

На правах рукописи

ТИМИРГАЛЕЕВ Урал Рустамович

РГБ ОД

- 1 ФЕВ 2000

**СИСТЕМА ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ
НА ОСНОВЕ
ОПТИМАЛЬНО-ИНВАРИАНТНЫХ ПРАВИЛ
ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ ГАЗОТУРБИННОГО
ДВИГАТЕЛЯ**

Специальность 05.13.14 —
Системы обработки информации и управления

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

УФА 2000

Работа выполнена на кафедре "Вычислительная техника и защита информации" Уфимского государственного авиационного технического университета

Научный руководитель: доктор технических наук,
профессор Л.Б. УРАЗБАХТИНА

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор Г.Н. ЗВЕРЕВ;
кандидат технических наук,
доцент В.Ф. ГАЛИАКБАРОВ

Ведущее предприятие: ОАО "Институт технологии и
организации производства" (г. Уфа)

Защита состоится "25" сентября 2000 г. в 14 часов на
заседании диссертационного совета К-063.17.03 в Уфимском государственном
авиационном техническом университете по адресу:

450000, г. Уфа, ул. К. Маркса, 12.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Уфимского
государственного авиационного технического университета.

Автореферат разослан "11" января 2000 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
д-р техн. наук, профессор



В.Н. Ефанов

0551.41-07с-5-05,0

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Оценка технического состояния (ТС) таких динамических объектов, как транспортные средства и энергетические установки, является неотъемлемой частью систем обеспечения их функционирования в искусственных исполнительской и управляющей средах на всех этапах их жизненного цикла, а также необходимым условием безопасности использования и защиты окружающей среды от последствий их отказов.

Принятие решений о работоспособности и правильности функционирования динамического объекта базируется на оценках его параметров, большую часть которых получают путем косвенных измерений, основанных на использовании априорной математической модели объекта. В этом случае модель объекта используется в качестве алгоритмической компоненты средства измерения. В силу сложности объекта, являющегося, как правило, многомерным, нелинейным, нестационарным объектом с распределенными параметрами, его математическая модель вследствие упрощений является параметрически и структурно недоопределенной. С другой стороны, состояние динамического объекта характеризуют параметры, методы измерения которых обладают существенной погрешностью, носящую случайный характер.

Поэтому качество систем обработки информации (СОИ) для оценки параметров динамического объекта в реальном масштабе времени, оцениваемое безусловным риском выхода погрешности оценки за требуемый допуск, остается неудовлетворительным, а принятие решений о ТС объекта производится в условиях неопределенности относительно ТС средств измерений его параметров, обусловленной несовершенством методов и средств получения информации. Это влечет за собой появление ошибок управления динамическим объектом и распознавания его ТС, наличие которых существенно повышает стоимость его жизненного цикла.

Для повышения качества СОИ, предназначенных для работы с объектами такого класса, возникает необходимость организации процессов устранения априорной неопределенности относительно ТС средств получения информации, используемых для решения задач управления динамического объекта и распознавания его ТС, а также решения проблемы выбора рациональной структуры и правил обработки информации, обеспечивающих работоспособное состояние средств получения информации в заданных условиях применения, то есть необходимость построения систем обработки информации как интеллектуальных.

Проблемы оценивания параметров сигналов на фоне помех и построения систем обработки информации с учетом случайностей и неопределенности рассмотрены в работах отечественных (В.В. Соболева, А.Н. Куликова, О.Н. Новоселова, А.Ф. Фомина, П.В. Новицкого) и зарубежных (Н. Винера, Р. Изермана, Р. Калмана, М. Кенуа, С. Стирнза, Дж. Тьюки, Б. Уидроу, П. Хьюбера, Б. Эфрона) ученых.

Эти работы позволили сформировать базу знаний правил обработки информации, пригодных для построения СООИ при наличии априорной информации о характере погрешностей средств получения информации.

Концепции построения интеллектуальных систем обработки информации на основе экспертных систем изложены в работах Э.И. Цветкова, В.И. Романова, Д.А. Поспелова. Они базируются преимущественно на использовании образцовых средств измерений, а также расчетных и экспериментальных методах устранения априорной неопределенности относительно инструментальной погрешности измерений.

В настоящее время информационная избыточность является основой для построения комплексных оптимально-инвариантных измерительных систем, широко используемых в практике авиационного приборостроения. В этой области известные работы Д.А. Браславского, А.М. Якубовича, И.Б. Челпанова, С.П. Дмитриева Ю.П. Иванова, направленные на создание систем обработки избыточной информации.

Вместе с тем, несмотря на значительный объем исследований в данной области, задача устранения неопределенности относительно погрешности косвенного метода измерения параметров динамического объекта остается практически нерешенной. Этому препятствует отсутствие механизма логического вывода для принятия решений относительно выбора правил обработки.

Перспективным направлением исследований для решения проблемы устранения неопределенности относительно погрешности метода измерения следует считать использование информационной и временной избыточности систем наблюдения за параметрами объекта для трансформации данных измерений параметров в знания о предметной области.

В связи с этим разработка системы принятия решений на основе оптимально-инвариантных правил оценки параметров газотурбинного двигателя является актуальной задачей для построения систем обработки информации.

Связь исследования с научными программами. Данная работа выполнена в соответствии с комплексной программой "Создание автоматизированной системы управления технологическим процессом стендовых испытаний газотурбинных двигателей на базе ПЭВМ типа РС", утвержденной Главным управлением автоматизации производства Госкомоборонпрома от 16.02.94; федеральной целевой программой "Интеграция", а также является результатом выполнения НИР по теме № ИРТ-ВТ-05-96-ОГ, выполненной на кафедре "Вычислительная техника и защита информации" Уфимского государственного авиационного технического университета.

Целью диссертационной работы является разработка системы принятия решений на основе оптимально-инвариантных правил обработки измерительной информации для обеспечения требуемой эффективности оценок параметров газотурбинного двигателя.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе поставлены и решены следующие задачи:

- 1) разработка инфологической и функциональной моделей системы обработки информации для оценки параметров динамического объекта в условиях неопределенности относительно технического состояния средств измерения;
- 2) разработка алгоритмов автоматической классификации технического состояния средств получения информации о параметрах динамического объекта;
- 3) наполнение и оптимизация базы знаний оптимально-инвариантных правил обработки информации и определение механизма логического вывода;
- 4) оценка эффективности функционирования системы принятия решений;
- 5) применение разработанных методов и средств обработки информации для оценки параметров газотурбинного двигателя при стендовых испытаниях.

Методы исследований. При решении поставленных задач были использованы методы теории оптимального оценивания, теории случайных процессов, теории корреляционного и статистического анализа, теории распознавания образов, теории идентификации, теории воздушно-реактивных двигателей. Проверка предлагаемых гипотез и эффективности интеллектуальных систем обработки информации проведена методом имитационного моделирования.

Научная новизна результатов определяется предложенной концепцией трехуровневой обработки избыточной информации в условиях априорной неопределенности на основе системы принятия решения относительно алгоритмов обработки избыточной информации путем автоматической классификации ТС средств получения информации и состоит в следующем:

1) показано, что устранение неопределенности относительно ТС средств получения информации обеспечивается разработкой структуры системы принятия решения, которая образуется множеством алгоритмов обработки информации и порядком их функционирования на априорном, ретроспективном и оперативном уровнях, на основе анализа совокупности базисных функций, в качестве которых предложено использовать корреляционные функции и законы распределения погрешностей результатов измерений;

2) обоснован базис диагностического пространства для автоматической классификации корреляционных функций стационарных случайных процессов в виде трех выборочных оценок их значений, полученных для последовательно увеличивающихся кратных интервалов корреляции, определенных в соответствии с требованиями к качеству классификации;

3) обоснован базис диагностического пространства для автоматической классификации случайных величин, распределенных по нормальному, равномерному распределению или распределению Коши в виде оценок дифференциальных энтропий соответствующих классов распределений;

4) установлено, что ядром инвариантных безыверсионных комплексных

СОИ для оценки параметров, является двухкомпонентная инвариантная система, в которой оценка текущего значения погрешности одного из измерительных каналов производится безынерционным преобразованием разностного сигнала для последующей ее сигнальной коррекции на основе статистического анализа, а требуемая эффективность оценки достигается последовательным увеличением кратности информационного резерва (алгоритм последовательной коррекции);

5) синтезированы решающие правила оценки текущих значений равномерно и нормально распределенных и распределенных по закону Коши погрешностей результатов измерений параметров динамического объекта.

6) предложен принцип выбора эффективного алгоритма обработки избыточной информации при нестационарных случайных составляющих погрешностей результатов измерения на основе оценки работоспособности и эффективности алгоритма в пространстве коэффициентов неравноточности.

Практическую значимость результатов представляют:

1) база знаний алгоритмов обработки избыточной информации, представленная в виде библиотеки подпрограмм с указанием границ работоспособности и областей предпочтения алгоритмов;

2) алгоритм автоматической классификации вида корреляционной функции стационарного случайного процессов, реализованный на основе нейронной сети и представленный математической моделью с определенными значениями весов семантических связей и активационными функциями;

3) алгоритм автоматической классификации вида закона распределения погрешностей результата измерения;

4) методика динамических измерений неконтролируемых параметров авиационного газотурбинного двигателя при стендовых испытаниях на неустановившихся режимах.

Реализация результатов работы. Результаты работы в виде методики оценки неконтролируемых параметров ГТД на основе комплексирования каналов косвенного измерения внедрены на предприятии ОАО "НИИТ" и в учебном процессе УГАТУ.

На защиту выносятся:

1) инфологическая и функциональная модель системы обработки информации для оценки параметров динамического объекта;

2) общий алгоритм функционирования системы принятия решения в условиях априорной неопределенности;

3) алгоритмы автоматической классификации технического состояния измерительных каналов параметров динамического объекта;

4) структура и состав базы знаний оптимально-инвариантных правил обработки информации для оценки параметров динамического объекта;

5) результаты исследований эффективности системы принятия решений в ус-

ловях априорной неопределенности относительно технического состояния измерительных каналов.

Апробация работы. Основные положения работы докладывались и обсуждались на X Юбилейной научно-технической конференции с участием зарубежных специалистов "Датчики и преобразователи информации систем измерения, контроля и управления" (Гурзуф, 1998г.), на Всероссийской научно-технической конференции "Методы и средства измерений физических величин" (Нижегород, 1998г.), на секции автоматизации производственных процессов международной научно-технической конференции, посвященной 50-летию УГНТУ "Проблемы нефтегазового комплекса России" (Уфа, 1998г.), на Международной научно-технической конференции "Методы и средства измерения в системах контроля и управления" (Пенза, 1999г.), на Международной молодежной научно-технической конференции "Интеллектуальные системы управления и обработки информации" (Уфа, 1999г.).

Публикации. Основные материалы диссертации опубликованы в 7 печатных работах, в том числе 4 статьи и 3 тезиса доклада.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, изложенных на 145 листах машинописного текста, и списка использованных источников из 104 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность проблемы, определена цель исследования, приведены основные научные положения и результаты, вынесенные на защиту.

В первой главе на основе анализа современного состояния проблемы повышения качества распознавания ТС динамического объекта показано, что ее решение связано с повышением точности оценки контролируемых и неконтролируемых параметров объекта на неустановившихся режимах работы на основе обработки избыточной информации, полученной методом косвенного измерения его параметров. Как объект контроля и управления, он может быть описан множеством обобщенных и локальных адекватных математических моделей. Таким образом, имеется возможность создания избыточных каналов косвенных измерений, а, следовательно, и повышения точности оценки параметров за счет взаимной коррекции погрешностей методов измерения (комплексирования).

При построении СОИ возможно несколько альтернативных вариантов ее реализации, что обуславливает существование задачи выбора решений, удовлетворяющих предъявленным требованиям. Различие между предполагаемыми и реальными условиями функционирования объекта и средств получения информации в условиях неполной или недостоверной информации приведет к тому, что техниче-

ские характеристики спроектированного варианта СОИ не будут удовлетворять требуемым в конкретных условиях функционирования.

Если СОИ решает задачи достоверного определения характера и параметров реакции СОИ на действие возмущающих факторов, а также ТС самого объекта, то появляется возможность адаптации СОИ к этим факторам с частичным или полным сохранением заданных показателей качества. Тогда качество работы СОИ будет определяться качеством классификации и распознавания ТС объекта и средств получения информации, а также полнотой базы знаний для выбора решающих правил, которая постоянно обновляется и дополняется, по мере необходимости, знаниями о предметной области. Получение новых знаний о предметной области возможно при накоплении и обработки данных о СОИ для последующей их трансформации в знания.

Для максимальной эффективности работы СОИ для оценки параметров динамических объектов, основой которой является система принятия решений, следует организовать, по крайней мере, три уровня обработки: априорный, ретроспективный и оперативный, а при необходимости и четвертый, прогностический. Сопоставление результатов обработки информации на перечисленных уровнях служит основой для обоснования выбора принятого варианта решения в данных условиях функционирования.

Предложен показатель целесообразности применения структурно-адаптивных систем на основе классификации и распознавания условий функционирования в виде функции риска, имеющего смысл вероятности выхода показателей качества за установленные требования, при этом целесообразность определяется условием, когда функция риска структурно-адаптивной системы не превышает функцию риска системы с постоянной структурой.

Во второй главе в результате проведенного анализа разработана инфологическая модель предметной области, которая включает следующие объекты: динамический объект; параметр объекта; условия функционирования объекта и СОИ; СОИ; измерительный канал; модель объекта; алгоритм обработки информации; контрольная точка; отчет. Перечисленные объекты описываются понятием "сущность" в терминах концепции "сущность-отношение". Для каждого из объектов определены первичные и вторичные атрибуты, выделение которых позволяет произвести однозначную идентификацию конкретного экземпляра сущности, установить взаимосвязи между различными сущностями. Инфологическая модель предметной области является основой для построения конкретной базы данных разрабатываемой СОИ.

В основу выбора решающих правил для оценки параметров динамического объекта был принят анализ спектральных характеристик оцениваемого параметра и погрешности результатов косвенных измерений. Во внимание приняты два основных случая:

1) спектры полезного сигнала и помехи находятся в различных частотных областях, тогда задача оценки параметров сводится к частотной фильтрации результатов измерения;

2) спектры полезного сигнала и помехи расположены в одной частотной области, в этом случае повышение качества оценки параметров СДО можно обеспечить совместной обработкой избыточной измерительной информации.

Если априорно известно, что спектры погрешностей результатов избыточных измерений лежат в различных частотных областях или несколько перекрывают друг друга, то совместная обработка результатов измерений будет основываться на частотной фильтрации сигналов. Если спектры погрешностей избыточных результатов измерений лежат в одном частотном диапазоне, то комплексирование осуществляется путем безынерционной обработки сигналов, основанной на использовании оптимально-инвариантных, адаптивных и робастных решающих правил. Следовательно, выбор алгоритмов обработки информации СДИ (см. рис. 1) осуществляется на основе текущего ТС комплекслируемых измерительных каналов, описываемого в базисе корреляционных функций и законов распределения погрешностей. Синтез структуры системы принятия решения включает разработку алгоритмов обработки информации и порядок их функционирования.

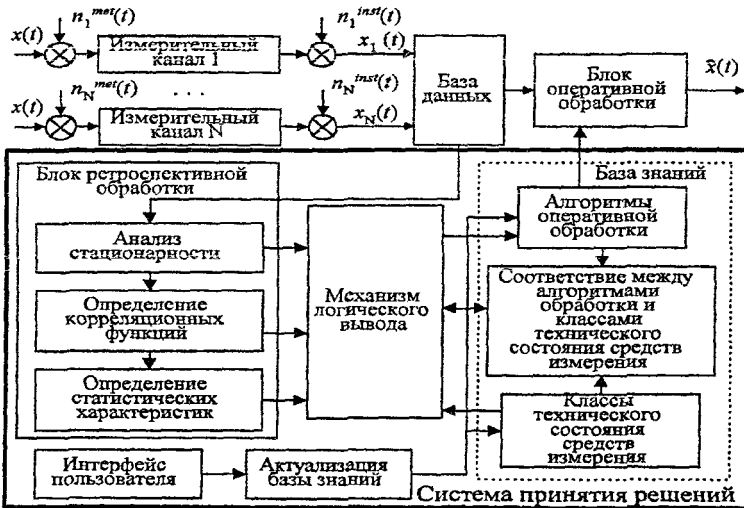


Рис. 1. Структурная схема СДИ

Предложен общий алгоритм работы СДИ, основанной на системе принятия решений относительно выбора оптимальных алгоритмов обработки в зависимости от ТС средств измерения:

Шаг 1. Определяется ТС средств измерения в пространстве базисных

функций, определяется стационарность случайных процессов;

Шаг 2. В БЗ производится поиск алгоритмов обработки, отвечающих предъявленным требованиям при данном ТС средств измерения;

Шаг 3. Если результаты поиска оказываются положительными, то система перестраивается согласно найденному в БЗ решению, в противном случае переходим к шагу 4;

Шаг 4. Моделируется текущее ТС средств измерения, определяется эффективность всех алгоритмов обработки, заложенных в базе знаний, по выбранному критерию;

Шаг 5. Осуществляется выбор решения, удовлетворяющего предъявленным требованиям, с занесением его в базу знаний, и настройка системы согласно найденного решения;

Шаг 6. Если решения, удовлетворяющего предъявленным требованиям, не существует, то выводится сообщение пользователю о данной ситуации, который вправе разрешить использовать наилучшее среди проанализированных решений, выявляя тем самым "белые пятна" и ставя перед исследователями новые задачи.

В условиях априорной определенности относительно характера погрешностей результатов измерения оптимальной оценкой измеряемого параметра по критерию минимума среднего квадрата обобщенной ошибки является условное математическое ожидание (байесовская оценка). В условиях априорной неопределенности используются робастные алгоритмы обработки: нахождение минимального значения, нахождение максимального значения, выбор среднего члена вариационного ряда, мгновенное весовое осреднение, осреднение, оценка полуразмаха выборки, визирование, цензурирование и т.д.

Все известные алгоритмы обработки избыточной информации при определенных условиях осуществляют оптимальную оценку. Таким образом, требуется осуществить выбор алгоритма обработки в зависимости от конкретных условий (ТС комплекслируемых измерительных каналов), при которых алгоритм обеспечивает оптимальную оценку. Эффективность комплексирования, оцениваемая условным риском выхода погрешности за допуск, при этом будет определяться вероятностью правильного распознавания ТС комплекслируемых измерительных каналов.

Необходимым условием восстановления параметров базисных функций, характеризующих ТС средств измерения, на ретроспективном уровне обработки является стационарность случайной составляющей погрешности результатов измерений. Поэтому, в базу знаний включены алгоритмы проверки случайных процессов на стационарность.

Оценка параметров объекта при использовании достоверной априорной информации о характере погрешностей избыточных результатов измерения на основе байесовской оценки является более эффективной, чем применение робастных ал-

горитмов обработки, но сопряжена со значительными трудностями аналитического решения при количестве измерительных каналов более двух. Поэтому был разработан алгоритм последовательной коррекции, основанный на двухкомпонентной комплексной системе, структурная схема которой приведена на рис.2. Основная идея совместной обработки избыточной информации заключается в последовательной коррекции погрешности результата измерения 1-го канала $x_1(i)$ в i -ый момент времени ее оценкой $\hat{n}_1(i)$, полученной из разности погрешностей результатов измерения 1-го и 2-го каналов $e_{12} = x_1(i) - x_2(i) = n_1(i) - n_2(i)$ с помощью решающего правила $f_1(e_{12}, p_1, p_2)$. При такой подходе алгоритм является инвариантным. Плотности распределения вероятностей погрешностей действующих в этих каналах p_1 и p_2 определены на ретроспективном уровне, а стационарность случайных составляющих установлена по результатам априорного и ретроспективного анализа.

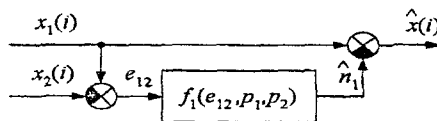


Рис. 2. Структурная схема двухкомпонентной системы

Число комплекслируемых измерительных каналов может последовательно увеличиваться для обеспечения заданного качества оценки параметра, при этом каждый добавляемый измерительный канал вносит все меньший вклад в повышение точности оценки. Основной задачей реализации алгоритма последовательной коррекции является синтез оптимальных решающих правил для оценки погрешности одного из каналов по разностному сигналу при известных плотностях распределения погрешностей.

Устранения ограничений по вычислительным и аппаратным ресурсам однопроцессорных платформ возможно разделением всех задач на группы, выполняемые на отдельных однопроцессорных платформах, объединенных единой вычислительной сетью.

В третьей главе рассмотрены вопросы оценки ТС средств измерения на априорном, ретроспективном и оперативном уровне.

Множество возможных спектральных и статистических характеристик погрешностей результатов измерения однозначно определяется методами и средствами измерений и физическими процессами, лежащими в основе функционирования объекта. Характерными для методов и средств измерения параметров ГТД являются спектральные плотности погрешностей результатов измерения, полученные в результате прохождения "белого" шума со спектральной плотностью $S_0(\omega)$ через формирующий фильтр с передающей функцией $W_\Phi(j\omega)$ до 3-го порядка включительно (см. табл.)

$$S(w) = S_0(w) \cdot |W_\Phi(jw)|^2, \quad R(\tau) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S(w) |W_\Phi(jw)|^2 e^{jw\tau} dw. \quad (1)$$

Для автоматической классификации соответствующих корреляционных функций предложено использовать различие в их образах, представленных в пространстве трех выборочных оценок их значений $R_1 = R(\tau_0)$, $R_2 = R(2\tau_0)$, $R_3 = R(3\tau_0)$, определенных для последовательно увеличивающихся кратных интервалов корреляции, значения которых устанавливаются в соответствии с требованиями к качеству классификации. Для автоматической классификации используется нейронная сеть в виде трехслойного персептрона.

Восстановление параметров корреляционной функции осуществляется либо методом наименьших квадратов, либо восстановлением параметров передаточной функции формирующего фильтра, учитывая связь между их параметрами, решая интегральное уравнение Фредгольма первого рода (1), в зависимости от класса корреляционной функции.

Закон распределения погрешности результата косвенного измерения параметра объекта является результатом сложных деформаций законов распределения погрешностей контролируемых параметров, входящих в математическую модель, лежащую в основе косвенного измерения. Восстановление вида закона распределения погрешности результата косвенного измерения аналитическими методами представляет собой трудоемкую математическую задачу, чтобы избежать вычислительных сложностей предложено установить несколько наиболее характерных классов законов распределения, обладающих существенным отличием формы этих распределений, которая влияет на структуру и параметры решающих правил.

По результатам анализа методов и средств измерения параметров ГТД обоснована целесообразность формализации описания погрешности результата косвен-

Классы ТС средств измерения в базисе корреляционных функций случайных составляющих погрешностей результатов измерения

Таблица

Класс	Передаточная функция $W_\Phi(s)$	Нормированная корреляционная функция $R_c(\tau)$
1	K	$\delta(\tau)$
2	$\frac{K}{s - \alpha_0}$	$e^{-\alpha_0\tau}$
3	$\frac{K}{(s - \alpha)^2}$	$e^{-\alpha\tau} (1 + \alpha\tau)$
4	$\frac{K}{(s - p_1)(s - p_2)}$, $p_{1,2} = \alpha \pm i\beta$	$e^{-\alpha\tau} (\cos(\beta\tau) + \gamma \sin(\beta\tau))$, $\gamma = \alpha/\beta$
5	$\frac{K}{(s - \alpha_0)(s - p_1)(s - p_2)}$, $p_{1,2} = \alpha \pm i\beta$	$De^{-\alpha_0\tau} + (1-D)e^{-\alpha\tau} (\cos(\beta\tau) + \gamma \sin(\beta\tau))$ $D = \frac{2\alpha(\alpha^2 + \beta^2)}{(2\alpha + \alpha_0)(\beta^2 + (\alpha - \alpha_0)^2)}$, $\gamma = \frac{\alpha_0^2\alpha - \alpha^3 + 3\alpha\beta^2}{\alpha_0^2\beta - \beta^3 + 3\alpha^2\beta}$

ного измерений тремя законами распределения: Гаусса, равномерного и Коши, поскольку распределение Коши описывает наличие в сигнале грубых ошибок измерений, приводящих к метрологическому отказу типа "сбой" с последующим самовосстановлением, равномерное распределение - наличие погрешностей квантования сигналов по уровню, существенно превосходящей по средней мощности остальные погрешности измерения.

Для разработки алгоритма автоматической классификации законов распределения по выборке, являющейся значениями сигнала в дискретные моменты времени, предложен детерминистский подход, основанный на распознавании вида закона распределения в диагностическом пространстве признаков, в качестве которых выбраны энтропии сигналов. Соотношения между величинами энтропий, определенных в соответствии с гипотезами, что закон распределения принадлежит к одному из распознаваемых классов распределений, будут зависеть от реальных характеристик сигнала и удовлетворять условиям

$$H_{\text{Гаусса}}^{\text{Гаусса}} < H_{\text{Равном.}}^{\text{Гаусса}} < H_{\text{Коши}}^{\text{Гаусса}}; H_{\text{Коши}}^{\text{Коши}} < H_{\text{Гаусса}}^{\text{Коши}} < H_{\text{Равном.}}^{\text{Коши}}; H_{\text{Равном.}}^{\text{Равном.}} < H_{\text{Гаусса}}^{\text{Равном.}} < H_{\text{Коши}}^{\text{Равном.}}, \quad (2)$$

где H_B^A - расчетное значение энтропии случайного сигнала распределенного по закону A при гипотезе о распределении по закону B .

Синтезированы оптимальные решающие правила для алгоритма последовательной коррекции при условии, что погрешности результатов измерения некоррелированы. В качестве критерия оптимизации был принят условный риск, имеющий смысл вероятности выхода погрешности за заданный допуск, при прямоугольной функции потерь.

При использовании трех классов законов распределения погрешностей результатов косвенных измерений возможны шесть вариантов решающих правил (на рис. 3 правила представлены графически; D , L , S - соответственно параметры нормального, равномерного распределения и распределения Коши):

1) погрешности обоих измерительных каналов распределены по нормальным законам (см. рис. 3а, где 1 - при $D_1 = D_2$; 2 - при $D_1 > D_2$; 3 - при $D_1 < D_2$)

$$\bar{n}_1 = \frac{D_1}{D_1 + D_2} \cdot e_{12}; \quad (3)$$

2) погрешность 1-го измерительного канала распределена по закону Коши, а погрешность 2-го измерительного канала - по нормальному закону с параметром $D_2 = 0.04$ (см. рис. 3б, где 1 - при $S_1 = 0.2$; 2 - при $S_1 = 0.06$; 3 - при $S_1 = 0.6$)

$$\bar{n}_1 = p_0, \quad |p_0| = \min(|p_1|, |p_2|, |p_3|), \quad (4)$$

где p_1, p_2, p_3 - действительные корни уравнения

$$p^3 - e_{12}p^2 + (2D_2 + S_1^2)p - e_{12}S_1^2 = 0;$$

3) погрешности обоих измерительных каналов распределены по законам Коши (см. рис. 3в, где 1 - при $S_1 = S_2$; 2 - при $S_1 > S_2$; 3 - при $S_1 < S_2$)

$$\bar{n}_1 = p_0, \quad \begin{cases} |p_0| = \max(|p_1|, |p_2|, |p_3|), & \text{если } S_1 > S_2 \\ |p_0| = \min(|p_1|, |p_2|, |p_3|), & \text{если } S_1 < S_2 \end{cases} \quad (5)$$

где p_1, p_2, p_3 - действительные корни уравнения

$$2p^3 - 3e_{12}p^2 + (S_1^2 + S_2^2 + e_{12}^2)p - S_1^2 e_{12} = 0;$$

4) погрешности обоих измерительных каналов распределены по равномерным законам (см. рис. 3г, где 1 - при $L_1 = L_2$; 2 - при $L_1 > L_2$; 3 - при $L_1 < L_2$)

$$n_1 = \begin{cases} 0.5 \cdot (e_{12} - \text{sign}(e_{12})L_2 - L_1), & \text{если } |L_2 - L_1| < |e_{12}| \leq L_2 + L_1 \\ z, & \text{если } |e_{12}| \leq |L_2 - L_1| \text{ и } L_2 < L_1 \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}; \quad (6)$$

5) погрешность 1-го измерительного канала распределена по равномерному закону с параметром $L_1 = 0.6$, а погрешность 2-го измерительного канала - по нормальному закону (см. рис. 3д, где 1 - при $D_2 = 0.04$; 2 - при $D_2 = 0.0001$; 3 - при $D_2 = 0.25$)

$$\bar{n}_1 = e_{12} - \sqrt{\frac{D_2}{2\pi}} \cdot \left(e^{-\frac{(L_1 - e_{12})^2}{2D_2}} - e^{-\frac{(L_1 + e_{12})^2}{2D_2}} \right) \cdot \left(\Phi_0\left(\frac{L_1 - e_{12}}{\sqrt{2D_2}}\right) + \Phi_0\left(\frac{L_1 + e_{12}}{\sqrt{2D_2}}\right) \right)^{-1}, \quad (7)$$

где $\Phi_0(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x \exp\left(-\frac{1}{2}t^2\right) dt$;

6) погрешность 1-го измерительного канала распределена по равномерному закону с параметром $L_1 = 0.6$, а погрешность 2-го измерительного канала - по закону Коши (см. рис. 3е, где 1 - при $S_2 = 0.01$; 2 - при $S_2 = 0.2$; 3 - при $S_2 = 0.5$)

$$\bar{n}_1 = e_{12} + \frac{S_2}{2} \ln \left(\frac{S_2^2 + (L_1 - e_{12})^2}{S_2^2 + (L_1 + e_{12})^2} \right) \left(\arctg\left(\frac{L_1 - e_{12}}{S_2}\right) + \arctg\left(\frac{L_1 + e_{12}}{S_2}\right) \right)^{-1}. \quad (8)$$

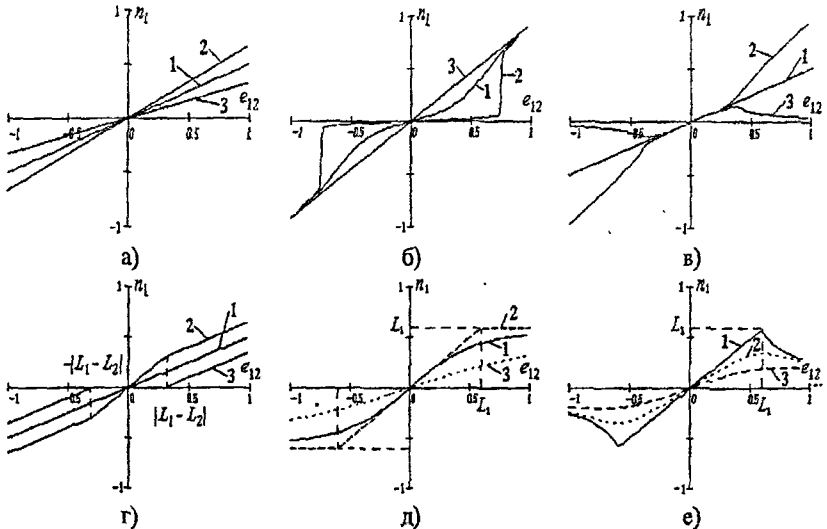


Рис. 3. Оптимальные оценки погрешности, полученные из разностного сигнала

Для выбора алгоритмов обработки на оперативном уровне было предложено классифицировать ТС средств измерения в базисе диагностического пространства

$$\left\{ \frac{n_2}{n_1}, \frac{n_3}{n_1} \right\} = \{ \xi_2, \xi_3 \}, \quad (9)$$

где n_i - текущее значение погрешности результата измерения i -го канала.

В результате исследования эффективностей алгоритмов обработки информации в данном диагностическом пространстве по критерию минимума погрешности результата обработки получены области предпочтения (см. рис.4), анализ которых показал, что все возможные измерительные ситуации могут быть эффективно решены использованием четырех алгоритмов: мгновенного апостериорного взвешивания (область 1), выбора медианы (область 2), выбора минимального или максимального значения (область 3 или 4 в зависимости от знака n_1).

Показано, что распознавание класса ТС средств измерения на оперативном уровне в предложенном базисе не может быть обеспечено с высокой достоверностью вследствие объективного существования ошибки оценки текущих погрешностей результатов измерения. Поэтому выбор алгоритмов обработки следует осуществлять по результатам обработки априорного и ретроспективного уровней.

В четвертой главе приведены и результаты исследований эффективности алгоритмов обработки информации.

Поскольку неравноточность комплекслируемых измерительных каналов существенно влияет на эффективность оценки алгоритма обработки информации, оцениваемую по критерию минимума среднеквадратической ошибки, введены показатели неравноточности комплекслируемых каналов в виде коэффициентов неравноточности, равных отношению текущих дисперсий измерительных каналов к суммарной дисперсии, действующей в этих каналах, что позволило обеспечить выбор эффективного алгоритма при нестационарных случайных составляющих погрешностей результатов измерения. При исследовании получены области предпочтения алгоритмов обработки информации в этом диагностическом пространстве (см. рис. 5). Области диагностического пространства 1, 2 и 3 соответствуют областям эффективности использования алгоритма осреднения, алгоритма мгновенного апостериорного взвешивания и алгоритма выбора медианы.

Проведены сравнительные исследования эффективности алгоритма последо-

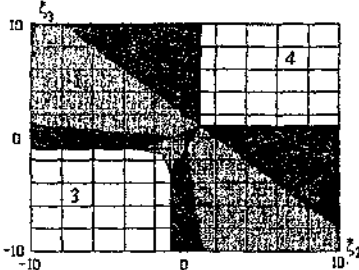


Рис. 4

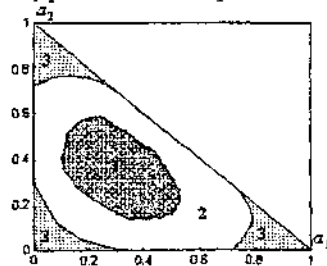


Рис. 5

вательной коррекции и алгоритмов оптимального взвешивания и выбора медианы по критерию безусловного риска, имеющего смысл вероятности выхода погрешности результата совместной обработки за допуск, при различных сочетаниях законов распределения погрешностей комплекслируемых каналов.

По результатам исследования эффективностей алгоритмов обработки избыточной информации в различных диагностических пространствах разработан механизм логического вывода (см. рис. 6) с использованием оптимально-инвариантных решающих правил на основе классификации ТС средств измерения по результатам трехуровневой обработки информации.

Для оценки неконтролируемых параметров ГТД использовались косвенные измерения, основанные на математических моделях физических процессов в двигателе. На рис. 7 и рис. 8 приведены результаты оценки температуры заторможенного газа перед турбиной и температуры заторможенного воздуха за компрессором, полученные совместной обработкой (1 – разработанной комплексной системой; 2 – алгоритмом оптимального взвешивания; 3 – алгоритмом мгновенного апостериорного взвешивания; 4 – алгоритмом выбора медианы) результатов косвенных измерений, основанных на уравнениях: теплового баланса в камере сгорания; адиабатического расширения газа на турбине ГТД; баланса моментов на роторах вентилятора и компрессора в виде вероятности выхода погрешности за допуск.

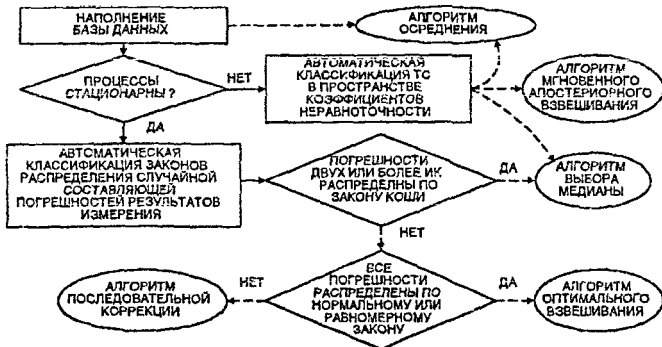


Рис. 6. Механизм логического вывода

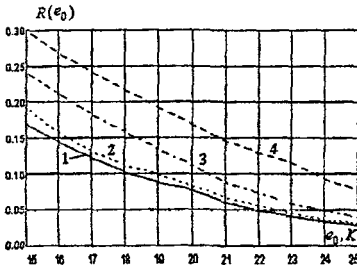


Рис. 7

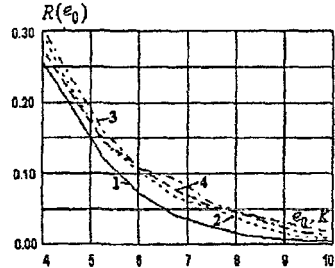


Рис. 8

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Повышение эффективности функционирования системы обработки информации для оценки параметров динамических объектов, оцениваемая безусловным риском выхода погрешности за допускаемые пределы, в условиях априорной неопределенности относительно ее технического состояния обеспечивается трехуровневым анализом совокупности базисных функций, в качестве которых целесообразно использовать корреляционные функции и функции плотности распределения вероятности погрешностей результатов измерений.

2. Разработана инфологическая и функциональная модели трехуровневой системы обработки информации с априорным, ретроспективным и оперативным уровнями, определяющими структуру баз данных и знаний и общий алгоритм функционирования системы; показано, что для интеллектуализации процессов обработки информации в состав функциональных задач должны быть включены задачи автоматической классификации базисных функций.

3. Показано, что классификация корреляционных функций может быть осуществлена в пространстве трех выборочных оценок значений корреляционных функций, определенных для последовательно увеличивающихся кратных интервалов корреляции, устанавливаемых в соответствии с требованиями к качеству классификации; разработан алгоритм автоматической классификации на основе обучаемой нейросети, обеспечивающий правильное распознавание пяти классов с вероятностями $P_1=1.00$, $P_2=1.00$, $P_3=0.96$, $P_4=0.89$ и $P_5=0.93$.

4. Показано, что техническое состояние средств измерений может быть определено на множестве законов распределения вероятности случайных погрешностей результата измерений, включающем распределения Коши, Гаусса и равномерное распределение; разработан алгоритм безошибочной классификации этих законов распределений в диагностическом пространстве их дифференциальных энтропий.

5. Получены оптимально-инвариантные правила для оценки параметров динамических объектов в условиях априорной определенности относительно базисных функций; показано, что знания об эффективности оптимально-инвариантных решающих правил могут быть представлены границами их эффективности и работоспособности в пространстве параметров базисных функций, что позволяет оптимизировать базу знаний и определить механизм логического вывода для системы принятия решений.

6. Оценка эффективности использования разработанной системы принятия решений показала, что применение механизма логического вывода, основанного на классификации технических состояний средств измерений, и включение в базу знаний синтезированных оптимально-инвариантных правил обработки информации позволяет обеспечить снижение вероятности выхода погрешности за допуск в

1.1...1.9 раза (при допустимой погрешности 1...3% от измеряемой величины); например, при оценке температуры заторможенного газа перед турбиной ГТД на неустановившихся режимах в 1.1...1.7 раза; при оценке температуры заторможенного воздуха за компрессором - в 1.4...1.9 раза.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Васильев В.И., Тимиргалеев УР., Уразбахтина Л.Б. Классификация технического состояния комплексных измерительных каналов //Сборник материалов X Юбилейной научно-технической конференции "Датчики и преобразователи информации систем измерения, контроля и управления" с участием зарубежных специалистов. Под редакцией профессора В.Н. Азарова. В 2-х частях. -М.: Изд-во МГИЭМ, 1998. -С.409-411.

2. Уразбахтина Л.Б., Тимиргалеев УР. Алгоритмы принятия решения в задачах проектирования измерительных каналов на основе временного и информационного резервирования //Тез. докл. Всероссийской научно-технической конференции "Методы и средства измерений физических величин" (В 10 частях). -Часть 8. - Нижний Новгород: Изд-во НГТУ, 1998. -С.18.

3. Тимиргалеев УР., Щетинкин В.В. Структура базы знаний автоматизированных систем испытаний газотурбинных двигателей //Тез. докл. Всероссийской научно-технической конференции "Методы и средства измерений физических величин" (в 10 частях). -Часть 8. -Нижний Новгород: Изд-во НГТУ, 1998. -С.19.

4. Уразбахтина Л.Б., Тимиргалеев УР., Щетинкин В.В. Концептуальная модель для проектирования интеллектуального измерительного канала //Материалы секции автоматизации производственных процессов международной научно-технической конференции "Проблемы нефтегазового комплекса России". - Т.1. - Уфа: Изд-во УГНТУ, 1998. - С.174-178.

5. Уразбахтина Л.Б., Тимиргалеев УР., Щетинкин В.В. Функциональная организация интеллектуального комплексного измерительного канала //Материалы секции автоматизации производственных процессов международной научно-технической конференции "Проблемы нефтегазового комплекса России". - Т.1. - Уфа: Изд-во УГНТУ, 1998. -С.169-173.

6. Тимиргалеев УР. Система оценки технических параметров изделия на основе информационной избыточности //Материалы Международной научно-технической конференции "Методы и средства измерения в системах контроля и управления" - Пенза: Приволжский Дом знаний, 1999. -С.99-101.

7. Тимиргалеев УР. База знаний интеллектуальных систем оценки параметров сложных динамических объектов //Тез. докл. международной молодежной научно-технической конференции "Интеллектуальные системы управления и обработки информации". - Уфа: Изд-во УГАТУ, 1999. -С.17.