора параметров  $\vartheta$  при стратегии  $S_{км}$  производится в соответствии с оператором

$$\widehat{\vartheta} = S_{км}(t, x(\cdot), y(\cdot), H(\cdot) / F_{h(\cdot)}), \quad t \in T_i, \quad (2.8)$$

где  $F_{h(\cdot)}$  – реквизиты процесса измерения, соответствующие траектории

$$H(\cdot) = H(t), \quad t \in T_i; \quad S_{км} : R \times R^{n_x} \times R^{n_y} \times R^k \rightarrow R^{n_\vartheta}.$$

При использовании  $S_{км}$  МС занимают по точности промежуточное место между системами с  $S_k$  и системами с  $S_{нк}$ . Выбором числа подмножеств  $H_j, j = \overline{i; k}$  можно достигнуть заданной точности МС и приемлемой сложности системы.

### 3 ПРИМЕР ПРОЕКТИРОВАНИЯ АДАПТИВНЫХ МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ СИСТЕМ КОНТРОЛЯ

#### 3.1 РАЗРАБОТКА ОПЕРАТИВНОГО МЕТОДА НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ

Процессы измерения и контроля качества материалов и изделий из них являются исключительно важными в различных отраслях промышленности, при этом весьма актуальной является задача оперативного определения теплофизических свойств материалов методами неразрушающего контроля. В существующих методах НК ТФС материалов оперативность измерения снижается из-за длительности необходимого процесса термостатирования измерительного зонда перед началом очередного измерения, поэтому разработка метода, повышающего производительность измерений, имеет большое практическое значение в неразрушающем контроле теплофизических свойств материалов.

##### 3.1.1 МЕТОД НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ

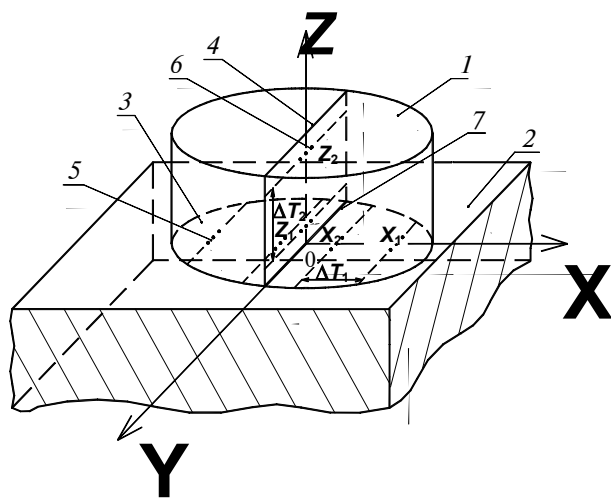
Рассмотрим оперативный метод НК ТФСМ, сущность которого заключается в следующем [10].

После проведения очередного теплофизического измерения с использованием метода НК ТФСМ, основанного на тепловом воздействии на поверхность исследуемого объекта линейного нагревателя импульсами заданной частоты и мощности, помещают измерительный термозонд на вспомогательный образец из материала, близкого по теплофизическим свойствам к материалу подложки термозонда (рис. 3.1).

При этом температура  $T(x, z, \tau)$  в подложке термозонда при двумерном потоке тепла, вызванного действием мгновенного линейного источника тепла, определяется по соотношению

$$T(x, z, \tau) = \frac{Q}{2\pi\lambda\tau} \exp\left[-\frac{x^2 + z^2}{4a\tau}\right], \quad (3.1)$$

где  $Q$  – мощность теплового воздействия;  $\lambda, a$  – коэффициенты тепло- и температуропроводности;  $\tau$  – время;  $x, z$  – координаты точки контроля температуры.



### Рис. 3.1 Физическая модель системы

#### «Термозонд – вспомогательный образец»:

1 – подложка термозонда (тело 1); 2 – вспомогательный образец (тело 2);  
 3 – контактная плоскость  $XOY$  измерительной головки термозонда; 4 – плоскость  $ZOY$ , проходящая через  
 линию нагревателя и перпендикулярная плоскости  $XOY$ ;  
 5 – основная термобатарея в плоскости  $XOY$ ; 6 – вспомогательная термобатарея в плоскости  $ZOY$  термо-  
 зонда; 7 – нагреватель;  $x_1, x_2$  – точки контроля температуры в плоскости  $XOY$ , причем точка  $x_2$  располо-  
 жена на заданном расстоянии от  
 нагревателя, при котором отсутствует прямое влияние нагревателя за счет  
 воздействия лучистого и конвективного теплообмена, а точка  $x_1$  – на расстоянии  
 от края подложки, обеспечивающем отсутствие влияния краевого эффекта на  
 результаты измерения из-за ограниченности размеров подложки зонда;  
 $z_1, z_2$  – точки контроля температуры в плоскости  $ZOY$ , при этом точка  $z_1$   
 расположена аналогично точке  $x_2$ , а  $z_2$  – на глубине, которая устраняет  
 действие краевого эффекта из-за ограниченности подложки

При частотно-импульсном воздействии на исследуемый объект температуру  $T(x, z, \tau)$  в точках кон-  
 троля  $x, z$  при подаче  $n$ -го импульса рассчитывают по формуле

$$T(x, z, \tau) = \frac{QF}{2\pi\lambda} \sum_{i=1}^n \frac{1}{i} \exp\left[-\frac{x^2 + z^2}{4a\Delta\tau i}\right], \quad (3.2)$$

где  $F$  – частота тепловых импульсов;  $\Delta\tau$  – интервал времени между тепловыми импульсами.

Далее контролируют перепад температур в плоскости  $XOY, z = 0$  в точках  $x_2, x_1$ , который определя-  
 ется выражением

$$\begin{aligned} \Delta T_1(x, \tau) &= T(x_2, \tau) - T(x_1, \tau) = \\ &= \frac{QF}{2\pi\lambda\tau} \left[ \sum_{i=1}^n \frac{1}{i} \exp\left(-\frac{x_2^2}{4a\Delta\tau i}\right) - \sum_{i=1}^n \frac{1}{i} \exp\left(-\frac{x_1^2}{4a\Delta\tau i}\right) \right]. \end{aligned} \quad (3.3)$$

Аналогично определяем перепад температур в плоскости  $YOZ, x = 0$  в точках  $z_2, z_1$ :

$$\begin{aligned} \Delta T_2(z, \tau) &= T(z_2, \tau) - T(z_1, \tau) = \\ &= \frac{QF}{2\pi\lambda\tau} \left[ \sum_{i=1}^n \frac{1}{i} \exp\left(-\frac{z_2^2}{4a\Delta\tau i}\right) - \sum_{i=1}^n \frac{1}{i} \exp\left(-\frac{z_1^2}{4a\Delta\tau i}\right) \right]. \end{aligned} \quad (3.4)$$

Затем определяют момент времени, когда величина контролируемых перепадов температур  $\Delta T_1$   
 и  $\Delta T_2$  внутри подложки станет меньше наперед заданного значения  $\varepsilon$ , т.е.

$$\Delta T_1 < \varepsilon \quad \text{и} \quad \Delta T_2 < \varepsilon . \quad (3.5)$$

На практике значение  $\varepsilon$  задается обычно не выше 0,2...0,3 °С, что позволяет считать наступление момента уравнивания (усреднения) температуры по всему объему подложки.

Как только перепады температур по объему подложки термозонда станут меньше заданной величины  $\varepsilon$ , что соответствует усреднению температуры по объему подложки термозонда, измерительный зонд приводят в контакт со следующим исследуемым объектом для проведения очередного измерения и определения искомого ТФС в соответствии с реализуемым в системе частотно-импульсным методом. При этом в системе «Термозонд – исследуемый объект» происходят два тепловых процесса.

Первый соответствует граничным условиям 4-го рода, т.е. теплообмену при контакте двух тел, температура одного из которых (подложки термозонда) выше другого. При этом на границе соприкосновения этих тел температура устанавливается после соприкосновения тел и остается постоянной на протяжении всего процесса теплообмена, так как

$$T(0, \tau) = T(x, \infty) = \frac{K_3}{1 + K_3} = \text{const} , \quad (3.6)$$

где  $K_3$  – критерий, характеризующий тепловую активность первого тела по отношению ко второму,

$$K_3 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \sqrt{\frac{a_2}{a_1}} ,$$

где  $\lambda_1$ ,  $a_1$  – коэффициенты тепло- и температуропроводности подложки;  $\lambda_2$ ,  $a_2$  – коэффициенты тепло- и температуропроводности исследуемого объекта.

Второй тепловой процесс вызван действием импульсного источника тепла, помещенного в плоскости контакта двух тел. В соответствии с принципом суперпозиции температурное поле в каждой точке контактной поверхности будет определяться действием двух теплообменных процессов

$$T(x, \tau) = T_{\text{п}}(x, \tau) + T_{\text{н}}(x, \tau) , \quad (3.7)$$

где  $T_{\text{п}}$  – температура, обусловленная действием остаточного тепла, аккумулированного в подложке термозонда от предыдущего измерения;  $T_{\text{н}}(x, \tau)$  – температура, обусловленная действием импульсного источника тепла.

Но поскольку рабочие термодатчики на контактной поверхности подложки находятся в абсолютно одинаковых условиях по отношению к первому теплообменному процессу (3.6), то их дифференциальное включение исключает влияние этого теплового процесса на выходную измерительную информацию с основной дифференциальной термобатарей, следовательно, рабочие дифференциальные термобатарей фиксируют и выдают информацию только о температурно-временных изменениях (температурном поле) от действия линейного импульсного источника тепла. Таким образом, на полученную измерительную информацию в следующих экспериментах не оказывает влияние остаточное, аккумулированное в подложке зонда тепло, от предыдущего измерения, т.е. полученная измерительная информация позволяет определить ТФС следующего исследуемого объекта без влияния на результат измерения предыдущих экспериментов.

Основным недостатком известных методов, применяющихся для НК ТФСМ является то, что неотъемлемым, с точки зрения метрологии, условием его работы является необходимость после каждого измерения в охлаждении измерительной головки до температуры окружающей среды с целью достижения равенства температур измерительной головки зонда и исследуемого объекта. Но поскольку охлаждение подложки измерительной головки осуществляется в основном только через одну контактную поверхность, а боковые поверхности подложки находятся внутри корпуса зонда практически при адиабатических условиях, то этот процесс очень длительный и составляет в среднем не менее 10...30 мин. В предлагаемом методе необходимым условием начала следующего измерения является момент наступления

температурного уравнивания (усреднения) в объеме подложки, которое наступает для большинства применяемых для подложки теплоизоляционных материалов за 2...3 мин. Таким образом, производительность измерений при использовании предлагаемого метода увеличивается не менее, чем в 5 – 10 раз.

На рис. 3.2 представлена блок-схема алгоритма предлагаемого метода НК ТФСМ.

Для подтверждения работоспособности разработанного метода выполнены расчеты перепадов температур  $\Delta T(x, \tau)$ , в соответствии с зависимостями (3.3) и (3.4) при остывании термозонда после проведения очередного теплофизического измерения в плоскостях  $XOY$  и  $ZOY$ .

В табл. 3.1 приведены расчетные значения  $\Delta T_1(x, \tau)$  и  $\Delta T_2(z, \tau)$  соответственно в плоскостях  $XOY$  и  $ZOY$  и при остывании подложки термозонда, выполненной из различных материалов.

На рис. 3.3 и 3.4 приведены экспериментальные термограммы в точках контроля температур в плоскостях  $XOY$  и  $ZOY$  подложки термозонда после окончания теплофизического измерения на различных по теплопроводности материалах: рипоре, линолеуме, полиметилметакрилате (ПММ), винилискоже, газосиликате.

В табл. 3.2 показаны значения температур термограмм остывания подложки термозонда в плоскости  $XOY$  и плоскости  $ZOY$  после проведения очередного измерения и помещения термозонда на вспомогательный образец. Из табл. 3.2 видно, что момент уравнивания в подложке наступает через 2 мин после остывания термозонда. Анализ термограмм, позволяет установить, что уравнивание температурного поля внутри подложки термозонда происходит в среднем за 2 мин, т.е. осуществляется выполнение условия  $\Delta T < \varepsilon$  для исследуемых классов материалов. В ранее применявшемся в данной ИВС способе измерения, интервал между теплофизическими измерениями составлял, как правило, около 10 мин.

Следовательно, предлагаемый метод определения ТФСМ способствует повышению оперативности проведения измерений в среднем в 5 раз.

Для сравнения расчетных и экспериментальных термограмм построены термограммы остывания в плоскостях  $XOY$  и  $ZOY$  подложки термозонда на одном графике. На рис. 3.5, 3.6 приведены термограммы остывания соответственно в плоскостях  $XOY$  и  $ZOY$  подложки термозонда из ПММ; на рис. 3.7 и 3.8 построены термограммы остывания подложки термозонда из рипора.

Сравнительный анализ расчетных и экспериментальных термограмм, приведенных на рис. 3.5 – 3.8, позволяет сделать вывод, что максимальная относительная погрешность отклонения экспериментальных термограмм от расчетных составляет не более 4...5 %, что подтверждает корректность теоретического обоснования разработанного метода НК ТФСМ.

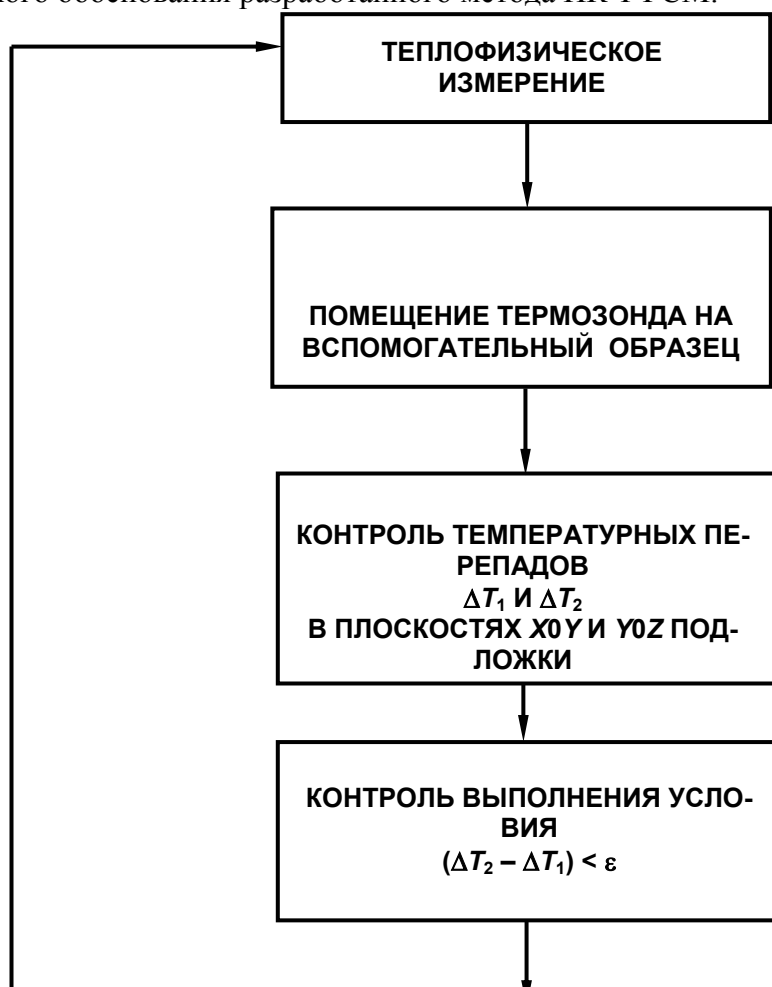


РИС. 3.2 БЛОК-СХЕМА АЛГОРИТМА МЕТОДА НК ТФСМ

**3.1 Расчетные значения  $\Delta T_1(x, \tau)$  и  $\Delta T_2(z, \tau)$  охлаждения подложки термозонда из различных материалов соответственно в плоскости  $XOY$  и в плоскости  $ZOY$**

$\tau, c$	Исследуемые материалы									
	ПММ		Рипор		Газосиликат		Винилискожа		Линолеум	
	$\Delta T_1$	$\Delta T_2$	$\Delta T_1$	$\Delta T_2$	$\Delta T_1$	$\Delta T_2$	$\Delta T_1$	$\Delta T_2$	$\Delta T_1$	$\Delta T_2$
0	4,92	0,52	20,8 5	1,85	5,57	0,65	14,25	2,59	10,10	2,59
10	2,85	0,26	12,0 4	0,91	3,24	0,26	7,77	0,65	5,82	0,52
20	1,81	0,26	4,54	0,65	2,07	0,26	3,89	0,52	3,24	0,39
30	1,04	0,26	2,59	0,52	1,30	0,26	2,59	0,39	1,81	0,26
40	0,65	0,26	1,94	0,52	0,91	0,13	1,68	0,39	1,16	0,26
50	0,52	0,26	1,42	0,39	0,77	0,13	1,16	0,26	0,77	0,26
60	0,26	0,13	1,04	0,26	0,39	0,13	0,77	0,26	0,52	0,13
70	0,13	0,13	0,91	0,26	0,26	0,13	0,52	0,26	0,39	0,13
80	0,13	0,13	0,65	0,26	0,13	0,13	0,39	0,26	0,26	0,13

90	0,13	0,13	0,52	0,26	0,13	0,13	0,26	0,13	0,13	0,13
100	0,13	0,13	0,39	0,26	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13
110	0,13	0,13	0,26	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13
120	0,13	0,13	0,26	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13
130	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13
140	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13
150	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13

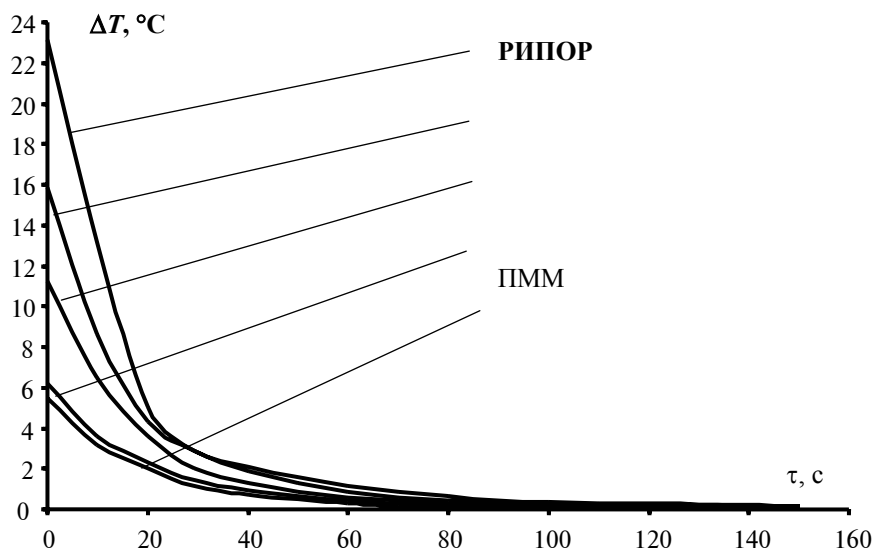


Рис. 3.3 Термограммы охлаждения подложки термозонда в плоскости  $YOY$  при  $\Delta x = 0,02$  м

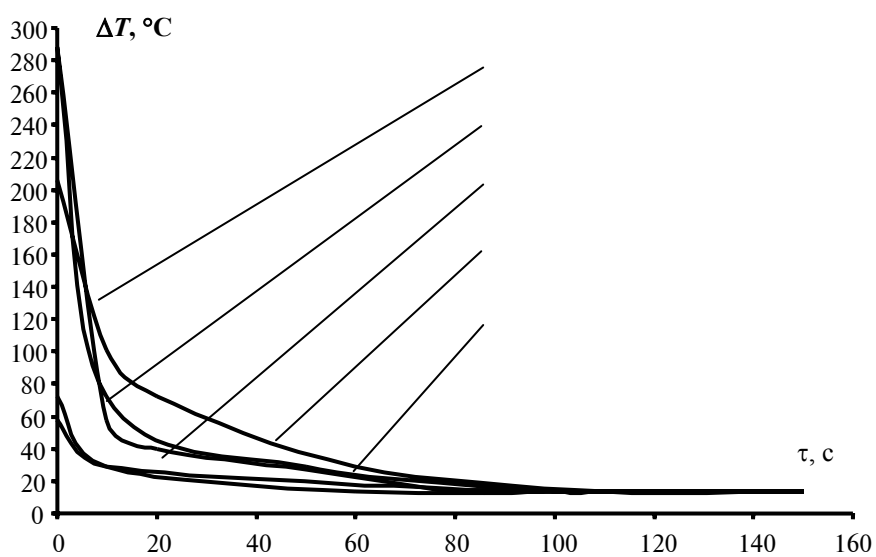


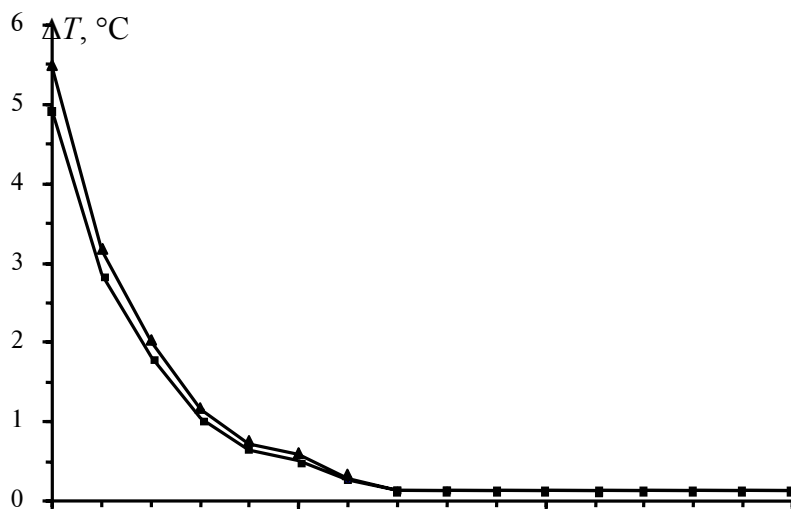
Рис. 3.4 Термограммы охлаждения подложки термозонда в плоскости  $ZOY$  при  $\Delta z = 0,02$  м, где  $\Delta z = z_2 - z_1$

### 3.2 Экспериментальные значения $\Delta T_1$ и $\Delta T_2$ при охлаждении подложки термозонда соответственно в плоскостях $XOY$ и $ZOY$

$\tau$ , с	Исследуемые материалы									
	ПММ		Рипор		Газосиликат		Винилискожа		Линолеум	
	$\Delta T_1$	$\Delta T_2$	$\Delta T_1$	$\Delta T_2$	$\Delta T_1$	$\Delta T_2$	$\Delta T_1$	$\Delta T_2$	$\Delta T_1$	$\Delta T_2$
0	5,47	0,58	23,17	2,06	6,19	0,72	15,83	2,88	11,2 2	2,88
10	3,17	0,29	13,38	1,01	3,60	0,29	8,63	0,72	6,47	0,58
20	2,01	0,29	5,04	0,72	2,30	0,29	4,32	0,58	3,60	0,43
30	1,15	0,29	2,88	0,58	1,44	0,29	2,88	0,43	2,01	0,29
40	0,72	0,29	2,16	0,58	1,01	0,14	1,87	0,43	1,29	0,29
50	0,58	0,29	1,58	0,43	0,86	0,14	1,29	0,29	0,86	0,29
60	0,29	0,14	1,15	0,29	0,43	0,14	0,86	0,29	0,58	0,14
70	0,14	0,14	1,01	0,29	0,29	0,14	0,58	0,29	0,43	0,14
80	0,14	0,14	0,72	0,29	0,14	0,14	0,43	0,29	0,29	0,14
90	0,14	0,14	0,58	0,29	0,14	0,14	0,29	0,14	0,14	0,14
100	0,14	0,14	0,43	0,29	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14
110	0,14	0,14	0,29	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14
120	0,14	0,14	0,29	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14
130	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14
140	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14
150	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14

Как сказано выше, экспериментальным и расчетным путем установлено, что термостабилизация по объему подложки термозонда при помещении его на вспомогательный образец наступает при выполнении неравенства

$$\Delta T(x, \tau) < 0,3 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

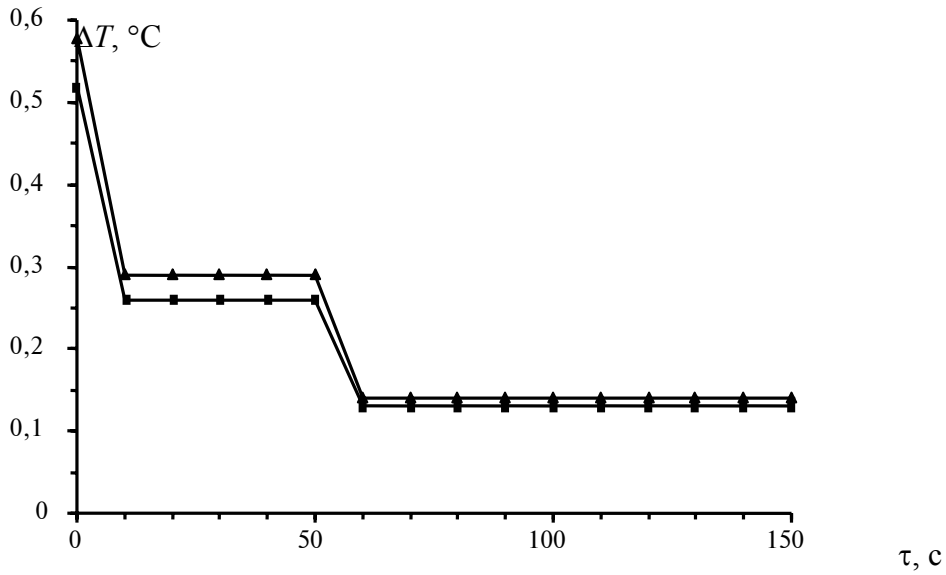




$\tau, c$

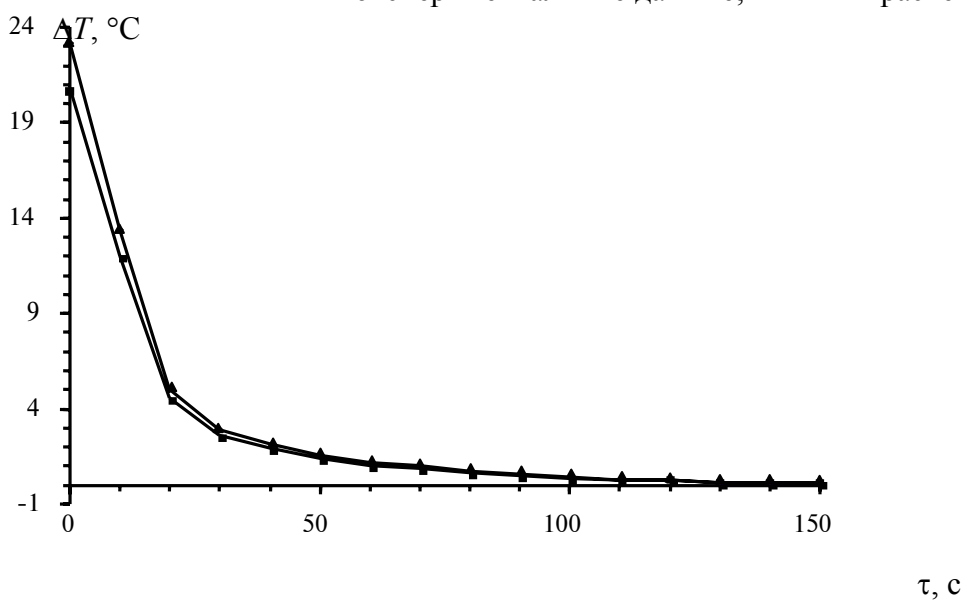
**Рис. 3.5 Термограммы охлаждения подложки термозонда из ПММ в плоскости X0Y:**

—■— — экспериментальные данные; —▲— — расчетные данные



**Рис. 3.6 Термограммы охлаждения подложки термозонда из ПММ в плоскости Z0Y:**

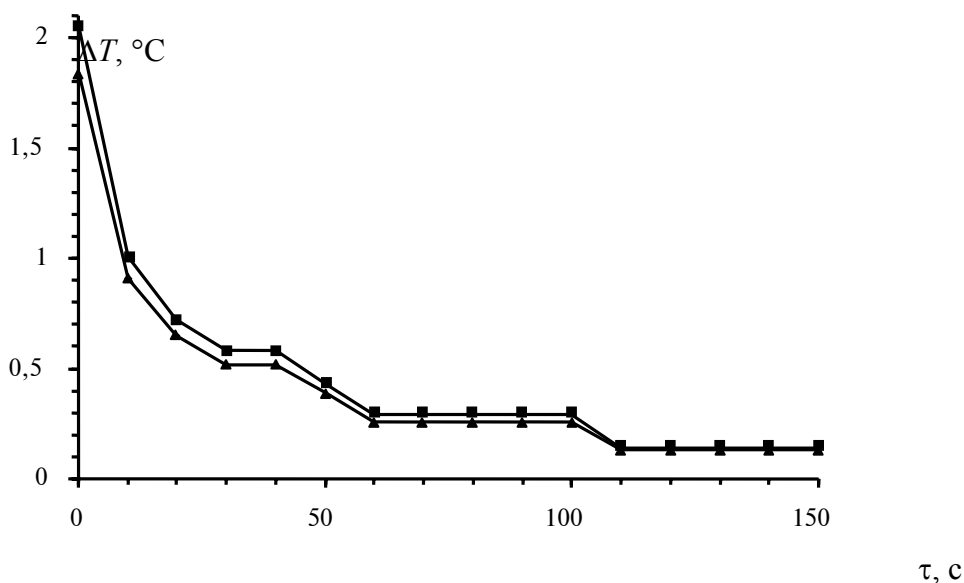
—■— — экспериментальные данные; —▲— — расчетные данные



$\tau, c$

**Рис. 3.7 Термограммы охлаждения подложки термозонда из рипора в плоскости X0Y:**

—■— — экспериментальные данные; —▲— — расчетные данные



**Рис. 3.8 Термограммы охлаждения подложки термозонда из рипора в плоскости Z0Y:**

—■— — экспериментальные данные; —▲— — расчетные данные

Из данного неравенства находим значение  $\tau_{\max}$ , при котором выполняется данное неравенство.

При выполнении расчетов значения  $x_2, z_2$ , задавались с минимальным расстоянием 1 мм от нагревателя,  $x_1, z_1$  – 1 мм от края подложки термозонда, а расстояние между  $x_1$  и  $x_2$  варьировалось с шагом 1 мм.

На рис. 3.9 построены графики расчетных зависимостей  $\tau_{\max} = f(\Delta x)$ , ( $\Delta x = x_2 - x_1$ ) в плоскости X0Y подложки термозонда, изготовленной из рипора.

Из приведенных графиков можно сделать вывод, что для исследуемых материалов максимальное время наступления уравнивания температурных перепадов в подложке термозонда при самом большом расстоянии  $\Delta x$  между термобатареями составляет не более 2 – 3 мин.

Таким образом, предлагаемый оперативный метод НК ТФСМ позволяет не менее, чем в 5 раз повысить производительность неразрушающего контроля ТФСМ, по сравнению с известными нестационарными методами, что подтверждается расчетными и экспериментальными данными.

### 3.1.2 АЛГОРИТМ, УРАВНЕНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ, СТРУКТУРА ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ЦЕПИ, РЕАЛИЗУЮЩЕЙ МЕТОД НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛА

В вышеизложенном методе определение искомых теплофизических свойств исследуемого объекта (тепло- и температуропроводности) осуществляется в соответствии с реализуемым в системе частотно-импульсным методом.

При этом необходимо иметь полную измерительную информацию о тепловых процессах в исследуемых материалах, которую содержит температурное поле в контактной плоскости тепловой системы

«термозонд – исследуемый объект» и в перпендикулярной ей плоскости в подложке термозонда, проходящей через линию нагревателя.

Большинство методов определения ТФСМ основано на решениях линейного дифференциального уравнения теплопроводности [11] при заданных краевых условиях

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \nabla^2 T,$$

где  $\nabla^2$  – оператор Лапласа.

Из анализа существующих методов НК ТФСМ можно сделать вывод, что нестационарные методы с использованием линейного импульсного источника тепла наиболее перспективны, так как характеризуются простотой реализации, допустимой для исследуемого класса материалов точностью и оперативностью.

Рассмотрим метод [12] при действии линейного мгновенного источника тепла в плоскости контакта двух полуограниченных тел, на основе которого определяются ТФСМ в предложенном оперативном методе в

п. 3.1 данной работы. При этом процессе распространения тепла на теплоизолированной поверхности полубесконечного в тепловом отношении тела при действии линейного источника тепла описывается решением задачи теплопроводности [11], которое имеет вид

$$T(x, \tau) = \frac{Q}{4\pi\lambda\tau} \exp\left(-\frac{x^2}{4a\tau}\right), \quad (3.8)$$

где  $x$  – расстояние от линейного источника тепла до точки контроля.

При частотно-импульсном воздействии на исследуемый объект температура  $T(x, n)$  в точках контроля  $n$  и  $m$  при подаче  $n$ -го импульса на основе (3.8) может быть определена по формуле [12]

$$T(x, n) = \sum_{i=1}^{n-1} \frac{QF}{4\pi\lambda i\Delta\tau} \exp\left(-\frac{x^2 F}{4ai\Delta\tau}\right). \quad (3.9)$$

Измерив значения температуры  $T(x, n)$  и  $T(x, m)$  и, используя отношение соответствующих правых частей (3.9), получим

$$\frac{T(x, n)}{T(x, m)} = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} \frac{1}{i} \exp\left(-\frac{x^2 F}{4ai}\right)}{\sum_{i=1}^{m-1} \frac{1}{i} \exp\left(-\frac{x^2 F}{4ai}\right)}, \quad (3.10)$$

т.е. в неявном виде соотношения имеет место равенство

$$f(a, T(x, n)/T(x, m)) = 0. \quad (3.11)$$

Из соотношения (3.10) видно, что существует некоторая зависимость

$$a = f\left(\frac{T(x, n)}{T(x, m)}\right). \quad (3.12)$$

Исследовались различные аппроксимации этой зависимости. Наиболее удобными в вычислительном отношении являются:

$$a = K_1 \exp\left(K_2 \frac{T(x, n)}{T(x, m)}\right); \quad (3.13)$$

$$(a \cdot 10^{-7}) = 1 + K_{11} \left(\frac{T(x, n)}{T(x, m)} \exp\left(K_{21} \frac{T(x, n)}{T(x, m)}\right)\right), \quad (3.14)$$

где  $K_1, K_{11}, K_2, K_{21}, K_3$  – константы, зависящие от  $x, F, n, m, a_3$  и  $\lambda_3$ .

Расчет при известных значениях констант производится по известной формуле

$$\lambda_2 = \frac{1}{T(x, m)} K_{12} \ln(K_{32}a + K_{31}). \quad (3.15)$$

Зависимость вида (3.12), (3.14) можно получить для различных ситуаций, в том числе и тогда, когда тело 1 (см. рис. 3.1) не является идеальным изолятором.

Учитывая требования к точности и быстродействию вычислительных средств, в качестве формул для расчета  $a$  и  $\lambda$  взяты:

$$a = K_1 \exp\left(K_2 \frac{T_n}{T_m}\right); \quad \lambda = \frac{1}{T_m} K_3 \ln(K_4 a);$$

$$T_n^{\Delta} = T(x, n); \quad T_m^{\Delta} = T(x, m), \quad (3.16)$$

где  $K_1, K_2, K_3, K_4$  – константы, определяемые при градуировке прибора.

Произведя замеры температур  $T_n$  и  $T_m$  для двух материалов с известными  $a, \lambda$ , на основе (3.15) получаем:

$$\left( \begin{array}{l} a_1 = K_1 \exp\left(K_2 \frac{T_{n1}}{T_{m1}}\right) \\ a_2 = K_1 \exp\left(K_2 \frac{T_{n2}}{T_{m2}}\right) \end{array} \right); \quad \left( \begin{array}{l} \lambda_1 = \frac{1}{T_{m1}}(K_3 \ln(K_4 a_1)) \\ \lambda_2 = \frac{1}{T_{m2}}(K_3 \ln(K_4 a_2)) \end{array} \right), \quad (3.17)$$

где  $T_{ni}, T_{mi}, a_i, \lambda_i$  – значения температур и коэффициентов для  $i$ -го материала,  $i = 1, 2$ .

**РЕШАЯ ЧЕТЫРЕ УРАВНЕНИЯ (3.17), НАХОДИМ ПАРАМЕТРЫ:**

$$K_2 = \frac{\ln \frac{a_2}{a_1}}{\frac{T_{n2}}{T_{m2}} - \frac{T_{n1}}{T_{m1}}}; \quad K_1 = \frac{a_1}{\exp\left(K_2 \frac{T_{n1}}{T_{m1}}\right)}; \quad (3.18)$$

$$K_4 = \exp\left[\frac{\ln a_1 - \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \frac{T_{m1}}{T_{m2}} \ln a_2}{\frac{\lambda_1}{\lambda_2} \frac{T_{m1}}{T_{m2}} - 1}\right]; \quad K_3 = \frac{\lambda_1 T_{m1}}{\ln(K_4 a_1)}. \quad (3.19)$$

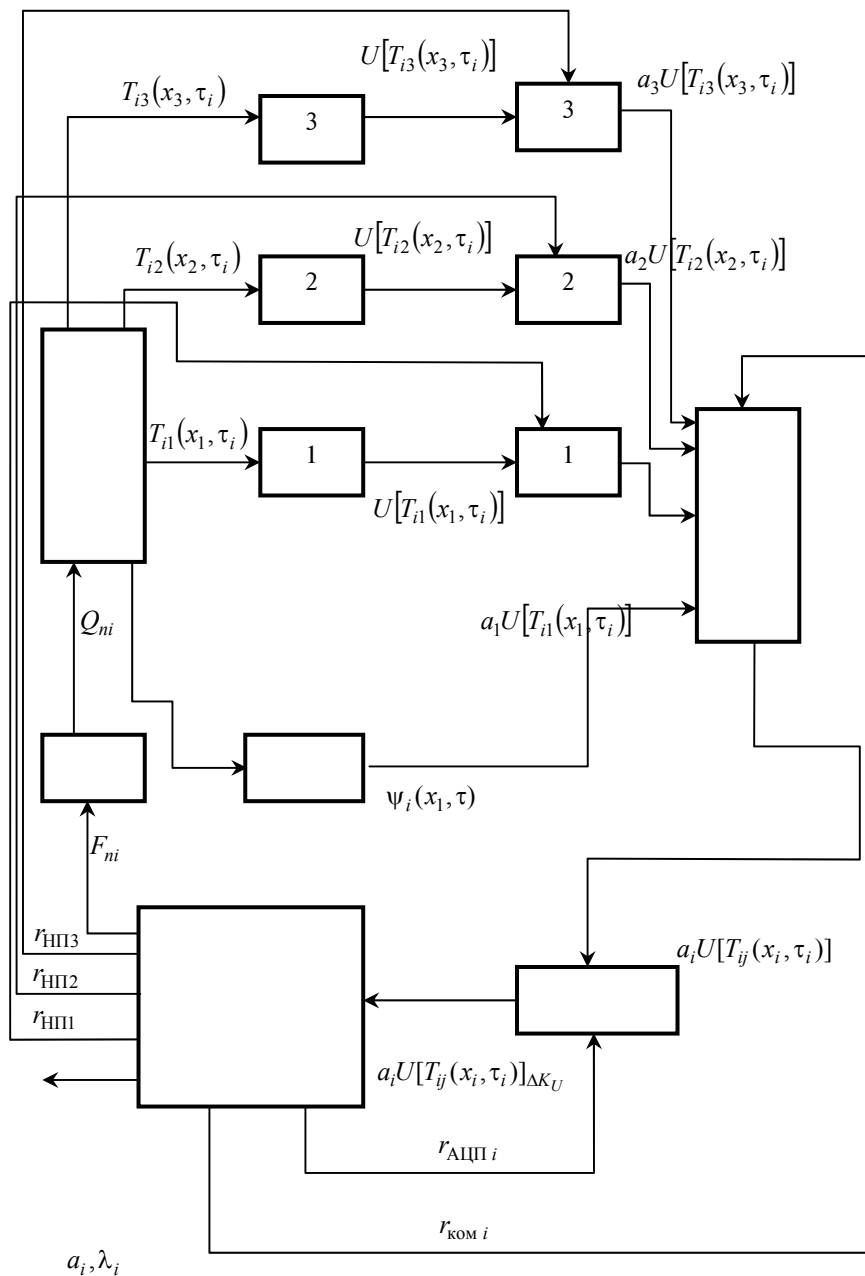
Параметры  $K_1, K_2, K_3$  и  $K_4$  заносятся в память микропроцессора и используются при дальнейших измерениях.

Для контроля температуры в контактной плоскости термозонда расположены термобатарей с размещением термодатчиков по всей контролируемой поверхности подложки, что позволяет получить среднеинтегральное значение температурного поля.

Получение и дальнейшее использование среднеинтегрального значения температурного поля как подложки, так и вспомогательного образца, способствует повышению метрологического уровня теплофизических измерений, так как при этом уменьшается одна из основных составляющих общей погрешности измерительного средства – влияние шероховатости поверхности исследуемого объекта. Действительно, при помещении измерительного зонда на исследуемый объект возможно попадание термодатчиков зонда в воздушные раковины, на неровности поверхности и т.д., поэтому контроль температуры одним термодатчиком неизбежно приведет к росту общей погрешности измерений. Отсюда следует, что необходим контроль величины шероховатости поверхности исследуемых материалов и изделий и введение коррекции результатов измерения ТФСМ при отклонении величины шероховатости поверхности от заданной. Способ определения шероховатости поверхности изложен в работе [13].

Для вышеизложенных алгоритма измерения и предлагаемого метода составлена структурная схема измерительной цепи, которая представлена на рис. 3.10. Данная схема позволяет осуществить теплофизическое измерение в соответствии с реализуемым в МС частотно-импульсным методом и определить искомые ТФСМ.

На рис. 3.10 составляющие блоки измерительной цепи обозначены следующим образом: ИО – исследуемый объект, ИИТ – импульсный источник тепла, осуществляющий тепловое воздействие на объект исследования; ДТ1 – датчик контроля температуры в плоскости нагревателя подложки термозонда; ДТ2, ДТ3 – датчики контроля температуры соответственно в плоскостях 1 и 2 подложки термозонда; УКШ – устройство для контроля шероховатости исследуемого объекта; НП1, НП2, НП3 – нормирующие преобразователи сигналов соответственно с ДТ1, ДТ2, ДТ3, выполняющие также функции усиления; АК – адаптивный коммутатор, предназначенный для адресной коммутации входных источников сигнала



**Рис. 3.10 Структурная схема измерительной цепи, реализующей разработанный метод измерения ТФСМ**

с адаптацией по частоте опроса каналов информации;  $a_1, a_2, a_3$  – характеристики преобразования (усиления) НП1, НП2, НП3; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; МП – микропроцессор, который осуществляет функции определения ТФСМ и изделий, а также управление теплофизическими измерениями с адаптацией по температуре, влажности, шероховатости и контактному термосопротивлению исследуемого объекта;  $Q_{ni}$  – количество воздействующих тепловых импульсов;  $F_{ni}$  – управляющие частотные сигналы;  $Q_{НП i}$  – идентификаторы управляющих команд, поступающих с МП на нормирующие преобразователи.

Формализованное описание измерительных процедур осуществляется с помощью уравнений измерений, изложенных в работе [14].

Уравнения измерений для определения ТФСМ исследуемых материалов и изделий в соответствии с формулами (3.16) имеют следующий вид:

$$a_i^* = \langle K_1 \langle \exp(K_2 \frac{\langle T_n^* \rangle_{q_{1i}}}{\langle T_m^* \rangle_{q_{2i}}}) q_{3i} \rangle q_{4i} \rangle q_{5i} ; \quad (3.20)$$

$$\lambda_i^* = \langle \frac{1}{\langle T_m^* \rangle_{q_{1i}}} \langle K_3 \langle \ln(K_4 \langle a \rangle_{q_{2i}}) \rangle q_{3i} \rangle q_{4i} \rangle q_{5i} \rangle q_{6i} . \quad (3.21)$$

Уравнения (3.20) и (3.21) описывают процедуры косвенных измерений, в которых используются следующие результаты прямых измерений температуры  $T(x, \tau)$

$$T_i^*(x, \tau) = \langle T^H (\langle \langle [bU(T_i(x, \tau))]_{\Delta_k U}^h \rangle_{q_{1i}} \langle \langle m_T \rangle_{q_{2i}} \rangle_{q_{3i}}) \rangle q_{4i} ,$$

где  $U(T)$  – статическая характеристика первичного измерительного преобразователя;  $\langle \cdot \rangle$  – числовой результат измерительного преобразования в цифровой форме;  $q_{1i}, q_{2i}, \dots, q_{ni}$  – характеристики округления, зависящие от разрядности микропроцессора;  $T^H(U)$  – градуировочная характеристика ПИП;  $m_T$  – коэффициент масштабирования,  $m_T = \frac{\Delta_k T}{T' b_i}$ ;  $\Delta_k T$  – интервал квантования;  $T'$  – принятая единица измерения;  $b$  – коэффициент нормализации с номинальным значением  $b_i$ .

Рассмотренный частотно-импульсный метод и реализующая его измерительная цепь позволяют осуществить предложенный метод, повышающий производительность неразрушающего контроля теплофизических свойств твердых материалов и изделий из них.

### 3.1.3 ТЕРМОЗОНД, ОСУЩЕСТВЛЯЮЩИЙ МЕТОД НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ

Известные методы и измерительно-вычислительные системы для измерения ТФС материалов используют информацию о температурном поле в исследуемых объектах, поступающую с термозонда, который является одним из основных устройств измерительной системы. Вследствие этого, конструкция термозонда соответствует установленным техническим требованиям [15], выполнение которых позволяет получить достоверную информацию об объектах исследования и контроля.

Сложность получения достоверной информации о ТФС исследуемых материалов и изделий из них связана с тем, что на результаты измерения оказывают влияние как воздействие внешних факторов, так и несовершенство конструкций применяемых термозондов.

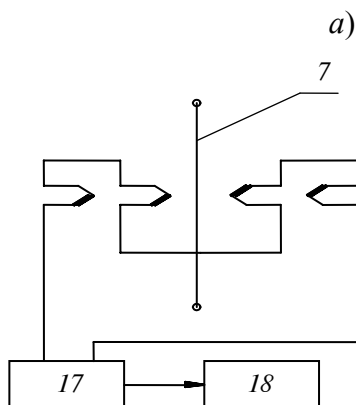
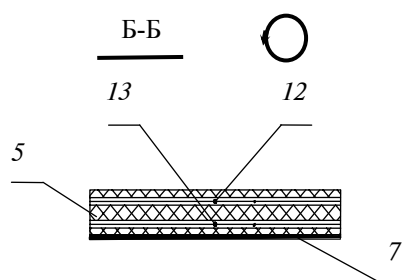
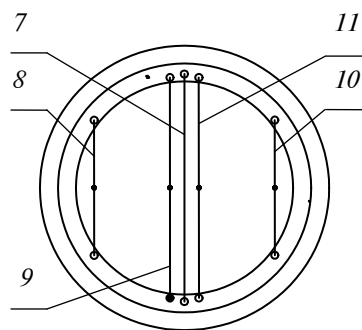
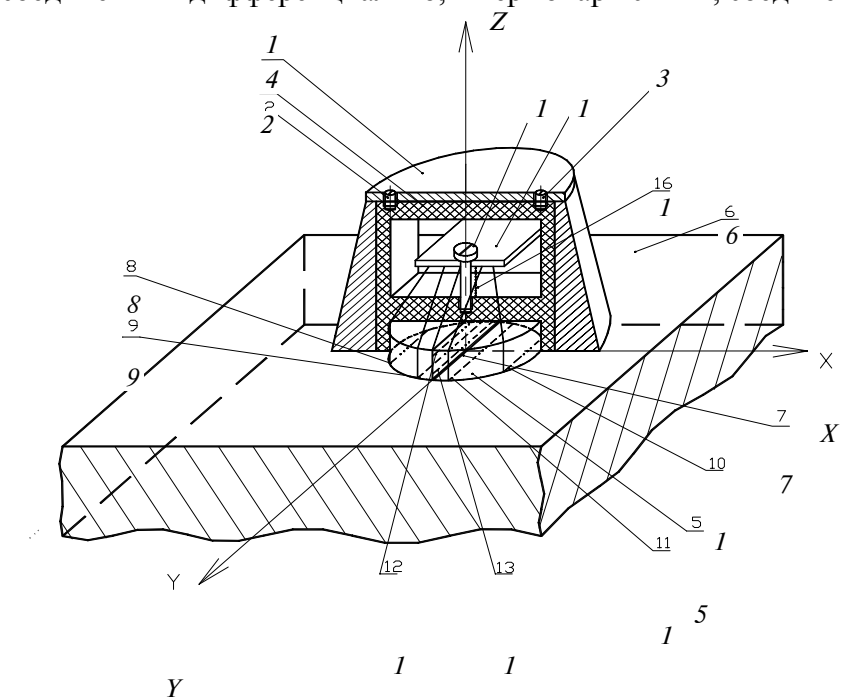
К основным недостаткам известных конструкций термозондов можно отнести наличие неучтенных тепловых потерь в зоне измерения, обусловленных отводом тепла по электродам термопар, отсутствие постоянного усилия прижатия измерительного термозонда к исследуемому материалу, в результате чего возрастает случайная составляющая общей погрешности результатов измерения от контактного термосопротивления, которое меняется от эксперимента к эксперименту. Кроме того, к недостаткам также относится низкая производительность измерений, обусловленная необходимостью охлаждения термозонда после каждого эксперимента до температуры окружающей среды, так как именно это условие является необходимым для получения достоверных результатов в определении искомых ТФС. Остаточное



тепло от предыдущего эксперимента, аккумулированное в подложке термозонда, вносит также дополнительную погрешность в результат измерения.

Предлагается конструкция термозонда, позволяющая устранить вышеперечисленные недостатки, т.е. повысить оперативность и точность определения ТФС материалов и изделий [15].

На рис. 3.11 изображен термозонд, который содержит цилиндрический корпус 1, конусообразно расширяющийся к основанию корпуса для обеспечения большей устойчивости термозонда. К корпусу 1 винтами 2 и 3 крепится измерительная головка 4 с теплоизоляционной подложкой 5. На поверхности теплоизоляционной подложки, контактирующей с исследуемым объектом 6, имеется канавка, в которой помещен электронагреватель 7, изготовленный из провода с высоким электрическим сопротивлением (нихром). Кроме того, на подложке 5 размещена основная термобатарея, состоящая из термопар 8 и 9, соединенных дифференциально, и термопар 10 и 11, соединенных также дифференциально.



**Рис. 3.11** Термозонд для адаптивной МС

в)

На рис. 3.11, а показано размещение нагревателя и основной термобатарей на поверхности теплоизоляционной подложки. Термопары 8 и 9, 10 и 11, расположены в канавках термоизолятора симметрично относительно линии нагревателя. Основная термобатарея предназначена для получения информации о температурно-временных изменениях в плоскости контакта измерительной головки термозонда с исследуемым объектом.

На рис. 3.11, б показано размещение вспомогательной дифференциальной термобатарей на нормали к линии нагревателя в плоскости  $ZOY$ , проходящей через линию нагревателя и перпендикулярной контактной плоскости измерительной головки. В плоскости  $ZOY$  дополнительно помещают на нормали к линии нагревателя вспомогательную дифференциальную термопару, состоящую из термопар 12 и 13. Термопары 12 и 13 помещают на нормали внутри подложки на заданных расстояниях (например, 0,5...1 мм) соответственно от контактной и противоположной ей поверхности подложки. Вспомогательные термобатарея и дифференциальная термопара служат для контроля температурных перепадов внутри подложки измерительной головки термозонда перед началом проведения очередного измерения, так как температура подложки изменяется при неоднократном тепловом воздействии нагревателя на подложку в процессе измерений.

Термопары основной термобатарей и вспомогательных термобатарей и дифференциальной термопары расположены на расстоянии, определяемом с учетом теплофизических свойств материала подложки измерительной головки термозонда, геометрических размеров подложки.

Холодные спаи всех термопар и выводы нагревателя припаиваются к разъему 14, который с помощью винта 15 крепится к измерительной головке. На винт 15 помещена пружина 16, которая обеспечивает постоянное натяжение термопар и нагревателя на контактной поверхности измерительной головки.

На рис. 3.11, в представлено соединение термопар в основной и вспомогательной термобатареях.

Принцип действия термозонда заключается в следующем. Перед проведением очередного теплофизического измерения термозонд помещается на вспомогательный образец из теплоизоляционного материала, по своим свойствам близкого к материалу, из которого изготовлена подложка термозонда. Температура подложки термозонда изменяется в результате воздействия температуры окружающей среды и аккумулированного тепла в измерительной головке термозонда при неоднократном тепловом воздействии нагревателя термозонда, поэтому с помощью МС осуществляется контроль перепадов температур  $\Delta T_1$  и  $\Delta T_2$  соответственно в  $XOY$  и  $ZOY$  плоскостях подложки измерительной головки термозонда основной термобатарей и дифференциальной термопарой. При помощи коммутирующего устройства 17 поочередно информационные сигналы о перепадах температур в подложке термозонда  $\Delta T_1$  и  $\Delta T_2$  поступают в МС 18, где программными средствами по заданному алгоритму выполняется выполнение условий  $\Delta T_1 < \varepsilon$ ,  $\Delta T_2 < \varepsilon$ , где  $\varepsilon$  – заданная величина, определяющая момент уравнивания температурных перепадов термозонда. Как показывает практика, значение  $\varepsilon$  целесообразно задавать в диапазоне от 0,1 до 0,3 °С, так как при таких значениях  $\varepsilon$  ТФС исследуемых материалов определяется с допустимой для практики погрешностью.

В традиционных методах определение ТФС осуществляется при длительном термостатировании образца, так как теплообмен происходит только через одну грань подложки термозонда. В предложенном методе при помещении термозонда на вспомогательный образец перераспределение (уравнивание) тепла внутри подложки произойдет быстрее, чем охлаждение до температуры окружающей среды только через одну контактную поверхность термозонда. В среднем процесс термостатирования в системе термозонд – исследуемый материал занимает 10 – 30 мин, а в предлагаемом термостабилизации в подложке наступает в течение 2 – 3 мин. Следовательно, производительность проведения измерения возрастает

в

5

–

10 раз. Кроме того, определяемая усредненная температура  $\Delta T_{\text{ср}}$  подложки термозонда хранится в оперативном запоминающем устройстве (ОЗУ) МС для последующего использования в коррекции математической модели тепловых процессов в системе «Термозонд – исследуемый образец».

При выполнении условий  $\Delta T_1 < \varepsilon$ ,  $\Delta T_2 < \varepsilon$  в МС осуществляется индикация сигнала готовности термозонда к проведению теплофизического измерения, т.е. фиксируется момент термостабилизации в подложке термозонда. Для проведения измерения термозонд помещается на исследуемый материал.

При этом в ОЗУ МС поступает информация о температуре в области контакта термозонда и исследуемого материала.

Если  $\Delta T_{cp} < \Delta T_0$ , то результирующая термоЭДС с основной термобатареи суммируется с поправкой  $\varepsilon_1 = \Delta T_{cp} - \Delta T_0$ , если же  $\Delta T_{cp} > \Delta T_0$ , то поправка  $\varepsilon_1$  вычитается из результирующей термоЭДС, где  $\Delta T_{cp}$  – средняя избыточная температура в области измерения перед проведением очередного измерения,  $\Delta T_0$  – температура в области измерения при нормальных условиях окружающей среды.

Для проведения теплофизического измерения с помощью аппаратных и программных средств МС на нагреватель термозонда поступают импульсы постоянной мощности, осуществляющие нагрев исследуемого объекта. При этом с основной термобатареи термозонда производится съем информации о избыточной температуре в области измерения и передача этой информации в ОЗУ МС через коммутирующее устройство. После окончания процесса нагрева, выполняется расчет по известным соотношениям искомым теплофизическим характеристикам исследуемого объекта на основе полученной информации о температурно-временных изменениях в области измерения. При этом осуществляется коррекция результатов измерения по вышеприведенной методике при изменении температуры окружающей среды. Введение адаптивной коррекции позволяет получать достоверную информацию с термозонда о температуре в области измерения независимо от воздействия температуры окружающей среды, так как при этом учитывается поправка  $T_0$  как в подложке термозонда, так и в области измерения.

Независимость показаний термодатчиков в подложке термозонда при воздействии температуры окружающей среды обеспечивается с помощью известного метода компенсации холодных спаев термопар [16], при котором холодные спаи термопар в процессе измерения должны находиться при одной температуре. В данном случае холодные спаи основной термобатареи и вспомогательных термобатареи и дифференциальной термопары размещены на одном разъеме 14.

Рассмотренный выше термозонд позволяет уменьшить инструментальную погрешность определения ТФСМ за счет определения среднеинтегрального значения температуры в области измерения и в подложке термозонда, введения поправок на контактное термосопротивление, термокомпенсации влияния температуры окружающей среды на результаты измерений, а также за счет уменьшения оттока тепла от зоны измерения температуры по электродам термочувствительных элементов.

Кроме того, дифференциальное соединение основной термобатареи исключает влияние теплообменного процесса между термозондом и объектом на выходную измерительную информацию с основной дифференциальной термобатареи, т.е. рабочие дифференциальные термобатареи фиксируют и выдают информацию только о температурно-временных изменениях (температурном поле) от действия линейного импульсного источника тепла. Таким образом, на полученную измерительную информацию в следующих экспериментах не оказывает влияния остаточное, аккумулированное в подложке зонда тепло, от предыдущего измерения, т.е. полученная измерительная информация позволяет определить ТФС следующего исследуемого объекта без влияния на результат измерения предыдущих экспериментов.

Экспериментальная проверка показала работоспособность предложенной конструкции термозонда. Инструментальная погрешность этого зонда по сравнению с известными конструкциями уменьшилась в среднем на 5 – 7 %.

Таким образом, создан термозонд, реализующий предлагаемый метод НК ТФСМ, который по конструкторско-технологическим и метрологическим параметрам отвечает требованиям, предъявляемым к устройствам данного назначения и применение которого позволяет повысить точность результатов контроля ТФСМ за счет исключения влияния на измерительную информацию аккумулированного в подложке термозонда тепла от предыдущего измерения.

### 3.2 СТРУКТУРА И ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ АДАПТИВНОЙ МИКРОПРОЦЕССОРНОЙ СИСТЕМЫ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ

Разработка адаптивной измерительно-вычислительной системы осуществляется на основе анализа алгоритма и структуры измерительной цепи НК ТФСМ, адаптивных стратегий, анализе дестабилизирующих факторов, воздействующих на МС. При этом необходимо в соответствии с алгоритмом измерения ТФСМ обеспечить заданное тепловое воздействие на объект исследования, реализовать идентифицирующую, корректирующую и контролируемую адаптивные стратегии для повышения метрологического уровня результатов измерения. Измерительные цепи МС формируют измерительную информа-

цию в частотно-импульсной или число-импульсной форме для последующего преобразования в цифровую форму, которая обеспечивает высокую помехоустойчивость при передаче сигналов, стабильность обработки параметров (независимость от времени и влияния изменений в окружающей среде).

Кроме того, для стабильной работы МС следует учитывать внутренние и внешние помехи, воздействующие на основные блоки МС.

При разработке МС, реализующей разработанный метод НК ТФСМ, необходимо обеспечить высокое быстродействие и синхронизацию работы всех устройств МС, так как алгоритм метода включает идентификацию параметров исследуемого объекта при воздействии дестабилизирующих факторов, причем дополнительно используется устройство для контроля шероховатости поверхности исследуемого объекта.

В данной главе представлено описание разработанной МС с параметрической адаптацией по энергетическим и режимным параметрам, в соответствии с классами и диапазонами исследуемых объектов, а также с коррекцией результатов измерения при воздействии доминирующих дестабилизирующих факторов при проведении теплофизических измерений в полевых условиях и условиях производства [17].

### 3.2.1 АНАЛИЗ ДЕСТАБИЛИЗИРУЮЩИХ ФАКТОРОВ, ВОЗДЕЙСТВУЮЩИХ НА ИЗМЕРИТЕЛЬНО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

Анализ дестабилизирующих факторов, воздействующих на МС, проводится в результате выявления воздействующих факторов, оказывающих влияние на работоспособность отдельных структурных блоков МС. На основе анализа дестабилизирующих факторов определяются методы уменьшения составляющих общей погрешности основных блоков МС [18].

Микропроцессорная система включает следующие основные блоки: термозонд (Т), служащий для реализации применяемого метода определения ТФС и содержащий первичный измерительный преобразователь (ПИП), аналого-цифровой преобразователь (АЦП), преобразующий аналоговый сигнал в цифровой, и микропроцессор (МП), выполняющий функции управления теплофизическим экспериментом и расчета ТФС.

Основными дестабилизирующими факторами, воздействующими на термозонд, являются изменение температуры, давления и влажности окружающей среды, контактного термосопротивления в области измерения (области контакта термозонда и исследуемого объекта), теплоемкости нагревателя, теплоотдачи в области измерения, изменение расположения элементов термоприемника в термозонде, влияние шероховатости поверхности объекта, а также воздействующие помехи на измерительный преобразователь.

Помехой считается любой электрический сигнал в цепях ПИП, отличный от полезного [19]. Помеха включает в себя внутренние источники шумов, возникающие от термоэффекта и гальванического взаимодействия в местах соединений участков цепи, от теплового шума в различных элементах цепи, от собственных шумов в источниках полезных сигналов. На работающую МС действуют также излучения от внешних источников. Указанные выше помехи создают электрические и магнитные поля, которые из-за наличия индуктивных, емкостных и резистивных связей способствуют возникновению на различных участках преобразования полезного сигнала паразитной разности потенциалов и протеканию токов по элементам измерительных и информационных цепей.

Воздействующие помехи на ПИП можно устранить с помощью инструментальных и алгоритмических методов. Инструментальными методами являются: экранирование, заземление, изоляция, регулировка значения полного сопротивления схемы, выбор кабеля и др. К алгоритмическим методам относятся: линейная и нелинейная фильтрация; отбраковка аномальных измерений и др.

Дестабилизирующим фактором, воздействующим на термозонд, является влияние теплоемкости нагревателя на результаты измерения. Тепловой импульс создается линейным источником, в качестве которого используется натянутая проволока, импульсно разогреваемая электрическим током [19].

Для оценки влияния теплоемкости нагревателя можно использовать условие

$$q_n / q_d < \delta_n,$$

где  $\delta_n$  – погрешность нагревателя, при которой можно пренебречь влиянием теплоемкости нагревателя,  $q_n = (C_n/l)t(0, \tau)$  – теплота, поглощенная нагревателем единичной длины, Дж/м;  $q_d$  – количество теплоты, выделившееся в течение импульса на участке источника единичной длины.

При контроле температуры в области измерения термодатчик может также нарушать первоначальное распределение температур в контролируемом объекте [16]. Вследствие этого при неблагоприятных условиях измерения может иметь место методическая погрешность измерения температуры и температура чувствительного элемента термодатчика будет отличаться от действительной температуры поверхности тела.

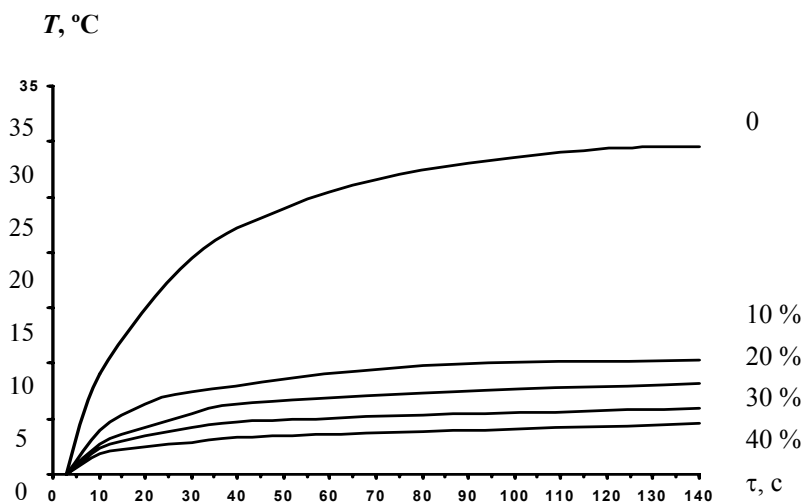
Для уменьшения погрешности за счет теплоотвода до минимума термоэлектрический термометр рекомендуется устанавливать на поверхности тела по всей длине соприкосновения термоэлектродов с поверхностью, вследствие чего теплоотвод от рабочего конца термоэлектрического термометра значительно уменьшается.

К дестабилизирующим факторам, воздействующим на термозонд относятся также контактные термические сопротивления, которые влияют на формирование температурного поля в области измерения и определения ТФСМ [20]. Исследуемый объект отделен от среды, в которой проходят теплофизические измерения, некоторым пограничным слоем, представляющим собой определенное термическое сопротивление, ухудшающее условия теплообмена. Контактные термические сопротивления имеют место также при соприкосновении тел с одинаковыми или различными свойствами. Точность определения теплофизических характеристик во многом определяется отношением термического сопротивления исследуемого объекта к контактному термическому сопротивлению. Чем выше это отношение, тем точнее при прочих равных условиях будут определены ТФСМ. При одних и тех же размерах тел и условиях контакта с окружающей средой это отношение всегда больше для материалов с низкой теплопроводностью, чем для материалов с большой теплопроводностью, например, для металлов.

Метод уменьшения контактного термического сопротивления заключается в тщательной обработке соприкасающихся поверхностей в области измерения (термозонда и исследуемого объекта) и замене газовой прослойки между ними более проводящим веществом.

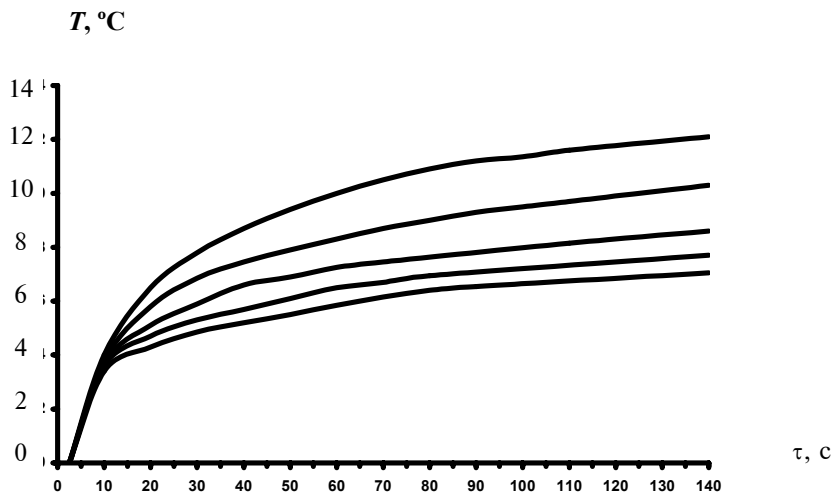
Влияние влажности окружающей среды является одним из важных дестабилизирующих факторов, воздействующих на термозонд при теплофизических измерениях. Поэтому необходимо определять теплофизические свойства одновременно с влажностью в процессе изготовления изделия и на основе полученных результатов прогнозировать свойства готовой продукции [21].

Проведены теплофизические эксперименты на различных материалах: рипоре, дереве, минвате, войлоке. На рис. 3.12 представлены термограммы нагрева минваты при изменении ее влажности от 0 до 40 %; на рис. 3.13 показаны термограммы дерева при изменении его влажности от 0 до 40 %; на рис. 3.14 изображены термограммы войлока при изменении влажности от 0 до 40 %; на рис. 3.15 представлены термограммы рипора при изменении его влажности от 0 до 40 %; на рис. 3.16 отобрана зависимость теплопроводности вышеперечисленных материалов от влажности.



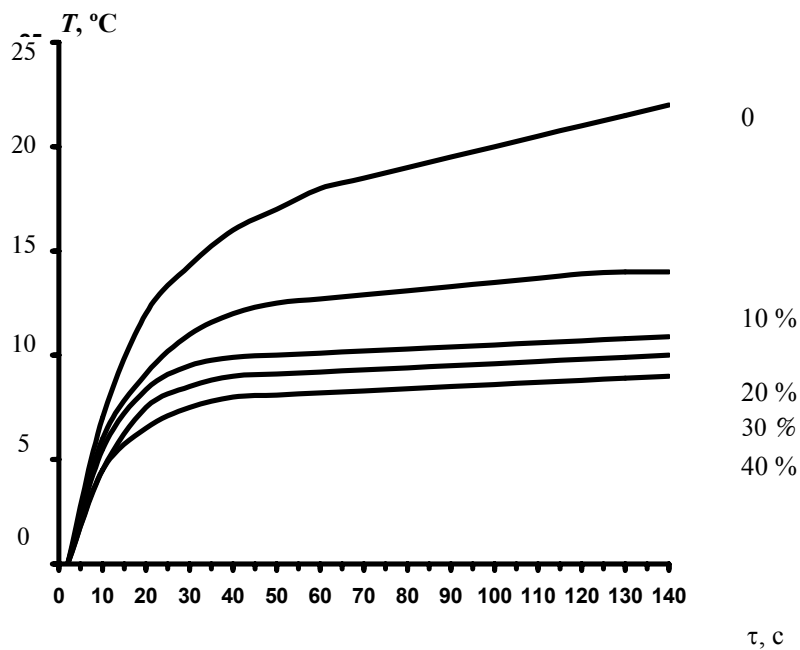
0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100 110 120 130

**Рис. 3.12** Термограммы нагрева минваты при изменении влажности от 0 до 40 %



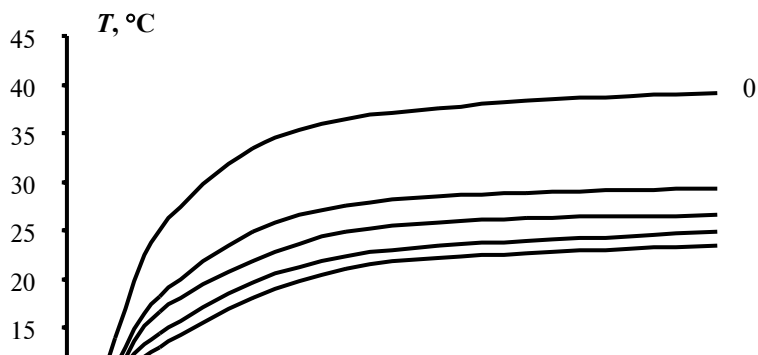
0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100 110 120 130

**Рис. 3.13** Термограммы нагрева дерева при изменении влажности от 0 до 40 %

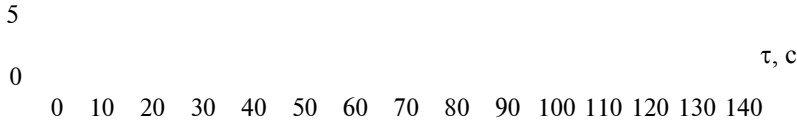


0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100 110 120 130

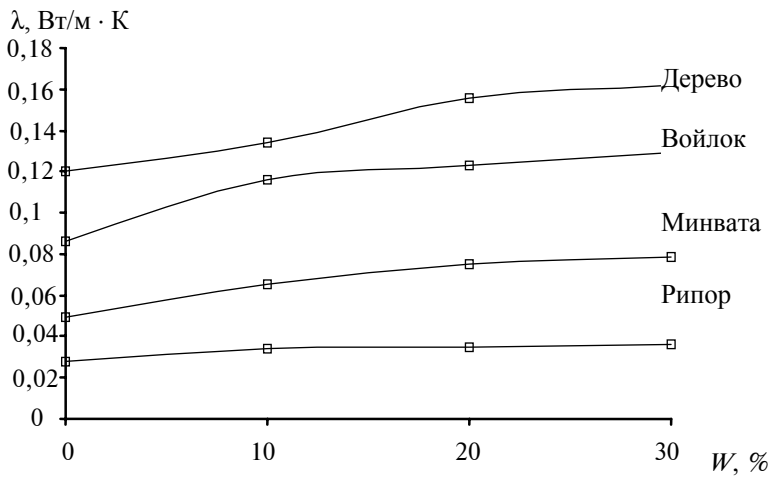
**Рис. 3.14** Термограммы нагрева войлока при изменении влажности от 0 до 40 %



10 %  
20 %  
30 %  
40 %



**Рис. 3.15 Термограммы нагрева рипора при изменении влажности от 0 до 40 %**

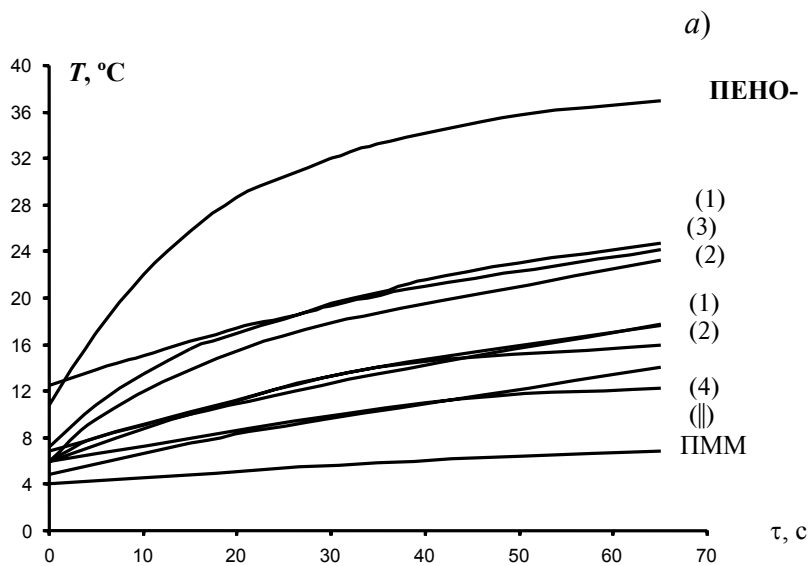


**Рис. 3.16 Зависимость теплопроводности материалов от влажности**

Для установления влажности исследуемых материалов и изделий в первую очередь определяются ТФСМ, а затем используется зависимость теплопроводности материалов от их влажности [22]. Из нестационарного дифференциального уравнения теплопереноса для влажного тела [23] следует, что скорость изменения температуры  $dT/dt$  зависит от влажности. Для определения зависимости  $dT/dt$  были проведены эксперименты по измерению температуры поверхности во времени на теплоизоляционных материалах: рипоре, войлоке, асбесте, картоне. При этом поверхность исследуемого материала подвергалась адиабатическому воздействию теплового источника. Для указанных материалов скорость изменения температуры поверхности существенно меняется только в начальный период времени – до 1 мин. Таким образом, необходимое время для определения влажности составляет 1 мин, что свидетельствует о достаточном быстродействии вышеизложенного способа.

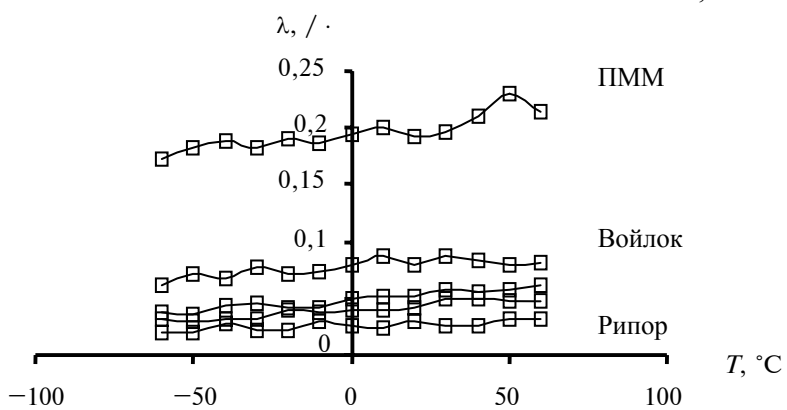
Важное значение имеет определение ТФСМ при воздействии на термозонд изменения температуры окружающей среды [24]. Как показывают теплофизические эксперименты, проведенные при воздействии на термозонд низких и высоких температур, теплопроводность исследуемых материалов при увеличении температуры уменьшается, а при уменьшении температуры – увеличивается. На рис. 3.17, а, б приведены термограммы определения ТФСМ исследуемых материалах при 20 и 50 °С, а на рис. 3.18 представлена зависимость теплопроводности исследуемых материалов от воздействия температур от –60 до +60 °С.





б)

Рис. 3.17 Термограммы нагрева материалов при:  
*a* – +20 °С; *б* – +50 °С





**Рис. 3.18 Зависимость теплопроводности исследуемых материалов от температуры**

Независимость показаний термодатчиков в измерительной головке термозонда обеспечивается с помощью известного метода компенсации холодных спаев термопар [16], при котором холодные спаи термопар в процессе теплофизического измерения должны находиться при одинаковой температуре. В данном термозонде холодные спаи термодатчиков размещены на одном разъеме термозонда.

Методом уменьшения составляющей общей погрешности результатов измерения при воздействии температуры окружающей среды является адаптивная коррекция результатов измерения на основе анализа экспериментальных термограмм, снятых при низких и высоких температурах окружающей среды. Адаптивная коррекция осуществляется аппаратными и программными средствами [25].

При аппаратной реализации адаптивной коррекции в измерительную цепь микропроцессора включается дифференциальный усилитель, на один из входов которого поступает информационный сигнал с термозонда, а на второй – сигнал с термодатчика, регистрирующего температуру окружающей среды.

В результате на выходе дифференциального усилителя формируется разностный сигнал, пропорциональный избыточной температуре в области измерения. Программные средства микропроцессора позволяют выполнять адаптивную алгоритмическую коррекцию результатов измерения ТФСМ [24].

Дестабилизирующими факторами, воздействующими на АЦП, измерительные цепи МС, являются помехи, которые классифицируются по их форме, источникам происхождения, по механизму проникновения в электрическую схему и многим другим признакам.

По форме помехи любого происхождения разделяются [26] на импульсные, флуктуационные и регулярные. Импульсные помехи – это случайно появляющиеся импульсы произвольной формы.

Флуктуационные помехи – непрерывный случайный процесс, распределение вероятностей которого близко к нормальному.

Регулярные помехи наиболее часто проявляются в виде наведенных помех с частотой сети и ее гармоник.

При классификации помех по источникам их делят на внутренние и внешние. Внутренние помехи (шумы) возникают в самом устройстве за счет флуктуаций тока в резисторах, полупроводниковых приборах и т.д.

Внешние помехи разделяют на промышленные (индустриальные) и атмосферные. Индустриальные помехи создаются разнообразными электрическими установками.

Атмосферные помехи обусловлены в основном молниевыми разрядами и электризацией частиц, находящихся в атмосфере.

По источникам и механизму проникновения в измерительную цепь, воздействующие на измерительные цепи помехи, разделяются следующим образом [27]:

- кондуктивные помехи – сигналы на входе устройства, обусловленные изменениями утечек в системе (ухудшением изоляции);

- **ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ НАВОДКИ (ЕМКОСТНЫЕ НАВОДКИ) ПОЯВЛЯЮТСЯ НА ВХОДЕ УСТРОЙСТВА ВСЛЕДСТВИЕ НЕИЗБЕЖНОЙ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ЕМКОСТИ МЕЖДУ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ЦЕПЬЮ И ОКРУЖАЮЩИМИ ТЕЛАМИ. ЕМКОСТНЫЕ НАВОДКИ ЧАСТО ПРИВОДЯТ К УВЕЛИЧЕНИЮ ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ И ПРИ РАЗРАБОТКЕ МС ВВЕДЕНО ЭКРАНИРОВАНИЕ ЛИНИЙ СВЯЗИ И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ;**

- электромагнитные наводки появляются в измерительных цепях благодаря наличию электромагнитных связей этих цепей с различными токовыми цепями. Методом борьбы с такими наводками являются скручивание линий связи и электромагнитное экранирование [28];

- перекрестные помехи возникают из-за близкого расположения измерительных цепей с разными уровнями сигнала, паразитных связей через коммутатор или общий источник питания и др. Для устранения перекрестных помех в цифровых блоках и устройствах используются: микроэлектронные элемен-

ты с повышенной помехоустойчивостью; специальные помехозащищенные линии связи; специальные конструкции и рациональный монтаж;

- помехи постоянного тока – паразитные термоЭДС. Эти помехи возникают, в основном в термоэлектрических цепях;
- помехи, вызванные наличием заземленных контуров;
- помехи, связанные с электропитанием. Существуют помехи по первичной питающей сети. Поэтому на вводе питания МС вводится сетевой фильтр с целью подавления кратковременных помех.

Необходимо также осуществлять подавление помех по цепям вторичного электропитания.

На результаты измерения ТФСМ оказывает влияние погрешность, вносимая АЦП. Обычно полагают, что погрешность результата аналого-цифрового преобразования равна сумме погрешности, обусловленной аналоговым преобразованием, и погрешности квантования полученного результата. Указанные погрешности можно устранить, применяя адаптивные измерительные процедуры. Разработаны итеративные адаптивные алгоритмы [20], например, выполненные на основе включения в измерительную цепь обратной связи с использованием цифро-аналогового преобразования или же на основе наличия сходимости результата усреднения к истинному значению измеряемой величины.

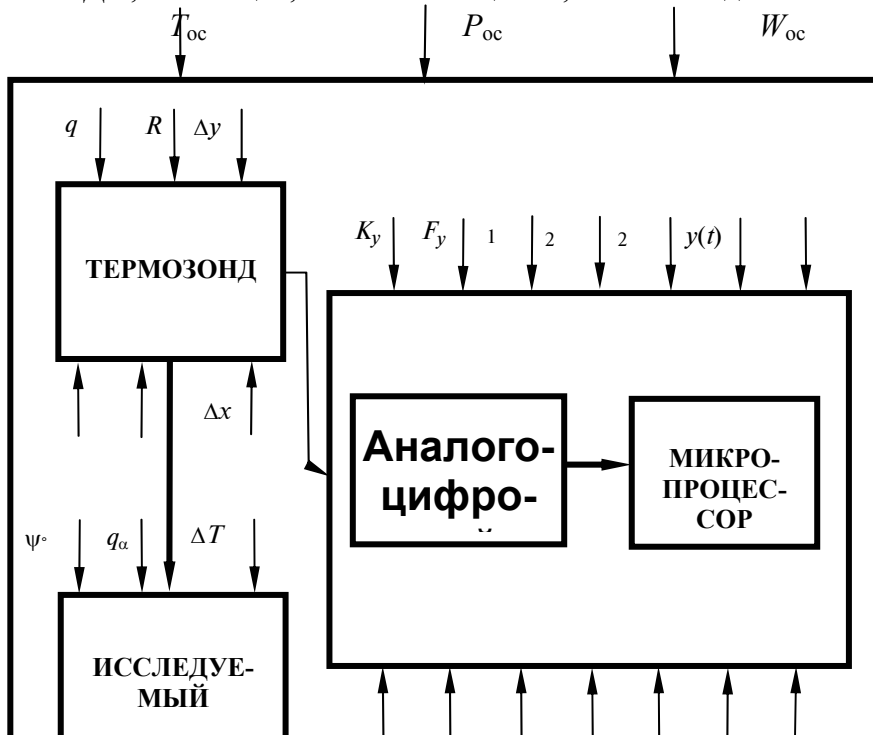
При анализе дестабилизирующих факторов, воздействующих на МС, работающих в масштабе реального времени в цехах предприятий, необходимо учитывать следующие воздействующие факторы: механические (удары, вибрации, ускорения); климатические (температура, влажность, давление окружающей среды); внешние и внутренние помехи (шумы от разводки питания, излучение электрического и магнитного полей) [29 – 31].

Устойчивость к механическим воздействиям обеспечивается в МС уменьшением габаритных размеров и массы, подбором конструктивных материалов, элементов, наиболее устойчивых к механическим воздействиям; увеличением собственных резонансных частот элементов конструкции путем введения дополнительных конструктивных элементов, увеличивающих жесткость; выбором способа крепления радиоэлектронных изделий.

Жесткий тепловой режим в конструкции из-за широкого изменения температуры окружающей среды, высокой плотности компоновки и, как следствие, из-за высоких мощностей рассеивания требует принятия специальных мер: использование радиоэлектронных изделий, рассчитанных на работу в широком температурном диапазоне; применения теплоотводящих и теплопроводящих конструктивных элементов, обеспечивающих малое тепловое сопротивление для всех участков передачи теплоты.

Необходимая помехозащищенность достигается тщательной проработкой трассировки печатных плат, выбором конструкции цепей питания, экранированием элементов и линий связи, введением информационной избыточности при передаче и хранении цифровой информации.

Анализ воздействующих ДФ на исследуемый объект, термозонд, АЦП и МП, позволяет разработать модель МС, отражающую воздействующие ДФ. На рис. 3.19 представлена модель МС, на которой показаны ДФ, влияющие, как на МС в целом, так и на отдельные ее блоки.



### Рис. 3.19 Модель МС, отражающая воздействующие дестабилизирующие факторы

На рис. 3.19 введены следующие обозначения ДФ:  $T_{oc}$  – температура окружающей среды;  $P_{oc}$  – давление окружающей среды;  $W_{oc}$  – влажность окружающей среды;  $C_n$  – теплоемкость нагревателя термозонда;  $\psi_0$  – шероховатость поверхности исследуемого объекта;  $\Delta x_T$  – изменение расположения элементов термодатчика;  $q_\alpha$  – количество тепла, рассеиваемое с поверхности объекта за время теплофизического эксперимента;  $q_n$  – количество тепла, поглощаемое подложкой термозонда;  $\Delta T_T$  – изменение температуры объекта при помещении на него термодатчиков термозонда;  $R_T$  – контактное термическое сопротивление в области измерения;  $\Delta y$  – погрешность преобразования ПИП;  $K_y$  – импульсные помехи, воздействующие на МС;  $F_y$  – флуктуационные помехи, воздействующие на МС;  $y(t)$  – регулярные помехи, воздействующие на МС;  $\Pi_1$  – внутренние помехи, возникающие в МС за счет флуктуаций тока в резисторах, полупроводниковых приборах и т.д.;  $\Pi_{2и}$  – внешние промышленные помехи, создаваемые разнообразными электрическими установками;  $\Pi_{2а}$  – внешние атмосферные помехи, обусловленные в основном разрядами молний;  $\Pi_k$  – кондуктивные помехи;  $\Pi_3$  – помехи, обусловленные электрическими наводками (емкостными);  $\Pi_n$  – перекрестные помехи;  $\Pi_{пт}$  – помехи постоянного тока, паразитные термоЭДС, возникающие в термоэлектрических цепях;  $\Pi_{зк}$  – помехи, вызванные наличием заземленных контуров;  $\Pi_3$  – помехи, связанные с электропитанием;  $\Pi_m$  – помехи, обусловленные механическими воздействиями (удары, вибрация, ускорение);  $\Pi_{нтр}$  – помеха, возникающая в результате нарушения теплового режима конструкции МС.

На основании анализа вышеизложенного материала по воздействию ДФ на МС и приведенной модели, можно сделать вывод, что при разработке метода определения ТФСМ и адаптивной МС необходимо контролировать и вводить коррекцию, т.е. осуществлять корректирующую стратегию результатов измерения при воздействии следующих ДФ:  $\psi_0, R_T, T_{oc}, N_{oc}$ .

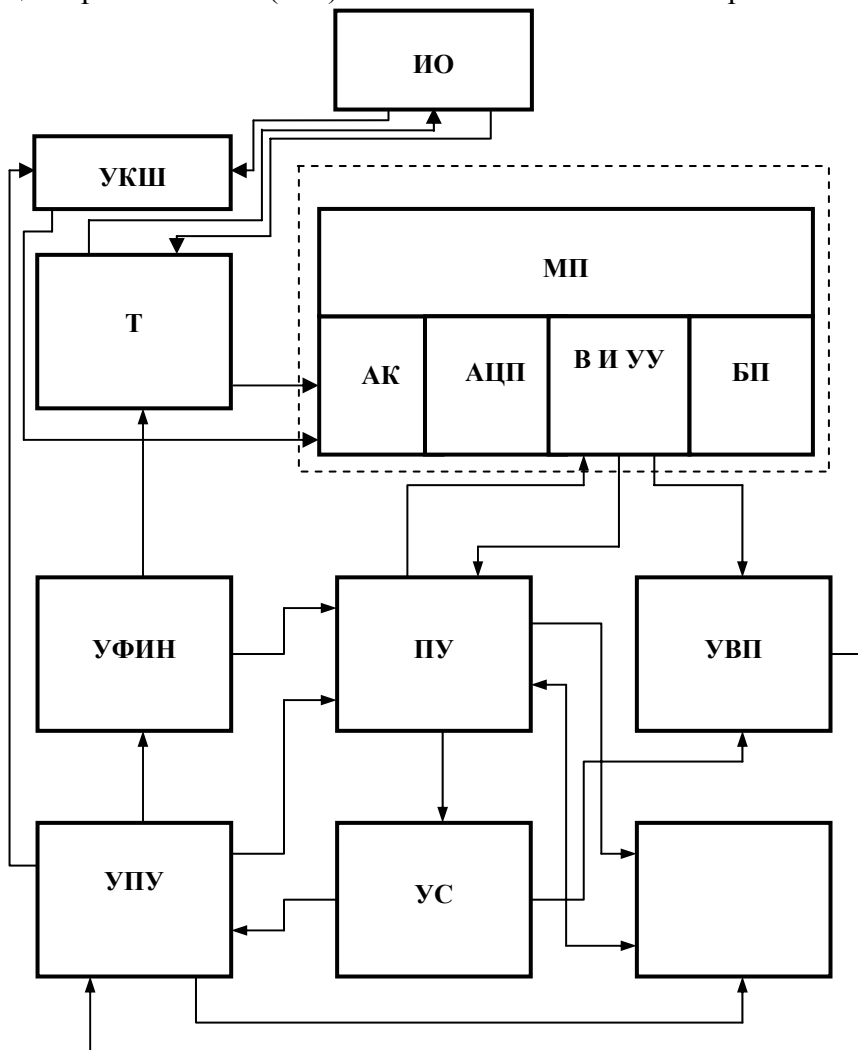
Как показывают экспериментальные и теоретические исследования, влиянием ДФ таких, как  $C_n, \Delta x_T, P_{oc}$ , можно пренебречь, так как оно незначительно. Для устранения влияния на результат измерения других ДФ, воздействующих на АЦП и МП, термозонд, приведены соответствующие рекомендации по изготовлению этих устройств и их эксплуатации.

Предлагаемые методы уменьшения составляющих общей погрешности основных блоков МС позволяют повысить метрологический уровень определения ТФС материалов и изделий на 3 – 5 %.

Таким образом, анализ дестабилизирующих факторов, воздействующих на ПИП, АЦП и измерительные цепи адаптивной МС, и применение методов, позволяющих устранить их влияние на получение достоверной информации о температурном поле в области измерения, способствуют повышению точности определения ТФС материалов и готовых изделий.

### 3.2.2 СТРУКТУРНАЯ СХЕМА АДАПТИВНОЙ МИКРОПРОЦЕССОРНОЙ СИСТЕМЫ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ

Структурная схема разработанной адаптивной микропроцессорной системы неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов (МС НК ТФСМ) [31] представлена на рис. 3.20. Микропроцессорная система (МС) выполнена на основе микроЭВМ «Электроника МС-1103», в



**Рис. 3.20 Структурная схема адаптивной микропроцессорной системы неразрушающего контроля теплофизических свойств материала**

состав которой входят адаптивный коммутатор каналов (АК), аналого-цифровой преобразователь (АЦП), вычислительное и управляющее устройство микропроцессором (ВиУУ МП), микропроцессор (МП), блок питания (БП). Адаптивная МС включает также следующие устройства: термозонд (Т), служащий для реализации предлагаемого метода определения ТФСМ; устройство формирования импульсов нагрева (УФИН), предназначенное для формирования импульсов нагрева заданной длительности, частоты и мощности, поступающих на нагреватель термозонда; устройство программного управления МС (УПУ МС), осуществляющее управление теплофизическим измерением; устройство выбора программ (УВП),

реализующее заданный код программ, записанных в постоянное программируемое запоминающее устройство (ППЗУ); устройство управления вводом программ (УУВП), осуществляющее управление формированием и записью команд программ ППЗУ; устройство синхронизации (УС), тактирующее работу УПУ и УВП МС, а также блок преобразователей уровня (ПУ), выполняющих необходимые преобразования уровней информационных сигналов между микроЭВМ и дополнительными функциональными устройствами, входящими в состав адаптивной МС, устройство для контроля шероховатости УКШ поверхности исследуемых материалов и изделий при теплофизических измерениях.

Адаптивная МС работает следующим образом. Перед началом измерения в микропроцессор с помощью блока автоматического ввода программ заносятся программы, соответствующие алгоритму, реализующему частотно-импульсный метод определения ТФСМ. Этими программами являются программа расчета начальной частоты подачи тепловых импульсов  $n$  и  $m$  в соответствии с заданным алгоритмом, программа калибровки прибора, по которой определяются коэффициенты  $K_1, K_2, K_3, K_4$  (3.18), (3.19), программа расчета искомым ТФСМ по полученным соотношениям (3.16) и программа коррекции результатов измерения. В регистры памяти процессора заносятся значения параметров  $n, m, K_1, K_2, K_3, K_4$ , где  $n$  и  $m$  определяют количество импульсов теплового воздействия на исследуемый объект.

Перед проведением очередного измерения осуществляется идентификация параметров исследуемого объекта: с помощью УКШ определяются значения и шероховатости объекта, которые поступают в оперативное запоминающее устройство (ОЗУ) допускового контроля МП. При помещении термозонда на исследуемый объект осуществляется контроль соответствующими термодатчиками температуры в плоскости контакта термозонда и объекта, а также проводится теплофизическое измерение, чтобы на основе полученной термограммы определить влажность объекта, контактное термосопротивление.

Адаптивное коммутирующее устройство, адаптация которого по частоте опроса информационных каналов осуществляется с помощью УПУ МС, позволяет по заданному алгоритму указанные параметры записать в ОЗУ допускового контроля МП.

С помощью допускового контроля МС проводится сравнение измеренных величин с записанными в ОЗУ тестовыми величинами. Значения отклонений измеренных параметров от тестовых используются в дальнейшем для выполнения коррекции результатов измерений, а сигнал готовности термозонда (наличие термостабилизации в подложке зонда) поступает в УПУ МС. Теплофизическое измерение осуществляется по заданному алгоритму программными и схемотехническими средствами. При осуществлении теплового воздействия УФИН и УПУ МС с помощью адаптивного коммутирующего устройства информация о температурном поле в области контакта термозонда и исследуемого объекта поступает в ОЗУ МП. При этом осуществляется параметрическая адаптация по диапазону усиления усилителя и выбору алгоритма определения ТФСМ. Уровень информационного сигнала с термозонда в процессе измерения позволяет установить теплопроводность исследуемого объекта, а это, в свою очередь, определяет измерительную процедуру теплофизического эксперимента: мощность и частоту теплового воздействия, количество импульсов нагрева, диапазон усилителя и др. Таким образом осуществляется параметрическая адаптация МС по режимно-энергетическим параметрам.

После окончания процесса нагрева исследуемого объекта выполняется расчет по соотношениям (3.16) искомым ТФСМ и изделий на основе полученной информации о температурно-временных изменениях в области измерения. При этом осуществляется коррекция результатов измерения на воздействие дестабилизирующих факторов: температуры окружающей среды, влажности, шероховатости поверхности и термического сопротивления исследуемого объекта по нижеприведенной методике.

### **3.2.3 ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ СХЕМА АДАПТИВНОЙ МИКРОПРОЦЕССОРНОЙ СИСТЕМЫ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ**

К преимуществам адаптивной МС относятся адаптивная коррекция результатов измерения при воздействии дестабилизирующих факторов, адаптация по мощности и частоте воздействующих тепловых

импульсов на поверхность исследуемого объекта в зависимости от диапазона теплопроводности исследуемых материалов [18, 25].

Функциональная схема адаптивной МС НК ТФСМ представлена на рис. 3.21 [32, 31].

На функциональной схеме МС показаны устройства МС и обозначены управляющие команды, информационные сигналы, сигналы синхронизации и тактирования работы всех устройств МС.

**Рис. 3.21 Функциональная схема адаптивной микропроцессорной системы неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов**

Микропроцессорная система неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов выполнена на основе микроЭВМ «Электроника МС 1103» и реализует новый метод определения ТФСМ, изложенный в разд. 3.1 данного учебного пособия.

Основным устройством в адаптивной МС НК ТФСМ является постоянное программируемое запоминающее устройство (ППЗУ), которое осуществляет управление процессом теплофизических измере-

ний, а именно: реализует программу идентификации контролируемых параметров исследуемого объекта, программу теплофизических измерений, программу адаптивного выбора алгоритма измерения, программу калибровки тепловой модели измерения, программу расчета ТФСМ и адаптивной коррекции результатов измерения.

Для записи необходимого количества программ в ППЗУ требуется увеличение объема памяти запоминающего устройства. Эта задача решена с помощью устройства увеличения объема памяти (УУОП) при параллельном включении по выходу требуемого числа ППЗУ с использованием дополнительного дешифратора, предназначенного для формирования сигнала разрешения работы нужной ППЗУ.

Выбор режима работы адаптивной МС и соответствующей программы, реализующей заданный режим, осуществляется с панели управления микроЭВМ и устройств управления 1 и 2 (УУ1 и УУ2). При этом на выходы УУ1 и УУ2 поступают с вычислительного и управляющего устройства (В и УУ) МП соответственно сигналы Упр. 1 и Упр. 2, а с выходов УУ1 и УУ2 коды, соответствующие требуемой программе, поступают на входы ППЗУ и УУОП. Заданная программа с ППЗУ считывается при смене адреса на входе ППЗУ, который определяется счетчиком адреса (СА). При считывании с выходов ППЗУ последней команды программы СА обнуляется сигналом с ППЗУ и возобновляет работу только при поступлении управляющего сигнала с устройства синхронизации (УС). С выхода УУ1 формируется команда «Запуск программы» и через преобразователь уровня ПУ2 передается в В и УУ МП.

Коды команд программы с выходов ППЗУ поступают в дешифратор (Д), где преобразуются в десятичный код и далее подаются в устройство управления вводом программ (УУВП), куда поступают дополнительные определяющие коды с выходов ППЗУ и с В и УУ МП через преобразователь уровня ПУ5 частота  $F_1$ . Далее коды команд программы с выходов УУВП преобразуются в преобразователях уровня ПУ6 и ПУ7 в сигналы амплитудой – 15 В и подаются в В и УУ МП.

В режиме измерения МС с выхода ППЗУ по заданной программе импульсы нагрева термозонда требуемой длительности и скважности следуют в устройство формирования импульсов нагрева (УФИН) и далее с выхода УФИН поступают на нагреватель термозонда. С выхода УФИН осуществляется передача сигнала индикации импульсов нагрева на лицевую панель МС через преобразователь уровня ПУ4, где сигнал амплитудой +5 В преобразуется в сигнал с амплитудой –15 В.

Устройство синхронизации (УС) МС тактирует работу УУ1, УУ2, счетчика адреса, УФИН, при этом опорная частота на УС поступает с генератора В и УУ МП через ПУ1, где импульсы с генератора частотой

80 кГц и амплитудой –27 В преобразуются в частотные импульсы с амплитудой +5 В.

После завершения процесса теплофизического измерения реализуется контролирующая стратегия, т.е. определяются искомые ТФС исследуемых материалов и изделий из них. При этом программным способом осуществляется адаптивная коррекция результатов измерения при воздействии дестабилизирующих факторов: температуры окружающей среды, влажности, контактного термосопротивления, шероховатости поверхности исследуемого объекта.

Блок-схема алгоритма функционирования адаптивной ИВС приведена на рис. 3.22.

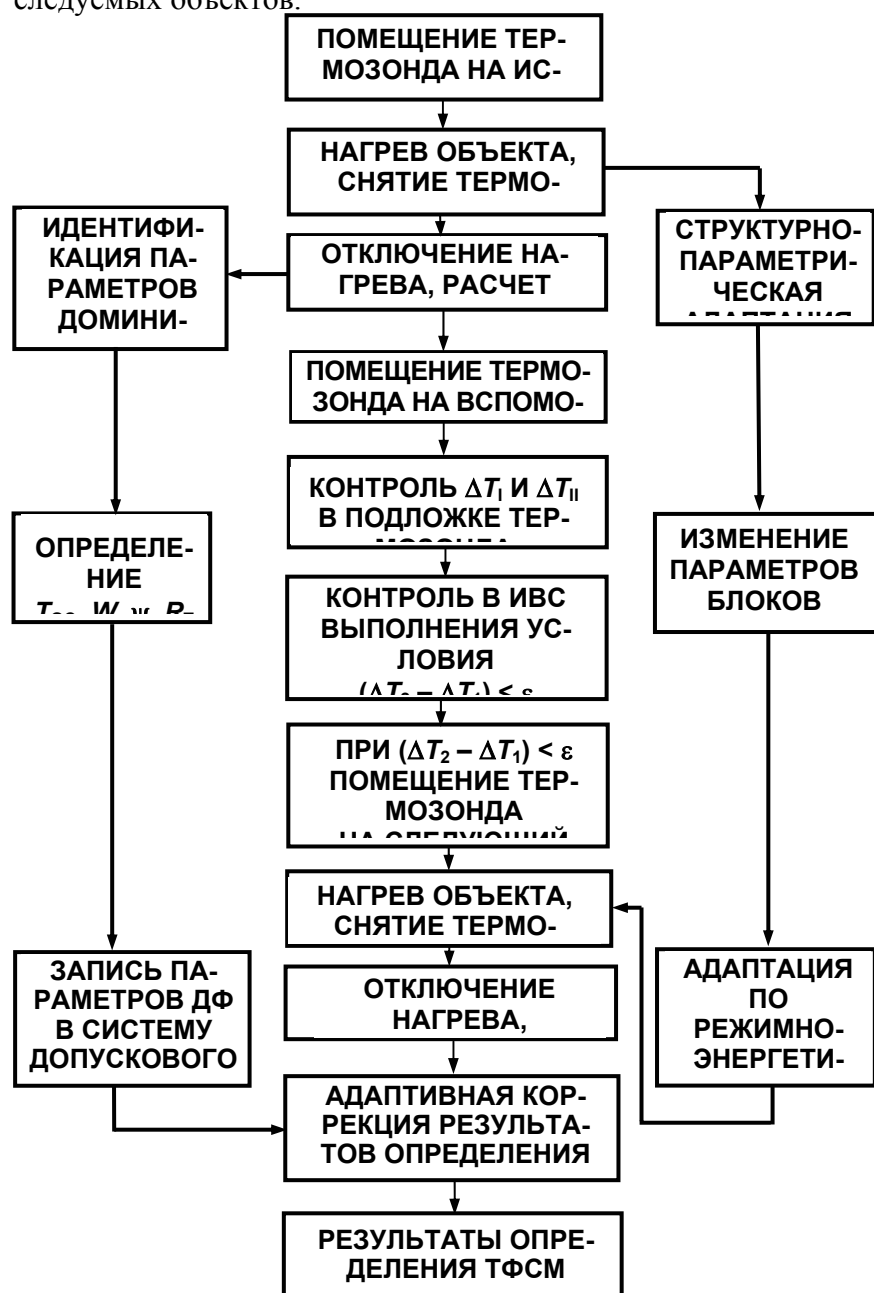
Идентификация параметров объекта при воздействии на него основных дестабилизирующих факторов (изменение температуры окружающей среды, влажности, контактного термосопротивления, шероховатости поверхности) устанавливает отклонение параметров объекта исследования и МС от параметров при нормальных условиях эксплуатации, а применение коррекции стратегии позволяет осуществить адаптацию МС, т.е. коррекцию алгоритма теплофизического измерения в зависимости от класса теплопроводности исследуемых материалов и изделий, а также автоматическую коррекцию результатов измерения.

Применение МС с различными тепловыми моделями, их анализ и синтез алгоритмов определения ТФСМ рассматривалось в работе [33].

Перед проведением теплофизического измерения реализуется идентифицируемая стратегия, т.е. осуществляется идентификация параметров объекта.

Как известно, вследствие шероховатости и волнистости реальных поверхностей исследуемых материалов и изделий контакт между твердыми телами всегда имеет дискретный характер, т.е. соприкосновение происходит в отдельных точках или группах точек поверхности. Отсутствие сплошности контак-

та при соприкосновении термозонда и исследуемого объекта существенно меняет картину передачи тепла от одного тела к другому при теплофизических измерениях, что в итоге влияет на достоверность получаемой измерительной информации в области измерения. Поэтому в МС необходимо введение коррекции результатов измерения как на наличие контактного сопротивления, так и шероховатости исследуемых объектов.



**Рис. 3.22** Блок-схема алгоритма определения ТФС адаптивной МС

При контроле шероховатости поверхности производится интегральная оценка поверхностных дефектов. Для определения шероховатостей изделий и материалов применяют в основном интерференционные приборы.

Принцип действия интерферометров основан на сравнении световых волн, получаемых при отражении когерентных пучков света от контролируемой и эталонной поверхности. В МС применен для



контроля шероховатости поверхности прибор конструкции В.И. Саркина– микроскоп сравнения, подробное описание работы которого приведено в работе [34]. Прибор позволяет одновременно наблюдать две интерференционные картины, одна из которых формируется изделием, а вторая эталоном шероховатости. О шероховатости изделия судят по степени различия этих картин согласно известным градуировочным характеристикам.

Для повышения точности измерения шероховатости выполнено усовершенствование принципа действия данного прибора, заключающееся в том, что предварительно определяется теплопроводность исследуемых изделий, оценивается степень черноты изделия, а затем вводится коррекция на их отклонение от градуировочных значений при определении шероховатости поверхности изделия.

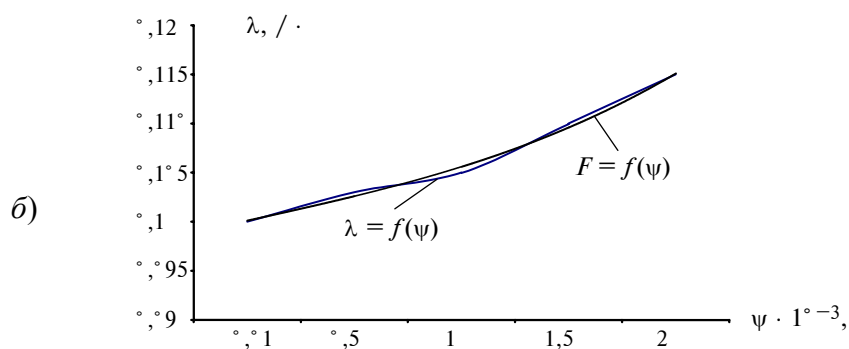
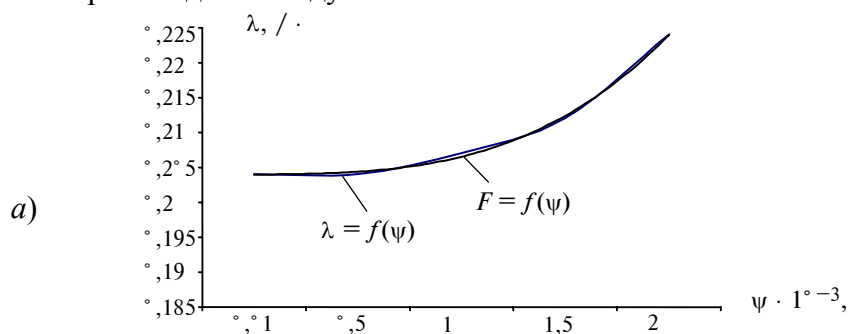
Диапазон величин шероховатости поверхности установлен ГОСТ 2789–73. Значение полученной величины  $\psi_i(x_i, \tau_i)$  заносится оператором в ОЗУ микропроцессора (МП).

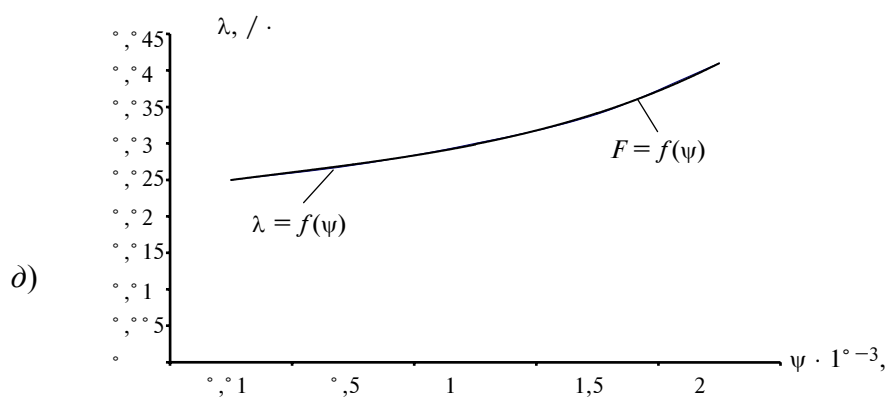
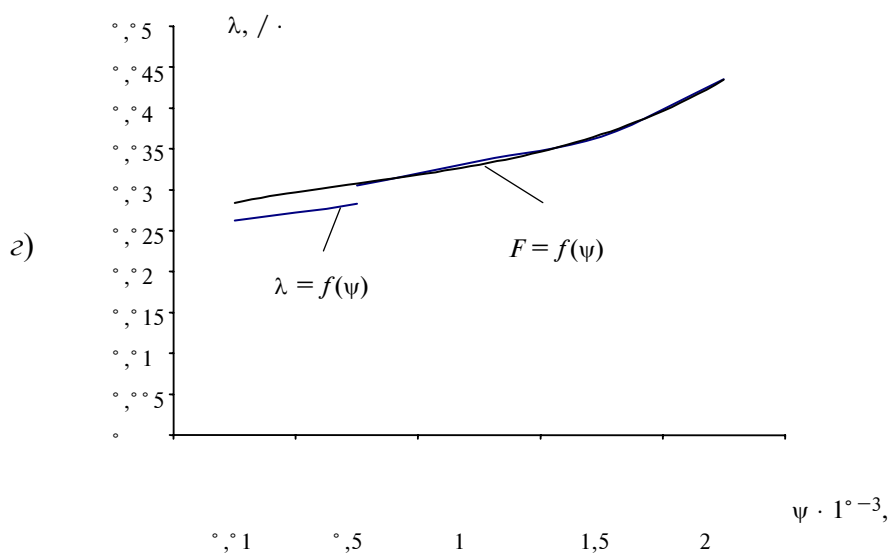
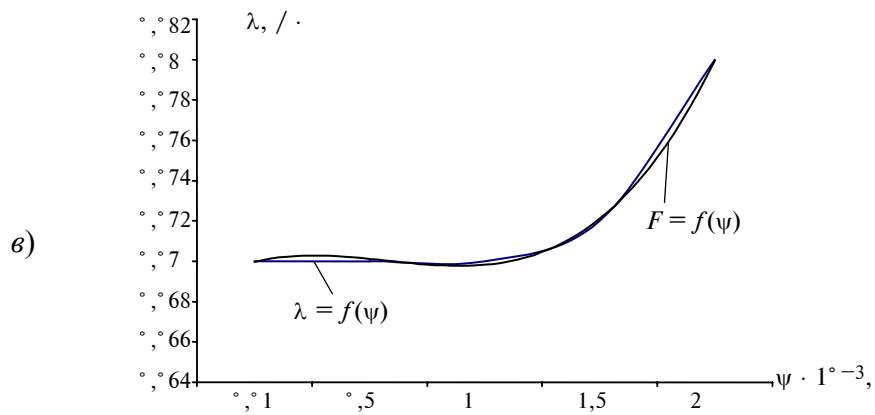
На рис. 3.23, а – д представлены зависимости теплопроводности исследуемых материалов от шероховатости их поверхности  $\lambda = f(\psi)$ , а также соответствующие им аппроксимирующие функции  $F = f(\psi)$ , на основе которых осуществляется коррекция результатов определения ТФСМ.

Далее на поверхность исследуемого объекта помещается термозонд для проведения теплофизического измерения. Термодатчики, расположенные в термозонде, фиксируют температуру в области измерения ( $U_{T_n}$ ). Эта информация также заносится в ОЗУ микропроцессора.

Воздействие температуры окружающей среды на МС НК ТФСМ, исследование математических моделей теплофизических измерений в широком диапазоне температур и рекомендации по выбору модели для определения ТФСМ изложены в работе [35].

При проведении теплофизического измерения осуществляется тепловое воздействие на исследуемый объект импульсами заданной частоты и мощности, при этом проводится параметрическая адаптация по мощности и частоте теплового воздействия на исследуемый объект в соответствии с классами и диапазонами исследуемых материалов. В результате измерения определяется теплопроводность исследуемых материалов, на основе которой по экспериментально полученным зависимостям и аппроксимирующим их функциям, определяют контактное термосопротивление, влажность и температуру в тепловой системе «термозонд – исследуемый объект».





**Рис. 3.23** Зависимости результатов измерения теплопроводности от шероховатости и аппроксимирующая функция:

$$\begin{aligned}
 a - \text{ПММ}, & F(\psi) = 0,003\psi^3 - 0,001\psi^2 + 0,0015\psi + 0,1992; \\
 б - \text{линолеума}, & F(\psi) = 8 \cdot 10^{-5} \psi^3 - 0,0002\psi^2 + 0,0027\psi + 0,0976; \\
 в - \text{винилискожи}, & F(\psi) = 0,0005\psi^3 - 0,0032\psi^2 + 0,0063\psi + 0,0664; \\
 г - \text{пенопласта}, & F(\psi) = 0,0005\psi^3 - 0,0015\psi^2 + 0,0052\psi + 0,026; \\
 д - \text{рипора}, & F(\psi) = 0,0005\psi^3 - 0,0007\psi^2 + 0,0031\psi + 0,0224
 \end{aligned}$$

На рис. 3.24,  $a - д$  представлены графики зависимости теплопроводности исследуемых материалов от температуры  $\lambda = f(T)$  и соответствующих им аппроксимирующих функций  $F = f(T)$  для ПММ, линолеума, войлока, минваты и рипора.

При определении ТФСМ часто используют экспериментальные термограммы, полученные для поверхности исследуемого материала при допущении отсутствия контактного термосопротивления. В действительности же в плоскости контакта термозонда и исследуемого материала всегда присутствуют прослойки воздуха, влаги, следы смазок и т.д., которые обладают определенным термосопротивлением, создающим дополнительный перепад температур в контактирующих телах. Оценка погрешности определения ТФСМ, обусловленной контактным термосопротивлением, и метод расчета контактного термосопротивления изложены подробно в работах [11, 20, 36].

Полученные зависимости теплопроводности исследуемых материалов от контактного термосопротивления и соответствующие аппроксимирующие функции приведены на рис. 3.25,  $a - д$ .

Изменение влажности окружающей среды, исследуемых материалов и изделий приводит также к искажению истинных данных об их ТФС, следовательно, необходимо осуществлять контроль влажности исследуемых материалов и вводить коррекцию результатов определения ТФСМ. Контроль влажности изложен также в работе [22].

На рис. 3.26,  $a - г$  представлены графики зависимости теплопроводности от влажности  $\lambda = f(W)$  и соответствующие им аппроксимирующие функции  $F = f(W)$  для рипора, войлока, минваты и дерева соответственно.

Полученная таким образом измерительная информация о шероховатости, влажности, температуре, контактом термосопротивлении заносится в процессе экспериментов в ОЗУ микропроцессора и далее используется для осуществления корректирующей стратегии, т.е. адаптивной коррекции результатов теплофизического измерения исследуемых объектов с помощью системы допускового контроля микроЭВМ, куда заносятся допустимые значения вышеперечисленных контролируемых параметров, установленные соответствующими ГОСТами для конкретных материалов и изделий из них и данные теплофизических экспериментов.

В процессе разработки адаптивной МС проведены совершенствования метода измерения ТФС и структурных блоков МС.

Совершенствование способов и средств инициирует развитие моделей и алгоритмов процесса измерений. При этом поэтапно уточняются модели аппроксимации и адаптивной коррекции, минимизируются и становятся более гибкими алгоритмы и программы управления, решается задача быстрого действия МС, синхронизации аппаратных и программных средств, увеличения числа каналов измерения.

При определении ТФС полистирольных пенопластов и многослойных линолеумов решалась задача достижения требуемой точности измерения, так как исследования проводились для нескольких видов полистирольного пенопласта, отличающихся по теплопроводности на  $0,005 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$  и линолеумов, отличающихся по теплопроводности на  $0,01 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$ . Теплофизические измерения проводились с помощью адаптивной МС. Конструкция применяемого термозонда обеспечивает требуемую чувствительность для достижения достаточной точности определения параметров ТФС, а также оптимальное тепловое воздействие на полистирольный пенопласт с сохранением целостности его поверхности и на многослойный линолеум, обеспечивая прохождение теплового воздействия термозонда на всю толщину материала [37].

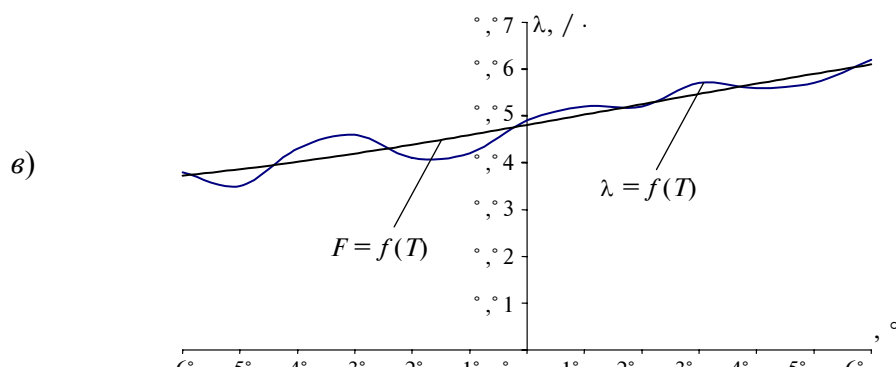
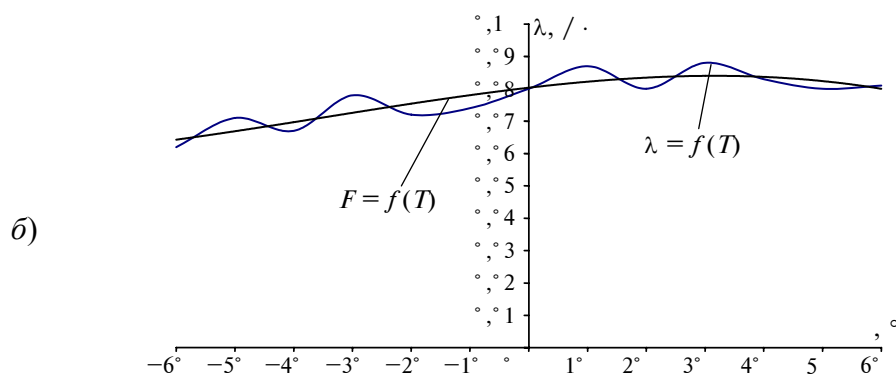
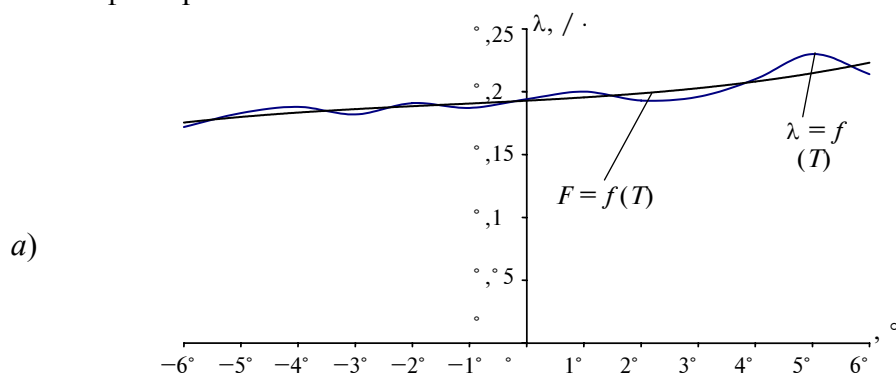
Разработаны математическое и программное обеспечение для решения поставленной задачи, алгоритм определения параметров ТФС пенопластов и линолеумов, который реализуется с помощью МС НК ТФСМ. Формирование стабильных сигналов с датчика и измерительного канала в МС позволяет получить достоверную информацию о ТФС пенопластов и линолеумов, повысить точность и быстродействие получения результатов.

Сложность в определении ТФС винилискож – НТ заключается в том, что исследуемые многослойные материалы отличаются теплопроводностью каждого слоя от 0,05 до 0,35 Вт/м · К. Следовательно, время достижения установившегося температурного поля материалов различно. Многочисленные экспериментальные исследования винилискож – НТ позволили определить оптимальный режим измерения теплопроводности винилискож – НТ на разной основе [38].

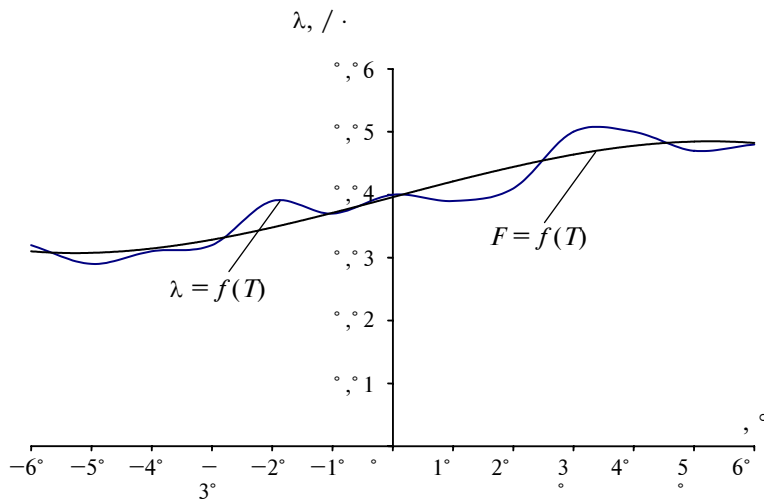
В процессе теплофизических измерений погрешности измерений могут определяться не только воздействием большого числа внешних и внутренних факторов, но и упрощенной математической моделью теплового процесса, не учитывающей дестабилизирующие факторы. Внешние факторы, влияющие на результаты эксперимента, можно сконцентрировать в некотором количественном показателе, определяющем работоспособность измерительной системы и характеризующем достоверность результатов измерения. Таким показателем качественной работоспособности системы может быть функциональная надежность, которая используется для повышения достоверности результатов теплофизических измерений одним из методов, изложенном в работе [39].

$$P_{\text{дп}} = P_{\text{вф}} P_{\text{ра}},$$

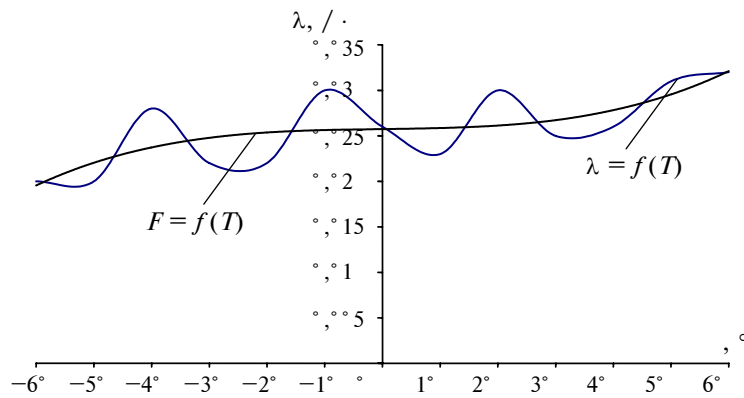
где  $P_{\text{дп}}$  – вероятность достоверных измерений в условиях воздействия на МС внешних дестабилизирующих факторов, не учтенных алгоритмом измерения;  $P_{\text{вф}}$  – вероятность воздействия внешних факторов, не учтенных алгоритмом измерения;  $P_{\text{ра}}$  – вероятность работоспособности МС в условиях действия внешних факторов.



з)



д)



**Рис. 3.24** Зависимость результатов измерения теплопроводности от температуры и аппроксимирующая функция:

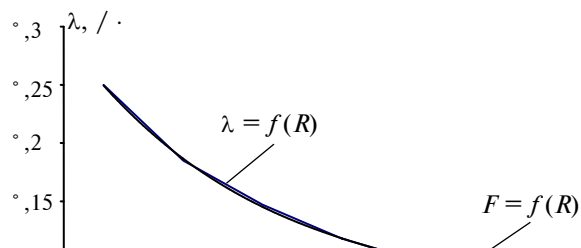
*a* – ПММ,  $F(T) = 4 \cdot 10^{-5}T^3 + 0,0008T^2 + 0,0064T + 0,1697$ ;

*б* – войлока,  $F(T) = -2 \cdot 10^{-5}T^3 - 2 \cdot 10^{-4}T^2 + 0,0021T + 0,062$ ;

*в* – линолеума,  $F(T) = -6 \cdot 10^{-6}T^3 + 0,0001T^2 + 0,001T + 0,0361$ ;

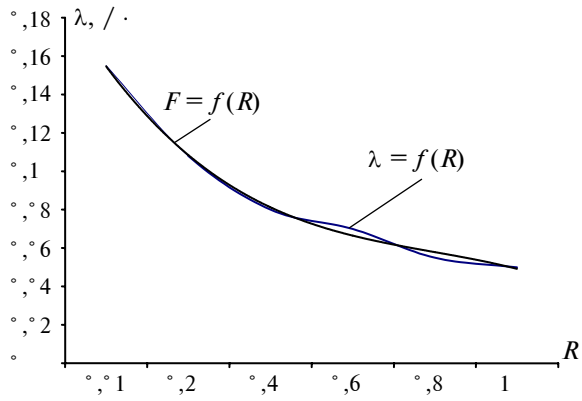
*з* – минваты,  $F(T) = -3 \cdot 10^{-5}T^3 - 6 \cdot 10^{-4}T^2 + 0,0019T + 0,0323$ ;

*д* – рипора,  $F(T) = 3 \cdot 10^{-5}T^3 - 0,0006T^2 + 0,004T + 0,0161$

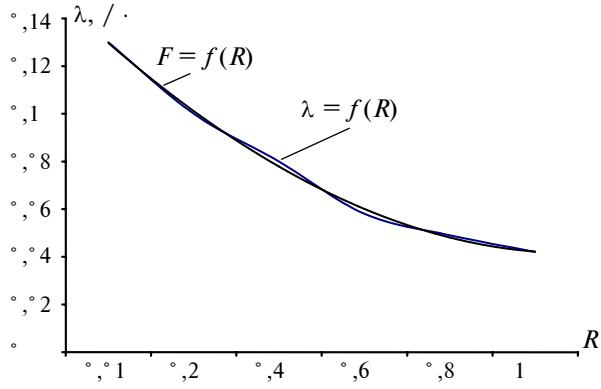


a)

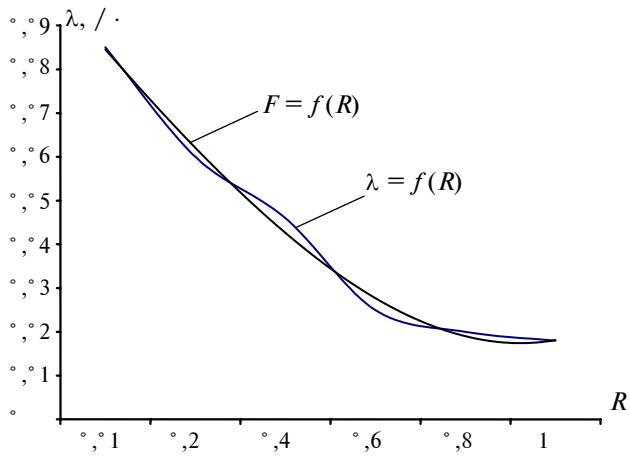
b)

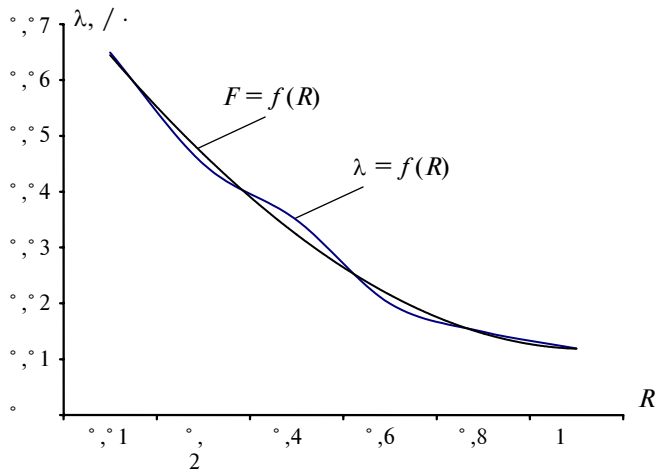


b)



c)





**Рис. 3.25** Зависимость результатов измерения теплопроводности от контактного термосопротивления и аппроксимирующая функция:

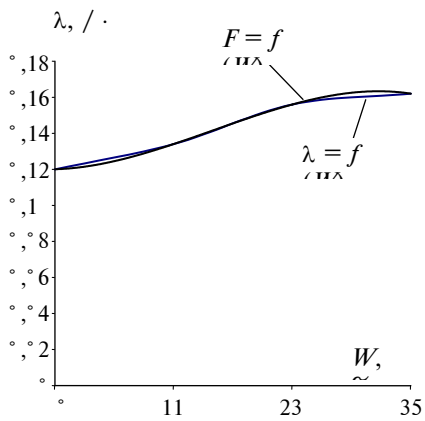
*a* – ПММ,  $F(R_T) = -0,0012R_T^3 + 0,0176R_T^2 - 0,1076R_T + 0,3407$ ;

*б* – линолеума,  $F(R_T) = -0,0011R_T^3 + 0,0158R_T^2 - 0,086R_T + 0,226$ ;

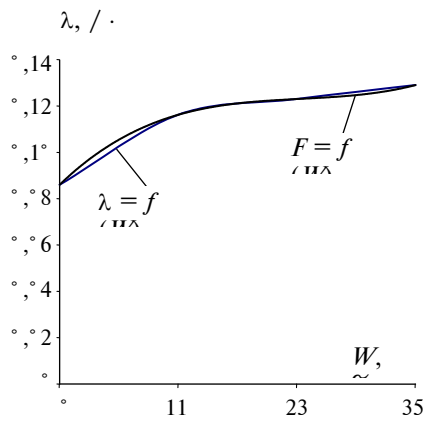
*в* – винилискожи,  $F(R_T) = 5 \cdot 10^{-5}R_T^3 + 0,0024R_T^2 - 0,036R_T + 0,1633$ ;

*г* – войлока,  $F(R_T) = 0,0003R_T^3 - 0,0004R_T^2 - 0,024R_T + 0,1083$ ;

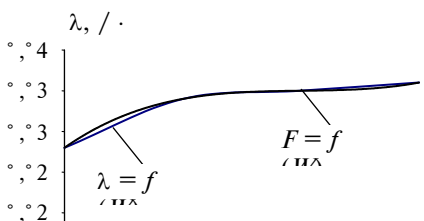
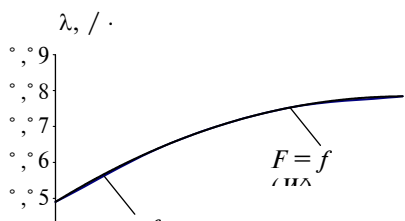
*д* – рипора,  $F(R_T) = 5 \cdot 10^{-5}R_T^3 + 0,0024R_T^2 - 0,222R_T + 0,083$



*a)*



*б)*



в)

з)

**РИС. 3.26 ЗАВИСИМОСТЬ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ  
от влажности и аппроксимирующая функция:**

$$a - \text{дерева, } F(W) = -0,004W^3 + 0,028W^2 - 0,042W + 0,13;$$

$$б - \text{войлока, } F(W) = 0,0038W^3 - 0,0343W^2 + 0,1076W + 0,0038;$$

$$в - \text{минваты, } F(W) = 5 \cdot 10^{-5}W^3 - 0,0036W^2 + 0,027W + 0,0283;$$

$$г - \text{рипора, } F(W) = 0,0008W^3 - 0,0075W^2 + 0,0227W + 0,012$$

Коррекция результатов измерения при этом ведется с помощью показательной функции  $P_{\text{вф}}$ , которая в значительной степени отображает функцию распределения усредненных случайных воздействий на результаты теплофизического эксперимента.

Работоспособность МС НК ТФСМ проверена при проведении теплофизических измерений на теплоизоляционных материалах с теплопроводностью в диапазоне 0,028 – 0,1 Вт/м · К: рипоре, минвате полужесткой и повышенной жесткости, войлоке, различных пенопластах. Относительная погрешность измерения при этом составляет 2 – 8 %. Кроме того, исследовались ТФС ряда строительных материалов: бетона, газосиликата, цемента и др. С теплопроводностью 0,2 – 0,7 Вт/м · К. относительная погрешность указанных измерений составляет 3 – 6 %.

Разработанная адаптивная МС характеризуется гибкой структурой и многофункциональностью. Изменяя программным способом алгоритм функционирования, можно определить ряд качественных параметров материалов и изделий из них: параметры адсорбции, толщину покрытия изделий, концентрацию органических жидкостей в волокнистых материалах, содержание алюминия и графита в металлополимерах .

Таким образом, адаптивная МС НК ТФСМ [24] характеризуется большими преимуществами, по сравнению с известными МС НК ТФСМ, универсальностью, возможностью получения достоверной информации о теплофизических свойствах материалов в результате применения нового метода НК ТФСМ, повышающего производительность измерений, параметрической адаптации по режимно-энергетическим параметрам, а также автоматической коррекции результатов измерения при воздействии дестабилизирующих факторов, что повышает метрологический уровень результатов НК ТФСМ в целом.

### **3.3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ АДАПТИВНОЙ МИКРОПРОЦЕССОРНОЙ СИСТЕМЫ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ**

Обеспечение высокой точности теплофизических измерений, которые проводятся МС НК ТФСМ, и ее оценка является сложной задачей, решение которой позволяет осуществлять измерения с заданной



точностью. Оценить погрешности и характеристики погрешностей результатов измерений можно с помощью метрологического эксперимента [40]. Для осуществления метрологического эксперимента проведены теплофизические измерения на эталонных образцах – ПММ и рипоре. Эталонные образцы из этих материалов аттестованы в НПО им. Д.И. Менделеева и рекомендованы в качестве стандартных эталонных образцов с допуском  $\pm(3 - 4) \%$  для поверки приборов и вычислительных систем измерений ТФСМ.

Экспериментальные исследования разработанной адаптивной МС НК ТФСМ выполнены также при определении ТФС теплоизоляционных, строительных, полимерных материалов, искусственных кож на различной основе, линолеумов и других материалов.

Результатом разработки адаптивной МС является уменьшение составляющих общей погрешности измерения при проведении метрологического эксперимента, исследовании ТФС материалов и изделий и метрологической оценки результатов теплофизического измерения.

### 3.3.1 ПРИМЕНЕНИЕ АДАПТИВНОЙ МИКРОПРОЦЕССОРНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ

В методе оценки погрешности с помощью метрологического эксперимента в качестве истинного значения характеристики  $\theta$  принимаем следующее [14, 41]

$$\theta^*[\Delta\lambda_i^*] = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U g^\Gamma[\Delta_a^* \lambda_i^*],$$

где  $\Delta_a \lambda_i^* = \lambda_{ia}^* - \lambda_i$  – оценка погрешности, получаемая с помощью гипотетического метрологического эксперимента при использовании адекватных моделей объектов, условий и средств измерений.

Ошибка оценки  $\theta^*[\Delta\lambda_i^*]$ , полученной с помощью метрологического эксперимента, представляется в виде суммы четырех компонент:

$$\Delta\theta^*[\Delta\lambda_i^*] = \Delta_{\text{на}}\theta^*[\Delta\lambda_i^*] + \Delta_{\text{кв}}\theta^*[\Delta\lambda_i^*] + \Delta_{\text{н}}\theta^*[\Delta\lambda_i^*] + \Delta_g\theta^*[\Delta\lambda_i^*],$$

где

$\Delta_{\text{на}}\theta^*[\Delta\lambda_i^*] = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U g^\Gamma[\Delta^* \lambda_i^*] - \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U g^\Gamma[\Delta_a^* \lambda_i^*]$  – ошибка, обусловленная неадекватностью используемых моделей  $\Delta^* \lambda_i^* = \lambda_i^* - \lambda_i$ ;

$\Delta_{\text{кв}}\theta^*[\Delta\lambda_i^*] = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U g^\Gamma[\Delta_a^* \lambda_i^*] - \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U g^\Gamma[\Delta_a^* \lambda_i^*]$  – ошибка в результате конечности объема выборки;

$\Delta_g\theta^*[\Delta\lambda_i^*] = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U g^\Gamma[\Delta^* \lambda_i^*] - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U g^\Gamma[\Delta_a^* \lambda_i^*]$  – ошибка, обусловленная отличием  $\lambda_{gi}$  от  $\lambda_i$ ;

$\Delta_{\text{ни}}\theta^*[\Delta\lambda_i^*] = \langle \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U g^\Gamma[\Delta_s^* \lambda_i^*] \rangle_{q_i} - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U g^\Gamma[\Delta_s^* \lambda_i^*]$  – ошибка из-за неидеальности усреднения и исходного преобразования.

Ошибка оценивания  $\theta[\Delta\lambda_i^*]$  с помощью метрологического эксперимента из-за неадекватности моделей, конечности объема выборки и неидеальности усреднения и исходного преобразования при одинаковых условиях (характере адекватных и неадекватных моделей, объеме выборки и виде неидеальности выполняемых преобразований) совпадают с ошибками оценок, получаемых с помощью имитационного моделирования.

Ошибки из-за отличия  $\lambda_{gi}$  от  $\lambda_i$  специфичны. Например,

$$\Delta_g M^*[\Delta\lambda_i^*] = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [\Delta_g \lambda_i^*],$$

где  $\Delta_g \lambda_i^* = \lambda_i - \lambda_{gi}$ ;

$$\Delta_g D^{1/2*}[\Delta\lambda_i^*] = \left[ \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N \left( \Delta_g \lambda_i^* - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Delta_g \lambda_i^* \right)^2 \right]^{1/2} -$$

$$- \left[ \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N \left( \Delta_g \lambda_i^* - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Delta_g \lambda_i^* \right)^2 \right]^{1/2}.$$

Применение метрологического эксперимента для определения  $\theta[\Delta\lambda_i^*]$  ошибки неидеальности усреднения и исходного преобразования, а также отличие  $\lambda_{gi}$  от  $\lambda_i$  носят случайный характер и их мерой может служить, как и для  $\Delta_{kb} \theta^*[\Delta\lambda_i^*]$  вероятность попадания оценки в заданный интервал.

При проведении метрологического эксперимента определены погрешности конкретных результатов измерения коэффициентов тепло- и температуропроводности на эталонных материалах. Наиболее употребляемыми характеристиками погрешностей являются: математическое ожидание (систематическая погрешность), корень квадратный из дисперсии (средняя квадратическая погрешность), доверительный интервал и доверительная вероятность [19, 42].

Математическое ожидание погрешности позволяет не только получить информацию о постоянной составляющей погрешности, но и создает предпосылки для ее коррекции. Математическое ожидание абсолютной погрешности температуропроводности и теплопроводности определяется по следующим соотношениям:

$$M[\Delta a_j^*] = \lim_{m \rightarrow \infty} \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \Delta a_j^* ; \quad (3.22)$$

$$M[\Delta \lambda_j^*] = \lim_{m \rightarrow \infty} \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \Delta \lambda_j^* , \quad (3.23)$$

где  $m$  – число измерительных экспериментов.

Средняя квадратическая погрешность абсолютной погрешности температуро- и теплопроводности рассчитывается по формулам

$$\sigma[\Delta a_j^*] = \left[ \lim_{m \rightarrow \infty} \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m (\Delta a_j^* - M[\Delta a_j^*])^2 \right]^{\frac{1}{2}}; \quad (3.24)$$

$$\sigma[\Delta \lambda_j^*] = \left[ \lim_{m \rightarrow \infty} \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m (\Delta \lambda_j^* - M[\Delta \lambda_j^*])^2 \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (3.25)$$

Определение характеристики случайной погрешности позволяет составить представление об интенсивности случайной погрешности и соотнести полученную информацию с предъявляемыми требованиями. Устанавливая связь средней квадратической погрешности с параметрами блоков измерительной цепи МС, определяются необходимые значения этих параметров, удовлетворяющие предъявляемым требованиям.

Характеристики относительной погрешности тепло- и температуропроводности рассчитываются по следующим формулам:

$$M^*[\delta a_j^*] = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \delta a_j^*; \quad (3.26)$$

$$\sigma^*[\delta a_j^*] = \left[ \frac{1}{m-1} \sum_{j=1}^m (\delta a_j^* - M^*[\delta a_j^*])^2 \right]^{\frac{1}{2}}; \quad (3.27)$$

$$M^*[\delta \lambda_j^*] = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \delta \lambda_j^*; \quad (3.28)$$

$$\sigma^*[\delta \lambda_j^*] = \left[ \frac{1}{m-1} \sum_{j=1}^m (\delta \lambda_j^* - M^*[\delta \lambda_j^*])^2 \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (3.29)$$

Предельные абсолютные и относительные погрешности коэффициентов тепло- и температуропроводности определяются следующим образом

$$\Delta_{\text{пред}} a_j^* = M[\Delta a_j^*] + t_{a,n-1} \sigma[\Delta a_j^*]; \quad (3.30)$$

$$\Delta_{\text{пред}} \lambda_j^* = M[\Delta \lambda_j^*] + t_{a,n-1} \sigma[\Delta \lambda_j^*]; \quad (3.31)$$

$$\delta_{\text{пред}} a_j^* = \frac{\Delta_{\text{пред}} a_j^*}{a_j}; \quad (3.32)$$

$$\delta_{\text{пред}} \lambda_j^* = \frac{\Delta_{\text{пред}} \lambda_j^*}{\lambda_j}, \quad (3.33)$$

где  $t_{a,n-1}$  – коэффициент Стьюдента при доверительной вероятности  $a = 0,95$  и количестве измерений  $n-1$ .

Результаты теплофизического эксперимента, реализующего новый оперативный метод определения ТФСМ, приведены в табл. 3.3 и 3.4.

Теплофизические измерения, результаты которых отображены в табл. 3.3 и 3.4, проведены при мощности теплового воздействия от линейного источника тепла  $P = 12$  Вт, в

точке контроля  $x_2$ , расположенной на расстоянии 0,002 м от линейного тепла в моменты времени  $\tau_1 = 6$  с,  $\tau_2 = 140$  с.

В таблицах обозначены:  $T_1, T_2$  – значения контролируемых температур в точке  $x_2$  и моменты времени  $\tau_1, \tau_2$ ;  $a$  и  $\lambda$  – коэффициенты температуро- и теплопроводности соответственно.

В табл. 3.3 представлены данные теплофизического эксперимента на аттестованном образце ПММ, а в табл. 3.4 – эталонном образце рипоре.

Результаты обработки метрологического эксперимента на эталонных образцах из ПММ и рипора представлены в табл. 3.5.

Проведена оценка погрешностей и их характеристик при использовании известных методик поверки рабочих средств измерений [43 – 45]. В соответствии с этими методиками в качестве основных характеристик погрешностей измерения ТФСМ определялись математическое ожидание (систематическая погрешность) и среднеквадратическое отклонение случайной составляющей погрешности результата измерений. Математическое ожидание результатов определения коэффициентов тепло- и температуропроводности рассчитывалось по формулам, приведенным в разд. 3.3.1 настоящей работы (3.22, 3.23), а среднеквадратическая погрешность по (3.24, 3.25).

### 3.3 Результаты метрологического эксперимента на эталонном образце из полиметилметакрилата

№	$T_1, ^\circ\text{C}$	$T_2, ^\circ\text{C}$	$a \cdot 10^{-7}, \text{м}^2$	$\lambda, \text{Вт/м} \cdot \text{К}$
1	8,1	17,3	1,06	0,192
2	7,8	17,1	1,09	0,195
3	8,4	17,0	1,11	0,198
4	8,3	16,8	1,08	0,196
5	8,0	17,2	1,07	0,194
6	7,9	16,9	1,10	0,197
7	7,5	17,0	1,11	0,198
8	8,5	16,8	1,06	0,192
9	8,0	17,3	1,08	0,196
10	8,2	16,9	1,10	0,197
11	8,1	16,8	1,09	0,195
12	7,4	17,1	1,11	0,198
13	7,2	16,9	1,06	0,192
14	7,8	17,3	1,08	0,196
15	8,2	17,2	1,07	0,194
16	8,0	16,7	1,10	0,197
17	7,9	17,0	1,11	0,198

18	8,1	16,9	1,06	0,192
19	8,3	17,3	1,09	0,195
20	8,2	17,1	1,08	0,196

### 3.4 Результаты метрологического эксперимента на эталонном образце из рипора

№	$T_1, ^\circ\text{C}$	$T_2, ^\circ\text{C}$	$a \cdot 10^{-7}, \text{м}^2$	$\lambda, \text{Вт/м} \cdot \text{К}$
1	14,5	30,1	4,51	0,027
2	14,6	29,9	4,71	0,029
3	14,2	29,8	4,60	0,028
4	14,5	30,3	4,61	0,028
5	14,8	30,5	4,55	0,027
6	14,7	29,9	4,66	0,029
7	13,9	30,1	4,54	0,027
8	14,6	30,2	4,70	0,029
9	14,3	30,5	4,58	0,028
10	14,0	29,8	4,64	0,028
11	14,5	30,1	4,69	0,029
12	14,2	30,5	4,52	0,027
13	14,1	30,4	4,71	0,029
14	13,9	29,9	4,63	0,028
15	14,6	30,2	4,55	0,027
16	14,2	30,3	4,66	0,029
17	14,7	29,8	4,54	0,027
18	14,1	30,1	4,60	0,028
19	13,9	30,5	4,69	0,029
20	14,2	30,3	4,58	0,028

### 3.5 Результаты метрологической обработки теплофизических измерений на эталонных образцах

Погрешности и характеристики погрешностей измерений	ЭТАЛОННЫЕ ОБРАЗЦЫ	
	ПММ	Рипор
$M[\Delta a_j^*]$	$1,55 \cdot 10^{-9}$	$5,69 \cdot 10^{-9}$

$\sigma[\Delta a_j^*]$	$8,63 \cdot 10^{-10}$	$3,12 \cdot 10^{-9}$
$M^*[\delta a_j^*]$	1,43 %	1,23 %
$\sigma^*[\delta a_j^*]$	0,82 %	0,69 %
$\Delta_{\text{пред}} a_j^*$	$3,35 \cdot 10^{-9}$	$1,22 \cdot 10^{-8}$
$\delta_{\text{пред}} a_j^*$	$3,09 \cdot 10^{-2}$	$2,64 \cdot 10^{-2}$
$M[\Delta \lambda_j^*]$	$1,76 \cdot 10^{-3}$	$6,65 \cdot 10^{-4}$
$\sigma[\Delta \lambda_j^*]$	$1,11 \cdot 10^{-3}$	$4,53 \cdot 10^{-4}$
$M^*[\delta \lambda_j^*]$	0,90 %	2,37 %
$\sigma^*[\delta \lambda_j^*]$	0,59 %	1,66 %
$\Delta_{\text{пред}} \lambda_j^*$	$4,09 \cdot 10^{-3}$	$1,61 \cdot 10^{-3}$
$\delta_{\text{пред}} \lambda_j^*$	$2,09 \cdot 10^{-2}$	$5,75 \cdot 10^{-2}$

Из оценки результатов метрологического эксперимента следует, что максимальное значение систематической погрешности по температуропроводности  $M^*[\delta a_j^*] = 1,43$  % по теплопроводности  $M^*[\delta \lambda_j^*] = 2,37$  %, максимальное значение случайной составляющей погрешности по температуропроводности  $\sigma^*[\delta a_j^*] = 0,82$  %, по теплопроводности  $\sigma^*[\delta \lambda_j^*] = 1,66$  %, что соответствует предъявляемым требованиям к точности теплофизических измерений.

Метрологический анализ результатов теплофизического эксперимента на эталонных материалах позволяет установить, что систематическая и случайная составляющие основной погрешности измерения значительно меньше в применяемом адаптивном алгоритме теплофизического измерения, по сравнению с известными алгоритмами за счет коррекции результатов измерений на основе алгоритмической адаптации и адаптации к воздействию внутренних и внешних дестабилизирующих факторов.

### 3.3.2 ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ, АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗМЕРЕНИЙ

Проведены исследования ТФС строительных материалов с помощью разработанной МС НК ТФСМ. Результаты экспериментов приведены в приложении к данному пособию: на рис. П1 – графики термограмм строительных материалов. В табл. 3.6 приведены результаты метрологической обработки теплофизических измерений строительных материалов. Относительная погрешность измерения составляет не более 6 %. Выполнены экспериментальные исследования ТФС серии новых композиционных материалов строительного назначения. Проведены теплофизические измерения по определению ТФС полимерных материалов и изделий из них с помощью МС НК ТФСМ. В качестве объектов теплофизических испытаний в данной работе использовались следующие полимерные материалы: гетинакс; текстолит; полиэтилен низкого давления; полиэтилен высокого давления; полиметилметакрилат. Результаты экспериментов приведены в приложении: на рис. П2 – графики термограмм полимерных материалов. В табл. 3.7 показаны результаты метрологической обработки теплофизических измерений полимерных материалов. Максимальная погрешность измерения составляет 7,22 %.

Анализ результатов испытаний полимерных материалов позволяет установить, что данные материалы отличаются сравнительно низкой теплопроводностью (до 0,43 Вт/м · К).

С помощью адаптивной МС проведены теплофизические измерения на теплоизоляционных материалах. Результаты измерений приведены в приложении к настоящему пособию: на рис. ПЗ изображены графики полученных при измерении термограмм теплоизоляционных материалов (рипора, минваты жесткой и полужесткой, войлока и др.); на рис. П4 – графики термограмм пенопластов и линолеумов на различной основе; на рис. П5 – графики термограмм искусственных винилискож – НТ разного вида. В табл. 3.8 представлены результаты метрологической обработки экспериментальных исследований теплоизоляционных материалов (рипора, минваты, войлока и др.); в табл. 3.9 – винилискож – НТ, в табл. 3.10 – пенопластов и линолеумов.

### 3.6 Результаты метрологической обработки теплофизических измерений строительных материалов

№	Материалы	Эталонные значения		Измеренные значения		Относительная погрешность измерения	
		$a \cdot 10^{-7}, \text{ м}^2/\text{с}$	$\lambda, \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$	$a \cdot 10^{-7}, \text{ м}^2/\text{с}$	$\lambda, \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$	$\delta_a, \%$	$\delta_\lambda, \%$
1	Газосиликат (1)	3,47	0,23	3,67	0,24	5,76	5,29
2	Газосиликат (2)	3,80	0,26	4,01	0,27	5,53	5,45
3	Бетон	1,58	0,54	1,67	0,56	5,69	5,04
4	Цемент	0,86	0,842	0,90	0,88	4,88	4,75
5	Дерево	4,84	0,15	5,02	0,16	3,72	4,66
6	Асбест	5,52	0,65	5,76	0,67	3,99	4,31

### 3.7 Результаты метрологической обработки теплофизических измерений полимерных материалов

№	Материалы	Эталонные значения		Измеренные значения		Относительная погрешность измерения	
		$a \cdot 10^{-7}, \text{ м}^2/\text{с}$	$\lambda, \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$	$a \cdot 10^{-7}, \text{ м}^2/\text{с}$	$\lambda, \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$	$\delta_a, \%$	$\delta_\lambda, \%$
1	ПММ	1,09	0,195	1,10	0,21	1,00	5,13
2	Гетинакс	1,63	0,35	1,52	0,33	6,19	4,92
3	Текстолит	$1,12_1$	0,43	1,04	0,46	7,22	6,98

4	Полиэтилен низкого давлени- я	1,55	0,16	1,65	0,17	6,39	3,01
5	Полиэтилен высокого давлени- я	0,68	0,36	0,72	0,38	6,18	4,12

### 3.8 Результаты метрологической обработки теплофизических измерений теплоизоляционных материалов

№	Материалы	Эталонные значения		Измеренные значения		Относительная погрешность измерения	
		$a \cdot 10^{-7}$ , м <sup>2</sup> /с	$\lambda$ , Вт/(м · К)	$a \cdot 10^{-7}$ , м <sup>2</sup> /с	$\lambda$ , Вт/(м · К)	$\delta_a$ , %	$\delta_\lambda$ , %
1	Рипор	4,61	0,028	4,47	0,028	2,82	1,79
2	Минвата повышенной жесткости	3,47	0,046	3,28	0,044	5,36	4,35
3	Минвата полужесткая	3,93	0,04	3,85	0,038	1,93	5,00
4	Войлок	4,65	0,08	4,39 6	0,08	5,46	6,58
5	ТИНК	1,02	0,117	1,05 2	0,12	2,93	5,98
6	КССК	4,61	0,058	5,17 2	0,05	5,33	6,62

### 3.9 Результаты метрологической обработки теплофизических измерений винилискожи-НТ

№	Материалы	Эталонные значения		Измеренные значения		Относительная погрешность измерения	
		$a \cdot 10^{-7}$ , м <sup>2</sup> /с	$\lambda$ , Вт/(м · К)	$a \cdot 10^{-7}$ , м <sup>2</sup> /с	$\lambda$ , Вт/(м · К)	$\delta_a$ , %	$\delta_\lambda$ , %
1	Винилискожа-НТ(1)	1,60	0,05	1,69	0,049	6,00	5,77
2	Винилискожа-НТ(2)	1,80	0,067	1,85	0,071	3,22	5,97
3	Винилискожа-НТ(3)	1,55	0,056	1,57	0,06	1,29	7,14



4	Винилискожа-НТ(4)	1,47	0,048	1,49	0,046	1,50	4,17
5	Винилискожа-НТ(5)	1,58	0,06	1,61	0,058	2,34 3	3,33
6	Винилискожа-НТ(6)	1,61	0,048	1,63	0,046	1,68	4,17

### 3.10 Результаты метрологической обработки теплофизических измерений пенопласта и линолеумов

№	Материалы	Эталонные значения		Измеренные значения		Относительная погрешность измерения	
		$a \cdot 10^{-7}$ , м <sup>2</sup> /с	$\lambda$ , Вт/(м · К)	$a \cdot 10^{-7}$ , м <sup>2</sup> /с	$\lambda$ , Вт/(м · К)	$\delta_a$ , %	$\delta_\lambda$ , %
1	Пенопласт(1)	7,28	0,038	7,07	0,037	2,80	2,63
2	Пенопласт(2)	7,30	0,037	7,08	0,035	2,89	5,41
3	Пенопласт(3)	7,12	0,039	7,34	0,037	3,19	5,13
4	Линолеум(1)	1,15	0,081	1,18	0,087	3,13	7,40
5	Линолеум(2)	1,68	0,091	1,76	0,097	4,76	6,59
6	Линолеум(3)	1,90	0,091	1,80 7	0,096	4,89	5,49

Искусственная винилискожа –НТ находит широкое применение в автомобильной, галантерейной, строительной и ряде других отраслей промышленности. Однослойная винилискожа – НТ используется для изготовления галантерейных изделий, многослойная – в качестве тепло-шумоизоляторов для обивки стен зданий, салонов автомобилей и т.д. При изготовлении винилискож – НТ основным параметром контроля, определяемым ГОСТ на производство винилискож – НТ, является теплопроводность. Погрешность определения ТФС винилискож и изделий из них МС составляет не более 3 – 5 %, относительная погрешность определения ТФС теплоизоляционных материалов – 1,79 – 6,58 %, пенопластов и линолеумов – 2,63 – 10,48 %.

Уменьшение погрешности при использовании МС связано как с совершенствованием измерительного средства, так и с применением нового метода измерения. Особенностью применяемого метода является измерение интегрального значения избыточных температур в термозонде, что способствует уменьшению случайной составляющей погрешности результатов измерения. Кроме того, получение измерительной информации о параметрах теплофизического эксперимента в частотно-импульсной форме способствует повышению помехоустойчивости измерительных цепей МС, что также уменьшает случайные составляющие погрешности измерения. Применение в МС программного управления теплофизическим экспериментом позволило усовершенствовать схемотехнику управляющих устройств МС и повысить метрологический уровень теплофизических измерений.

Таким образом, экспериментальные исследования строительных, теплоизоляционных и полимерных материалов на базе МС НК ТФСМ подтверждают соответствие метрологического уровня МС современным требованиям к теплофизическим измерениям и возможность применения МС для контроля ТФС в условиях производства, научных исследованиях.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

---

---

В первой и второй главах учебного пособия рассмотрены теоретические основы анализа и синтеза микропроцессорных систем контроля на множестве состояний функционирования (МСФ). Введение МСФ позволяет более полно учесть реальные условия проведения сложных измерений. Изменение состояния функционирования может быть вызвано сменой условий протекания процесса измерения, нарушением работоспособности отдельных частей системы. В состояниях, отличных от состояния нормального функционирования, может возрасти погрешность, ухудшиться быстродействие или не выполняться отдельные функции.

Приводится классификация микропроцессорных измерительных систем на МСФ. Рассматривается модель процесса измерения, представлен алгоритм последовательности разработки модели измерения.

Разработаны три основные стратегии измерения – корректируемая, некорректируемая и комбинированная. Корректируемая стратегия предполагает внесение изменений в процесс измерения при смене состояния функционирования с целью повышения точности или улучшения других характеристик МС. Некорректируемая стратегия учитывает изменения состояний функционирования. В случае комбинированной стратегии, переналадка измерительной системы происходит при выходе состояния функционирования из некоторого подмножества состояний.

В третьей главе учебного пособия в качестве примера проектирования микропроцессорных систем рассмотрена адаптивная МС НК ТФСМ с параметрической адаптацией по энергетическим и режимным параметрам в соответствии с классами и диапазонами исследуемых объектов, а также с коррекцией результатов измерения при воздействии дестабилизирующих факторов. Приведены метод НК ТФСМ, повышающий производительность измерений за счет усовершенствования технологии измерения, и термозонд, реализующий метод НК ТФСМ.

Кроме того, представлены структурная и функциональная схемы адаптивной МС НК ТФСМ, а также результаты экспериментальных исследований МС. Сравнительный анализ результатов экспериментов и их метрологическая оценка позволил установить эффективность практического применения и преимущество адаптивной МС НК ТФСМ, по сравнению с МС данного назначения.

## **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

---

---

- 1 Общая теория систем: Сб. докл. М.: Мир, 1966. 188 с.
- 2 Бусленко Н.П. Моделирование сложных систем. М.: Наука, 1968. 356 с.
- 3 Калман Р., Фадб П., Арбиб М. Очерки по математической теории систем. М.: Мир, 1971. 400 с.
- 4 Директор С., Рорер Р. Введение в теории систем. М.: Мир, 1974. 469 с.
- 5 Раскин Л.Г. Анализ сложных систем и элементы теории оптимального управления. М.: Сов. радио, 1976. 344 с.

- 6 Месарович М., Такахара Я. Общая теория систем. Математические основы. М.: Мир, 1978. 311 с.
- 7 Денисов А.А., Колесников Д.Н. Теория больших систем управления: Учеб. пособие для вузов. Л.: Энергоиздат, 1982. 288 с.
- 8 Дружинин В.В., Конторов Д.С. Системотехника. М.: Радио и связь, 1985. 200 с.
- 9 Теоретические основы исследования сложных систем с учетом надежности: Учеб. пособие / Ю.Л. Муромцев, Л.Н. Ляпин, В.Н. Грошев, В.Н. Шамкин; Моск. ин-т хим. машиностроения. М., 1987. 116 с.
- 10 Патент 2170423 РФ на изобретение. Термозонд для неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов и готовых изделий / В.Н. Чернышов, З.М. Селиванова. Опубл. 10.07.2001 г., Бюл. № 19.
- 11 Методы определения теплопроводности и температуропроводности / Под. ред. А.В. Лыкова. М.: Энергия, 1973. 336 с.
- 12 Муромцев Ю.Л., Ляшков В.И., Селиванова З.М. и др. Микропроцессорная ИВС оперативного контроля // Гибкие автоматизированные производства и роботизация технологических процессов: Тез. докл. / ТГТУ. Тамбов, 1986. С. 91 – 92.
- 13 А.с. № 94033271/28, 6G01 В 11/30. Устройство для измерения шероховатости поверхности / П.И. Емельянов. Опубл. 27.07.96. Бюл. № 21.
- 14 Цветков Э.И. Алгоритмические основы измерений. Л.: Энергоатомиздат, 1992. 254 с.
- 15 Селиванова З.М., Чернышов В.Н. Термозонд для неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов и готовых изделий // Вестник ТГТУ. Тамбов, 2000. Т. 6, № 3. С. 402 – 407.
- 16 Преображенский В.П. Теплотехнические измерения и приборы. М.: Энергия, 1978. 704 с.
- 17 Селиванова З.М., Чернышов В.Н. Система неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов со структурно-параметрической адаптацией на воздействие дестабилизирующих факторов // VI науч. конф. ТГТУ: Материалы конф. Тамбов, 2001. С. 218 – 219.
- 18 Селиванова З.М. Анализ дестабилизирующих факторов, воздействующих на адаптивную измерительно-вычислительную систему неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов и готовых изделий // Информационные технологии в проектировании микропроцессорных систем: Тез. докл. Междунар. конф. / ТГТУ. Тамбов, 2000. С. 94 – 96.
- 19 Методы электрических измерений / Л.Г. Журавин, М.А. Мариненко, Е.И. Семенов, Э.И. Цветков; Под ред. Э.И. Цветкова. Л.: Энергоатомиздат, 1990. 288 с.
- 20 Варфоломеев Б.Г., Грошев В.Н., Селиванова З.М. Оценка погрешности определения теплофизических характеристик материалов, обусловленной контактным термосопротивлением // Теплофизические проблемы промышленного производства: Тез. докл. Всесоюзного теплофизического совещания. Тамбов, 1992. С. 53.
- 21 Григорьев А.С., Муромцев Ю.Л., Селиванова З.М. Комплексное определение теплофизических свойств и влажности твердых материалов // Теплофизика релаксирующих систем: Тез. докл. Всесоюзного теплофизического совещания. Тамбов, 1990. С. 106.
- 22 Варфоломеев Б.Г., Муромцев Ю.Л., Селиванова З.М. Прибор для комплексного определения теплофизических характеристик и влажности твердых тел // Метрологическое обеспечение машиностроительных отраслей промышленности: Тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф. Минск, 1992. С. 53 – 54.
- 23 Лыков А.В. Теория сушки. М.: Энергия, 1968.
- 24 Селиванова З.М. Метод уменьшения погрешности измерения теплофизических свойств твердых материалов при воздействии низких и высоких температур // Методы и средства измерения физических величин: Тез. докл. IV Всероссийской научн.-техн. конф. Нижний Новгород, 1999. С. 5.
- 25 Селиванова З.М., Чернышов В.Н. Адаптивная микропроцессорная система для определения теплофизических свойств материалов в среде с переменной температурой // V науч. конф. ТГТУ: Тез. докл. / ТГТУ. Тамбов, 2000. С. 258.
- 26 Цапенко М.П. Измерительные информационные системы. М.: Энергоатомиздат, 1985. 440 с.
- 27 Михайлов Е.В. Помехозащищенность информационно-измерительных систем. М.: Энергия, 1975. 104 с.
- 28 Шевкопляс Б.В. Микропроцессорные структуры. Инженерные решения: Справочник. М.: Радио и связь, 1990. 512 с.
- 29 Микропроцессоры / В.Д. Вернер, Н.В. Воробьев, А.В. Горячев и др.; Под ред. Л.Н. Преснухина. М.: Высшая школа, 1986. 383 с.

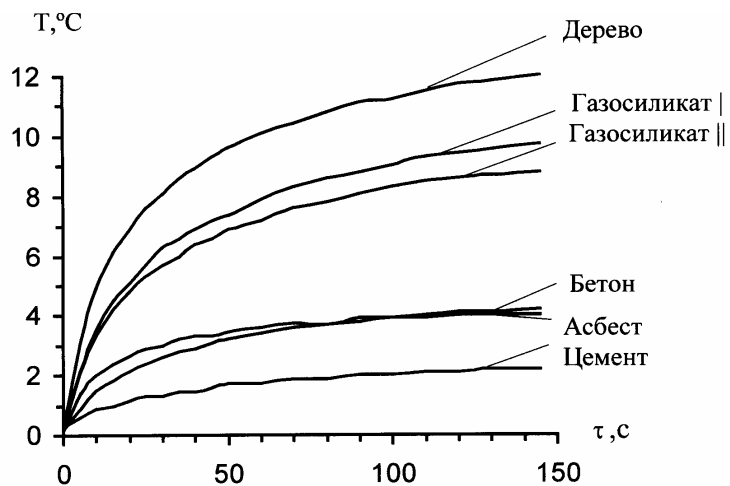
- 30 Отт Г.У. Методы подавления шумов и помех в электронных схемах / Пер. с англ.; Под ред. М.В. Гальперина. М.: Мир, 1979.
- 31 Селиванова З.М., Чернышов В.Н. Метод и адаптивная измерительно-вычислительная система неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов и изделий при воздействии дестабилизирующих факторов // Контроль, диагностика. 2001. № 1 (31). С. 12 – 15.
- 32 Селиванова З.М., Муромцев Ю.Л. Прибор «Термис ТФС и В» // Приборы и техника эксперимента. 1993. № 2. С. 8.
- 33 Селиванова З.М. Измерительно-вычислительная система с веером моделей для определения теплофизических свойств твердых материалов // Математическое моделирование и оптимизация систем переменной структуры: Межвузовский сб. науч. тр. / ТГТУ. Тамбов, 1989. С. 163 – 165.
- 34 Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий: Справочник / Под ред. В.В. Ключева. М.: Машиностроение, 1976. Т. 2. 182 с.
- 35 Селиванова З.М. Исследование математических моделей теплофизических измерений в широком диапазоне температур // Моделирование САПР, АСНИ и ГАП: Тез. докл. Всесоюз. конф. / ТГТУ. Тамбов, 1989. С. 131 – 132.
- 36 Шлыков Ю.П., Ганин Е.А., Царевский С.Н. Контактное термическое сопротивление. М.: Энергия, 1977. 328 с.
- 37 Селиванова З.М., Казаков В.Н. Повышение точности и быстродействия теплофизических измерений полистирольных пенопластов и линолеумов // Повышение эффективности теплофизических исследований технологических процессов промышленного производства и их метрологического обеспечения: Тез. докл. II Междунар. теплофизич. школы / ТГТУ. Тамбов, 1995. С. 246.
- 38 Селиванова З.М. Способ определения теплопроводности винилискожи-НТ // I науч. конф. ТГТУ: Тез. докл. Тамбов, 1994. С. 105 – 106.
- 39 Казаков В.Н., Селиванова З.М. Некоторые оценки функциональной надежности результатов теплофизических измерений // Вестник ТГТУ. 1996. Т. 2, № 4. С. 386 – 388.
- 40 Интеллектуальные средства измерений / Под ред. Э.И. Цветкова. М.: Татьянин день, 1994. 280 с.
- 41 Чернышов В.Н., Цветков Э.И. Анализ характеристик погрешностей результатов косвенных измерений коэффициентов тепло- и температуропроводности твердых материалов // Метрология. 1994. № 3. С. 29 – 36.
- 42 Новицкий П.В., Зограф И.А. Оценка погрешностей результатов измерений. Л.: Энергоатомиздат, 1991. 304 с.
- 43 Маркин Н.С. Основы теории обработки результатов измерений. М.: Изд-во стандартов, 1991. 176 с.
- 44 Методика поверки рабочих средств измерений теплопроводности, удельной теплоемкости и температуропроводности твердых тел. МИ-115-77 / Сост.: Ю.А. Чистякова, Л.П. Левина. М.: Изд-во стандартов, 1978. 11 с.
- 45 М.И. 1317–86. ГСИ Результаты и характеристики погрешностей измерений. Формы представления. Способы использования при испытании образцов продукции и контроля их параметров. М.: Изд-во стандартов, 1986.

## ПРИЛОЖЕНИЕ

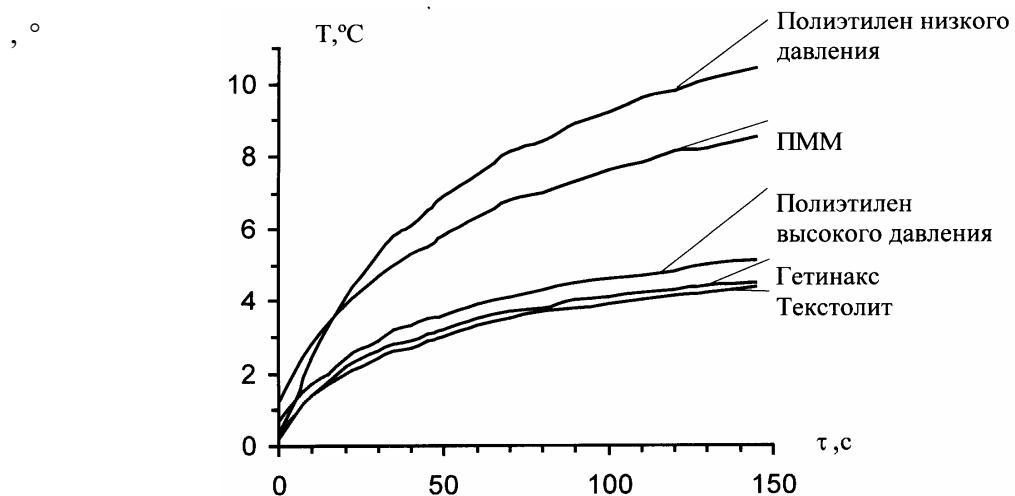
---

---

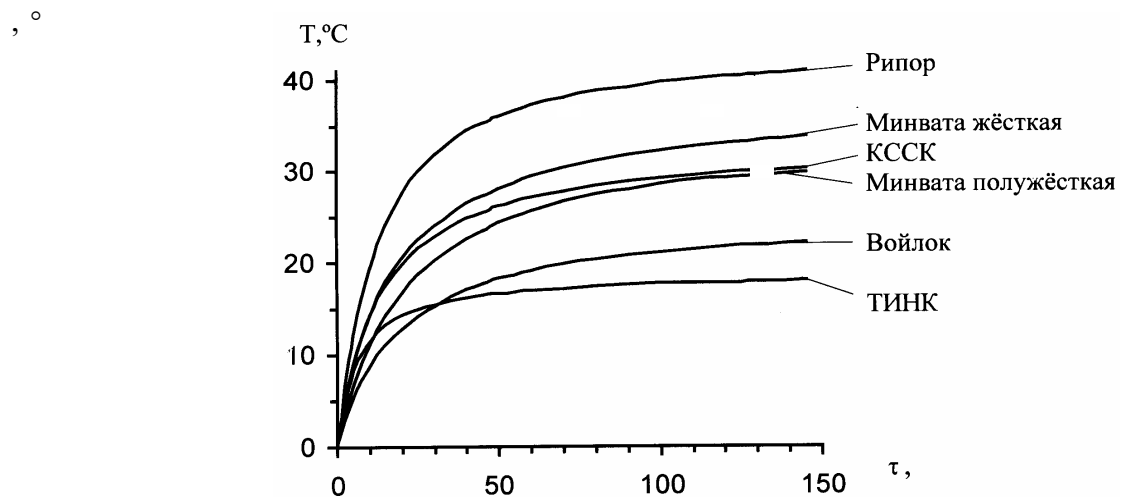
### РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ МЕТОДА И АДАПТИВНОЙ МИКРОПРОЦЕССОРНОЙ СИСТЕМЫ



**Рис. П1 Термограммы строительных материалов**



**Рис. П2 Термограммы полимерных материалов**



**Рис. П3 Термограммы теплоизоляционных материалов**

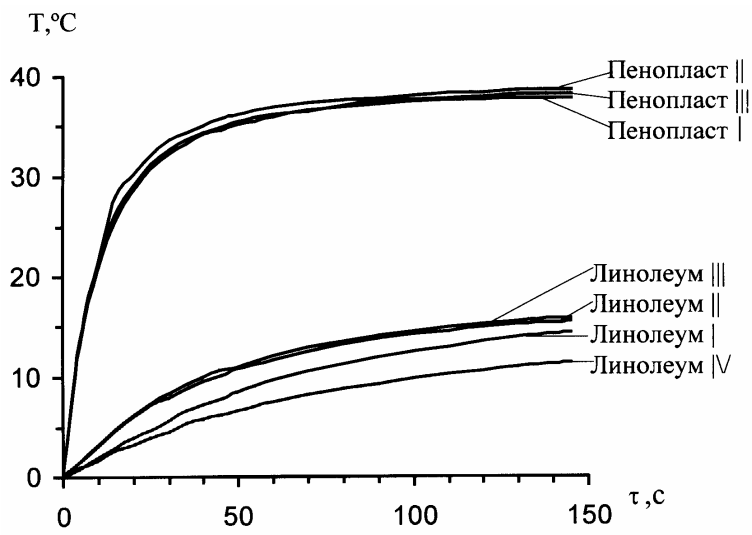


Рис. П4 Термограммы пенопластов и линолеумов

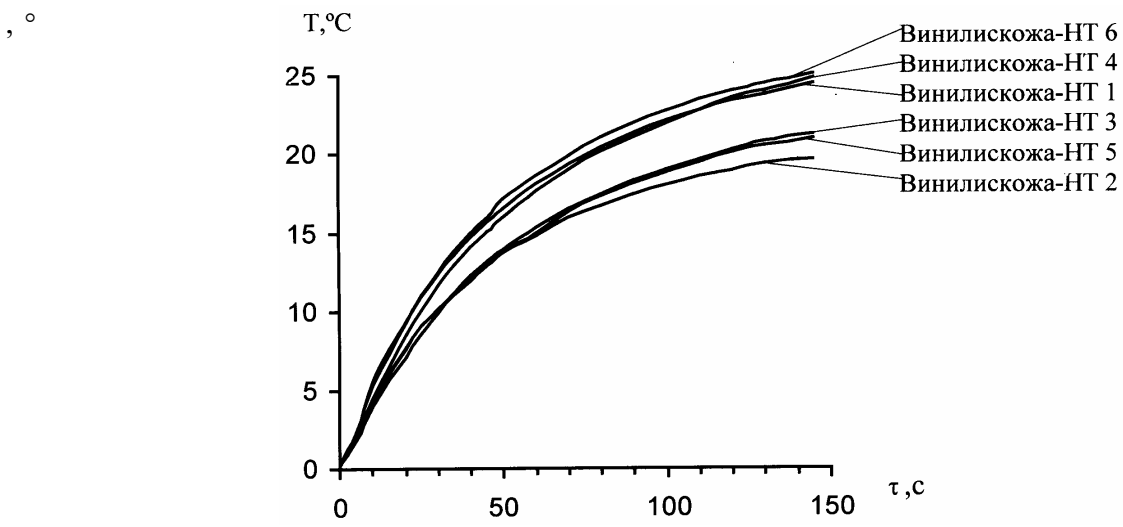
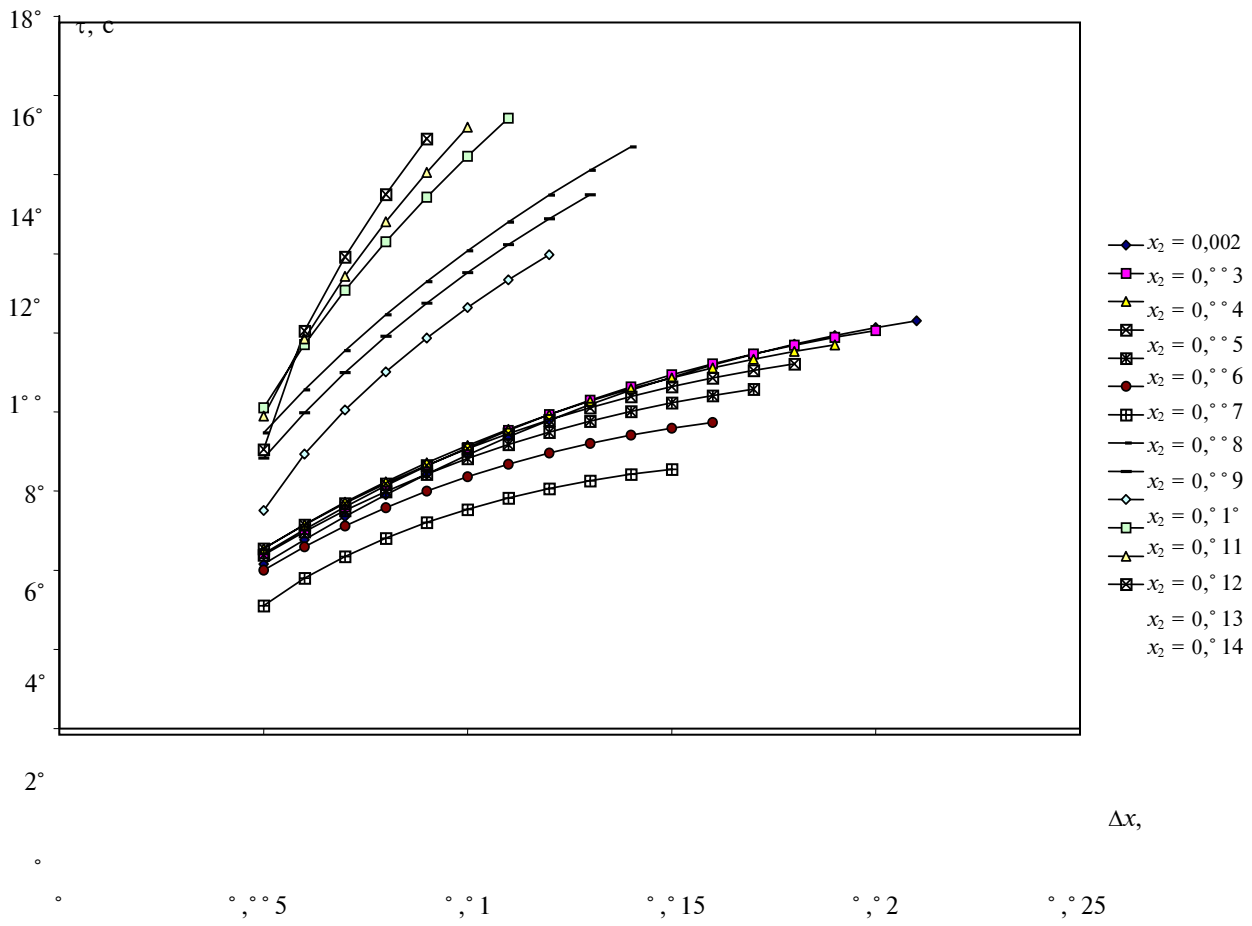


Рис. П5 Термограммы искусственных винилискож



**Рис. 3.9** График расчетной зависимости  $\tau_{\max} = f(\Delta x)$  в плоскости  $XOY$  подложки из рипора при  $x_2 = \text{const}$