

**А.Г. ДМИТРИЕНКО, А.В. БЛИНОВ, Д. В. ВОЛКОВ, В.С. ВОЛКОВ.**

**ПОД РЕДАКЦИЕЙ Д.И. НЕФЕДЬЕВА, Б.В. ЦЫПИНА.**

**ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА. ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ И  
ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ТЕХНИЧЕСКИ  
СЛОЖНЫХ ОБЪЕКТОВ**

**Учебное пособие**

**Пенза, 2013**

УДК 681.02

0-75

**В учебном пособии изложены принципы построения и формализованные модели систем мониторинга и контроля технических объектов; рассматриваются задачи распознавания и методы прогнозирования остаточного ресурса технически сложных объектов.**

Учебное пособие подготовлено на кафедре «Информационно-измерительная техника» и предназначено для подготовки студентов по направлению 200100 – «Приборостроение» и целевой подготовки студентов в области ракетно-космического приборостроения. Пособие также может быть полезно аспирантам и специалистам, работающим в области мониторинга и контроля технических объектов.

Ил 9.

Авторы: А.Г. Дмитриенко, *А.В. Блинов, Д.В. Волков, В.С. Волков.*

*Под редакцией Д.И. Нефедьева, Б.В. Цыпина.*

**Рецензенты:**

зам. начальника УНЦ-37 ОАО "НИИФИ", д.т.н., доцент А.А. Трофимов,

профессор кафедры "Приборостроение" ФГБОУ ВПО ПГУ, д.т.н., профессор В.П. Фандеев.

## **Предисловие**

В современных условиях технически сложные объекты (ТСО) различного, в том числе специального назначения, должны отвечать комплексу требований по обеспечению работоспособности в условиях воздействия влияющих факторов, агрессивных сред, электромагнитных полей и т.д. Вместе с тем элементы ТСО непрерывно усложняются функционально, что требует высокой степени интеграции механических, электронных, оптических элементов силовых и информационных подсистем. Все это требует непрерывного мониторинга и контроля параметров ТСО для обеспечения надлежащего функционирования, что, в свою очередь, требует создания комплексных систем мониторинга и контроля (СМиК), в задачи которых входит получение информации и параметрах функционирования ТСО в реальном масштабе времени и анализ этой информации для определения текущего состояния объекта.

В главе 1 учебного пособия даются основные термины и определения технической диагностики и формулируется задача контроля технического состояния ТСО.

В главе 2 дается постановка задачи распознавания текущего состояния объекта, приводятся статистические методы распознавания, подробно рассмотрен метод Байеса.

Глава 3 посвящена оценке остаточного ресурса ТСО. Приводится алгоритм функционирования СМиК для определения остаточного ресурса, рассматриваются условия возможности прогнозирования остаточного ресурса, подробно рассматриваются методы прогнозирования остаточного ресурса при монотонном и немонотонном изменении контролируемых параметров.

В главе 4 рассматривается функционирование СМиК на уровне формализованной модели, а также проводится сравнительный анализ альтернативных решений СМиК ТСО.

В главе 5 определяются принципы построения типовых интеллектуализированных СМиК ТСО.

Материал пособия обеспечивает знакомство с основами технического диагностирования, прогнозирования технического состояния ТСО и принципами построения СМиК с использованием достижений современной информационно-измерительной техники и технологии.

# **Глава 1 Разработка требований к многомерным моделям систем мониторинга и контроля состояния ТСО**

## **1.1 Основные термины и определения технической диагностики**

В области технического контроля и технической диагностики имеется ряд действующих нормативных документов [1-4], регламентирующих основные термины и определения. Несмотря на это имеются расхождения в трактовке некоторых терминов, используемых в различных источниках (как в самих нормативных документах, так и в справочниках, монографиях, учебных пособиях). Для устранения возможной неоднозначности приведем определения основных терминов. Причем, при наличии различий в трактовке, предпочтение будем отдавать более поздним документам [4].

Надежность есть свойство объекта сохранять во времени значения всех параметров, характеризующих способность этого объекта выполнять требуемые функции.

**Надежность** — комплексное свойство, которое в зависимости от назначения объекта и условий его эксплуатации может проявляться через безотказность, долговечность, ремонтпригодность, сохраняемость.

**Безотказность** — это свойство объекта непрерывно сохранять работоспособное состояние в течение установленного времени или установленной наработки.

**Долговечность** — это свойство объекта сохранять работоспособное состояние до наступления предельного состояния.

**Ремонтпригодность** есть свойство объекта, заключающееся в приспособлении к предупреждению и обнаружению причин возникновения отказов, повреждений и устранению их последствий путем проведения ремонтов и технического обслуживания.

**Техническое состояние** — это состояние оборудования, которое характеризуется в определенный момент времени, при определенных условиях внешней среды значениями параметров, установленными технической документацией на объект.

Таким образом, техническое состояние — это совокупность подверженных изменению в процессе производства или эксплуатации свойств объекта, характеризуемая в определенный момент признаками, установленными в технической документации на этот объект. Признаками

технического состояния могут быть области значений качественных и количественных характеристик свойств объекта. В зависимости от фактических значений признаков видами технического состояния могут быть: исправность (неисправность), работоспособность (неработоспособность), правильное функционирование (неправильное функционирование).

**Исправность** – состояние, при котором объект соответствует всем требованиям, установленным нормативно-технической документацией.

**Неисправность** – состояние, при котором объект не соответствует хотя бы одному из требований нормативно-технической документации.

**Работоспособность** – состояние, при котором объект способен выполнять заданные функции, сохраняя значения заданных выходных основных параметров в пределах, установленных нормативно-технической документацией. При этом остальные характеристики могут не соответствовать требованиям (наличие коррозии, нарушение лакокрасочного покрытия и т.п.). Следовательно, работоспособный объект может быть неисправным. Исправный объект всегда работоспособен.

**Неработоспособность** – состояние, при котором значение хотя бы одного заданного параметра, определяющего способность объекта выполнять заданные функции, не соответствует требованиям нормативно-технической документации. Переход изделия из работоспособного в неработоспособное состояние в заданных условиях применения называется отказом. При одном и том же существующем техническом состоянии объект может быть работоспособным для одних условий применения и неработоспособным для других. Каждый объект в общем случае может находиться в одном из многих работоспособных и неработоспособных состояний. Число неработоспособных состояний объекта определяется числом возможных отказов элементов и их групп (сочетаний).

Правильное функционирование означает, что применяемый по назначению объект в текущий момент времени выполняет предписанный алгоритм функционирования. Объект может находиться в таком неработоспособном состоянии, при котором он правильно функционирует в одних режимах работы и неправильно в других. Работоспособный объект правильно функционирует во всех режимах работы.

**Техническое диагностирование** – определение технического состояния объекта. Задачами технического диагностирования являются: контроль технического состояния, поиск места и определение причин отказа (неисправности), прогнозирование технического состояния. Термин

«техническое диагностирование» применяют в наименованиях и определениях понятий, когда решаемые задачи технического диагностирования равнозначны или основной задачей является поиск места и определение причин отказа (неисправности). В случаях, когда основной задачей технического диагностирования является определение вида технического состояния, применяется термин «контроль технического состояния».

**Контроль технического состояния** – это процесс определения соответствия параметров объекта требованиям технической документации и определение на этой основе одного из заданных видов технического состояния в данный момент времени. Видами технического состояния являются, например, исправное работоспособное, неисправное, неработоспособное и т.д.

**Объект контроля** – это изделие и (или) его составные части, подлежащие (подвергаемые) диагностированию (контролю).

**Диагностический (контролируемый) параметр** – это параметр объекта, используемый при его диагностировании (контроле).

**Прогнозирование технического состояния** – определение технического состояния объекта с заданной вероятностью на предстоящий интервал времени. Целью прогнозирования технического состояния может быть определение с заданной вероятностью интервала времени (ресурса), в течение которого сохранится работоспособное (исправное) состояние объекта и вероятности сохранения работоспособного (исправного) состояния объекта на заданный интервал времени.

**Предельным** называют такое состояние объекта, при котором возникает необходимость во временном или окончательном прекращении применения объекта по назначению. Переход объекта из работоспособного состояния в неработоспособное называют отказом, а переход в предельное состояние — исчерпанием ресурса.

**Критерий предельного состояния** – признак или совокупность признаков предельного состояния объекта, установленные нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документацией. В зависимости от условий эксплуатации для одного и того же объекта могут быть установлены два и более критерия предельного состояния.

**Ресурс** – суммарная наработка объекта от начала его эксплуатации или ее возобновления после ремонта до перехода в предельное состояние.

**Гамма-процентный ресурс** – суммарная наработка, в течение которой объект не достигнет предельного состояния с вероятностью  $\gamma$ , выраженной в процентах.

**Остаточный ресурс** – суммарная наработка объекта от момента контроля его технического состояния до перехода в предельное состояние.

**Срок службы** – календарная продолжительность эксплуатации от начала эксплуатации объекта или ее возобновления до перехода в предельное состояние.

**Гамма-процентный срок службы** – календарная продолжительность эксплуатации, в течение которой объект не достигнет предельного состояния с вероятностью  $\gamma$ , выраженной в процентах.

**Остаточный срок службы** – календарная продолжительность эксплуатации объекта от момента контроля его технического состояния до перехода в предельное состояние.

**Наработка** – продолжительность или объем работы объекта.

**Критерий отказа** – признак или совокупность признаков нарушения работоспособного состояния объекта, установленные в нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации.

**Критерии отказов** и предельных состояний устанавливаются индивидуально для каждого вида оборудования техническими условиями или нормативно-технической документацией

**Ресурсный отказ** – отказ, в результате которого объект достигает предельного состояния.

**Внезапный отказ** – отказ, характеризующийся скачкообразным изменением значений одного или нескольких параметров объекта.

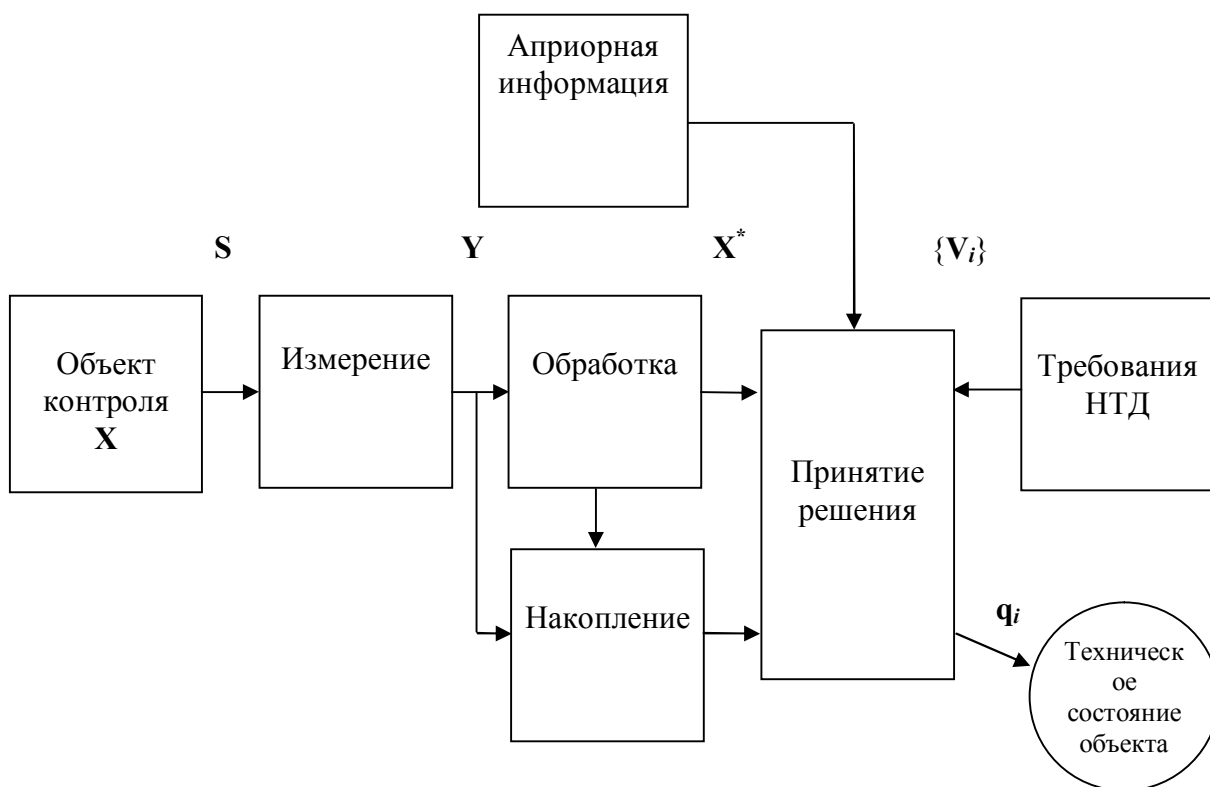
**Постепенный отказ** – отказ, возникающий в результате постепенного изменения значений одного или нескольких параметров объекта.

**Деградационный отказ** – отказ, обусловленный естественными процессами старения, изнашивания, коррозии и усталости при соблюдении всех установленных правил и (или) норм проектирования, изготовления и эксплуатации.

**Критичность отказа** – совокупность признаков, характеризующих последствия отказа.

## 1.2 Формулирование задачи контроля технического состояния технически-сложных объектов ракетно-космической техники

С самых общих позиций задача контроля и мониторинга технического состояния состоит в распознавании текущего состояния объекта в условиях ограниченной информации и может быть представлена в виде следующих составляющих (Рис.1.1.).



$X$  – вектор контролируемых параметров,  
 $S$  – вектор измеряемых параметров (сигналов),  
 $Y$  – вектор результатов измерения,  
 $X^*$  – вектор восстановленных контролируемых параметров,  
 $\{V_i\}$  – набор векторов ограничений на контролируемые параметры для каждого технического состояния,  
 $q_i$  – одно из возможных технических состояний объекта.

Рис. 1.1 Структура задачи технического контроля

**Объект контроля (ТКО)** характеризуется вектором контролируемых параметров  $X = (x_1, x_2, \dots, x_{N_x})$ , где  $N_x$  – количество контролируемых



параметров. Сюда относятся те параметры, на основании значений которых затем принимается решение о текущем техническом состоянии объекта. В общем случае контролируемые параметры недоступны для непосредственного измерения, а определяются косвенно на основании доступного для непосредственного измерения вектора измеряемых параметров (сигналов)  $\mathbf{S} = (s_1, s_2, \dots, s_{N_s})$ , где  $N_s$  – количество измеряемых параметров, при этом в общем случае  $N_x \neq N_s$ .

В частном случае, когда один или несколько контролируемых параметров доступны для непосредственного измерения, соответствующие компоненты векторов  $\mathbf{X}$  и  $\mathbf{S}$  будут совпадать (по значению). Компонентами векторов  $\mathbf{X}$  и  $\mathbf{S}$  могут быть скаляры (числа) или функции времени и (или), возможно, других переменных. С точки зрения упрощения процедур контроля желательно, чтобы контролируемые параметры были скалярами, однако не всегда это возможно. Например, такие параметры как частотная характеристика или импульсный отклик линейной системы по своей сути являются функциями. Для упрощения их иногда, если возможно, заменяют набором небольшого количества числовых характеристик (частоты среза, уровень пульсаций, крутизна фронта и т.п.).

Кроме того, возможны ситуации, когда некоторый скалярный контролируемый параметр определяется косвенно посредством измеряемого параметра в виде одной или нескольких функций. Это имеет место, например, в случае ультразвуковой дефектоскопии, когда контролируемый параметр определяется на основе совместной обработки излучаемых и отраженных акустических колебаний в нескольких точках объекта, представленных измеряемыми сигналами в виде функций времени.

Процесс **измерения** заключается в преобразовании (с помощью датчиков, преобразователей и других компонентов измерительного канала) вектора измеряемых параметров  $\mathbf{S}$  в вектор результатов измерений  $\mathbf{Y} = (y_1, y_2, \dots, y_{N_y})$ , где  $N_y$  – количество результатов, которое обычно совпадает с  $N_s$ . Кроме того, соответствующие компоненты векторов  $s_i$  и  $y_i$  также обычно имеют одинаковую форму: оба скаляры или оба функции. Но могут быть случаи, когда они имеют различную форму.

Например, если  $s_i$  – функция, то в качестве соответствующего результата измерения может быть скаляр  $y_i$  (среднеквадратическое, максимальное или иное числовое значение измеряемого сигнала). Наиболее общей характерной особенностью процесса измерения является невозможность получения абсолютно точных результатов, что обычно характеризуется числовыми и иными характеристиками погрешностей

измерения. Погрешности определяются как методами измерения, так и техническими характеристиками измерительных каналов, могут варьироваться в некоторых пределах, но не могут быть устранены полностью. Задача технического контроля характеризуется тем, что требования к точности измерений, как правило, не очень высоки, поскольку в итоге на основании результатов измерения принимаются довольно «грубые» решения типа попадания в допусковые зоны или оценки некоторой метрики относительно области предельных состояний.

Процесс **обработки** состоит в том, что решается задача обратная процессу измерения, а именно, на основании вектора результатов измерения  $Y$  находится оценка  $X^*$  вектора контролируемых параметров. То есть происходит «реконструкция» контролируемых параметров по информации, содержащейся в результатах измерения. В случае непосредственного измерения контролируемых параметров на этом этапе обычно выполняются процедуры фильтрации, нормировки, шкалирования и т.п.

В случае косвенного измерения, в дополнение к указанным, требуются более сложные процедуры обработки. Они могут быть основаны на решении алгебраических и интегральных уравнений, обращении матриц и т.п., которые зачастую являются некорректными в математическом смысле (из-за неустойчивости обратных задач к погрешностям исходных данных) и требуют специальных алгоритмов нахождения устойчивых решений. Эта проблема несколько «смягчается» в области контроля технического состояния в виду уже упомянутой выше особенности последующего использования данных на этапе принятия решения.

Процесс **накопления** обеспечивает сохранность уже полученных в предшествующие моменты времени функционирования системы контроля данных для учета их при принятии решения в текущий момент времени. Сохраняться могут как предшествующие результаты измерений  $Y$ , так и предшествующие оценки вектора контролируемых параметров  $X^*$ . Состав и объем данных подлежащих хранению, а также длительность их хранения определяются требованиями к мониторингу технического состояния объекта с целью повысить эффективность принятия решения о текущем техническом состоянии объекта и прогнозе этого состояния на будущее. Для сложных объектов, характеризующихся большой размерностью векторов контролируемых параметров и векторов результатов измерений, весьма актуальной является задача сокращения объема сохраняемых данных. Основой для этого могут служить различные методы устранения избыточности в данных, в том числе методы обратимого и необратимого (с

заданной точностью восстановления) сжатия измерительных данных.

Блок **«априорная информация»** отражает тот факт, что до реализации процесса контроля технического состояния имеется информация как о самом объекте контроля – в виде математических, алгоритмических или иных моделей, так и о способах принятия решения относительно текущего состояния объекта. Эта информация используется как на этапе проектирования системы контроля (для выбора измеряемых параметров и их характеристик, формулирования задач обработки и алгоритмов их решения), так и на этапе функционирования путем использовании соответствующих данных об объекте в процессе принятия решения о текущем состоянии и прогноза будущих состояний.

Блок **«требования НТД»** символизирует наличие нормативной информации относительно объекта контроля, содержащейся в его нормативно технической документации, которая отражает установленные изготовителем виды технического состояния объекта и параметры их определяющие. С точки зрения системы контроля нормативная информация задается набором векторов ограничений  $\{V_1, V_2, \dots, V_{N_q}\}$ , где  $N_q$  – количество возможных технических состояний  $q_1, q_2, \dots, q_{N_q}$  объекта контроля. Таким образом, для каждого технического состояния имеется свой вектор ограничений. Каждый вектор ограничений  $V_i$  содержит столько компонент, сколько имеется контролируемых параметров ( $N_x$ ), то есть  $V_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iN_x})$ . При этом каждая компонента  $v_{ij}$  в общем случае является вектором, содержащим набор числовых данных, определяющих допустимые значения  $j$ -го контролируемого параметра для  $i$ -го технического состояния. В простейшем случае, когда  $i$ -е состояние определяется на основании допускового контроля по  $j$ -му контролируемому параметру, компонента вектора ограничений  $v_{ij}$  будет двухкомпонентным вектором, содержащим два числа: верхнюю и нижнюю границы допуска.

Процедура **принятия решения** является завершающей в общем процессе контроля технического состояния объекта. Суть этой процедуры заключается в том, что на основании нормативной информации о возможных технических состояниях объекта в виде набора векторов  $\{V_1, V_2, \dots, V_{N_q}\}$  с одной стороны, и на основании оценки текущего состояния объекта в виде вектора  $X^*$  восстановленных контролируемых параметров с другой стороны, принимается решение о том, в каком из состояний  $q_1, q_2, \dots, q_{N_q}$  находится объект в данный момент времени. При этом используется априорная информация об объекте и информация,

накопленная в процессе контроля в предшествующие моменты времени. Для решения этой задачи используются методы теории распознавания и теории принятия решений. Кроме этой основной задачи на данном этапе может на основании тех же исходных данных решаться дополнительная задача оценки остаточного ресурса относительно критериев предельных состояний объекта. По сути это задача прогноза состояния объекта. Кроме текущих и накопленных исходных данных для ее решения необходима модель объекта, позволяющая с известной точностью прогнозировать (экстраполировать) остаточный ресурс. Как правило, задача прогноза решается в вероятностной постановке.

### **Контрольные вопросы**

- 1 В чем заключается различие понятий “исправность” и “работоспособность?”
- 2 Перечислите основные задачи технического диагностирования.
- 3 Для характеристики каких объектов целесообразно применять понятие “остаточный срок службы” вместо понятия “остаточный ресурс”?
- 4 Что является наиболее характерной особенностью процесса измерения в задачах технического контроля?
- 5 Для чего необходим процесс накопления в задачах технического контроля?
- 6 Какую роль играет априорная информация при техническом контроле?

## **Глава 2 Контроль текущего состояния объекта**

### **2.1 Задача распознавания текущего состояния объекта**

Анализ состояния объекта проводится в условиях эксплуатации, при которых получение полной информации крайне затруднено. Часто не представляется возможным по имеющейся информации сделать однозначное заключение и приходится использовать специальные методы. Теоретическим фундаментом для решения основной задачи технической диагностики является теория распознавания образов. Эта теория, составляющая важный раздел технической кибернетики, занимается распознаванием образов любой природы (геометрических, звуковых и т. п.), машинным распознаванием речи, печатного и рукописного текстов и т. д. Техническая диагностика использует алгоритмы распознавания применительно к задачам диагностики, которые обычно могут рассматриваться как задачи классификации в многомерном пространстве контролируемых параметров объекта.

Алгоритмы распознавания в технической диагностике основываются на диагностических моделях, устанавливающих связь между состояниями технической системы и их отображениями в пространстве контролируемых параметров. Важной частью проблемы распознавания являются правила принятия решений (решающие правила).

Решение диагностической задачи (отнесение изделия к исправным или неисправным) всегда связано с риском ложной тревоги или пропуска цели. Для принятия обоснованного решения целесообразно привлекать методы теории статистических решений, разработанные изначально для нужд в радиолокации.

Решение задач технической диагностики всегда связано с прогнозированием надежности на ближайший период эксплуатации (обычно до следующего технического осмотра). Здесь решения должны основываться на моделях отказов, изучаемых в теории надежности.

Требования к системе контроля во многом определяются используемыми на этапе принятия решений методами и алгоритмами распознавания текущего состояния, поскольку именно от этого в первую очередь зависят требования к перечню контролируемых параметров, требования к измерениям и к обработке экспериментальных данных. Чтобы обоснованно сформулировать эти требования рассмотрим постановку задачи распознавания технического состояния и существующие способы ее решения.

Состояние объекта описывается совокупностью (множеством) определяющих его параметров (контролируемых параметров, признаков). Разумеется, что множество определяющих параметров может быть различным, в первую очередь, это определяется как самим объектом контроля, так и задачей распознавания. Распознавание состояния объекта – это процедура отнесения текущего состояния объекта к одному из возможных классов (диагнозов). Число диагнозов (классов, типичных состояний, эталонов) зависит от особенностей задачи контроля и целей исследования. Часто требуется провести выбор одного из двух возможных диагнозов (дифференциальная диагностика или дихотомия); например, «исправное состояние» и «неисправное состояние». В других случаях необходимо более подробно охарактеризовать неисправное состояние, например повышенный износ шлицев, возрастание вибраций лопаток и т. п. В большинстве задач технической диагностики диагнозы (классы) устанавливаются заранее, и в этих условиях задачу распознавания часто называют задачей классификации.

Совокупность последовательных действий в процессе распознавания называется алгоритмом распознавания. Существенной частью процесса распознавания является выбор параметров, описывающих состояние системы. Они должны быть достаточно информативны, чтобы при выбранном числе диагнозов процесс разделения (распознавания) мог быть осуществлен. Имея в виду, что задача оптимального выбора контролируемых параметров должна решаться изготовителем объекта контроля и это должно быть отражено в НТД на объект, будем считать, что набор контролируемых параметров (вектор  $\mathbf{X}$  на рис.1.1.) задан и рассмотрим известные способы распознавания, пригодные для формирования на их основе соответствующих алгоритмов.

## **2.2 Математическая постановка задачи распознавания.**

В задачах диагностики состояние системы описывается с помощью вектора контролируемых параметров  $\mathbf{X} = (x_1, x_2, \dots, x_{N_x})$ , где  $N_x$  – количество контролируемых параметров. Таким образом, состояние объекта характеризуется точкой (вектором) в  $N_x$ -мерном пространстве. Для упрощения процедур распознавания вектор контролируемых параметров  $\mathbf{X}$  может быть заменен соответствующим ему вектором признаков  $\mathbf{K} = (k_1, k_1, \dots, k_{N_x})$ , который имеет ту же размерность, а значения признака  $k_i$  однозначно определяются значением соответствующего контролируемого параметра  $x_i$  на основе заданной функции (правила)  $k_i =$

$f(x_i)$ . Множество возможных значений признака  $k_i$  конечно, их количество обычно невелико (2, 3, 5). Поэтому функция  $f(x_i)$  фактически отображает множество вещественных чисел в конечное множество значений признаков. Часто используется троичное представление признаков на основе процедуры допускового контроля по верхнему  $x_{\max}$  и нижнему  $x_{\min}$  уровням контролируемого параметра  $x_i$  и в этом случае

$$k_i = f(x_i) = \begin{cases} k_{i0}, & x_i > x_{\max} \\ k_{i1}, & x_{\min} \leq x_i \leq x_{\max} \\ k_{i2}, & x_i < x_{\min} \end{cases} \quad (2.1)$$

Предельные значения допускового контроля могут устанавливаться непосредственно в требованиях НТД (компоненты  $v_{ij}$  векторов ограничений  $V_i$ ).

С точки зрения задачи распознавания принципиальных отличий при описании состояний объекта признаками или параметрами нет, но использование признаков обычно дает экономию в вычислениях, поскольку признаки дают дискретное описание, а параметры обычно являются непрерывными величинами. При непрерывном описании обычно требуется значительно больший объем предварительной информации, но описание получается более точным. Если, однако, известны статистические законы распределения контролируемого параметра, то необходимый объем предварительной информации сокращается.

Кроме того, считается известным множество возможных технических состояний объекта  $\{q_1, q_2, \dots, q_{N_q}\}$ . Это множество конечно (содержит  $N_q$  элементов), что в значительной мере упрощает решение задачи распознавания.

Существуют два основных подхода к задаче распознавания: вероятностный и детерминированный. Постановка задачи при вероятностных методах распознавания такова. Имеется объект, который находится в одном из  $N_q$  случайных состояний  $q_i$ . Известен вектор признаков  $\mathbf{K} = (k_1, k_1, \dots, k_{N_x})$  (или вектор параметров  $\mathbf{X} = (x_1, x_2, \dots, x_{N_x})$ ), каждый из которых с определенной вероятностью характеризует состояние объекта. Требуется построить решающее правило, с помощью которого предъявленная (диагностируемая) совокупность признаков была бы отнесена к одному из возможных состояний  $\{q_1, q_2, \dots, q_{N_q}\}$  (диагнозов). Желательно также оценить достоверность принятого решения и степень риска ошибочного решения.

При детерминированных методах распознавания удобно формулировать задачу на геометрическом языке. Если система характеризуется  $N_x$ -мерным вектором  $\mathbf{X}$ , то любое состояние объекта представляет собой точку в  $N_x$ -мерном пространстве параметров (признаков). Предполагается, что диагнозу  $q_i$  соответствует некоторая область пространства признаков. Требуется найти решающее правило, в соответствии с которым предъявленный вектор  $\mathbf{X}^*$  (диагностируемый объект) будет отнесен к определенной области диагноза. Таким образом задача сводится к разделению пространства признаков на области диагнозов. При детерминированном подходе области диагнозов обычно считаются «непересекающимися», т. е. вероятность одного диагноза (в область которого попадает точка) равна единице, вероятность других равна нулю. Подобным образом предполагается, что и каждый признак либо встречается при данном диагнозе, либо отсутствует.

Вероятностный и детерминированный подходы не имеют принципиальных различий. Более общими являются вероятностные методы, но они часто требуют и значительно большего объема предварительной информации. Детерминированные подходы более кратко описывают существенные стороны процесса распознавания, меньше зависят от избыточной, малоценной информации, больше соответствуют логике мышления человека.

### **2.3 Статистические методы распознавания. Метод Байеса.**

Основное преимущество статистических методов распознавания состоит в возможности одновременного учета признаков различной физической природы, так как они характеризуются безразмерными величинами — вероятностями их появления при различных состояниях системы.

Среди методов технической диагностики метод, основанный на обобщенной формуле Байеса, занимает особое место благодаря простоте и эффективности. Разумеется, метод Байеса имеет недостатки: большой объем предварительной информации, «угнетение» редко встречающихся диагнозов и др. Однако в случаях, когда объем статистических данных позволяет применить метод Байеса, его целесообразно использовать как один из наиболее надежных и эффективных методов. Метод основан на простой формуле Байеса [5, 6]. Формула Байеса позволяет «переставить причину и следствие»: по известному факту события вычислить вероятность того, что оно было вызвано данной причиной.



Если имеется диагноз  $q_i$  и простой признак  $k_j$ , встречающийся при этом диагнозе, то вероятность совместного появления двух событий (наличие у объекта состояния  $q_i$  и признака  $k_j$ )

$$P(q_i k_j) = P(q_i)P(k_j/q_i) = P(k_j)P(q_i/k_j). \quad (2.2)$$

Из этого равенства вытекает формула Байеса

$$P(q_i/k_j) = P(q_i) \frac{P(k_j/q_i)}{P(k_j)}. \quad (2.3)$$

В этой формуле  $P(q_i)$  – вероятность диагноза  $q_i$ , определяемая по статистическим данным (априорная вероятность диагноза). Так, если предварительно обследовано  $N$  объектов и у  $N_i$  объектов имелось состояние  $q_i$ , то  $P(q_i) = N_i/N$ .

$P(k_j/q_i)$  – вероятность появления признака  $k_j$  у объектов с состоянием  $q_i$ . Если среди  $N_i$  объектов, имеющих диагноз  $q_i$ , у  $N_{ij}$  объектов проявился признак  $k_j$ , то  $P(k_j/q_i) = N_{ij}/N_i$ .

$P(k_j)$  – вероятность появления признака  $k_j$  во всех объектах независимо от состояния (диагноза) объекта. Пусть из общего числа  $N$  объектов признак  $k_j$  был обнаружен у  $N_j$  объектов, тогда  $P(k_j) = N_j/N$ .

Для установления диагноза специальное вычисление  $P(k_j)$  не требуется. Значения  $P(q_i)$  и  $P(k_j/q_i)$ , известные для всех возможных состояний, определяют величину  $P(k_j)$ .

$P(q_i/k_j)$  – вероятность диагноза  $q_i$  после того, как стало известно наличие у рассматриваемого объекта признака  $k_j$  (апостериорная вероятность диагноза).

В том случае, когда обследование производится по вектору признаков  $\mathbf{K} = (k_1, k_2, \dots, k_{N_x})$ , имеет место обобщенная формула Байеса. Обозначим через  $\mathbf{K}^*$  конкретное значение (реализацию) вектора признаков, полученное в эксперименте. Тогда формула Байеса для этого случая примет вид

$$P(q_i/\mathbf{K}^*) = P(q_i) \frac{P(\mathbf{K}^*/q_i)}{P(\mathbf{K}^*)} \quad (i = 1, 2, \dots, N_x) \quad (2.4)$$

где  $P(q_i/\mathbf{K}^*)$  – вероятность диагноза  $q_i$  после того, как стали известны результаты обследования по комплексу признаков  $\mathbf{K}$ ,  $P(q_i)$  – предварительная вероятность диагноза  $q_i$  (по предшествующей статистике).

Имеются определенные сложности при нахождении величины  $P(\mathbf{K}^*/q_i)$ . По определению в общем случае

$$P(\mathbf{K}^*/q_i) = P(k_1^*/q_i)P(k_2^*/k_1^*q_i) \dots P(k_{N_x}^*/k_1^* \dots k_{N_x-1}^*q_i). \quad (2.5)$$

В случае независимых признаков нахождение этой величины можно существенно упростить, используя формулу

$$P(\mathbf{K}^*/q_i) = P(k_1^*/q_i)P(k_2^*/q_i) \dots P(k_{N_x}^*/q_i). \quad (2.6)$$

В большинстве практических задач, особенно при большом числе признаков, можно принимать условие независимости признаков даже при наличии существенных корреляционных связей между ними.

Вероятность появления комплекса признаков  $\mathbf{K}^*$  определяется формулой

$$P(\mathbf{K}^*) = \sum_{s=1}^{N_x} P(q_s)P(\mathbf{K}^*/q_s) \quad (2.7)$$

С учетом этого обобщенная формула Байеса примет вид

$$P(q_i/\mathbf{K}^*) = \frac{P(q_i)P(\mathbf{K}^*/q_i)}{\sum_{s=1}^{N_x} P(q_s)P(\mathbf{K}^*/q_s)} \quad (i = 1, 2, \dots, N_x) \quad (2.8)$$

где  $P(\mathbf{K}^*/q_i)$  определяется равенством (2.5) или (2.6).

Решающее правило – правило, в соответствии с которым принимается решение о диагнозе. В методе Байеса объект с комплексом признаков  $\mathbf{K}^*$  относится к диагнозу с наибольшей апостериорной вероятностью

$$\mathbf{K}^* \in q_i, \text{ если } P(q_i/\mathbf{K}^*) > P(q_j/\mathbf{K}^*) (j = 1, 2, \dots, N_x; i \neq j). \quad (2.9)$$

Условие (2.9) указывает, что объект, обладающий данной реализацией комплекса признаков  $\mathbf{K}^*$  принадлежит диагнозу (состоянию)  $q_i$ . Правило (2.9) обычно уточняется введением порогового значения для вероятности диагноза:

$$P(q_i/\mathbf{K}^*) > P_i. \quad (2.10)$$

где  $P_i$  – заранее выбранный уровень распознавания для диагноза  $q_i$ . При этом вероятность ближайшего конкурирующего диагноза не выше  $1 - P_i$ . Обычно принимается  $P_i \geq 0,9$ . При условии

$$P(q_i/\mathbf{K}^*) < P_i \quad (2.11)$$

решение о диагнозе не принимается (отказ от распознавания) и требуется поступление дополнительной информации.

Как указывалось, методу Байеса присущи некоторые недостатки, например погрешности при распознавании редких диагнозов. При практическом применении целесообразно провести диагностику и для случая равновероятностных диагнозов, положив  $P(q_i) = 1/N_x$ . Тогда наибольшим значением апостериорной вероятности будет обладать диагноз  $q_i$ , для которого  $P(\mathbf{K}^*/q_i)$  максимальна:

$$\mathbf{K}^* \in q_i, \text{ если } P(\mathbf{K}^*/q_i) > P(\mathbf{K}^*/q_j) (j = 1, 2, \dots, N_x; i \neq j). \quad (2.12)$$

Иными словами, устанавливается диагноз  $q_i$ , если данная совокупность признаков чаще встречается при диагнозе  $q_i$ , чем при других диагнозах. Такое решающее правило соответствует методу максимального правдоподобия. Из чего вытекает, что этот метод является частным случаем метода Байеса при равных априорных вероятностях диагнозов. В методе максимального правдоподобия «частые» и «редкие» диагнозы равноправны.

Для надежности распознавания условие (2.12) должно быть дополнено пороговым значением

$$P(\mathbf{K}^*/q_i) \geq P_i, \quad (2.13)$$

## 2.4 Метод последовательного анализа

Метод последовательного анализа, предложенный Вальдом [7], может применяться для дифференциальной диагностики (распознавания двух состояний). В отличие от метода Байеса, число обследований заранее не устанавливается, их проводится столько, сколько необходимо для принятия решения с определенной степенью риска. В методе последовательного анализа рассматриваемые отношения вероятностей признаков (отношения правдоподобия) составляются не сразу, а в последовательном порядке; поэтому, как правило, требуется меньшее число обследований.

Будем для краткости считать, что признаки являются независимыми. Пусть проведено  $n - 1$  обследований, которые еще не дали возможности принятия решения, то есть выполняются неравенства

$$B < \frac{P(k_1^*/q_2)}{P(k_1^*/q_1)} \dots \frac{P(k_r^*/q_2)}{P(k_r^*/q_1)} < A; \quad r = 1, 2, \dots, n-1, \quad (2.14)$$

но после  $n$ -го обследования

$$\frac{P(k_1^*/q_2)}{P(k_1^*/q_1)} \dots \frac{P(k_n^*/q_2)}{P(k_n^*/q_1)} > A; \quad (2.15)$$

Тогда принимается решение об отнесении объекта к диагнозу  $q_2$ :

$K^* \in q_2$ . Если после  $n$ -го обследования

$$\frac{P(k_1^*/q_2)}{P(k_1^*/q_1)} \dots \frac{P(k_n^*/q_2)}{P(k_n^*/q_1)} < B, \quad (2.16)$$

то объект относится к диагнозу  $q_1$ . Для сокращения объема обследований следует вначале проводить обследование по наиболее информативным признакам.

Отметим, что метод пригоден и для непрерывно распределенных диагностических параметров,  $k_1$  и  $k_2$ , но вместо вероятностей признаков в отношения (2.14), (2.15) и (2.16) должны входить плотности вероятностей параметров.

При распознавании могут быть ошибки двоякого рода. Ошибка относящаяся к диагнозу  $q_1$  (принимается решение о наличии диагноза  $q_2$ , когда в действительности объект принадлежит диагнозу  $q_1$ ), называется ошибкой первого рода. Ошибка, относящаяся к диагнозу  $q_2$  (принимается решение в пользу диагноза  $q_1$  когда справедлив диагноз  $q_2$ ), называется ошибкой второго рода.

Считая состояние  $q_1$  исправным, а состояние  $q_2$  дефектным, легко понять, что ошибка первого рода является «ложной тревогой», а ошибка второго рода «пропуском дефекта».

Обозначим вероятность ошибки первого рода  $\alpha$ , второго рода  $\beta$ . Допустим, что имеются условия (2.14) и (2.15) и принимается решение в пользу диагноза  $q_2$ . Вероятность того, что это решение будет справедливым, равна  $1 - \beta$ . Вероятность принадлежности объекта с данной реализацией признаков к диагнозу  $q_1$  составляет  $\alpha$ . С другой стороны, в силу соотношения (2.15), вероятность диагноза  $q_2$ , по крайней мере, в  $A$  раз больше, чем диагноза  $q_1$  т. е.

$$\frac{1-\beta}{\alpha} \geq A. \quad (2.17)$$

Подобным образом можно получить и следующую оценку:

$$B \geq \frac{\beta}{1 - \alpha} \quad (2.18)$$

В практических расчетах часто принимают  $\alpha = \beta = 0,05$  или  $\alpha = \beta = 0,10$ .

## 2.5 Методы статистических решений

В методах статистических решений решающее правило выбирается исходя из некоторых условий оптимальности, например из условия минимума риска. Возникшие в математической статистике как методы проверки статистических гипотез (работы Неймана и Пирсона), эти методы нашли широкое применение в радиолокации (обнаружение сигналов на фоне помех), радиотехнике, общей теории связи и других областях. Методы статистических решений давно и успешно используются в задачах технической диагностики [8, 11]. Среди них можно назвать метод минимального риска, метод минимального числа ошибочных решений, метод минимакса, метод Неймана-Пирсона, метод наибольшего правдоподобия. Подробное изложение этих методов можно найти в фундаментальных работах [9,10]. Все эти методы естественным образом обобщаются на случай многомерного контроля (когда имеется  $N_x$  контролируемых параметров) путем замены одномерных плотностей распределения многомерными, граничных точек – граничными линиями, одномерные области интегрирования – многомерными. Наиболее просто обобщаются на многомерные системы методы минимального риска и его частные случаи (метод минимального числа ошибочных решений, метод наибольшего правдоподобия). В случаях, когда в методе статистического решения требуется определение границ области принятия решения, расчетная сторона задачи существенно усложняется (методы Неймана—Пирсона и минимакса).

## 2.6 Метрические методы распознавания

В большинстве методов распознавания делается естественное предположение, что отображения объектов одного класса (образа) более близки друг другу, чем отображения разных классов. Метрические методы основаны на количественной оценке этой близости. В качестве изображения объекта принимается точка в пространстве признаков, мерой близости считается расстояние (метрика) между точками этого пространства. Все разнообразие метрических методов определяется в

основном тремя факторами: способом формирования пространства, конкретным видом функции метрики и конкретным способом (алгоритмом) распознавания в метрическом пространстве.

Базовым пространством может быть  $N_x$  мерное пространство контролируемых параметров, координаты объекта в котором задаются значением вектора контролируемых параметров  $\mathbf{X} = (x_1, x_2, \dots, x_{N_x})$  или вектором признаков  $\mathbf{K} = (k_1, k_1, \dots, k_{N_x})$ . В качестве альтернативы базовым пространством может быть «диагностическое пространство», координаты объекта в котором задаются вектором диагностических признаков  $\mathbf{Z} = (z_1, z_2, \dots, z_{N_z})$ . Каждый  $j$ -й признак функционально зависит от всех контролируемых параметров  $z_j = \varphi_j(\mathbf{X})$ . Обычно размерность диагностического пространства меньше размерности пространства контролируемых параметров ( $N_z < N_x$ ), что упрощает решение задачи распознавания в диагностическом пространстве.

### Контрольные вопросы

1 С какой целью при описании состояния системы вектор контролируемых параметров заменяют соответствующим ему вектором признаков, имеющих ту же размерность?

2 Чем отличаются вероятностный и детерминированный подходы к задаче распознавания?

3 В чем преимущество статистических методов распознавания?

4 В чем заключаются основные недостатки метода Байеса?

5 Для решения каких задач применяется метод последовательного анализа?

6 При каких условиях метод последовательного анализа применим для непрерывно распределенных диагностических параметров?

## **Глава 3 Оценка остаточного ресурса сложного объекта**

### **3.1 Определение остаточного ресурса**

Большая часть эксплуатационных и технологических отказов проявляется постепенно в изменении одного или нескольких выходных параметров, поэтому их называют также параметрическими. Контролируемыми параметрами могут быть как непосредственно намеряемые величины повреждений, так и выходные параметры оборудования. Далее эти параметры, контроль которых позволяет прогнозировать моменты наступления отказов оборудования, называются параметрами технического состояния, или сокращенно ПТС. В соответствии с [4] отказом оборудования считается нарушение его работоспособного состояния. Если оборудование после отказа или технического освидетельствования не подлежит восстановлению, то такое состояние называют предельным состоянием (ПС) оборудования. Нецелесообразность восстановления оборудования, имеющего повреждения, может быть обусловлена как технико-экономическими показателями, так и нарушениями установленных требований безопасности (экологии) [25, 26]. Признаки предельного состояния оборудования, установленные в НТД, называются критериями предельного состояния (КПС). Остаточным ресурсом называют запас возможной наработки оборудования после момента контроля его технического состояния (или ремонта), в течение которого обеспечивается соответствие, требованиям НТД всех его основных технико-эксплуатационных показателей и показателей безопасности. Возможный алгоритм СМиК ТСО по показателям надёжности представлен на рисунке 3.1.



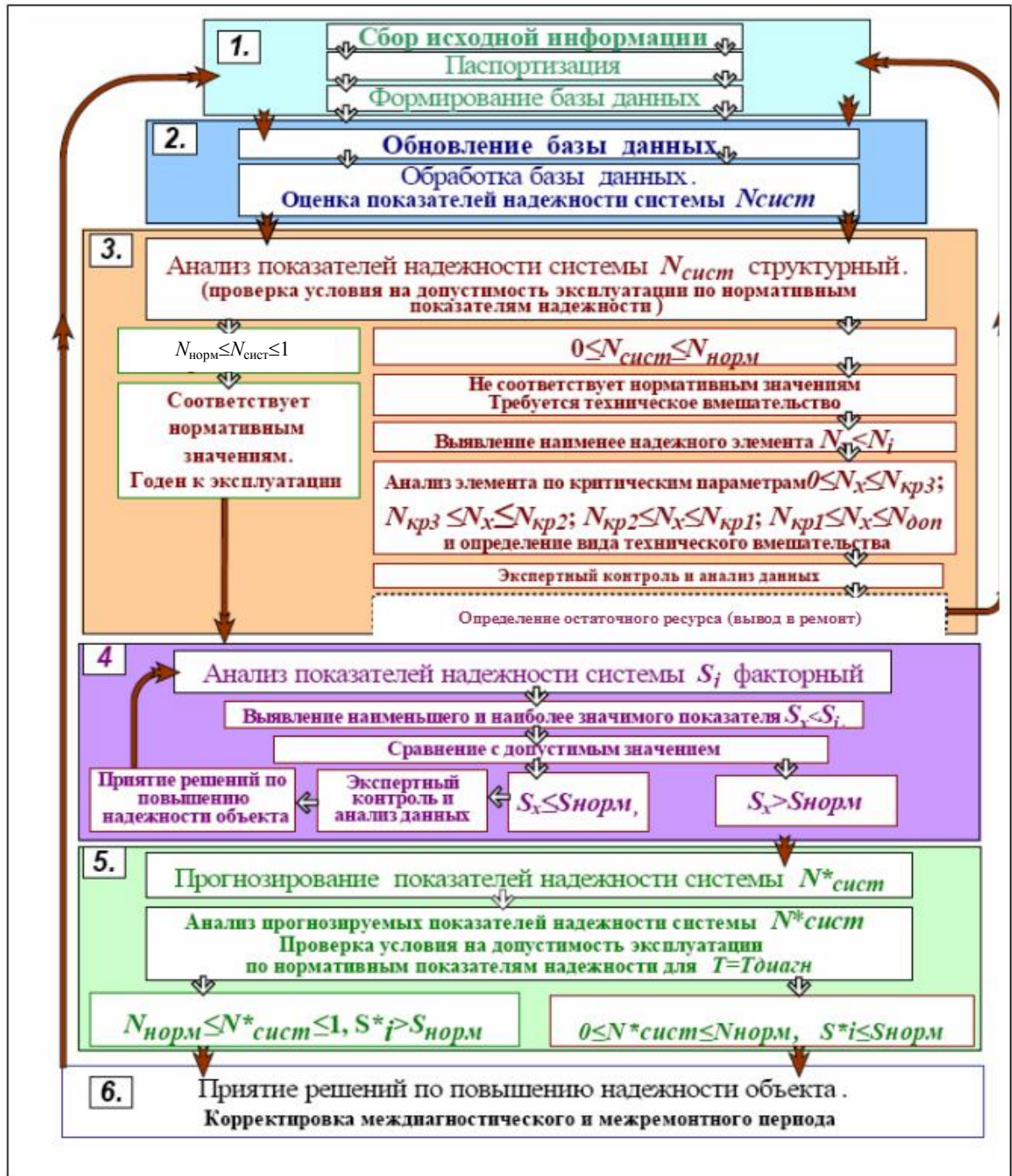


Рис. 3.1. Алгоритм функционирования СМиК ТСО при определении остаточного ресурса по показателям надёжности

Здесь  $N_m$  – функция надежности (например, сохраняемость) системы уровня сложности  $m$ ;  $S_{im-1}$  – показатель надежности на иерархическом уровне  $(m-1)$  (по структурной или факторной схеме);  $i$  – номер показателя  $i \in [1;n]$ ;  $k_i$  –весовой коэффициент значимости для  $i$ -го показателя. Качественный и количественный состав показателей  $S_i$  определяется

индивидуально для каждой системы на различных иерархических уровнях с учетом функциональных характеристик технологической схемы объекта. Значения  $k_i$  рассчитываются по многофакторным математическим моделям или методом экспертных оценок [40-42].

### 3.2 Концепция прогнозирования остаточного ресурса

Остаточный ресурс оборудования может иметь не только до истечения расчетного срока службы, но и после него. Это обусловлено действующими нормами и правилами расчета сроков службы оборудования, предусматривающими обеспечение прочности и износостойкости изделий при наиболее неблагоприятных режимах нагружения в заданных условиях эксплуатации, а также при минимальных уровнях механических характеристик конструкционных материалов, обеспечиваемых по государственным стандартам. Фактические режимы нагружения при соблюдении правил эксплуатации оказываются, как правило, менее напряженными, чем расчетные, что снижает интенсивность расходования заложенных запасов и обеспечивает резерв по остаточному ресурсу оборудования. Возможность прогнозирования величины остаточного ресурса обеспечивается при одновременном наличии следующих условий:

- известны параметры, определяющие техническое состояние оборудования (ПТС);
- известны критерии предельного состояния оборудования;
- имеется возможность периодического (или непрерывного) контроля значений ПТС.

По многим процессам указанные условия выполняются. По другим видам повреждений не все условия, необходимые для прогнозирования остаточного ресурса, могут выполняться. В таких случаях требуется проведение специальных исследований.

Прогнозирование надежности оборудования обычно осуществляется по схеме, приведенной на рис. 3.2. Через определенные периоды эксплуатации  $t_1, t_2, \dots$  и т.д. измеряют максимальные величины возникших повреждений (износа, коррозии, деформаций)  $h_1, h_2, \dots$  и т.д. и экстраполируют зависимость до предельно допустимой величины повреждений  $h_n$ . Такой метод позволяет получить достаточно точные оценки показателей надежности, если известен вид зависимости  $h(t)$  и при измерениях значений  $h$  определяются действительно максимальные значения повреждений, т.е. осуществляется сплошной контроль

оборудования.

Вид зависимости  $h(t)$  может быть установлен для многих видов разрушения. В простейшем случае зависимость износа от времени линейная:  $h(t) = h_0 + C \times t$ , где  $h_0$  и  $C$  - постоянные величины для заданных условий. Существует целый ряд типовых видов зависимостей  $h(t)$ , которые могут использоваться в конкретных случаях.

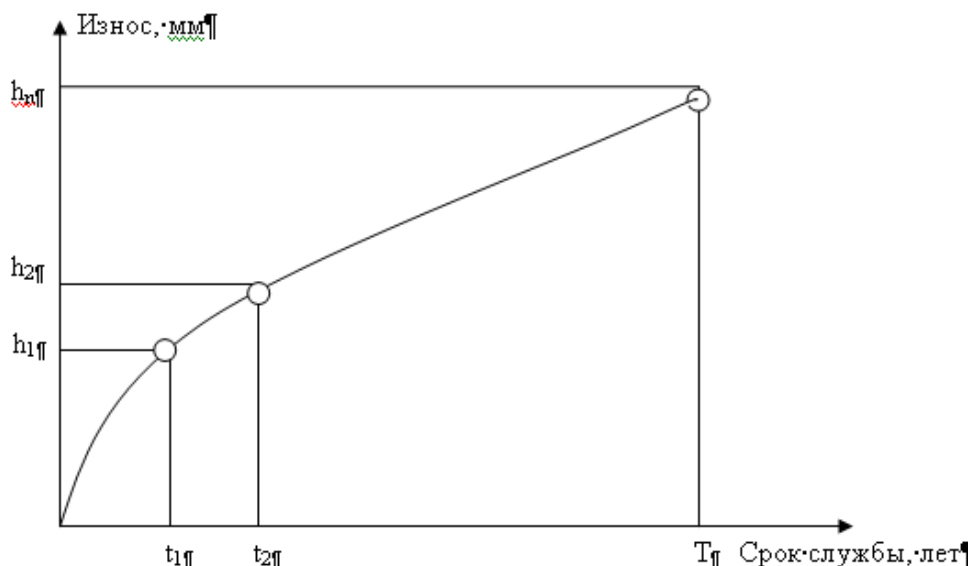


Рис. 3.2 Типовая схема прогнозирования долговечности оборудования:

$t$  - продолжительность эксплуатации;  $h$  - величина повреждений.

При прогнозировании в зависимости от срока эксплуатации оборудования применяют два подхода. При малом сроке эксплуатации (относительно нормативного) и незначительной поврежденности оборудования для прогнозирования его остаточного ресурса используют только информацию о нагруженности. При сроке эксплуатации близком к нормативному или значительной поврежденности элементов оборудования дополнительно исследуют степень поврежденности оборудования. Преимуществом первого подхода является его меньшая трудоемкость, второго - более точный прогноз, возможность выявления дополнительного резерва ресурса оборудования.

В зависимости от требуемой достоверности прогноза и возможностей получения информации применяют два подхода к прогнозированию: упрощенный, основанный на детерминистических оценках показателей, и уточненный, основанный на вероятностных оценках.

При первом - отклонения контролируемых параметров относят к

погрешностям методов контроля, случайным помехам и при прогнозировании остаточного ресурса в расчетах учитывают с помощью коэффициентов запасов. При втором подходе колебания наблюдаемых параметров используют в качестве дополнительной информации, что позволяет повысить достоверность прогнозирования.

### **3.3 Анализ условий эксплуатации**

Анализ условий эксплуатации проводят с целью определения возможности достоверного прогнозирования остаточного ресурса оборудования, выявления наиболее информативных параметров и источников получения исходных данных, необходимых для расчета.

Возможность прогнозирования остаточного ресурса оборудования имеется в тех случаях, когда критерии предельного состояния оборудования определены в численных значениях, и в ходе эксплуатации оборудования ведутся измерения (периодические или непрерывные) и регистрация параметров (ПТС), определяющих предельное состояние.

Большинство контролируемых параметров являются стационарными и немонотонными, так как подвергаются регулированию. Некоторые из них могут нести информацию об интенсивности деградации оборудования; в таких случаях при анализе записей параметров наблюдается их дрейф, т.е. постепенное смещение среднего значения. Если этот дрейф не устраняется регулированием и определены предельно допустимые уровни параметров, то такие параметры могут быть использованы для прогнозирования ресурса оборудования. Поэтому прогнозированию должен предшествовать анализ случайных процессов, определяющих параметры технического состояния объекта.

Для выбора наиболее информативных параметров составляют полный перечень предельных состояний оборудования и контролируемых параметров, связанных с каждым предельным состоянием. Затем из этого перечня исключают зависимые (вторичные) параметры, если при контроле основных параметров обеспечивается получение достоверных данных в достаточном объеме.

### **3.4 Критерии предельных состояний оборудования**

В соответствии с требованиями [4,12] критерии отказов и предельных состояний должны устанавливаться в технических условиях

(стандартах технических условий) с целью достоверного определения их технического состояния.

Критерии отказа - это совокупность признаков, характеризующих неработоспособное состояние изделия. Критерием предельного состояния (КПС) является совокупность признаков, при которых использование по назначению должно быть прекращено (или невозможно) и изделие должно направляться в капитальный ремонт или списываться (сниматься с эксплуатации).

Критерии предельного состояния могут быть качественными и количественными. При отсутствии в технической документации КПС ориентировочными значениями КПС могут служить нормы технологических допусков на изготовление, взятые с некоторым коэффициентом запаса (обычно рекомендуется 1,5).

### **3.5 Методы прогнозирования остаточного ресурса при монотонном изменении контролируемых параметров**

Прогнозирование остаточного ресурса узлов и агрегатов машин, оборудования и приборов, отказы которых вызывают процессы накопления повреждений, рекомендуется выполнять в соответствии с [13]

Среди параметров технического состояния (ПТС) различают прямые и косвенные параметры. Прямой ПТС – это параметр технического состояния (ТС), непосредственно характеризующий конкретное свойство объема или его составной части - и определяющий его предельное состояние. Косвенный ПТС – это параметр ТС, связанный с прямым ПТС детерминированной или стохастической зависимостью, изменяющийся в результате изменения прямых ПТС.

Прогнозирование остаточного ресурса изделия по косвенным параметрам основано на одновременном выполнении следующих условий:

- известны физические процессы, приводящие к ресурсным отказам, а также математические модели изменения прямых (структурных) и косвенных (диагностических) параметров;
- для каждого прямого ПТС установлены предельные значения, достижение которых определяет величину ресурса по данному параметру;
- в процессе наблюдения за изменением технического состояния изделия имеется возможность фиксации параметров, отражающих индивидуальные особенности изделия;

- имеется информация о функциональных или регрессионных соотношениях между прямыми и косвенными ПТС;

- зависимость между математическими ожиданиями прямых и косвенных ПТС является монотонной и непрерывной.

Определение остаточного ресурса по косвенным ПТС сопровождается, в общем случае, тремя видами погрешностей:

- погрешностями измерения косвенных параметров;
- погрешностями, связанными со случайной природой физических процессов развития отказов;
- методическими погрешностями определения прямых ПТС по значениям косвенных.

В зависимости от того, какой информацией располагает исследователь относительно объекта, остаточный ресурс которого прогнозируется, существуют три группы типовых ситуаций.

Первая группа типовых ситуаций характеризуется наличием следующей информации:

- известны вид функции  $F$ , определяющий связь между прямыми и косвенными параметрами, все коэффициенты и дисперсии этих коэффициентов;
- имеются результаты периодических измерений каждого косвенного параметра.

Вторая группа типовых ситуаций характеризуется следующей информацией:

- вид функции  $F$  известен, коэффициенты неизвестны;
- имеются результаты периодических измерений косвенных параметров, а также результаты обучающего эксперимента, в процессе которого производится одновременное измерение прямых и косвенных ПТС.

Третья группа типовых ситуаций характеризуется следующей информацией:

- функция  $F$  монотонна и непрерывна (общий вид неизвестен);
- имеются результаты обучающего эксперимента.

В [13] приведены соотношения для расчета остаточного ресурса и его дисперсии для указанных групп типовых ситуаций в общем виде. Дисперсия оценки остаточного ресурса представлена в виде суммы трех

слагаемых: погрешности измерений, погрешности определения коэффициентов функции  $F$  и дисперсии случайного изменения приращений контролируемых параметров.

Использование приведенных в [13] соотношений затрудняется необходимостью большого объема предварительных исследований для установления исходных данных. Наиболее доступным для практического использования является метод, основанный на степенной аппроксимации изменения ПТС, включенным также в [14] для прогнозирования процессов изнашивания и других монотонных процессов ухудшения технического состояния объектов.

Математическое описание процесса изменения параметра технического состояния  $Y(t)$  (после приработки) основано на аппроксимации каждой реализации данного процесса случайной функцией следующего вида:

$$Y(t) = Kt^\alpha + z(t), \quad (3.1)$$

где  $K$  - случайное для группы одноименных составных частей, но неизменное для каждой реализации случайного процесса значение показателя скорости изменения параметра;

$\alpha$  - показатель степени аппроксимирующей функции, характеризующий конструктивные особенности составной части;

$z(t)$  - нормальный стационарный случайный процесс отклонений фактических значений параметра от аппроксимирующей степенной функции каждой реализации процесса  $Y(t)$ .

Статистические характеристики случайного процесса  $z(t)$  при  $t > 0,3 T_{ср}$  следующие:

$$\begin{aligned} M[z(t)] &= 0; \quad D[z(t)] = \sigma^2; \quad R[z(t), z(t + \Delta t)] = R(\Delta t), \\ f[z(t_k)] &= \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \exp\left[-\frac{z^2(t_k)}{2\sigma^2}\right]. \end{aligned} \quad (3.2)$$

Средний остаточный ресурс составной части вычисляют на основе информации об изменении параметра ее технического состояния  $Y_k$  и о наработке  $t_k$  к моменту контроля по приближенной формуле:

$$t_{ocm}^{cp} = t_k \left[ \left( \frac{Y_n}{Y_k} \right)^{1/2} - 1 \right] K_t \quad (3.3)$$

При  $s < 0,03$   $Y_n$  можно не учитывать поправочный коэффициент  $K_t$ . Точно условный средний остаточный ресурс определяют по формуле

$$t_{ocm}^{cp} = \int_0^{\infty} t_{ocm} dQ[t_{ocm}/Y(t_k) = Y_k]$$

где  $Q[t_{ocm}/Y(t_k) = Y_k]$  – условная вероятность отказа (условие состоит в том, что в момент  $t_k$  значение отклонения параметра составляет  $Y_k$ ).

Для определения остаточного ресурса с заданной вероятностью безотказной работы и оптимального остаточного ресурса используют уравнения, куда входит условная вероятность отказа  $Q[t_{ocm}/Y(t_k)]$ , являющаяся функцией условного распределения остаточного ресурса.

Необходимую точность оценки рекомендует метод обеспечивает в том случае, если изменение параметра технического состояния к моменту контроля составляет не менее половины предельного отклонения параметра  $Y_n$  и при соблюдении условия  $t_{ост} < 0,5 t_k$ .

При выполнении всех приведенных условий погрешность такого метода прогнозирования не превышает 8-9%.

Оценка остаточного ресурса по изменениям контролируемого параметра

В тех случаях, когда показатели назначения оборудования монотонно изменяются по времени (наработке), а дисперсия показателей не изменяется, для прогнозирования остаточного ресурса может быть использован метод, изложенный в ГОСТ 23942-80.

Правила стандарта разработаны для линейного:

$$Y(t) = C_1 + C_{2t}, \quad (3.4)$$

квадратического

$$Y(t) = C_1 + C_{2t} + C_{3t^2}, \quad (3.5)$$

и экспоненциального законов изменения показателя назначения



$$Y(t) = \exp \{C_1 + C_2 t\}, \quad (3.6)$$

где  $C_1, C_2, C_3$  - неизвестные коэффициенты,

$$t = t_i - t_0, t \geq 0,$$

$t_0 \geq 0$  - начальное значение наработки изделия.

Для использования метода, необходимо убедиться в том, что изменение контролируемого параметра подчиняется одному из указанных законов, а его дисперсия не изменится с увеличением наработки изделия

Показатель назначения оценивают по измеренным значениям контролируемого параметра

$$Y_i = F(t_i) + \Delta i; i = 1, \dots, N, \quad (3.7)$$

где  $t_i$  - значение наработки в  $i$ -й момент измерения

$$t_0 \leq t_1 \leq t_2 \leq \dots \leq t_N,$$

$\Delta i$  - неограниченная случайная величина с дисперсией  $D$ , симметрично распределенная относительно математического ожидания, равного нулю, либо симметрично распределенная, ограниченная случайная величина, для которой при всех значениях наработки выполняется условие

$$-\Delta \leq \Delta(t) \leq \Delta, 0 < \Delta < \infty.$$

Число измерений  $N$  выбирают из условия:

$$N > 2m,$$

где  $m$  - количество неизвестных коэффициентов закона изменения параметра, Рекомендуется выбирать  $N \geq 11$ .

Моменты измерения  $t_i$  выбирают таким образом, чтобы случайные величины  $\Delta_i$  были практически независимыми.

Теоретической основой рассматриваемого метода является оценка соответствующих показателей на базе общеизвестного метода наименьших квадратов.

При линейном законе изменения параметра рекомендуется следующий порядок прогнозирования.

1. Проводят  $N$  измерений  $Y_i$  ( $i=1, 2, \dots, N$ ) контролируемого параметра в определенные моменты времени  $t_i$ .

2. Вычисляют величины

$$Y_1 = \sum_{i=1}^N Y_i \quad Y_1 = \sum_{i=1}^N t_i Y_i ;$$

$$X_1 = \sum_{i=1}^N t_i \quad X_2 = \sum_{i=1}^N t_i^2 ;$$

$$D = N \sum_{i=1}^N t_i^2 - \left( \sum_{i=1}^N t_i \right)^2 ; \quad D_{22} = N/D ;$$

3. Вычисляют точечные оценки коэффициентов закона (3.4):

$$C_1 = Y_1 \cdot D_{11} + Y_2 \cdot D_{21}; \quad C_2 = Y_1 \cdot D_{12} + Y_2 \cdot D_{22}.$$

4. Вычисляют оценку среднего квадратического отклонения параметра

$$\sigma = \sqrt{S/(N-2)}$$

$$S = \sum_{i=1}^N (Y_i - C_1 - C_2 t_i)^2$$

где .

5. Вычисляют средние квадратические отклонения коэффициентов  $C_1$  и  $C_2$ :

$$\sigma_1 = \sigma \sqrt{D_{11}}; \quad \sigma_2 = \sigma \sqrt{D_{22}} .$$

6. Вычисляют гарантированные оценки коэффициентов

$$C_j = C_j \pm K \cdot \sigma_j \quad (j = 1; 2),$$

где (+) берется при возрастающем параметре, (–) – при убывающем;

$K = 1,282$  (при  $\gamma = 0,9$ );  $1,6459$  ( $\gamma = 0,95$ );  $2,326$  ( $\gamma = 0,99$ );

$\gamma$  – доверительная вероятность.

7. Вычисляют средний (ожидаемый) ресурс

$$T_{cp} = (Y_{\pi} - C_1)/C_2 - t_k$$

где  $t_k$  – наработка на момент последнего контроля.

8. Вычисляют гарантированный остаточный ресурс

$$T_{\gamma} = (Y_{\pi} - C_1)/C_2 - t_k.$$

### **3.6 Оценка остаточного ресурса оборудования по изменению его выходных параметров при их немонотонном изменении**

Существенная часть контролируемых параметров являются стационарными и немонотонными, так как подвергаются регулированию. Некоторые из них могут нести информацию об интенсивности деградации оборудования; в таких случаях при анализе записей параметров наблюдается их дрейф, т.е. постепенное смещение среднего значения. Если этот дрейф не устраняется регулированием и определены предельно допустимые уровни параметров, то такие параметры могут быть использованы для прогнозирования ресурса оборудования.

Поэтому прогнозированию должен предшествовать анализ случайных процессов, определяющих параметры технического состояния объекта. Суть рекомендуемого в данном подразделе метода заключается в использовании наблюдений за изменением параметров до момента контроля для оценки скорости деградации и ее возможных отклонений в последующий период эксплуатации оборудования до его предельного состояния.

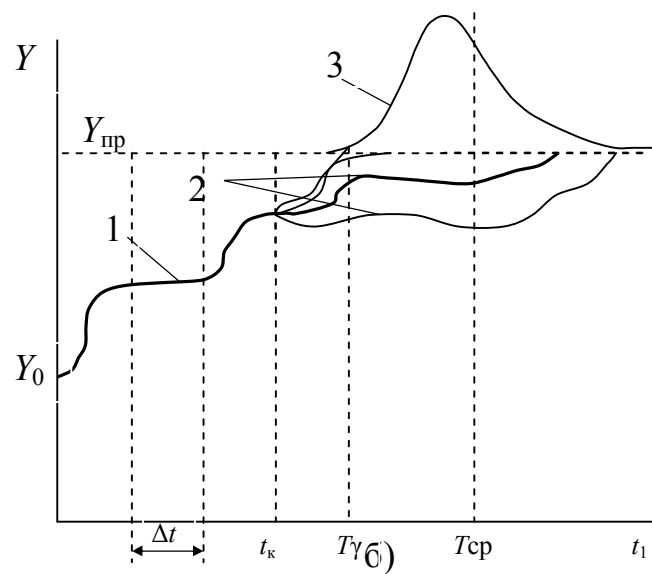
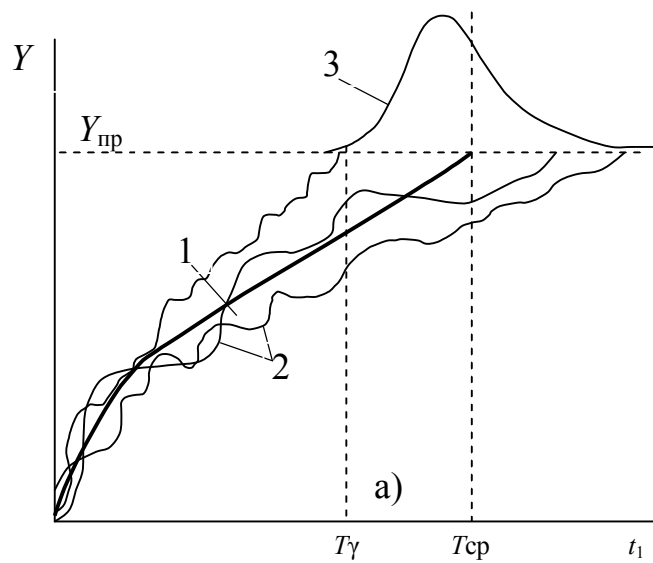
Оценка остаточного ресурса осуществляется путем статистической обработки значений измеренных ПТС и вычисления численных значений показателей по формулам диффузионного распределения. Статистическую обработку ПТС осуществляют по результатам их записи за весь период эксплуатации оборудования или (при отсутствии таких записей) специально организуемых наблюдений.

В расчетные формулы входит предельно допустимая величина ПТС, значение которой рекомендуется определять по критериям отказов и предельных состояний оборудования, а также установленным в технологическом регламенте предельно допустимым уровням технологических параметров.

### **3.6.1 Порядок подготовки данных**

При наличии записей (диаграмм) контролируемых параметров за период предыдущей эксплуатации оборудования осуществляют их статистическую обработку, при отсутствии записей организуют специальные наблюдения за изменением параметров. При эксплуатационных наблюдениях ПТС периодически измеряют, результаты записывают и наносят на рабочий график наблюдений, на котором также отмечены предельно допустимые уровни значений параметров.

После окончания наблюдений осуществляют статистическую обработку данных измерений и оценку параметров процесса деградации.



Кривые:

1 - математического ожидания  $Y(t)$ ;

2 - отдельных реализаций;

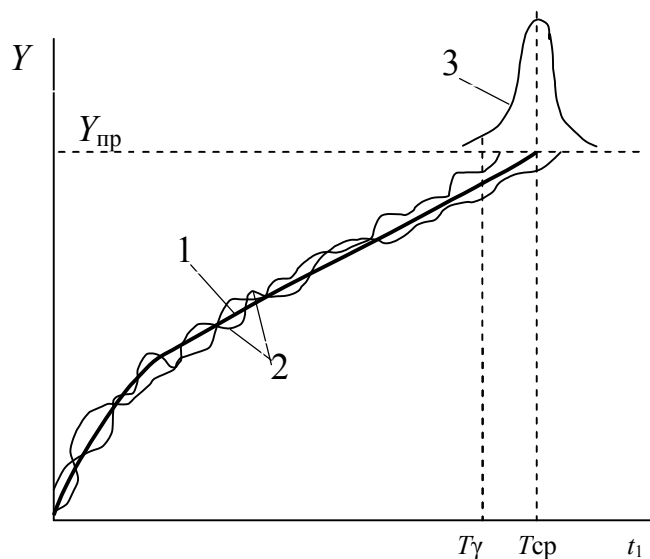
3 - плотности распределения ресурса;

$T_{ср}$  – средний ресурс;

$T_{\gamma}$  - гарантированный (гамма-процентный) ресурс;

$Y_{пр}$  - предельное значение ПТС.

Рис. 3.3. Схема изменения параметров технического состояния  $Y$  при постоянной дисперсии (а) и непостоянной дисперсии (б).



Кривые:

- 1 - изменения контролируемого параметра  $Y$  до момента контроля;
- 2 - возможных реализаций процесса деградации;
- 3 - плотности распределения остаточного ресурса;
- $(T_{\text{сп}} - t_k)$  - средний (ожидаемый) остаточный ресурс;
- $(T_{\gamma} - t_k)$  - гарантированный (гамма-процентный) остаточный ресурс;
- $D_t$  - периодичность контроля или интервал разбиения записи параметра.

Рис. 3.4. Схема прогнозирования остаточного ресурса оборудования после момента контроля  $t_k$ .

### 3.6.2 Статистическая обработка результатов измерений

Результаты измерений, нанесенные на рабочий график, подвергаются качественной оценке:

- определяется период приработки (выхода на стационарный режим) – по перегибу графика ПТС или стабилизации колебаний параметра; в дальнейших расчетах скорости изменения ПТС этот период не учитывается;

- определяется монотонность или немонотонность зависимости ПТС от наработки – при отсутствии отрицательных приращений ПТС зависимость считается монотонной;

- оценивается стационарность или нестационарность процесса; (из рассмотрения исключают резкие отклонения параметров по известным причинам – из-за внезапных остановок, резкого изменения внешних условий и т.п.); при наличии признаков нелинейности оценку параметров

осуществляют по степенной или другой функции.

При **предварительной** статистической обработке оценивается величина дисперсии измеряемых параметров и ее однородность.

Определяется средняя скорость изменения параметра:

$$W = \Delta Y_i / N \cdot \Delta t_i, \quad (3.8)$$

где  $\Delta Y_i$  - приращение ПТС за 1-й интервал наработки  $\Delta t_i$ ;

$N$  - число интервалов наблюдений.

Определяется среднее квадратическое отклонение скорости:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\Delta Y_i / \Delta t_i - W)^2}{N - 1}}. \quad (3.9)$$

Определяется коэффициент вариации скорости изменения параметра:  $V = \sigma / W$ .

Проверка однородности дисперсии осуществляется по критерию Фишера.

### 3.6.3 Определение интервала корреляции

Поскольку близкорасположенные на графиках точки замеров являются зависимыми друг от друга (коррелированными), необходимо интервал разбиения графика выбирать большим, чем интервал корреляции. Для определения интервала корреляции строится корреляционная функция  $r(y)$  связи приращений контролируемого параметра (см. рис.3.5), где  $y$  - параметр сдвига ( $y=0, 1, 2, \dots, n-1$ );  $n$  - количество интервалов квантования ( $n \geq 100$ ).

Значения  $r(y)$  определяются по формуле

$$r(y) = \frac{\sum_{i=0}^{n-y} \Delta Y_{i+y} \Delta Y_i}{(n-y)D}$$

где  $\Delta Y_i = Y_{i+1}$  - За величину интервала корреляции принимают значение  $y_k$ , при котором  $r(y) < 0,2$  при всех  $y > y_k$ .

При линейной зависимости ПТС от наработки определяют среднюю скорость изменения ПТС по формуле (3.8).

Определение верхней и нижней доверительных границ скорости изменения ПТС осуществляют по формуле:

$$W_{B(H)} = W \pm U_{\lambda} \sigma / \sqrt{N},$$

где  $U_{\gamma}$  - квантиль нормального распределения;  $U_{\gamma}=1,28$  при  $\gamma=0,9$ ;  $U_{\gamma}=1,65$  при  $\gamma=0,95$ ;  $U_{\gamma}=2,33$  при  $\gamma=0,99$ .

Определение верхней доверительной границы коэффициента вариации скорости осуществляют по формуле:

$$V_E = V \left( 1 + U_{\gamma} \sqrt{\frac{3}{N}} \right) \quad (3.10)$$

Определение коэффициента вариации остаточного ресурса осуществляют по формуле:

$$V_T = V_E \sqrt{\frac{\Delta \bar{Y}}{Y_{np} - Y_k}} \quad (3.11)$$

Оценка среднего и гарантированного остаточного ресурса осуществляется по формулам диффузионных распределений (3.12) для монотонных зависимостей ПТС от наработки и (3.13) - для немонотонных.

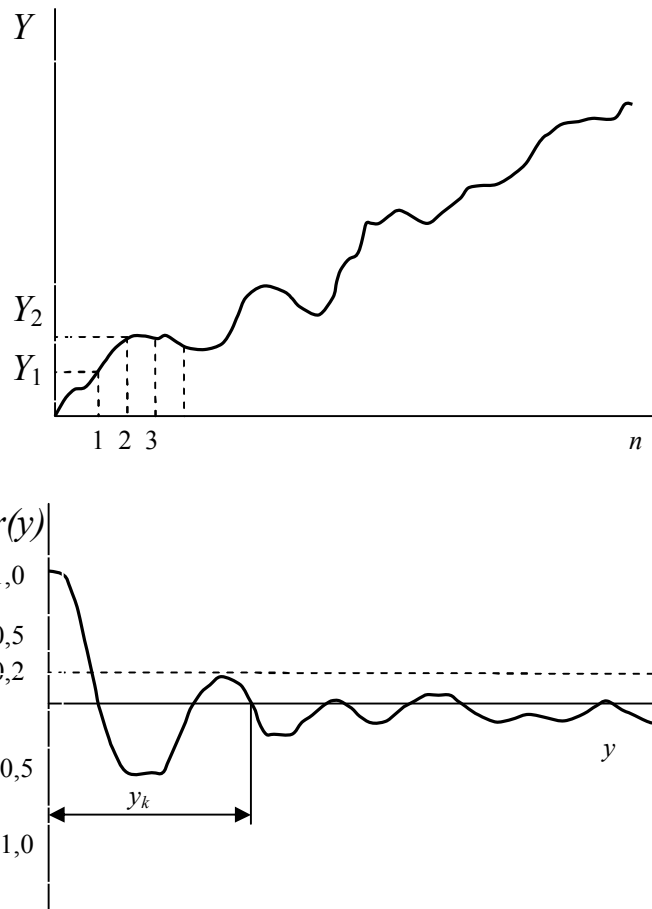


Рис. 3.5. Схема определения интервала корреляции  $y_k$  по корреляционной функции  $r(y)$ .

$$T_{\gamma} = \frac{1}{a_E} \left[ 1 + U_{\gamma}^2 V_T^2 / 2 - U_{\gamma} V_T (1 + U_{\gamma}^2 V_T^2 / 4)^{1/2} \right], \quad (3.12)$$

где  $a = w/(Y_{\text{пр}} - Y_{\text{к}})$ ;  $a_{\text{с}} = w_{\text{с}}/(Y_{\text{пр}} - Y_{\text{к}})$ ;

$Y_{\text{пр}}$ ,  $Y_{\text{к}}$  - соответственно предельное и контрольное значение ПТС.

$T_{\text{ср}} = 1/a$ ;

$$T_{\gamma} = \frac{1}{a(1 + V_T^2/2)} \left[ 1 + U_{\gamma}^2 V_T^2 / 2 - U_{\gamma} V_T (1 + U_{\gamma}^2 V_T^2 / 4)^{1/2} \right]. \quad (3.13)$$

При нелинейной зависимости ПТС от наработки вид зависимости  $Y(t)$  выбирают на основе анализа физических процессов, приводящих к потере работоспособности оборудования. Коэффициенты уравнения связи  $Y(t)$  определяют методом наименьших квадратов либо по таблице для



заданных аппроксимирующих функций, либо с помощью пакетов прикладных программ по статистическому анализу данных на ЭВМ.

Статистический анализ эксплуатационных параметров дает дополнительные возможности для выявления причин низкой надежности оборудования и разработки эффективных мер по их устранению: стабилизации наиболее влияющих параметров, созданию повышенных запасов до предельного состояния по этим параметрам и др. Предварительный анализ стабильности (дисперсии) технологических параметров производств, для которых разрабатывается оборудование, позволяет создавать оборудование с гарантированными показателями надежности для конкретных условий.

Для контроля параметров применяются штатные приборы или специальные средства технического диагностирования.

### **Контрольные вопросы**

1 На основании каких параметров определяется остаточный ресурс объекта технического контроля?

2 Каким образом осуществляется прогнозирование надежности оборудования?

3 Какие подходы применяются при прогнозировании остаточного ресурса в зависимости от срока эксплуатации?

4 В каких случаях при анализе условий эксплуатации возможно прогнозирование остаточного ресурса?

5 Что такое косвенный параметр технического состояния?

6 Какими видами погрешностей сопровождается определение остаточного ресурса по косвенным параметрам технического состояния?

7 В чем заключается особенность оценки остаточного ресурса оборудования при немонотонном изменении его выходных параметров?

## Глава 4 Формирование требований к многомерным моделям системы мониторинга и контроля технически сложных объектов

### 4.1 Функционирование СМиК на уровне формализованной модели

С формальной точки зрения (на уровне теоретико-множественного описания) процесс функционирования СМиК можно представить в виде диаграммы отображений одних множеств в другие, как это показано на рис. 4.1, где использованы введенные в 1.1.2 обозначения с той разницей, что через  $X$ ,  $Y$  и т.д. обозначены множества возможных значений соответствующих векторов, а не сами вектора. Такой формализм позволит в максимально общем виде сформулировать требования к основным составляющим постановки задачи контроля технического состояния относительно специфики конкретных объектов контроля (ТСО РКТ).

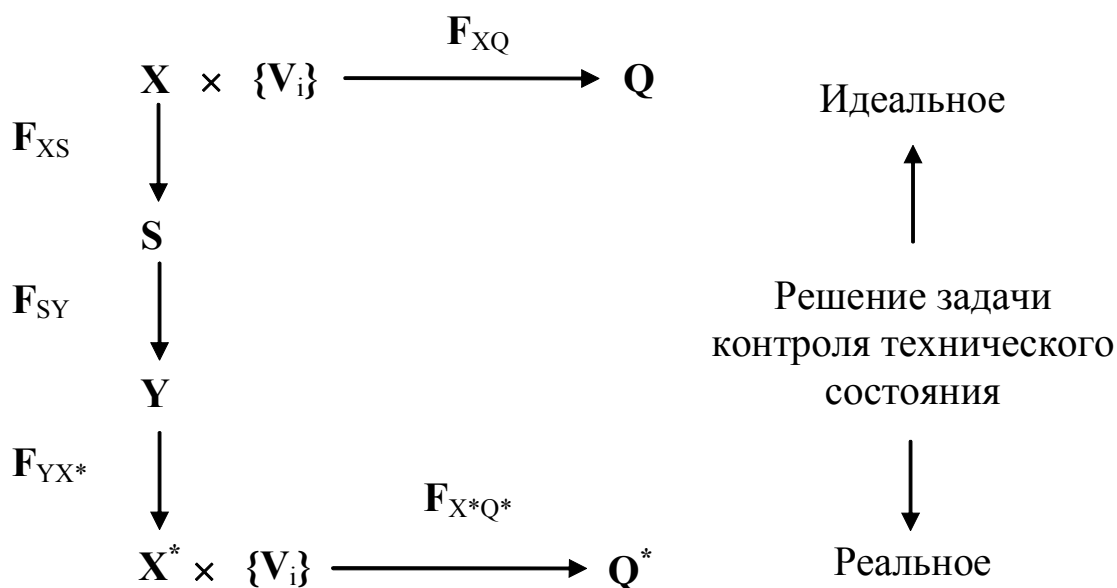


Рис. 4.1. Функционирование СМиК на уровне формального описания.

В том случае, когда доступно значение вектора контролируемых параметров может быть получено идеальное решение задачи контроля технического состояния в виде отображения  $F_{XQ} : X \times \{V_i\} \rightarrow Q$  декартова

произведения (множества пар) множества  $X$  значений векторов контролируемых параметров и множества ограничений  $\{V_i\}$  на множество  $Q$  технических состояний объекта контроля. По своей сути отображение  $F_{XQ}$  символизирует процедуру принятия решения о текущем состоянии в идеальном случае непосредственной доступности всех контролируемых параметров.

## 4.2 Реальное решение

В реальном случае контролируемые параметры (все или частично) непосредственно недоступны и приходится наблюдать только их образы, полученные в результате цепочки последовательных отображений. Как минимум следует учесть следующие отображения.

$F_{XS} : X \rightarrow S$ , где  $S$  – множество измеряемых (доступных для непосредственного наблюдения) сигналов. Отображение  $F_{XS}$  вытекает из свойств самого объекта контроля и определяет функциональную связь, лежащую в основе косвенных измерений.

$F_{SY} : S \rightarrow Y$ , где  $Y$  – множество результатов измерения для всех возможных значений векторов измеряемых сигналов. Отображение  $F_{SY}$  символизирует все преобразования, осуществляемые в каждом измерительном канале (для соответствующего компонента вектора), начиная от первичных преобразователей (датчиков) и до получения итогового результата непосредственного измерения сигналов в виде вектора из множества  $Y$ .

$F_{YX^*} : Y \rightarrow X^*$ , где  $X^*$  – множество «восстановленных» значений контролируемых параметров, полученных путем обработки результатов измерений. Отображение  $F_{YX^*}$  символизирует процедуру обработки измерительных сигналов, которая в существенной части определяется методом восстановления искомых контролируемых параметров по результатам их косвенных измерений.

$F_{X^*Q^*} : X^* \times \{V_i\} \rightarrow Q^*$ , где  $Q^*$  – множество технических состояний объекта, которые могут быть определены по восстановленным значениям  $X^*$  контролируемых параметров и вектору ограничений  $\{V_i\}$ . В идеале множество  $Q^*$  должно совпадать с множеством  $Q$ , при этом а) все состояния объекта являются наблюдаемыми и б) нет избыточных (фиктивных) состояний. Однако для общности следует предусмотреть возможность обоих этих случаев и считать  $Q^* \neq Q$ . Отображение  $F_{X^*Q^*}$

символизирует процедуру принятия решения о текущем состоянии на основании восстановленных по результатам измерений контролируемых параметров  $X^*$ .

Из диаграммы (см. рис. 4.1) можно установить, что для того, чтобы реальное решение (оценка состояния  $Q^*$ ) в точности совпадало с идеальным (фактическое состояние  $Q$ ), должны одновременно выполняться два условия:

1)  $X^* = X$ , что обеспечивается при  $F_{YX^*} F_{SY} F_{XS} = I$ , где  $I$  – тождественное отображение, а в левой части равенства – композиция отображений;

2)  $F_{X^*Q^*} = F_{XQ}$ , то есть реальная и идеальная процедуры принятия решения совпадают.

По поводу условия 1) сразу можно утверждать, что оно невыполнимо, по крайней мере, по той причине, что измерительное отображение  $F_{SY}$  не является взаимнооднозначным (обратимым) в виду неизбежных погрешностей измерения (одному и тому же результату измерения может соответствовать множество порождающих его измеряемых величин или сигналов). Поэтому нахождение  $F_{YX^*}$  (процедура обработки измерительных сигналов) путем решения композиционного уравнения в виде  $F_{YX^*} = F_{XS}^{-1} F_{SY}^{-1}$  является некорректным в виду отсутствия единственного решения. Эта неоднозначность – следствие потерь информации при измерениях. Таким образом, чтобы найти одно единственное решение, требуется каким-то образом снять эту неопределенность в решении, то есть выбрать из множества возможных решений одно, которое и принимается за оценку  $Q^*$  состояния объекта. Следует заметить, что при невыполнении условия 1) требовать безусловного выполнения условия 2) нет смысла. То есть, процедура принятия решения по неточным данным вовсе не обязана совпадать с идеальной. Все зависит от критерия, по которому устраняется множественность решений. Более простая процедура принятия решения (при определенных условиях) может давать более устойчивое, а иногда и более точное решение (по некоторому выбранному критерию оптимальности).

Модели систем мониторинга и контроля состояния ТСО РКТ должны обладать следующими качествами:

- открытостью – обеспечивается как переносимость компонентов системы, так и возможность совместного функционирования компонентов, в том числе функционирующих в составе различных систем;

- интегрируемостью – обеспечивается возможность интеграции различных систем и ресурсов в состав целого без необходимости дорогостоящих разработок. Это предполагает возможность объединения систем с различными архитектурами, ресурсами и поведением;
- гибкостью – обеспечивается способность систем как к развитию, так и к приспособлению к имеющимся и предполагаемым действиям;
- модульностью – обеспечивается возможность автономной работы для отдельных частей системы, остающихся взаимосвязанными;
- федеративностью – обеспечивается возможность комбинирования системы с другими системами;
- управляемостью – обеспечивается возможность для управления, контроля и наблюдения за поведением ресурсов, входящих в состав системы;
- безопасностью – обеспечивается гарантия того, что система и данные защищены от несанкционированного воздействия.

#### **4.3 Требования к априорной информации**

До начала функционирования (на стадии проектирования СМиК ТСО) в качестве априорной информации об объекте контроля должно быть известно следующее:

- множество значений  $\mathbf{X}$  вектора контролируемых параметров, число компонентов вектора должно быть минимальным, но достаточным для решения задачи контроля технического состояния;
- идеальное правило принятия решения (отображение  $\mathbf{F}_{\mathbf{XQ}}$ ), задающее эталонную процедуру определения текущего технического состояния объекта  $\mathbf{Q}$  по значению вектора  $\mathbf{X}$  контролируемых параметров;
- взаимосвязь между вектором контролируемых параметров  $\mathbf{X}$  и вектором измеряемых сигналов  $\mathbf{S}$  (отображение  $\mathbf{F}_{\mathbf{XS}}$ ), определяющая зависимости для косвенных измерений.

Для получения этих требований необходима модель объекта контроля и модель процесса принятия решения (классификация и распознавание состояний). Это требует проведения исследования конкретного объекта контроля. Данная задача может решаться как в детерминированной постановке, так и в недетерминированной.

Детерминированная постановка состоит обычно в построении динамической модели на основе физических закономерностей, которым

подчиняется данный объект. Технически все сводится к составлению системы интегро-дифференциальных уравнений с последующим решением ее численными методами. Недостатками такого подхода являются: необходимость знания большого количества внутренних параметров каждого конкретного объекта, комбинаторная сложность вычислений при увеличении размерности вектора контролируемых параметров, представление результатов (обычно функций времени и других параметров) в виде числовых массивов, что не позволяет использовать эффективные аналитические методы анализа динамических моделей.

Недетерминированная постановка в явном виде включает в себя учет неопределенности как в исходных данных, так и в конечном результате. Существуют два основных способа учета неопределенности: вероятностно-стохастический и на основе нечетких множеств и нечеткой логики. Традиционным и более проработанным является вероятностно-стохастический способ. Способы применения нечеткой логики в задачах технического контроля находятся в стадии активного развития (см., например, [15]).

#### **4.4 Требования к измерениям**

Измерительные процессы в задачах контроля технического состояния характеризуются следующими особенностями:

- критерии состояния часто определяются с помощью допускового контроля контролируемых параметров, что может осуществляться при не очень высоких требованиях к точности измерения;
- некоторые методы косвенного измерения (вибрационная и акустическая диагностика, ультразвуковая дефектоскопия, оценка динамических и спектральных характеристик) требуют измерения быстропротекающих во времени динамических процессов, что приводит к большим потокам измерительных данных и требует достаточного быстрогодействия измерительных каналов в части оцифровки данных, хранения и передачи к месту обработки;
- при использовании вероятностно-стохастических способов контроля требуется постоянное накопление больших объемов статистических выборок измеряемых данных и нахождение текущих статистических оценок в реальном масштабе времени.

#### **4.5 Требования к процедуре принятия решения**

Основными исходными данными для синтеза процедуры (алгоритма) принятия решения о текущем состоянии объекта являются:

- перечень (множество) возможных технических состояний объекта и критерии предельных состояний, представленные в виде вектора ограничений (устанавливается изготовителем объекта и фиксируется в НТД);
- требования к минимально необходимому перечню контролируемых параметров;
- требования к достоверности контроля (в вероятностной постановке это вероятности «правильного решения» и «ложной тревоги»).

## **4.6 Сравнительный анализ альтернативных решений СМик ТСО**

### **4.6.1 Интеллектуальные измерения и сенсоры**

В настоящее время, процесс, происходящий в развитии измерительных систем, переходит на качественно новый уровень, характеризующийся следующими особенностями:

- внедрением процессорной техники на уровень первичных преобразователей (сенсоров), что дает возможность перенести часть вычислительной нагрузки на уровень первичных измерительных и исполнительных приборов и снизить интенсивность межсетевого обмена;
- использованием технологий открытого взаимодействия, дающих принципиальную возможность получить доступ к диагностической информации, управлению системой из любой ее точки по цифровой шине, по радиоканалу или с WEB-узла, при этом каждый датчик или исполнительный механизм превращается в своеобразный сервер данных и может накапливать и хранить информацию, а также управлять некоторыми контурами управления в системе;
- реализацией адаптивных алгоритмов измерения и обмена, позволяющих повысить надежность системы;
- на основе диагностической информации, поступающей от первичных преобразователей, система может прогнозировать изменение характеристик и отказы, как отдельных узлов, так и так и системы в целом.

За счет усложнения своей организации сенсоры приобретают новые потребительские качества: упрощается обслуживание, снижаются

эксплуатационные и ремонтные расходы, уменьшается время подготовительных работ перед началом эксплуатации, повышается надежность и точность измерения. В сенсорах может быть обеспечена непрерывная самодиагностика и доступность для контроля, настройки и коррекции непосредственно на объекте.

Необходимо определить, что понимается под словом «интеллектуальность», поскольку в практике его употребления наблюдаются значительные расхождения в его значении. Определение «интеллектуального» сенсора, как сенсора с цифровым выходом или с встроенным микроконтроллером, является не совсем корректным, так как в этом случае любой сенсор, способный непосредственно включаться в какую-либо цифровую шину, может считаться интеллектуальным. По-видимому, целесообразно ввести определенные градации в «степени интеллектуальности»:

1. Сенсоры с минимальной «интеллектуальностью» - сенсоры, имеющие встроенный микропроцессор для первичной математической обработки сигнала (линеаризация, компенсация температурной погрешности) и преобразования сигнала первичного преобразователя в унифицированный выходной сигнал. Причем формат выходного сигнала значения не имеет. Это может быть унифицированный аналоговый сигнал (4–20мА, 0–5мА и т.д.) или цифровой RS-485 или RS-232. Фактически эти сенсоры реализуют только первый уровень базовой эталонной модели OSI [16]. Ключевой особенностью таких сенсоров является отсутствие обратной связи между системой и сенсором. Система только принимает выходной сигнал сенсора. Основные цели использования сенсоров подобного типа:

- повышение точности за счет точного расчета и корректировки измеряемого параметра;
- повышение точности и стабильности за счет компенсации внешних возмущающих факторов;
- повышение точности за счет передачи информации в цифровом виде;
- удобство интеграции в цифровые информационно-измерительные и контрольно-диагностические системы.

2. Сенсоры, обладающие всеми особенностями, перечисленными в п.1 и дополнительно обеспечивающие обратную связь с системой управления измерениями. Эти сенсоры дополнительно обеспечивают 7-й уровень эталонной модели ISO. Типичными примерами таких сенсоров



являются сенсоры с HART-протоколом [17] и сенсоры системы ProfiBus.

3. Сенсоры, обеспечивающие полнофункциональное взаимодействие с другими участниками системы. Это подразумевает не только самодиагностику сенсора, но и анализ его собственных данных, данных системы и выдачу управляющих сигналов другим участникам системы. В настоящее время говорить о широком внедрении сенсоров такого типа в промышленные системы достаточно рано. Единственным, пожалуй, примером сенсоров с таким уровнем интеллекта являются сенсоры с выходным интерфейсом FOUNDATION FieldBus [18].

Сенсоры первого типа правильнее охарактеризовать как «цифровые», а не «интеллектуальные». «Интеллект» сенсора направлен, в основном, только на то, чтобы представить результаты измерения в цифровом виде для удобства математической обработки. Достоинствами сенсоров такого уровня «интеллекта» является их дешевизна, простота, универсальность и малые накладные расходы на бит полезной информации (фактически, это всего лишь адрес сенсора). Встраивание температурных сенсоров позволяет компенсировать «температурный дрейф» характеристик. Используя модульную конструкцию, и соответствующие шинные преобразователи, такой сенсор может легко приспособить практически к любой шине. Формально такие сенсоры можно использовать в качестве элемента открытой системы, но при этом все вопросы по согласованию сенсора с приложением пользователя должна взять на себя система. Учитывая многообразие типов сенсоров, протоколов связи и запросов пользователя, это представляется затруднительным. В настоящее время этот вопрос решается путем разработки специализированных драйверов. В качестве примеров подобных сенсоров можно привести сенсоры давления RPT 200 SMART фирмы Druck и Метран 100 (без HART протокола) одноименной компании.

Сенсоры второго типа являются «интеллектуальными», согласно определению Honeywell: «Мы называем "интеллектуальным" прибор, который с помощью сенсора на кремниевой основе и микропроцессорной технологии, обеспечивает:

- возможность двустороннего обмена цифровой информацией при настройке и эксплуатации сенсора;
- диагностику сенсора и электроники;
- изменение диапазона измерений в широких пределах;
- стабильный результат измерений при изменяющихся режимах работы».

Такой сенсор не только способен выдавать текущее измерение, но и корректировать собственные параметры и проводить самодиагностику. Наиболее распространенными сенсорами такого типа являются сенсоры, реализующие протоколы HART и ProfiBus (серия 3051 фирмы Emerson, Magnew 3000 Plus фирмы Honeywell и т.д.). С целью реализации взаимодействия с пользователем сенсоры обязаны поддерживать стандартизованный набор команд.

Такой подход упрощает построение системы управления, но ограничивает возможности разработчика по реализации нестандартных функции взаимодействия приборов на полевого уровне. Это связано с тем, что, несмотря на декларируемую интеллектуальность, фактически прибор может выполнять только набор функций, заложенный в него изготовителем и, в лучшем случае, ознакомить пользователя с этим набором. Собственно это является не ограничением сенсора, а ограничением всего комплекса управления, накладываемого на него стандартом OSI.

Попыткой преодолеть ограничения приборов «второго уровня интеллектуальности» является разработка протоколов FF и LonTalk [19], которые позволяют создавать пользовательские программы работы сенсоров, загружать их в ПЗУ сенсоров и запускать на выполнение. Именно это принципиальное отличие позволяет реализовать на основе сенсоров «третьего уровня интеллекта» своеобразные микро-управляющие центры, распределенные по всей СМик и говорить о возникновении нового типа систем контроля – на базе распределенных элементов искусственного интеллекта.

Из сравнения сенсоров всех трех уровней, можно сделать вывод, что с точки зрения устройства они отличаются только возможностями процессора электронного модуля. Однако это различие определяет и различие в схеме построения СМик и в требованиях к программному обеспечению. Это означает, что только согласованное проектирование системы управления измерениями и сенсоров позволит полностью реализовать возможности сенсоров.

Рассмотрев проблему «интеллектуализации» сенсора можно обратить внимание, что с ее помощью решаются две главные проблемы – проблема оптимальной оценки собственного параметра сенсора и проблема взаимосвязи сенсора с другими устройствами, входящими в СМик.

#### **4.6.2      Базовые      архитектуры      информационно-измерительной системы**

Аппаратная часть СМиК представляет собой информационно-измерительную систему (ИИС). Специфичные части СМиК (процедуры обработки измерительных сигналов и принятия решений о текущем техническом состоянии объекта) реализуются в программном обеспечении.

Существует широкий спектр возможных конфигураций архитектуры ИИС. Двумя предельными случаями являются централизованная (рис. 4.2) и распределенная (рис. 4.3) архитектура аппаратной части ИИС.

Централизованная архитектура является традиционной, она характеризуется полностью централизованным управлением от ЭВМ всеми процессами (конфигурирование компонентов, синхронизация и запуск измерений, передача и ввод цифровых данных). Достоинствами этой архитектуры считаются: относительно небольшое количество цифровых блоков; возможность достижения предельного быстродействия.

Процесс контроля технического состояния обычно характеризуется невысокими требованиями к скорости и точности отдельных измерительных каналов, поэтому достоинства централизованной архитектуры ИИС для СМиК не являются решающими. Более важными являются требования однородности подключения сенсоров, простоты и надежности средств передачи данных, живучести при отказе части информационной сети [20-24]. Этим требованиям в большей степени удовлетворяет распределенная архитектура ИИС (рис. 4.3). В случае использования интеллектуальных сенсоров 1-го, 2-го и 3-го типов (см. предыдущий подраздел) распределенная архитектура получается естественным путем за счет использования штатных коммуникативных функций самих сенсоров. Для повышения совокупной скорости съема данных сверх возможностей цифровой распределенной шины структура может разветвляться, для этого потребуется по одному дополнительному концентратору (контроллеру) на каждую ветвь распределенной шины. Таким образом, именно распределенная структура ИИС является оптимальной для реализации на ее основе типовых интеллектуализированных СМиК [27-30].

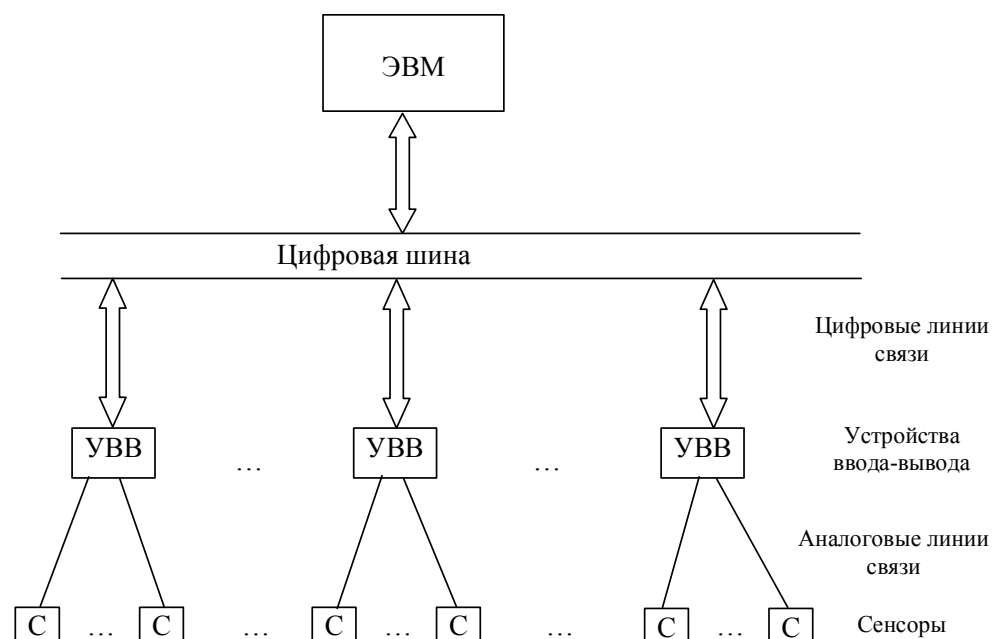


Рис. 4.2. Централизованная (радиальная) информационно-измерительная система

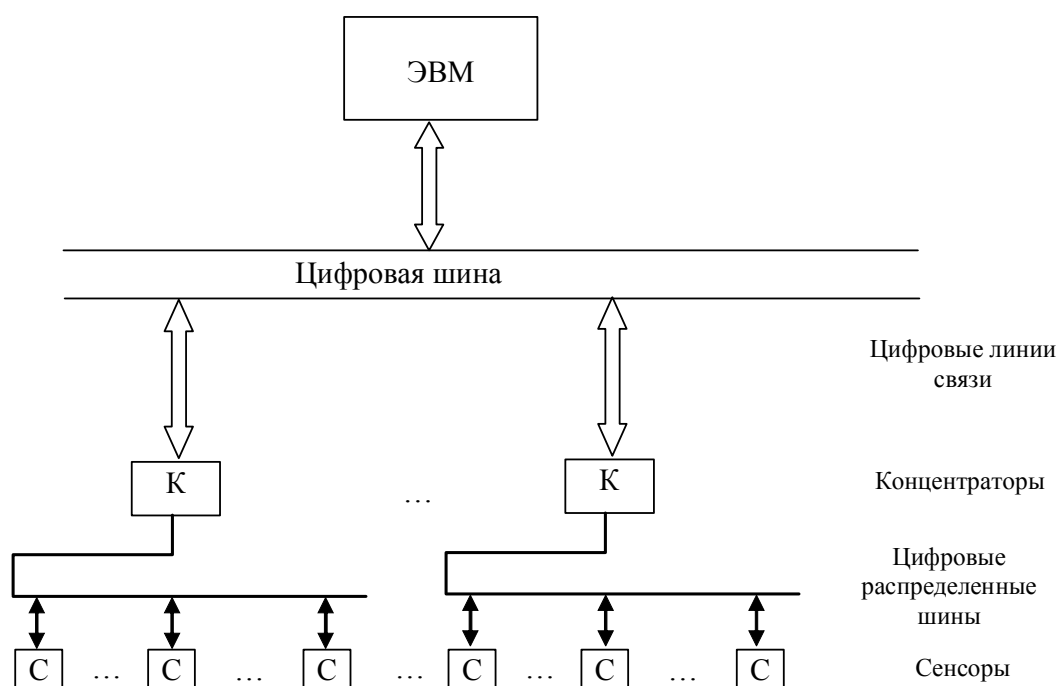


Рис. 4.3. Распределенная информационно-измерительная система

### Контрольные вопросы

1 В чем заключается особенность процедуры принятия решения по неточным данным (в реальной ситуации)?

2 Почему условия совпадения идеального и реального решения в системе мониторинга и контроля не могут быть выполнены?

3 Какие требования к априорной информации предъявляются на стадии проектирования системы мониторинга и контроля?

4 Перечислите типы интеллектуальных сенсоров в порядке повышения степени “интеллектуализации”.

5 В чем заключается преимущество распределенной информационно – измерительной системы перед централизованной?

## **Глава 5 Разработка принципов построения типовых интеллектуализированных СММК ТСО**

### **5.1 Требования к встроенным ресурсам ТСО**

Принципиальной особенностью СММК с системными элементами ИИ является информационная и функциональная избыточность всех составляющих: датчиков, ДПА, каналов передачи данных, средств предварительной обработки, представления и визуализации результатов мониторинга и контроля для системы верхнего уровня [32, 33]. Таким образом, СММК может осуществлять сбор и предварительную обработку данных от датчиков трех типов:

- встроенных датчиков ТСО;
- собственных датчиков СММК для контроля ТСО;
- датчиков вторичной сенсорики СММК.

Встроенность датчика в ТСО предполагает ситуацию, когда он установлен и/или изготовлен в едином технологическом цикле разработки, испытаний, поставки ТСО. Это обеспечит снижение стоимости изготовления, комплексирования, отладки, и повышение надежности системы ТСО-СММК.

Интеллектуализированный мониторинг и контроль состояния ТСО возможен только на статистически значимых массивах данных [34, 35]. Если измерение какого-либо параметра (группы параметров) осуществляется единственным датчиком (нет информационной избыточности) и этот параметр не может быть рассчитан по косвенным данным других датчиков (нет функциональной избыточности), то сфера применения системных элементов ИИ касается только самой СММК и не может быть распространена на анализ ТСО [36-38].

Отсюда первое требование: встроенные датчики ТСО должны либо дублироваться, либо дополняться более простыми и дешевыми датчиками того же параметра. В этом смысле объявленный в СА 03-002-05 «4.1.2. Принцип достаточности, регламентирующий выбор минимального числа датчиков вторичных процессов, сопровождающих работу машин, оборудования и технологической системы в целом, обеспечивающих наблюдаемость технического состояния» для СММК с системными элементами ИИ трансформируется в принцип обязательной избыточности [39].

Второе требование: встроенные датчики ТСО должны быть управляемы СМиК с целью изменения режимов и процедур контроля и мониторинга, как ТСО, так и самих датчиков. Оба требования распространяются и на собственные датчики СМиК для контроля ТСО.

Третье требование: датчики вторичной сенсорики СМиК должны контролировать функциональное состояние основных компонентов СМиК и загруженность трактов сбора, обработки и передачи данных, включая каналы связи, буферную память, вычислительные ресурсы. Отметим, что датчики вторичной сенсорики это не датчики вторичных процессов, которые определены в СА 03-002-05, как *«датчики физических величин, описывающих вторичные процессы функционирования оборудования, применяемые в различных методах неразрушающего контроля (датчики вибрации, акустической эмиссии, магнитных полей и т. д.)»* [39].

Анализ внешних условий и мониторинг жизненного цикла компонентов СМиК представляют собой взаимосвязанные задачи. Но их решение не исчерпывается методами изложенными выше. Во-первых, необходимым ресурсом для обеспечения анализа внешних влияющих факторов (ВВФ) являются электронная паспортизация компонентов. Эта паспортизация необходима для компонентов СМиК, которая сама квалифицируется, как ТСО РКТ, причем в предельном случае должна быть обеспечена, как защита от контрафакта, так и накопление исчерпывающих данных об условиях производства, испытаний, транспортировки и эксплуатации.

Во-вторых, электронная паспортизация предполагает не просто запись текущих ВВФ, а накопление данных об этих ВВФ с последующим анализом данных в экспертной системе. Следует учитывать, что принципиальным отличием мониторинга состояния от мониторинга параметров является наличие интерпретатора измеренных параметров в терминах технического состояния (экспертной системы поддержки принятия решения о состоянии объекта и дальнейшем управлении).

Экспертная система может быть встроенной в СМиК или находится в системе более высокого уровня, но без нее мониторинг состояния превратится в пассивное наблюдение для возможного последующего использования, т.е. мониторинг параметров. СМиК со встроенными системными элементами искусственного интеллекта предполагает обязательность текущего анализа накопленных данных о ВВФ, параметрах ТСО, о параметрах компонентов СМиК.

Отметим, что информация о статистической модели СМиК и ее компонентов совсем не является обязательным условием текущего

анализа. Например, использование методов ККШ (контрольных карт Шухарта) позволяет анализировать стабильность процессов работы СМиК, независимо от статистических параметров контролируемого ТСО и самой СМиК [31].

## **5.2 Принципы построения типовых интеллектуализированных СМиК ТСО**

К числу основных принципов построения интеллектуализированных СМиК ТСО, исходя из общих принципов построения систем мониторинга, изложенных в [39], следует отнести:

1. Системы мониторинга и контроля должны обеспечивать получение информации о состоянии оборудования ТСО РКТ в необходимом количестве и качестве для обеспечения наблюдаемости его технического состояния. По результатам наблюдения должны заблаговременно вырабатываться управляющие воздействия, которые обеспечивают необходимый запас устойчивости ТСО, качество их функционирования, создают необходимый запас их техногенной, экологической и экономической безопасности.

2. Принцип достаточности регламентирует выбор минимального числа датчиков вторичных процессов, сопровождающих работу машин, оборудования и технологической системы в целом, обеспечивающих наблюдаемость технического состояния. При этом выходной сигнал датчиков может быть представлен в широком диапазоне амплитуд и частот с последующей обработкой его в компьютере (обнаружением, фильтрацией, линеаризацией, коррекцией амплитудно-фазовых характеристик и т.д.).

3. Принцип информационной полноты отражает ограниченность наших знаний об окружающем мире и в общем виде может быть сформулирован так, что помимо известных нам диагностических признаков, описывающих техническое состояние объекта известным образом, из спектра сигнала после удаления из него известных признаков выделяют остаточный «шум», характеристики которого также используют для диагностики. При достаточно общих условиях такая система признаков почти ортогональна, т.е. каждый из признаков отражает свой класс неисправностей оборудования.

4. Принцип инвариантности регламентирует выбор и селекцию таких диагностических признаков, которые инвариантны к конструкции оборудования и форме связи с параметрами ее технического состояния,



что обеспечивает применение стандартных процедур без эталонной диагностики и прогнозирования ресурса машин и, соответственно, быстрые темпы разработки и внедрения СМиК, переводя их в разряд стандартных систем обеспечения безопасности оборудования и процессов.

5. Принцип самодиагностики всех измерительных и управляющих каналов СМиК реализуется подачей специальных стимулирующих сигналов в цепь датчика и компьютерного анализа этого сигнала на выходе системы. Таким образом, проверяется функционирование всего тракта СМиК от датчика до компьютерной программы и монитора. Реализация этого принципа обеспечивает легкий пуск систем в эксплуатацию, простоту обслуживания и ремонта отдельных каналов, высокую метрологическую и функциональную надежность системы, ее выживаемость и приспособляемость к постоянно меняющимся условиям реального производства.

6. Принцип структурной гибкости и программируемости обеспечивает реализацию оптимальной параллельно-последовательной структуры ИДС, исходя из критериев необходимого быстродействия при минимальной стоимости. Системы с параллельной сосредоточенной структурой (VME-VXI) имеют максимальное быстродействие при максимальной стоимости. Системы с последовательной распределенной структурой имеют минимальное быстродействие при минимальной стоимости. Системы с последовательно-параллельной структурой занимают промежуточное положение. Главным недостатком применения параллельных систем во взрывопожароопасных производствах является большой расход кабеля, стоимость которого соизмерима со стоимостью СМиК. Выбор структуры системы (степени параллельности) требует оценки ее необходимого быстродействия. Последнее определяется скоростью деградации технического состояния диагностируемого объекта.

7. Принцип коррекции неидеальностей измерительных трактов вычислительными методами на ЭВМ - нелинейности датчиков, амплитудно-фазовых характеристик согласующее преобразовательных трактов и т.д. обеспечивает высокую точность и стабильность метрологических характеристик СМиК.

8. Принцип дружелюбности интерфейса при максимальной информационной емкости обеспечивает восприятие оператором состояния технологической системы в целом при одном взгляде на монитор и получение целеуказующего предписания на ближайшие неотложные действия. Осуществление этого принципа возможно только при наличии ЭВМ, дисплея с графическими экранами, комплексно отражающими

состояние объекта и его свойств в автоматическом режиме и под управлением оператора, средств мультимедиа и встроенной экспертной системы, диагностирующей состояние машин и технологической системы в целом.

9. Принцип многоуровневой организации обеспечивает работу с системой специалистам разных уровней квалификации и ответственности. Количество уровней СМиК определяется сложностью объекта РКТ, его принадлежностью и местом расположения.

### **Контрольные вопросы**

1 Что является принципиальной особенностью систем мониторинга и контроля с элементами искусственного интеллекта?

2 При соблюдении какого условия возможен интеллектуализированный мониторинг и контроль?

3 В чем заключается принцип инвариантности при построении типовых интеллектуализированных систем мониторинга и контроля?

4 Для чего необходимо соблюдение принципа коррекции неидеальности измерительных трактов при построении типовых интеллектуализированных систем мониторинга и контроля?

## Литература

1. ГОСТ 19919-74 Контроль автоматизированный технического состояния изделий авиационной техники. Термины и определения.
2. ГОСТ 20911-89 Техническая диагностика. Термины и определения.
3. ГОСТ 16504-81 Испытания и контроль качества продукции. Основные термины и определения.
4. ГОСТ 27.002-89 Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения.
5. Гмурман В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика, — М.: Высшее образование. 2005
6. Гнеденко Б. В. Курс теории вероятностей. М., Наука, 1969. 399 с.
7. Вальд А., Последовательный анализ, пер. с англ.- М.: Физматгиз, 1960.
8. Горелик А. Л., Скрипкин В. А. Построение систем распознавания. М., Советское радио, 1974. 222 с.
9. Ван Трис Г. Теория обнаружения, оценок и модуляции. Том 1. М., Советское радио, 1972. 743 с.
10. Харкевич А. А. Борьба с помехами. М., Наука, 1965. 274 с.
11. Биргер И.А. Техническая диагностика. М., Машиностроение, 1978. 240 с.
12. ГОСТ 27.003-90 Состав и общие правила задания требований по надежности.
13. РД 50-490-84 Методические указания. Техническая диагностика. Методика прогнозирования остаточного ресурса машин и деталей по косвенным параметрам".
14. ГОСТ 27.302-86 Надежность в технике. Методы определения допускаемого отклонения параметра технического состояния и прогнозирование остаточного ресурса составных частей агрегатов и машин.
15. Фандеев В.П., Тутушкин В.И. Методический подход к выбору диагностических параметров для прогнозирования технического состояния электронных приборов и аппаратуры // Известия вузов

Поволжского региона: Технические науки. - № 3. - 2011. -с. 124 - 131.

16. Прогрессивные технологии моделирования, оптимизации и интеллектуальной автоматизации этапов жизненного цикла авиационных двигателей: Монография / А. В. Богуслаев, Ал. А. Олейник, Ан. А. Олейник, Д. В. Павленко, С. А. Субботин; Под ред. Д.В. Павленко, С.А. Субботина. – Запорожье: ОАО "Мотор Сич", 2009. – 468 с.

17. ГОСТ Р ИСО 7498-2-99 Информационная технология. Взаимосвязь открытых систем. Базовая эталонная модель.

18. HART-протокол первичной связи. Технический обзор.

19. Официальный Web-сайт <http://www.fieldbus.org/>.

20. LonTalk protocol specifications. Echelon corporation.

21. IEEE SCC20 – стандарт на представление данных диагностики сложных систем в области электроники.

22. СА 03-002-05 Стандарт ассоциации. СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА АГРЕГАТОВ ОПАСНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ОБЪЕКТОВ. Общие технические требования.

23. ГОСТ 15.601-98. Система разработки и постановки продукции на производство. Техническое обслуживание и ремонт техники. Основные положения.

24. ГОСТ 27518-87. Диагностирование изделий. Общие требования.

25. РД 09-102-95. Методические указания по определению остаточного ресурса потенциально опасных объектов, поднадзорных Госгортехнадзору России.

26. ГОСТ Р 22.2.05-94. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Техногенные аварии и катастрофы. Нормируемые метрологические и точностные характеристики средств контроля и испытаний в составе сложных технических систем, формы и процедуры их метрологического обслуживания. Основные положения и правила

27. ГОСТ Р ИСО/МЭК 15288-2005 Информационная технология. Системная инженерия. Процессы жизненного цикла систем

28. Стандарты серии ГОСТ Р ИСО 10303-....-... Системы автоматизации производства и их интеграция.

29. Шильников П.С. Средства поддержки CALS-технологий (технологий непрерывной компьютерной поддержки полного Жизненного

Цикла Изделия)//Юбилейная научно-практическая конференция АНТОК СНГ:Тезисы докладов. –М.,2001. – С.15– 18.

30. Standard data access interface // ISO 10303: Industrial automation system and integration: Product data representation and exchange: Implementation methods, 1998. – Part 22. – 217p.

31. Статистическое управление процессами: оптимизация бизнеса с использованием контрольных карт Шухарта/ Д. Уиллер, Д. Чамберс; Пер. с англ. – М.: Альпина Бизнес Бук, 2009. -409с.

32. Ацюковский В.А. и др. Основы организации систем цифровых связей в сложных информационно-измерительных комплексах. – М.: [Энергоатомиздат](#), 1996 г., 96 стр.

33. Ацюковский В.А. Построение оборудования летательных аппаратов: Информационные основы построения систем связей комплексов систем передачи и преобразования сигналов бортовых комплексов оборудования. - М.: Машиностроение, 1976. - 240 с.

34. Ольховский Ю.Б., Новоселов О.Н., Мановцев А.П. Сжатие данных при телеизмерениях. М. Советское радио 1971г. 304 с.

35. Мановцев А.П. Основы теории радиотелеметрии.М.: Энергия 1973 592с.

36. Авдеев Б.Я. Антонюк Е.М. Долинов С.Н. Адаптивные телеизмерительные системы \ Под редакцией А.В. Фремке. Л.: Энергоиздат. Ленинградское отд-ние. 1981.248с.

37. Цапенко М.П. Измерительные информационные системы.- М.: Энергоатомиздат, 1985.- 439 с.

38. Недосекин Д.Д., Прокопчина СВ. Чернявский Е.А. Информационные технологии интеллектуализации измерительных процессов. СПб.:Энергоатомиздат, 1995, 185 с.

39. Стандарт ассоциации. Системы мониторинга агрегатов опасных производственных объектов. Общие технические требования. СА 03-002-05 Москва 2005.

40. Волков, В.С. Модели, методы и алгоритмы оптимизации диагностирования приборов.: Учебное пособие / В.П. Фандеев, В.С. Волков - Пенза: Изд-во ПГУ, 2007. – 76 с.

41. Фандеев В.П. Технологии и средства анализа отказов восстанавливаемых электронных изделий приборостроения. – Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2001. – 240 с.

42. Цыпин Б.В. Методы поиска неисправностей при диагностике машин и приборов: Учеб. пособие. – Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 1997. – 60 с.