

**В. И. Сидельников**

**ДИАГНОСТИКА И НАДЕЖНОСТЬ  
АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ**

**Часть 2**

**Учебное пособие**

**Санкт-Петербург  
2023**

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации**  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

**«Санкт-Петербургский государственный университет  
промышленных технологий и дизайна»  
Высшая школа технологии и энергетики**

**В. И. Сидельников**

# **ДИАГНОСТИКА И НАДЕЖНОСТЬ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ**

**Часть 2**

**Учебное пособие**

Утверждено Редакционно-издательским советом ВШТЭ СПбГУПТД

Санкт-Петербург  
2023

**УДК 681.5.03**  
**ББК 30**  
**С347**

*Рецензенты:*

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой автоматизации химической промышленности Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета)

*Л. А. Русинов;*

кандидат технических наук, доцент кафедры прикладной математики и информатики Института энергетики и автоматизации Высшей школы технологии и энергетики Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна

*В. П. Яковлев*

**Сидельников, В. И.**

**С347** Диагностика и надежность автоматизированных систем: учеб. пособие. Часть 2 / В. И. Сидельников. — СПб.: ВШТЭ СПбГУПТД, 2023. — 54 с.  
ISBN 978-5-91646-347-7

Учебное пособие соответствует программам и учебным планам дисциплины «Диагностика и надежность автоматизированных систем» для студентов, обучающихся по направлениям подготовки: 27.03.04 «Управление в технических системах» и 15.03.04 «Автоматизация технологических процессов и производств».

Пособие предназначено для подготовки бакалавров очной и заочной форм обучения.

УДК 681.5.03  
ББК 30

ISBN 978-5-91646-347-7

© ВШТЭ СПбГУПТД, 2023  
© Сидельников В. И., 2023

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	4
ГЛАВА 1. ОСНОВЫ ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ.....	5
1.1. Что такое техническая диагностика.....	5
1.2. Основные термины и определения .....	7
1.3. Проблемы диагностирования и методы повышения качества технической диагностики.....	10
ГЛАВА 2. ДЕФЕКТЫ И МЕТОДЫ ИХ ОБНАРУЖЕНИЯ .....	13
2.1. Классификация методов обнаружения дефектов .....	13
2.2. Оптимизация поиска отказов .....	18
ГЛАВА 3. ОБНАРУЖЕНИЕ НЕИСПРАВНОСТЕЙ В АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ .....	23
3.1. Структура задачи технического контроля.....	23
3.2. Задача распознавания текущего состояния объекта.....	26
3.3. Математическая постановка задачи распознавания .....	27
3.4. Статистические методы распознавания. Метод Байеса .....	29
3.5. Метод последовательного анализа .....	31
3.6. Методы статистических решений .....	33
3.7. Метрические методы распознавания .....	33
3.8. Классификация методов прогнозирования.....	34
ГЛАВА 4. АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ .....	37
4.1. Определение остаточного ресурса .....	37
4.2. Концепция прогнозирования остаточного ресурса .....	37
4.3. Критерии предельных состояний оборудования .....	40
4.4. Методы прогнозирования остаточного ресурса при монотонном изменении контролируемых параметров .....	40
4.5. Оценка остаточного ресурса оборудования по изменению его выходных параметров при их немонотонном изменении .....	45
ГЛАВА 5. ОРГАНИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ.....	51
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	53

## ВВЕДЕНИЕ

Эта часть учебного пособия посвящена проблемам диагностики и оценке остаточного ресурса технических средств. Понятие **диагностика** означает распознавание, определение. Рост роли и значения технической диагностики связан с общим развитием техники, усложнением систем, необходимостью обеспечения надежной и безаварийной работы этих систем, увеличением степени опасности и тяжести последствий отказов. Все это требует непрерывного мониторинга и контроля параметров технических устройств в целях обеспечения их работоспособности в условиях воздействия внешних факторов, агрессивных сред, электромагнитных полей, а также возможности предсказания их поведения в будущем.

Информация о параметрах функционирования технических систем в реальном масштабе времени и анализ этой информации позволяет определить текущее состояние объекта и провести подготовку и проведение необходимых мероприятий для обеспечения их надежной работы.

## ГЛАВА 1. ОСНОВЫ ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ

Ответственность и сложность задач, решаемых автоматизированными системами управления (АСУ), выдвигают особые требования к обеспечению их надежной работы. Основные понятия и определения связаны с этой проблемой и приведены в первой части учебного пособия. При этом, как отмечалось, одной из важнейших характеристик АСУ является восстанавливаемость, что в первую очередь связано с обнаружением отказа и с поиском отказавших элементов. Наблюдение за работоспособностью системы и поиск дефекта составляют до 90 % времени, затрачиваемого на восстановление системы [1]. Одновременно очень важное значение имеют вопросы прогнозирования состояния систем в будущем.

### 1.1. Что такое техническая диагностика

*Техническая диагностика* – область знаний, охватывающая теорию, методы и средства определения технического состояния объекта [2].

Техническая диагностика является **научной дисциплиной**, содержание которой заключается в изучении и определении действительного состояния системы и характера его изменения во времени.

Задачи, решаемые диагностикой, очень разнообразны. Она интенсивно развивается в направлении совершенствования формализованных методов алгоритмизации поиска дефектов, определения работоспособности устройств и систем и создания автоматизированных диагностических комплексов. Создаются рациональные аналитические методы построения программ диагностирования. Находятся пути и способы сокращения объема необходимых вычислений, также определяются методы оптимизации поиска дефектов и оптимизации программ диагностирования. В общем виде структура технической диагностики представлена на рис. 1.

Как видно из приведенной схемы, важным направлением технической диагностики является теория контроллепригодности – обеспечения достоверной оценки технического состояния объекта и раннего обнаружения неисправностей, что обеспечивается конструкцией объекта и принятой системой технической диагностики.

Одной из задач теории контролеспособности является изучение средств и методов получения диагностической информации, а также разработка алгоритмов поиска неисправностей и минимизация времени процесса установления диагноза [2]. В соответствии с ГОСТ 16504-81 «Испытания и контроль качества продукции. Основные термины и определения», техническая диагностика направлена на исследование текущего состояния объектов диагностирования и форм его проявления во времени, на разработку методов его определения и принципов построения систем диагностирования [3]. Причем, результатом этого исследования должно быть заключение о техническом состоянии объекта с указанием места, а при необходимости – вида и причины дефекта.

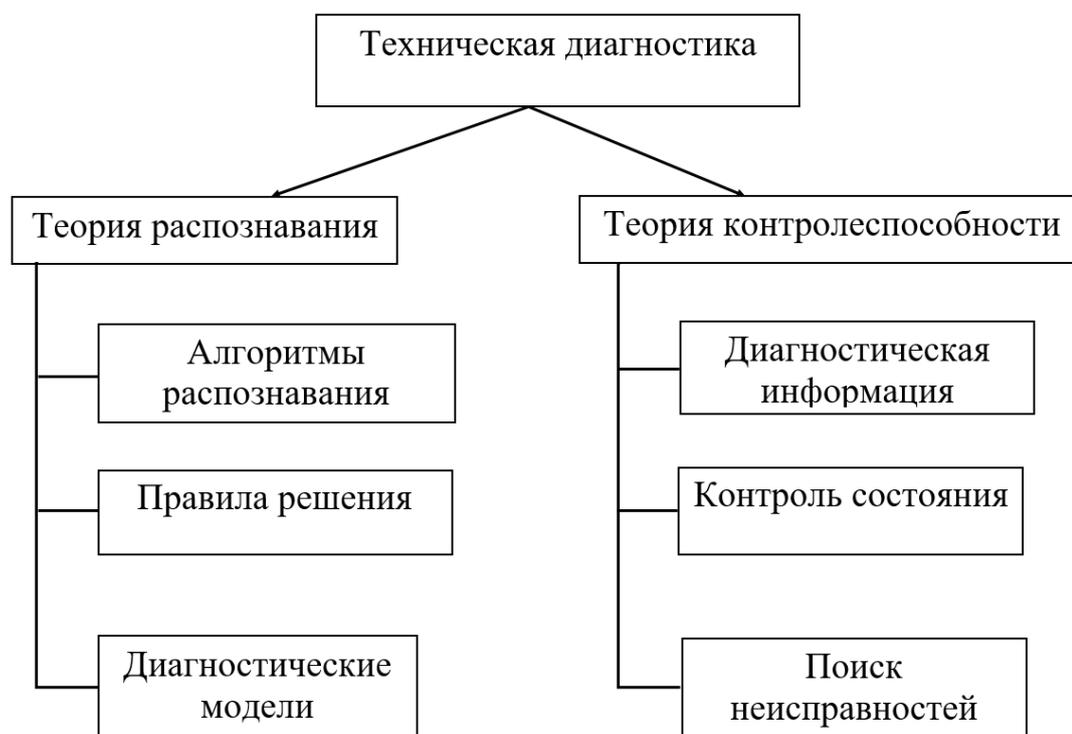


Рис. 1. Структура технической диагностики

Важными в диагностике являются понятия «метод» и «алгоритм диагностирования», т. е. определение технического состояния объекта.

Под **методом диагностирования** понимается совокупность операций, действий, позволяющих дать объективное заключение о состоянии объекта.

Под **алгоритмом диагностирования** понимается совокупность предписаний, которые определяют порядок действий при проведении диагностирования. Алгоритм диагностирования реализуется с помощью средств технического диагностирования. Основные термины и определения в соответствии с ГОСТом будут приведены ниже.

Процесс постановки диагноза в общем виде представлен на рисунке 2.

В процессе диагностирования обычно принимают участие объект диагностирования, средства технического диагностирования и человек – оператор. Между ними наблюдается как прямая, так и обратная связь, как представлено на рисунке 3.

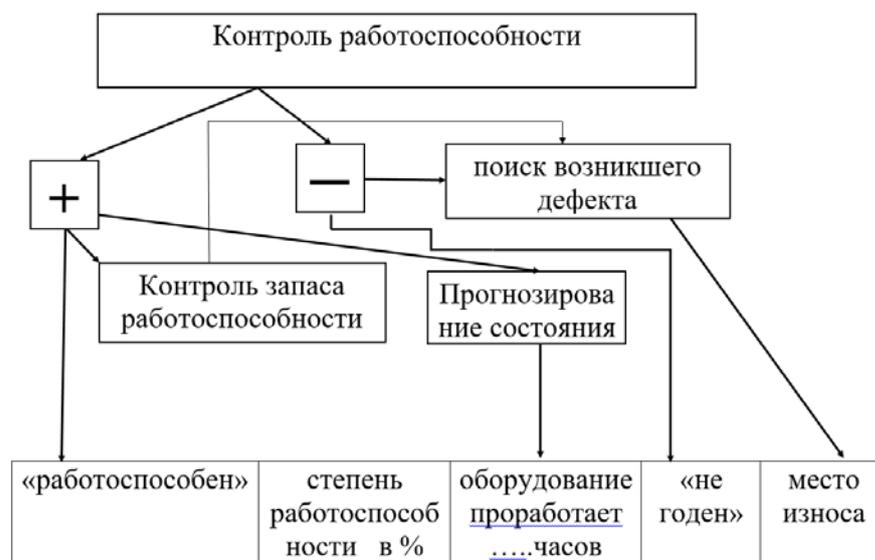


Рис. 2. Процесс постановки диагноза

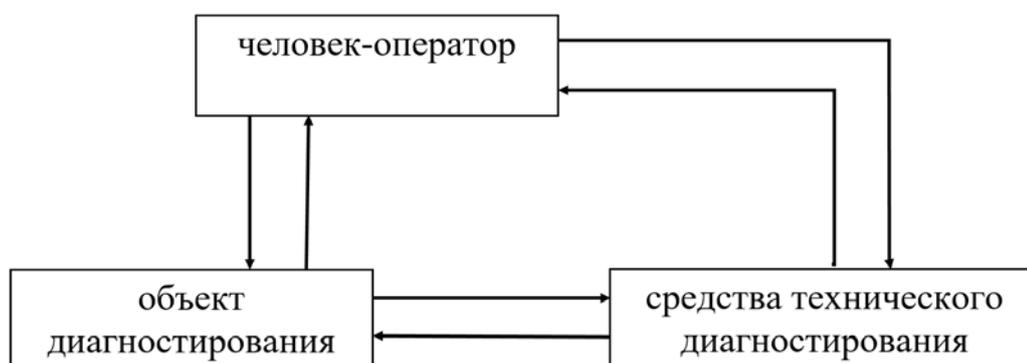


Рис. 3. Общая схема системы диагностирования

## 1.2. Основные термины и определения

В соответствии с ГОСТ 20911 – 89 «Техническая диагностика. Термины и определения» и ГОСТ Р 27.102 – 2021 «Надежность в технике. Надежность объекта. Термины и определения», используются следующие термины и определения, связанные с диагностикой.

**Техническая диагностика** – область знаний, охватывающая теорию, методы и средства определения технического состояния объектов.

**Техническое состояние объекта** – состояние, которое характеризуется в определенный момент времени, при определенных условиях внешней среды значениями параметров, установленных технической документацией на объект.

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

**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)**. Следует понимать различие в трактовке понятий «Техническое диагностирование» и «Контроль технического состояния».

**Контроль технического состояния** – проверка соответствия значений параметров объекта требованиям технической документации и определение на этой основе одного из заданных видов технического состояния в данный момент времени. Видами технического состояния являются такие состояния, как исправное, работоспособное, неисправное, неработоспособное и т. п., в зависимости от значений параметров в данный момент времени.

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

**Контроль функционирования** – контроль выполнения объектом части или всех свойственных ему функций.

**Рабочее техническое диагностирование** – диагностирование, при котором на объект подаются рабочие воздействия.

**Тестовое техническое диагностирование** – диагностирование, при котором на объект подаются тестовые воздействия.

**Средство технического диагностирования (контроля технического состояния)** – аппаратура и программы, с помощью которых осуществляется диагностирование (контроль).

**Встроенное средство технического диагностирования (контроля технического состояния)** – средство диагностирования (контроля), являющееся составной частью объекта.

**Система технического диагностирования (контроля технического состояния)** – совокупность средств, объекта и исполнителей, необходимая для проведения диагностирования (контроля) по правилам, установленным в технической документации.

**Внешнее средство технического диагностирования (контроля технического состояния)** – средство диагностирования (контроля), выполненное конструктивно отдельно от объекта.

**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, в течение которого сохранится работоспособное состояние объекта или вероятности сохранения

работоспособного состояния объекта на заданный интервал времени.

**Исправное состояние (исправность):** состояние объекта, в котором все параметры объекта соответствуют всем требованиям, установленным в документации на этот объект.

**Неисправное состояние (неисправность):** состояние объекта, в котором хотя бы один параметр объекта не соответствует хотя бы одному из требований, установленных в документации на этот объект.

**Работоспособное состояние:** состояние объекта, в котором значения всех параметров, характеризующих его способность выполнять заданные функции, соответствуют требованиям нормативной и технической документации.

**Неработоспособное состояние:** состояние объекта, в котором значение хотя бы одного из параметров, характеризующих способность объекта выполнять заданные функции, не соответствует требованиям документации на этот объект. Для сложных объектов возможно деление их неработоспособных состояний. При этом из множества неработоспособных состояний выделяют частично неработоспособные состояния, в которых объект способен частично выполнять требуемые функции.

Исправный объект всегда работоспособен, неисправный объект может быть как работоспособным, так и неработоспособным. Работоспособный объект может быть исправен и неисправен, неработоспособный объект всегда неисправен.

**Предельное состояние** – состояние объекта, в котором его дальнейшая эксплуатация недопустима или нецелесообразна, либо восстановление его работоспособного состояния невозможно или нецелесообразно. Недопустимость дальнейшей эксплуатации устанавливаются на основе критериев предельного состояния объекта.

**Критерий предельного состояния** – признак или совокупность признаков, установленных в документации, появление которых свидетельствует о возникновении предельного состояния объекта.

В зависимости от условий эксплуатации для одного и того же объекта могут быть установлены два и более критериев предельного состояния. Предельное состояние может возникнуть как в результате внутренних процессов, так и внешних воздействий на объект в процессе его функционирования.

Переход объекта в предельное состояние влечет за собой временное или окончательное прекращение эксплуатации объекта. При достижении предельного состояния объект должен быть снят с эксплуатации, направлен в средний или капитальный ремонт, списан, утилизирован или передан для применения не по назначению. Если критерий предельного состояния установлен из соображений безопасности, хранения или транспортирования, то при наступлении предельного состояния хранение или транспортирование объекта должно быть прекращено. В других случаях при наступлении предельного состояния должно быть прекращено применение объекта по назначению.

Для неремонтируемых объектов имеет место предельное состояние двух

видов. Первый вид совпадает с неработоспособным состоянием. Второй вид предельного состояния обусловлен тем обстоятельством, что начиная с некоторого момента дальнейшая эксплуатация еще работоспособного объекта оказывается недопустимой в связи с опасностью или высокими затратами эксплуатации. Переход неремонтируемого объекта в предельное состояние второго вида происходит до потери объектом работоспособности.

В связи с этим важно напомнить ещё несколько определений, связанных с диагностикой [4].

**Ресурс** – суммарная наработка объекта от начала его эксплуатации или ее возобновления после ремонта до момента достижения объектом предельного состояния.

**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 момента достижения объектом предельного состояния.

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

**Критерий отказа** – признак или совокупность признаков нарушения работоспособного состояния объекта, установленные в документации.

**Диагностическая модель** – формализованное описание объекта, необходимое для решения задач диагностирования. Описание может быть представлено в аналитической, табличной, векторной, графической и других формах. Диагностическая модель должна учитывать изменение состояния объекта. В этом случае можно дать следующее определение диагностической модели – это заданная и подлежащая математической обработке связь внутренних и внешних управляющих, а также возмущающих параметров и реакций рассматриваемой системы.

Как правило, диагностическая модель формируется как математическая модель объекта – совокупность дифференциальных и алгебраических уравнений, эмпирических формул. Возможны эмпирические, полуэмпирические и аналитические модели. Аналитические модели обладают наибольшей общностью, однако имеют такие недостатки, как низкую точность и большую трудоемкость получения решения для сложных случайных процессов.

### **1.3. Проблемы диагностирования и методы повышения качества технической диагностики**

Существует целый ряд проблем диагностирования, что связано с современным развитием технических объектов. Рассмотрим основные из них.

Во-первых, проблемы, связанные с *ростом объема измерительной информации*. В настоящее время наблюдается процесс, который выражается в росте объема измерительной информации. Следовательно, количество

диагностических параметров растет, что требует усложнения и удорожания контролирующей системы. В процессе технического диагностирования требуется измерение значений параметров качества, которые зависят от большого объема влияющих на них факторов: нагрузок механического и климатического происхождения, биологических и специальных сред. Количество влияющих факторов доходит до нескольких десятков.

Во-вторых, проблемы, связанные с требованиями **повышения быстродействия измерения и обработки диагностической информации**. Т. е. возникает необходимость перехода к контролю технических объектов по их состоянию (к контролю в процессе работы систем в реальном масштабе времени).

В-третьих, проблемы, связанные со **слабой осведомленностью разработчиков в методах диагностирования**. На стадии проектирования разработчики разрабатывают систему так, что она часто непригодна для диагностирования. За счет чего сокращается срок службы оборудования, возникают аварийные ситуации.

В-четвертых, проблемы, связанные с **необходимостью повышения точности и надежности измерений**. Без точных и надежных измерений невозможен объективный контроль качества промышленной продукции, правильный технический диагноз, действенный контроль состояния АСУ.

Для решения вышеуказанных проблем используют разнообразные подходы по повышению качества диагностики:

1. **Используют несколько способов диагностирования**, т. е. если один способ диагностирования не дал желаемого результата в полной мере, другой способ может его дополнить.

2. **Автоматизируют все этапы получения и обработки информации, полученной в результате диагностирования**. Это стало возможным за счет появления специального программного обеспечения, которое способно обработать результаты диагностирования. В настоящее время широко используются встроенные микропроцессоры.

3. Обеспечивают единый мониторинг всей системы, с учетом влияния окружающей среды. Чем больше степень влияния **внешних факторов на систему, тем масштабней должна быть проведена техническая диагностика**.

4. Усовершенствуют алгоритм проведения диагностики. **Часто из-за неправильной последовательности диагностирования диагностика не дает желаемого результата**.

5. **Совершенствуют организационное обеспечение процессов диагностирования**. Практика показывает, что 20 % отклонений от стандартов – вина персонала, а 80 % происходит по вине руководства предприятия.

Работоспособное состояние объекта нельзя обеспечить только с помощью технического контроля – оно должно быть заложено в изделие, причем на самых ранних этапах его производства и эксплуатации. Разработка новых систем не

может не предусматривать затраты на их контрольно-диагностическое сопровождение.

Несмотря на многообразие АСУ, в решении задач поиска неисправностей существует общая главная цель – обнаружить неисправность, для чего разрабатывают специальные методы диагностики, направленные на их поиск. Самое целесообразное в этом – сузить границы области неисправностей частью системы до тех пор, пока неисправность не будет локализована до конкретного поврежденного элемента. Это означает, что каждый последующий шаг предпринимается на основе информации, полученной от предыдущего испытания, указывающей, какая часть системы может быть исключена из рассмотрения как исправная. Для применения этого метода необходимо систему разделить вначале на крупные элементы с отбрасыванием исправных элементов, затем на все более мелкие. Этот метод называется **методом последовательного приближения**. Он является необходимым, но недостаточным элементом методики. Для его реализации необходимы определенные способы испытания при обнаружении неисправностей и порядок их использования, вытекающий из особенностей системы и характера возникающей неисправности.

## ГЛАВА 2. ДЕФЕКТЫ И МЕТОДЫ ИХ ОБНАРУЖЕНИЯ

По мнению многих специалистов, наиболее частой причиной отказов являются скрытые дефекты, поэтому важную роль в проблеме повышения качества и надежности элементов АСУ отводят неразрушающим испытаниям (НРИ) – дефектологии – науке о принципах, методах и средствах обнаружения дефектов.

### 2.1. Классификация методов обнаружения дефектов

Классификация методов обнаружения дефектов представлена в табл. 1.

Таблица 1– Классификация методов обнаружения дефектов

№ п/п	Метод	Разновидности
1	Магнитопорошковый	С применением магнитной суспензии
		С использованием воздушной извести ферромагнитного порошка
2	Капиллярный	Цветной
		Люминесцентный
		Люминесцентно-цветной
3	Электромагнитный	Вихретоковый импульсный
4	Акустический	Звуковой
		Ультразвуковой
		Импедансный
5	Радиационный	Рентгенографический
		Гаммаграфический
6	Тепловой	Пассивный
		Активный
		Контактный
		Бесконтактный

Для контроля дефектов в системах управления используют как методы **интегральной диагностики**, наиболее эффективными из которых являются методы, основанные на измерении шумовых характеристик, в том числе электрических и акустических шумов, так и методы **локальной диагностики**. Можно также выделить общие и специальные методы.

К **общим методам** относятся такие, как визуальный контроль, испытание давлением, акустическая и магнитная дефектоскопия, метод капиллярной дефектоскопии, радиография и метод вихревых токов.

К **специфическим методам** НРИ относятся: рентгеновские, голографические, тепловые, оптические и электрические методы и др.

Рассмотрим подробнее каждый из этих методов.

**Визуальный контроль** – наиболее широко распространенный метод НРИ. Используется для исследования поверхностных характеристик (повреждения, посторонние включения, расположение элементов и пр.). Достоинства метода заключаются в простоте, малых затратах времени и экономичности.

При **испытании давлением** дефекты обнаруживаются по проникновению газов или жидкости в полости дефектов или через эти дефекты.

Под **акустическими испытаниями** понимают ультразвуковые испытания.

Наиболее широко используется **ультразвуковая спектроскопия**. Метод основан на анализе процесса распространения возбужденных ультразвуковых волн в магнитных и немагнитных материалах, которые отражаются от дефектов в виде трещин, шлака, неметаллических включений. Информацией о дефекте служат амплитуда и местоположение эхо-сигнала. Достоинством метода является большая глубина обнаружения дефектов. Недостатком метода является то, что объекты контроля сравнимы по размерам с пределами разрешения, из-за чего, как правило, получается некачественное изображение. Также большинство объектов контроля взаимодействуют с ультразвуком сложным образом, из-за чего полученные изображения нуждаются в дополнительной расшивке.

**Акустический импедансный метод** необходим при диагностировании многослойных конструкций. Принцип метода заключается в различие механических импедансов (полное механическое сопротивление), дефектных и бездефектных элементов. Бездефектная конструкция под действием преобразователя колеблется как единое целое и механический импеданс максимален, в отличие от конструкции с дефектами. Это изменение можно измерить с помощью стрелочного прибора. Достоинство метода – обнаружение дефектов в многослойной конструкции. Недостаток – можно обнаружить дефект только со стороны установки преобразователя.

**Метод капиллярной дефектоскопии** основан на использовании проникающих, смазывающих красящих или люминесцентных жидкостей, которые светятся под действием ультрафиолетового излучения. Эти жидкости наносятся на очищенную поверхность детали для заполнения узких мест. Лишняя жидкость с поверхности удаляется, после этого необходимо нанести проявитель, который выглядит в виде специальной белой краски или порошка. В результате чего выступающая из полостей жидкость окрашивает проявитель и образует хорошо видимый на белом фоне так называемый «индикаторный рисунок». Он дает информацию о нахождении, форме и протяженности дефекта. Достоинства капиллярного метода: при использовании жидкости, окрашенной в красный цвет (цветной метод), рисунок виден при дневном свете; при использовании люминесцентных жидкостей рисунок ярко светится в ультрафиолетовых лучах; при использовании люминесцентно-цветного метода рисунок виден и при дневном свете, и при ультрафиолетовых лучах. Недостатки метода – необходимость удаления защитных покрытий, большие затраты времени (1...3 ч), а также высокая трудоемкость.

**Метод магнитной дефектоскопии** основан на явлении искажения магнитного поля ферромагнитного испытуемого образца при наличии в нем дефектов. Этим методом определяют состояние большинства стальных деталей, снятых или не снятых с систем, к которым имеется доступ для намагничивания, осмотра и нанесения суспензии. На поверхность объекта наносят ферромагнитные частицы (у них собственное, внутреннее магнитное поле может в сотни и тысячи раз превосходить вызвавшее его внешнее магнитное поле), которые находятся во взвешенном состоянии в жидкости или в воздухе. Объект помещается в магнитное поле или пропускается ток по кабелю, который проходит через отверстие в объекте. Результатом метода должно быть следующее: если в объекте есть дефект, то образуется неоднородный магнитный поток. К месту дефекта стремятся ферромагнитные частицы под действием возникающей силы. Опять же, как и в предыдущем методе, информационным параметром является индикаторный рисунок, который выглядит в виде полосок осевшего на поверхности объекта порошка. Характер, и что не менее важно, размер дефекта можно оценить по количеству порошка и форме рисунка. Применяется метод для определения неровностей, микротрещин 0,01...0,05 мм. Достоинства метода – высокая чувствительность и точность, простота технологии, малые затраты времени. Недостаток – необходимость удаления лакокрасочных покрытий толщиной более 0,03 мм.

**Метод радиационной дефектоскопии** основан на просвечивании изделий рентгеновскими,  $\gamma$ –,  $\delta$ –лучами, нейтронами и другими элементарными частицами, что дает возможность получить информацию о внутреннем их состоянии, учитывается способность лучей проникать сквозь непрозрачные вещества и «высвечивать» неоднородности и дефекты структуры исследуемого объекта. В качестве регистратора дефектов можно использовать рентгеновскую пленку, флуоресцентный экран и т. п. Достоинства радиационного метода: возможность определения взаимного положения внутренних деталей в агрегатах, наличие документа (рентгеногамма снимков). Недостатки метода: большие габариты аппаратуры и ее сложность, высокая стоимость, необходимость обеспечения защиты человека от вредного воздействия на его организм излучения.

**Метод вихревых токов (электромагнитный)** применяется для обнаружения аномалий электрической или магнитной проводимости, которые обусловлены различными механическими дефектами, неоднородностями, изменениями структуры и неправильной кристаллизации (отклонение в режиме термообработки). Все эти аномалии электропроводности, магнитной проводимости обнаруживаются по изменениям полного сопротивления катушки, питаемой переменным током, электромагнитное поле которой служит источником вихревых токов, наводимых в испытуемом образце.

Иллюстрация вихревого метода представлена на рис. 4. Под действием тока в катушке индуктивности образуется переменный магнитный поток  $\Phi_0$ , проникающий в металл. В результате чего в металле возникают вихревые токи, создающие свой магнитный поток  $\Phi_B$ , который направлен навстречу

возбуждающему потоку. За счет протекания вихревых токов происходит превращение электрической энергии в тепловую, что эквивалентно изменению индуктивности и активного сопротивления преобразователя. Их приращения, вызываемые вносимыми индуктивностью и сопротивлением, можно измерить. Трещина на поверхности приводит к перераспределению вихревых токов, уменьшению их плотности, вследствие чего уменьшаются вносимые индуктивность и сопротивление, что может быть зарегистрировано средствами технической диагностики. Достоинство метода – возможность диагностирования объектов с защитным покрытием. Недостатки – отсутствует наглядность. Большая трудоемкость, сложность определения размеров дефекта, требует однородности свойств материала. Далее рассмотрим специфические методы неразрушающих испытаний.

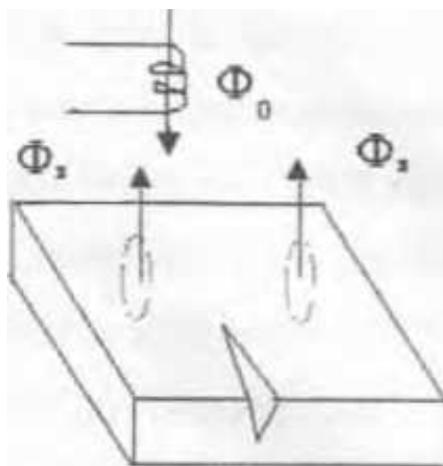


Рис. 4. Иллюстрация вихревого метода

**Голографические методы** используются в качестве как общих, так и специфических методов НРИ. Метод базируется на глубоком знании физических процессов, протекающих в исследуемых образцах. Метод очень дорогостоящий, основан на применении компьютерной техники.

При **тепловых методах НРИ** получают информацию о параметрах и качестве изделий по распределению температуры на их поверхности в виде термограмм, которые позволяют судить о наличии скрытых дефектов. Метод основан на излучении электромагнитной энергии в инфракрасной области спектра любым телом, имеющим температуру, отличную от абсолютного нуля. Тепловые методы подразделяются на пассивные и активные.

Пассивные – это методы, позволяющие определять распределение температуры на поверхности изделия без применения специальных источников тепловой энергии (т. е. осуществляют контроль качества изделия без искажения электрических и тепловых характеристик изделия). При активных методах имеется источник искусственного тепла, который воздействует на проверяемое изделие.

Тепловые методы делятся также на контактные и бесконтактные. В основном применяют контактные методы, к которым относятся:

- методы измерения температуры с помощью термопар;
- люминесцентные методы, основанные на измерении интенсивности свечения некоторых люминофоров под действием ультрафиолетового излучения;
- методы измерения температур с помощью температурно-чувствительных красок, изменяющих свой цвет при определенных температурных режимах;
- жидкокристаллические методы, основанные на использовании свойств жидкокристаллических соединений изменять окраску под воздействием температуры, которые позволяют определять разность температур до 0,1 °С.

Бесконтактные методы измерения температуры являются более перспективными и универсальными, они не вызывают искажения температурного поля изделий, мало инерционны, обладают высокой разрешающей способностью. Здесь наиболее перспективным является метод, сущность которого состоит в регистрации каким-либо способом инфракрасного излучения, исходящего от исследуемого объекта, без непосредственного механического контакта термоприемника с объектом (фотография, приборы разного назначения).

К методам *интегральной диагностики* относятся *электрические методы*, основанные на возможности оценки и прогнозирования работоспособности по величине характерных электрических параметров.

Исследования, занимающиеся надежностью систем, показали, что собственные шумы приборов, штепсельных разъемов, контактов реле и других элементов несут информацию об их надежности. Физической основой метода прогнозирования отказов системы по их низкочастотным шумам (НЧ) является зависимость уровня шума от наличия дефектов структуры и контактов прибора.

Основными источниками шума в электрических цепях и активных элементах являются следующие шумы:

- **тепловой шум:** существует в любом проводнике, этот шум вызывается хаотическим тепловым движением носителей заряда;
- **дробовый шум:** этот шум возникает вследствие флуктуации концентрации носителей заряда за счет случайности процессов генерации и рекомбинации.
- **НЧ шумы:** в литературе по надежности нет еще единой терминологии для данного вида шума; встречаются названия: фликкер – шум, шумы мерцания, избыточные шумы и НЧ шумы.

Причиной возникновения этого шума являются различные дефекты в структурах системы. Для этого вида шума обычно рассматривают спектральную плотность мощности этого шума. Отмечено, что коэффициент шума сильно зависит от сопротивления источника сигнала, что является недостатком этого параметра. Многие исследователи отметили, что основные виды отказов систем прогнозируются по уровню их НЧ шумов, поэтому считается, что через характеристики НЧ шума можно получить показатели надежности систем.

В качестве прогнозирующего параметра можно использовать любую из

рассматриваемых характеристик: эффективное напряжение шума, коэффициент шума, спектральную плотность мощности, функцию автокорреляции. Отмечено, что функция автокорреляции и спектральная плотность мощности любого случайного процесса тесно взаимосвязаны и для получения данных об этом процессе достаточно измерить одну из этих характеристик. Но с точки зрения удобства измерений, в производственных условиях предпочтение отдается спектральной плотности мощности шума.

Рассмотрим еще один вопрос, связанный с диагностикой автоматизированных систем управления, это вопрос ускорения процесса диагностирования.

## 2.2. Оптимизация поиска отказов

Имеется много способов обнаружения неисправностей. Рассмотрим возможные пути определения оптимальных программ. Представим, что мы имеем систему, состоящую из  $N$  последовательно соединенных элементов, имеющих одинаковую надежность. Метод последовательных приближений может быть оптимизирован по минимуму числа испытаний. Допустим, что один из  $N$  элементов имеет неисправность, тогда всю цепочку элементов можно поделить на две части таким образом, что в одной части будет  $h$  элементов, а в другой  $N - h$ .

Выдвинем две гипотезы:

1) неисправный элемент с вероятностью:  $p_1 = h/N$  может оказаться среди  $h$  элементов;

2) неисправный элемент с вероятностью  $p_2 = ((N-h)/N)$  среди  $N-h$  элементов.

Среднее число элементов  $z$ , среди которых может оказаться отказавший элемент после одной проверки:

$$z = hp_1 + (N - h)p_2 \quad (1)$$

Очевидно, что  $z$  достигнет  $\min$  при  $h = 0,5N$ .

Следовательно, для того, чтобы поиск неисправности был оптимальным, необходимо последовательно делить цепочку элементов на две равные части. Такая задача, посвященная выбору одного элемента из множества других при наименьшем числе испытаний, была рассмотрена Шенноном. Такой двоичный выбор получил название *метода средней точки*.

Максимальное время обнаружения неисправности по методу проб, т. е. определение неисправностей всех элементов подряд:

$$T_n = k(N - 1), \quad (2)$$

где  $k$  – средняя норма времени проведения одного испытания.

Максимальное число испытаний  $R$  при методе средней точки:

$$N = 2^R, \quad (3)$$

где  $R$  – число испытаний.

Время обнаружения неисправного элемента определяется из уравнения:

$$T_{ст} = kR \quad (4)$$

Искомый выигрыш будет равен:

$$L = \frac{T_n}{T_{ст}} \quad (5)$$

Чаще мы имеем случай, когда последовательно соединенные элементы системы имеют различную априорную вероятность отказа. При допущении равенства времени испытаний элементов  $T_i = T_j$  оптимальная программа последовательности поиска неисправного элемента может быть определена следующим образом.

Условная вероятность того, что отказал  $i$ -й элемент при условии, что в системе произошел отказ только одного элемента, определяется по формуле:

$$q_i^* = \frac{\frac{q_i}{q_j}}{\sum_{k=1}^N \frac{q_k}{q_k}} \quad (6)$$

где  $q_i$ , – вероятность отказа  $i$ -го элемента,  $p_i$  – вероятность безотказной работы  $i$ -го элемента.

Оптимальная последовательность поиска отказавшего элемента:

- для всех элементов системы определяются значения  $q_i^*$ ;
- первое испытание производится в точке, которая делит пополам сумму условных вероятностей;
- последующие испытания производятся аналогично предыдущему пункту: сумма условных вероятностей оставшихся под подозрением элементов делится пополам.

Рассмотрим следующий пример. Пусть система состоит из  $N = 6$  элементов, поток возникновения отказов которых является простейшим. В таблице 2 приведены значения  $q_i^*$ , которые были определены по формуле (6).

Таблица 2 – Данные для организации оптимального поиска

№	1	2	3	4	5	6
$q_i^*$	0,4	0,1	0,2	0,1	0,2	0,1
$p_i$	0,6	0,9	0,8	0,9	0,8	0,9
$q_i$	0,44	0,07	0,17	0,07	0,17	0,07

Первое испытание проводится между 2 и 3 элементами – в точке, которая делит сумму условных вероятностей на две примерно равные части 0,51 и 0,48.

На рис. 5 представлена оптимальная схема поиска неисправностей.

Вторая проверка производится между 4 и 5 элементами, где оставшееся значение условной вероятности делится также пополам (0,25 и 0,24) и т. д.

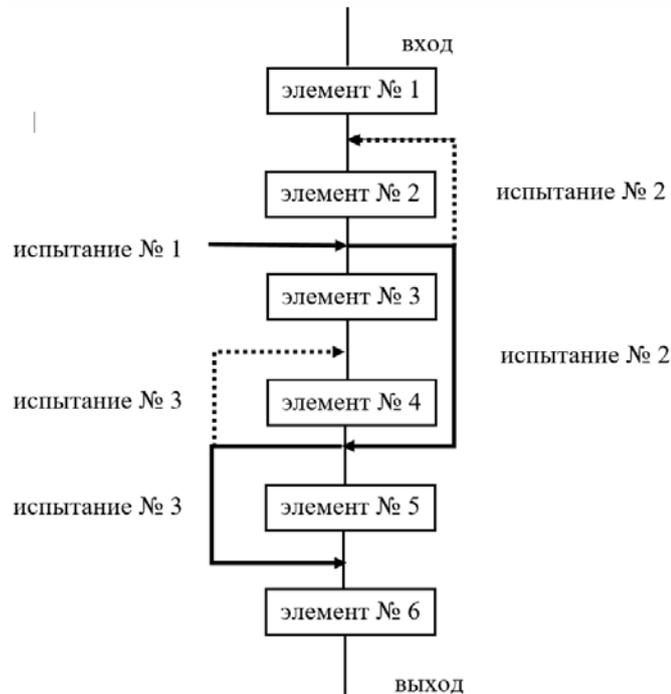


Рис. 5. Диаграмма реализации метода оптимального поиска неисправности

Если мы хотим минимизировать время поиска, то необходимо осуществлять проверку элементов в такой последовательности, которая для неравенства  $1 \leq i \leq j \leq N$  удовлетворяет условию:

$$\frac{T_i p_i}{q_i} < \frac{T_j p_j}{q_j} \quad (7)$$

Вначале необходимо проверять элементы, для которых отношение времени проверки  $T_i$  к их надежности является минимальным.

Для определения оптимальной последовательности испытаний элементов, имеющих различные значения времени проверки, рассчитаем  $T_i p_i / q_i$  для каждого элемента (табл. 3):

Таблица 3 – Расчет для определения оптимальной последовательности испытаний элементов

№ элемента в системе	$T_i$	$q_i$	$p_i$	$T_i p_i / q_i$
1	0,2	0,3	0,7	0,47
2	0,15	0,2	0,8	0,6
3	0,22	0,4	0,6	0,33
4	0,17	0,3	0,7	0,4
5	0,07	0,2	0,8	0,28
6	0,14	0,4	0,6	0,29

На рис. 6 представлена диаграмма последовательности, в которой необходимо осуществлять испытания элементов: 2–1–4–3–5 (элемент 6 проверять нет необходимости).

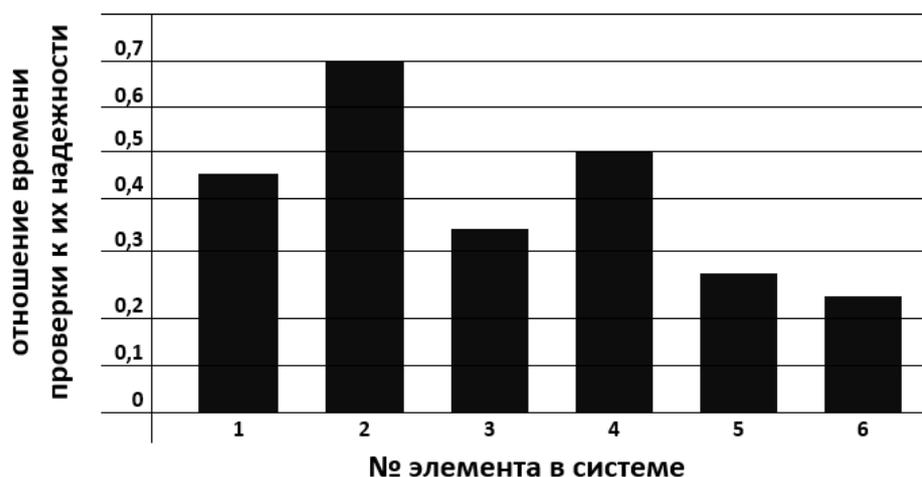


Рис. 6. Диаграмма оптимальной последовательности проведения испытаний элементов

Основной задачей рациональной организации поиска дефекта является сокращение времени и средств, которые необходимо затратить на поиск [1]. На рис. 7 представлена структурная схема ОД, которую необходимо протестировать.

Реализация теста заключается в подаче на вход элементов объектов диагностирования воздействий, имитирующих рабочие сигналы, и контроле реакций на эти сигналы. Система выводится из эксплуатации. Теоретической основой тестирования является Булева алгебра, т. е. предполагается, что исправному состоянию элемента соответствует наличие сигнала 1 на его выходе, а неисправному 0 – его отсутствие.

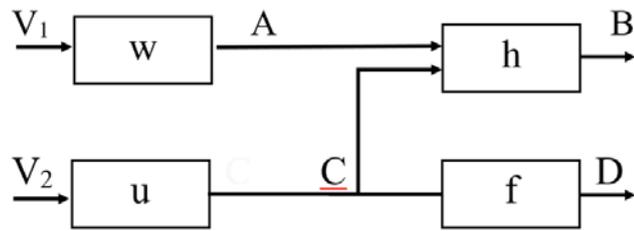


Рис. 7. Структурная схема ОД

На основании схемы, представленной на рис. 7, составим таблицу неисправностей этой схемы (табл. 4), М обозначает множество всех возможных проверок, а Н – множество возможных состояний.

Таблица 4 – Неисправности элементов

Проверка М	Состояния объекта Н				
	1111	0111	1011	1101	1110
$M_A$	1	0	1	1	1
$M_B$	1	0	0	0	1
$M_C$	1	1	1	0	1
$M_D$	1	1	1	0	0

Из таблицы видно, что 5 возможных состояний ОД, определяемых состоянием элементов, оказываются полностью различными с помощью четырех проверок. Отказавшие элементы определяются соответственно кодовыми числами 0011, 1011, 1000, 1110. Очевидно, что с ростом числа элементов увеличивается число состояний ОД, а это усложняет задачу обнаружения неисправностей.

## ГЛАВА 3. ОБНАРУЖЕНИЕ НЕИСПРАВНОСТЕЙ В АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ

### 3.1. Структура задачи технического контроля

С самых общих позиций задача контроля и мониторинга технического состояния состоит в распознавании текущего состояния объекта в условиях ограниченной информации что может быть представлено в виде следующих составляющих (рис. 8).

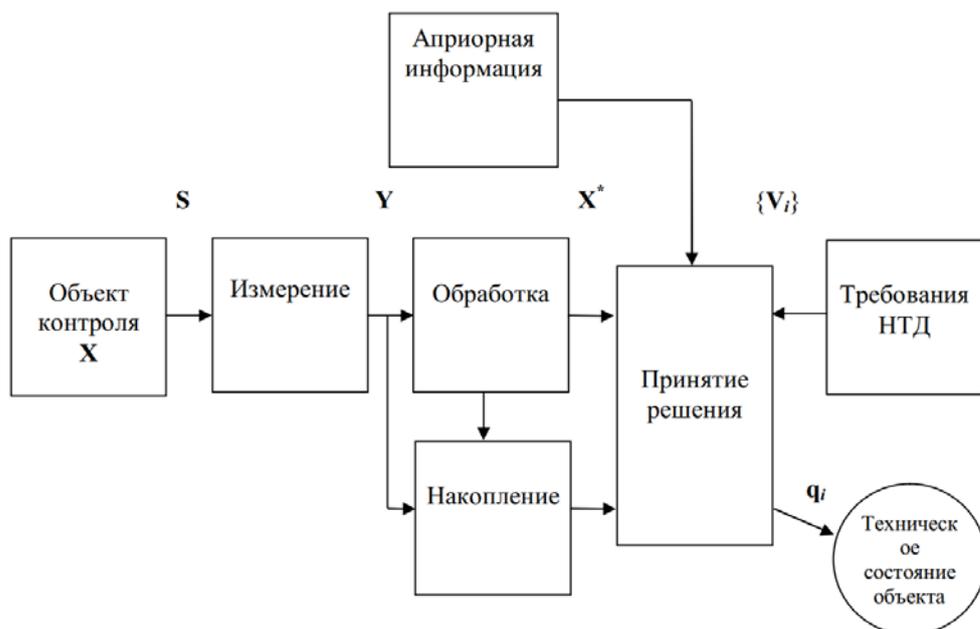


Рис. 8. Структура задачи технического контроля:

**X** – объект контроля (вектор контролируемых параметров); **S** – вектор измеряемых параметров (сигналов); **Y** – вектор результатов измерения;  
**X\*** – вектор восстановленных контролируемых параметров;  
**{V<sub>i</sub>}** – набор векторов ограничений на контролируемые параметры для каждого технического состояния; **НТД** – научно-техническая документация;  
**q<sub>i</sub>** – одно из возможных технических состояний объекта

**Объект контроля** характеризуется вектором контролируемых параметров  $\mathbf{X} = (x_1, x_2, \dots, x_{N_x})$ , 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 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 допустимые 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  $\mathbf{Y}$  находится оценка  $\mathbf{X}^*$  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  $\{V_1, V_2, \dots, V_{Nq}\}$  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  $q_1, q_2, \dots, q_{Nq}$  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. Все эти данные дают возможность создания предьюктивной системы диагностики, что требует особого обсуждения.

### **3.2. 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 образцов. 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 [5].

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 отнесения изделия к исправному или неисправному 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.

Возвращаясь к предыдущему разделу, следует отметить, что 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 задачу **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 научно-технической документации на объект, будем считать, что набор контролируемых параметров (вектор  $\mathbf{X}$  на рис. 5) задан, и рассмотрим известные способы распознавания, пригодные для формирования на их основе соответствующих алгоритмов.

### 3.3. 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  $k_i=f(x_i)$ . 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:

$$k_i = f(x_i) = \begin{cases} k_{i0}, & x_i > x_{max} \\ k_{i1}, & x_{min} \leq x_i \leq x_{max} \\ k_{i2}, & x_i < x_{min} \end{cases} \quad (8)$$

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

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  $\{q_1, q_2, \dots, q_{Nq}\}$ . 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** следующая. Имеется объект, который находится в одном из  $N_q$  случайных состояний  $q_i$ . Известен вектор признаков  $\mathbf{K}=(k_1, k_2, \dots, k_{N_x})$  (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  $\{q_1, q_2, \dots, q_{Nq}\}$  (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.

### 3.4. 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. 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  $k_j$ ):

$$P(q_i k_j) = P(q_i)P(k_j | q_i) = P(k_j)P(q_i | k_j). \quad (9)$$

Из этого равенства вытекает формула Байеса

$$P(q_i | k_j) = P(q_i) \frac{P(k_j | q_i)}{P(k_j)} \quad (10)$$

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:

$$P(q_i/\mathbf{K}^*) = P(q_i) \frac{P(\mathbf{K}^*/q_i)}{P(\mathbf{K}^*)}, \quad (i = 1, 2, \dots, N_x), \quad (11)$$

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

$$P(\mathbf{K}^*/q_i) = P(k_1^*/q_i)P(k_2^*/k_1^*q_i) \dots P(k_{N_x-1}^*/q_i) \quad (12)$$

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

$$P(\mathbf{K}^*/q_i) = P(k_1^*/q_i)P(k_2^*/k_1^*q_i) \dots P(k_{N_x}^*/q_i). \quad (13)$$

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

$$P(\mathbf{K}^*) = \sum_{s=1}^{N_x} P(q_s)P(\mathbf{K}^*/q_s). \quad (14)$$

С учетом этого обобщенная формула Байеса примет вид

$$P(q_i/\mathbf{K}^*) = \frac{P(q_i)P(\mathbf{K}^*/q_i)}{\sum_{s=1}^{N_x} P(q_s)P(\mathbf{K}^*/q_s)}, \quad (i = 1, 2, \dots, N_x), \quad (15)$$

где  $P(\mathbf{K}^*/q_i)$  определяется равенством (10) или (11).

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 вероятностью

$$\mathbf{K}^* \in q_i, \text{ если } P(q_i/\mathbf{K}^*) > P(q_j/\mathbf{K}^*), \quad (j=1, 2, \dots, N_x; i \neq j). \quad (16)$$

Условие (16) указывает, что объект, обладающий данной реализацией комплекса признаков  $\mathbf{K}^*$ , принадлежит диагнозу (состоянию)  $q_i$ . Правило (16) обычно уточняется введением порогового значения для вероятности диагноза:

$$P(q_i/\mathbf{K}^*) > P_i, \quad (17)$$

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

$$P(q_i/\mathbf{K}^*) < P_i \quad (18)$$

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:

$$\mathbf{K}^* \in q_i, \text{ если } P(\mathbf{K}^*/q_i) > P(\mathbf{K}^*/q_j), \quad (j = 1, 2, \dots, N_x; i \neq j). \quad (19)$$

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 (19) должно быть дополнено пороговым значением

$$P(\mathbf{K}^*/q_i) \geq P_i. \quad (20)$$

### 3.5. Метод последовательного анализа

Метод последовательного анализа, предложенный Вальдом, применяется для дифференциальной диагностики (расознавания 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

$$B < \frac{P(k_1^*/q_2)}{P(k_1^*/q_1)} \cdots \frac{P(k_r^*/q_2)}{P(k_r^*/q_1)} < A; \quad r = 1, 2, \dots, n - 1, \quad (21)$$

но после  $n$ -го обследования:

$$\frac{P(k_1^*/q_2)}{P(k_1^*/q_1)} \cdots \frac{P(k_n^*/q_2)}{P(k_n^*/q_1)} < A; \quad (22)$$

Тогда принимается решение об отнесении объекта к диагнозу  $q_2$ :  $\mathbf{K}^* \in q_2$ .  
Если после  $n$ -го обследования

$$\frac{P(k_1^*/q_2)}{P(k_1^*/q_1)} \cdots \frac{P(k_n^*/q_2)}{P(k_n^*/q_1)} < B, \quad (23)$$

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 (21), (22) и (23) 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 (14) и (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 (15), вероятность диагноза  $q_2$ , по крайней мере, в  $A$  раз больше, чем диагноза  $q_1$ , т. е.

$$\frac{1 - \beta}{\alpha} \geq A \quad (24)$$

Подобным образом можно получить и следующую оценку:

$$B \geq \frac{\beta}{1 - \alpha}. \quad (25)$$

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

### 3.6. 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. 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).

### 3.7. 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  $\mathbf{K} = (k_1, k_2, \dots, k_{N_x})$ . 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.

Как отмечалось выше, разными задачами диагностирования являются: контроль за техническим состоянием, поиск неисправностей, прогнозирование состояния системы, проверка исправности, работоспособности, с выявлением элементов, от которых непосредственно зависит работоспособность, а также определение предельных значений параметров, обеспечивающих работоспособность элементов, проверка правильности функционирования, разработка алгоритма последовательности проверок для определения фактического состояния и прогнозирования остаточного ресурса системы и др.

Большое значение в диагностике имеет **прогноз**. Само слово «прогноз» происходит от греческого слова «prognosis», которое означает предвидение, предсказание о развитии чего-либо, основанное на определенных данных, например, прогноз состояния технического объекта. С точки зрения философии, всякое научное предвидение – это распространение известных законов, типов взаимодействий на область рассматриваемых явлений, недоступных экспериментальному изучению. Очень важна точность прогнозирования, которая зависит от того, какой закон используется и насколько правильно и точно он осознан. Выполнить достоверное прогнозирование можно только в том случае, когда известны условия, в которых объект диагностирования будет применяться. Под условиями понимается: режимы использования, характер нагрузки, внешние факторы. Чем больше физических процессов, являющихся причинами деградации объекта, тем сложнее характер изменения работоспособности, тем сложнее осуществить точное прогнозирование.

### 3.8. Классификация методов прогнозирования

Условно классификация методов прогнозирования может быть представлена на рисунке 9.

Элементы, у которых изменение их структуры можно проконтролировать, т. е. можно указать прогнозирующий или косвенно с ним связанный выходной параметр, подвергаются **инструментальному прогнозу**. При отсутствии прогнозирующего параметра неисправные элементы выявляются **статистическими методами прогнозирования**.

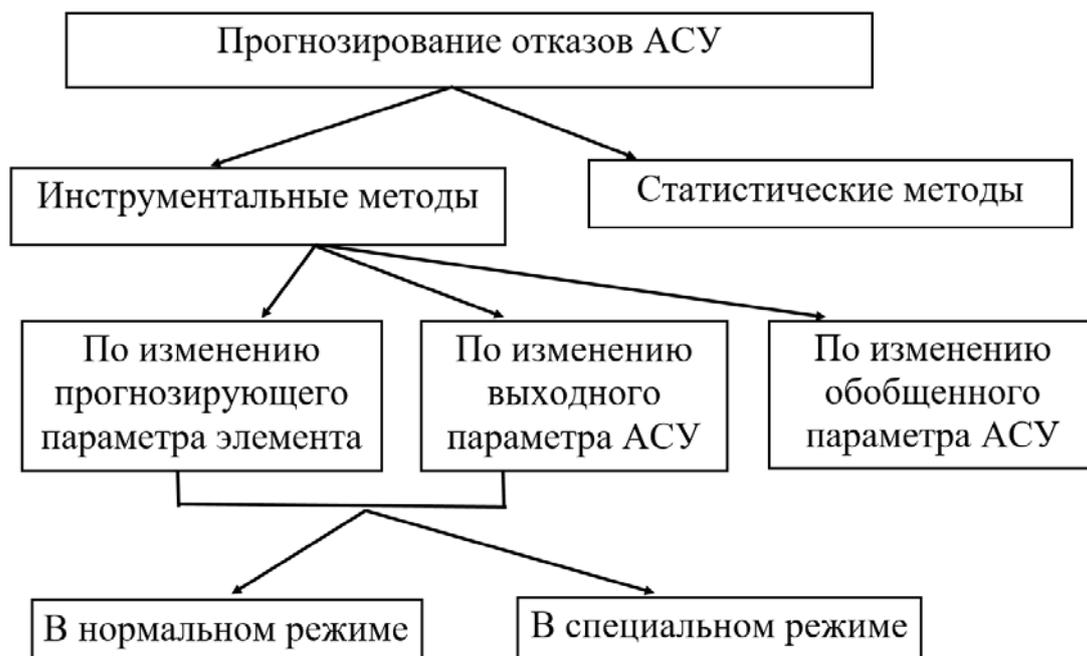


Рис. 9. Классификация методов прогнозирования

Инструментальный прогноз в настоящее время осуществляется [11]:

- по изменению прогнозирующего параметра элемента;
- по изменению выходного параметра АСУ;
- по изменению обобщенного параметра АСУ.

Прогнозирование в нормальном режиме осуществляется методами непосредственного контроля прогнозирующих параметров и состоит в периодическом измерении параметра и построении графика изменения величины этого параметра во времени. Экстраполируя результаты измерений параметра, можно получить кривую зависимости  $g=f(t)$  и, зная величину допустимого значения параметра  $g_{кр}$ , определить время предупредительной замены или восстановления элемента.

Прогнозирование в специальном режиме, заключается в применении перегруженных или облегченных режимов (граничных режимов) работы элементов с имитацией явлений старения, износа работы элементов. Такое искусственное испытание элементов применяется для более раннего выявления тенденции к резкому ухудшению прогнозирующего параметра. Чувствительность прогноза при этом повышается.

*Достоинства* прогнозирования в специальных (контрольных) режимах:

- Достаточно высокая степень чувствительности прогнозирования. Имеется возможность такой отбраковки элементов, которая обеспечивает их работу в более тяжелых, чем нормальные, условиях эксплуатации.
- Сравнительно простая система прогнозирования. Если же прогнозирующий параметр совпадает с выходным, то можно обходиться и без специальных приборов прогноза, так как отбраковка неисправных элементов, контроль их качества проверяются функционированием всей системы.

*Недостатки* прогнозирования с использованием специального режима:

- Необходимость создания устройств, обеспечивающих получение специальных контрольных режимов;
- Проведение испытаний элемента в тяжелых специальных режимах, что в отдельных случаях может приводить к преждевременному старению;
- Отсутствие возможности прогноза в нормальном режиме эксплуатации, что приводит к дополнительным простоям системы на профилактике.

Прогнозирование отказов по изменению выходного параметра для АСУ в нормальном эксплуатационном режиме также имеет свои достоинства и недостатки.

*Достоинства* метода:

- Сокращаются простои на профилактике, так как контролируется вся АСУ в целом.
- При профилактических работах с автономными системами прогноза не требуется демонтаж и монтаж элементов. Возможно прогнозирование несъемных элементов.

*Недостатки* метода:

- Большой объем работ по определению изменения выходного параметра за период времени. Эту работу необходимо проводить каждый раз при разработке и изготовлении новых типов систем.
- Для системы, собранной на элементах, не имеющих прогнозирующего параметра, нельзя воспользоваться сокращенной методикой испытаний.

При оценке состояния АСУ часто используется метод оценки по обобщенному параметру, который обладает высокой чувствительностью и позволяет в процессе профилактических испытаний выявить значительную часть неисправностей. Кроме того, он позволяет предотвращать некоторые виды внезапных отказов.

**Обобщенным параметром АСУ** называется такой параметр, который в любой момент времени может характеризовать ее работоспособность. Он обобщает все данные о работоспособности системы по каждому из выходных параметров в единый критерий качества работоспособности.

*Недостатками* метода является:

- Трудоемкость испытаний. Однако затраты на испытания могут себя окупить, если они будут проводиться для АСУ массового использования.
- Возможность преждевременного изнашивания системы в результате введения специальных контрольных режимов.

Диагностика состояния АСУ может осуществляться или с применением серийных приборов, либо специальными измерительными устройствами или автоматическими системами контроля (встроенные или автономные). Внедрение в новую АСУ встроенных систем автоматического контроля параметров, обнаружения и прогнозирования отказов требует решения задач, которые связаны с рациональным выбором контролируемых параметров и допустимых пределов их изменения.

## ГЛАВА 4. АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ

### 4.1. 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 [3] 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) [12, 13]. 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.

### 4.2. Концепция прогнозирования остаточного ресурса

Остаточный ресурс оборудование 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. 10. Через определенные периоды эксплуатации  $t_1$ ,  $t_2$ , ... и т. д. измеряют максимальные величины возникших повреждений (износа, коррозии, деформаций)  $h_1$ ,  $h_2$ , ... 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[5].

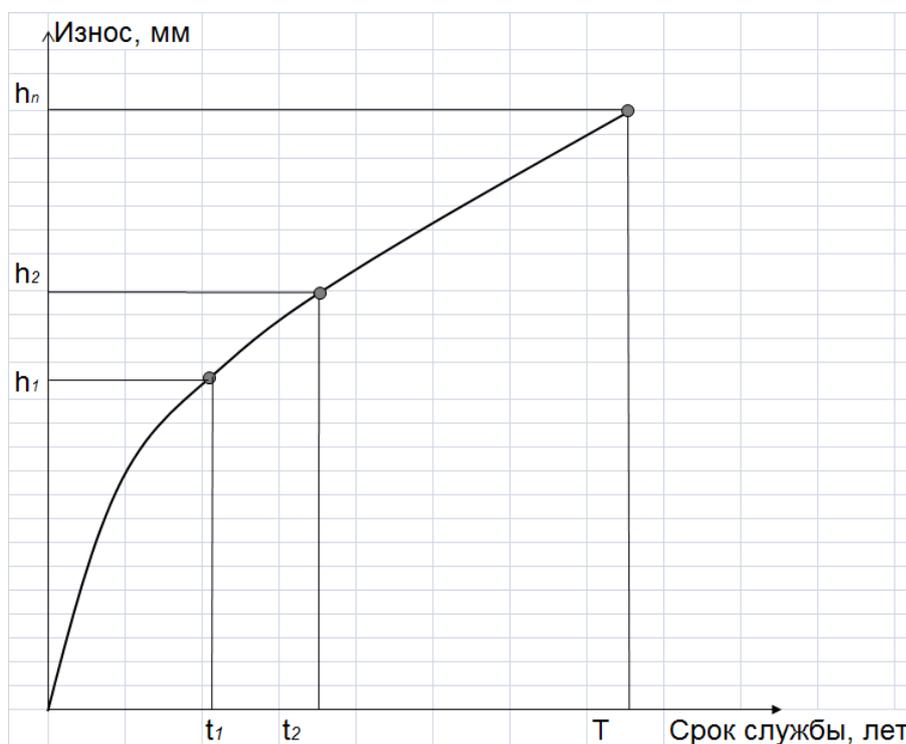


Рис. 10. Типовая схема прогнозирования долговечности оборудования:  
 $t$  - продолжительность эксплуатации;  $h$  - величина повреждений

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. При этом важно оценить условия эксплуатации диагностируемого объекта.

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.

### **4.3. Критерии предельных состояний оборудования**

В соответствии с требованиями 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 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 критериев предельного состояния ориентировочными значениями могут служить нормы технологических допусков на изготовление, взятые с некоторым коэффициентом запаса (обычно рекомендуется 1,5).

### **4.4. 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 [3].

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

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 параметра 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 параметрами;
- зависимость между математическими ожиданиями прямых и косвенных параметров является монотонной и непрерывной.

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

- погрешностями измерения косвенных параметров;
- погрешностями, связанными со случайной природой физических процессов развития отказов;
- методическими погрешностями определения прямых параметров технического состояния 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 [3] 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 [3] соотношений затрудняется необходимостью большого объема предварительных исследований для установления исходных данных. Наиболее доступным для практического использования является метод, основанный на степенной аппроксимации изменения параметра 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:

$$Y(t) = Kt^\alpha + z(t), \quad (26)$$

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  $t > 0,3 T_{cp}$  следующие:

$$\begin{aligned} M[z(t)] &= 0; \\ D[z(t)] &= \sigma^2; \\ R[z(t), z(t + \Delta t)] &= R(\Delta t); \\ f[z(t_k)] &= \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \exp\left[-\frac{z^2(t_k)}{2\sigma^2}\right]. \end{aligned} \quad (27)$$

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:

$$t_{ост}^{cp} = t_k \left[ \left( \frac{Y_n}{Y_k} \right)^{1/2} - 1 \right] K_t. \quad (28)$$

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

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

где  $Q[t_{ост}/Y(t_k) = Y_k]$  – 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  $Q[t_{ост}/Y(t_k)]$  являющаяся функцией условного распределения остаточного ресурса.

Необходимую точность оценки рекомендуемый 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:

$$Y(t) = C_1 + C_2 t, \quad (29)$$

квадратического:

$$Y(t) = C_1 + C_2 t + C_3 t^2, \quad (30)$$

и экспоненциального законов изменения показателя назначения:

$$Y(t) = \exp \{ C_1 + C_2 t \}, \quad (31)$$

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

$$Y_i = F(t_i) + \Delta_i; i = 1, \dots, N, \quad (32)$$

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

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

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

$$Y_1 = \sum_{i=1}^N Y_i \quad Y_2 = \sum_{i=1}^N t_i Y_i \quad ;$$

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

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

3. Вычисляют точечные оценки коэффициентов закона (3.4):

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

4. Вычисляют оценку среднего квадратического отклонения параметра

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

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

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

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

2. Вычисляют гарантированные оценки коэффициентов

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

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.

3. Вычисляют средний (ожидаемый) ресурс  $T_{cp} = (Y_n - C_1)/C_2 - t_k$ , где  $t_k$  – наработка на момент последнего контроля. 8. Вычисляют гарантированный остаточный ресурс  $T_{\gamma} = (Y_n - C_1)/C_2 - t_k$ .

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

Существенная часть контролируемых параметров является стационарной и немонотонной, так как подвергается 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 параметров технических средств и вычисления численных значений показателей по формулам диффузионного распределения. Статистическую обработку параметров 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.

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.

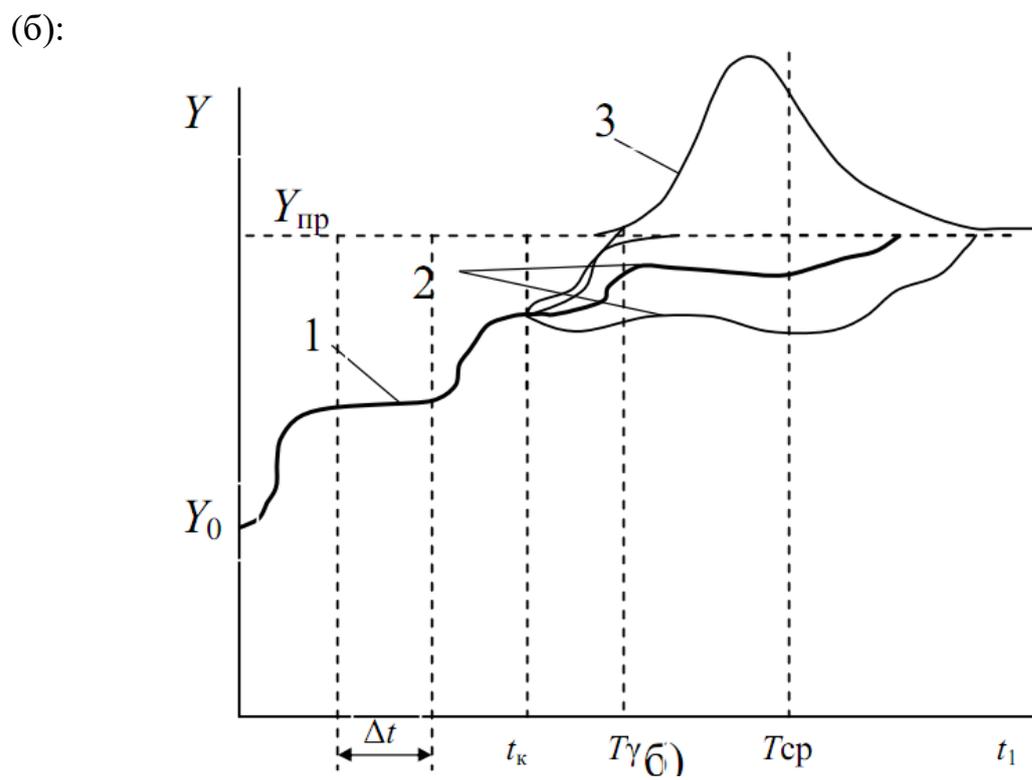
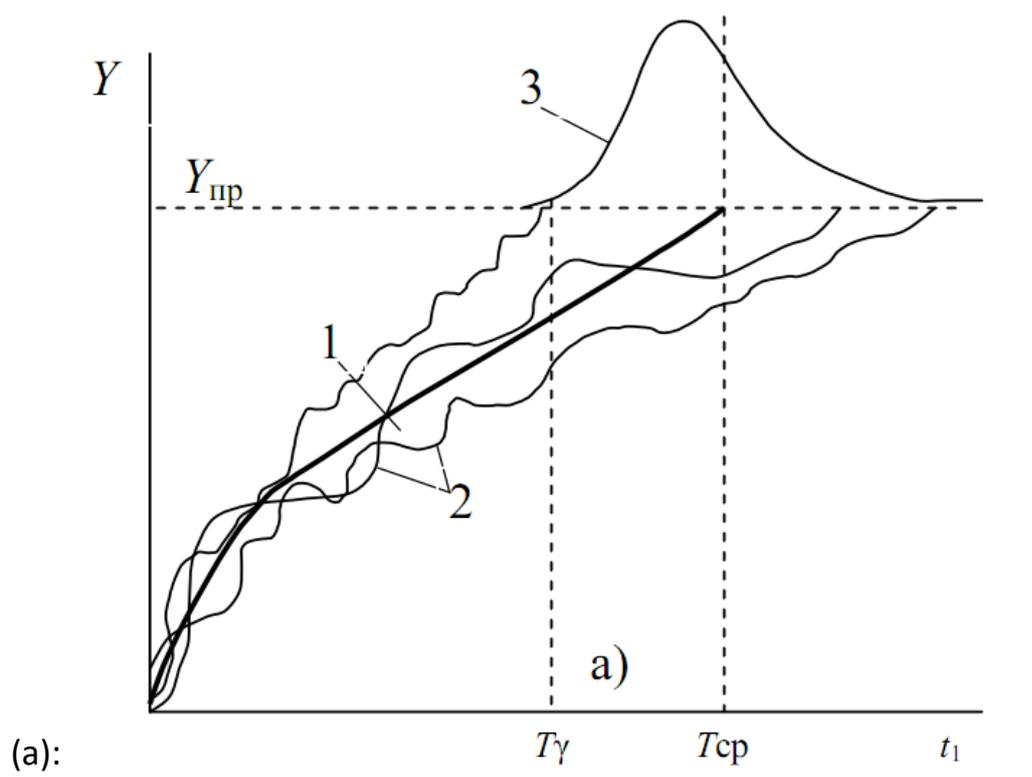


Рис. 11. Схема изменения параметров технического состояния  $Y$  при постоянной дисперсии (а) и непостоянной дисперсии (б):  
 Кривые: 1 – математического ожидания  $Y(t)$ ; 2 – отдельных реализаций;  
 3 – плотности распределения ресурса;  $T_{ср}$  – средний ресурс;  
 $T_{\gamma}$  – гарантированный (гамма-процентный) ресурс;  $Y_{пр}$  – предельное значение ПТС

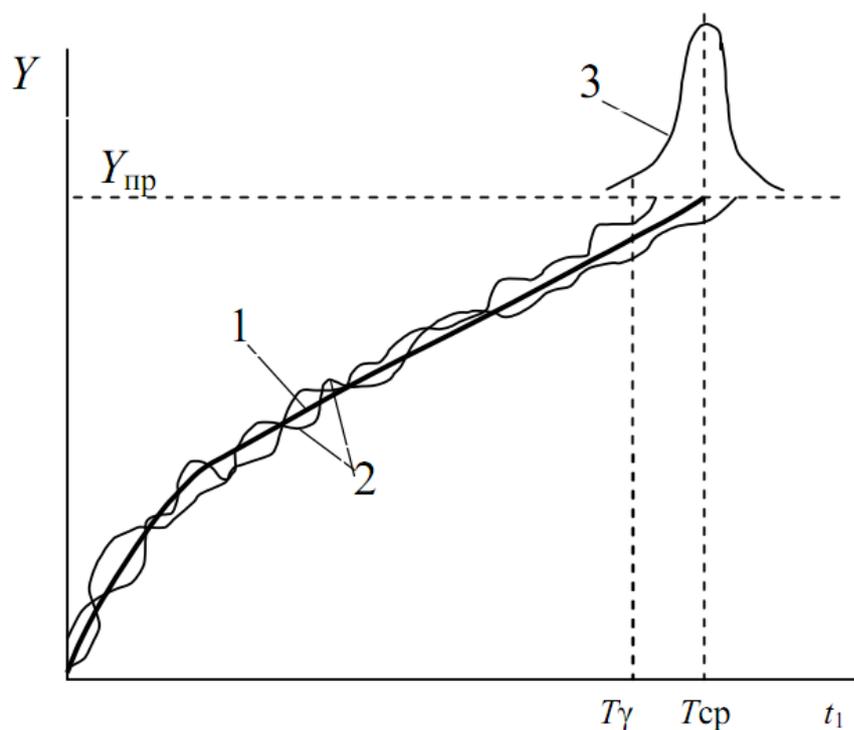


Рис. 12. Схема прогнозирования остаточного ресурса оборудования после момента контроля  $t_k$ :

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

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:

$$W = \Delta Y_i / N \cdot \Delta t_i, \quad (33)$$

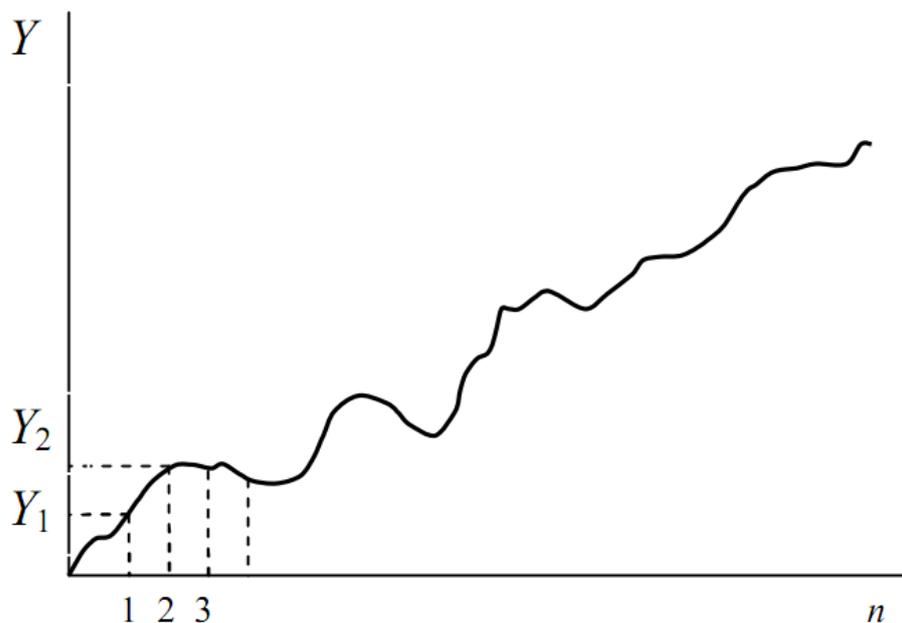
где  $\Delta Y_i$  – приращение ПТС за 1-й интервал наработки  $\Delta t_i$ ;  $N$  – число интервалов наблюдений. Определяется среднее квадратическое отклонение скорости:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\Delta Y_i / \Delta \Delta_i - W)^2}{N - 1}} \quad (34)$$

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

Проверка однородности дисперсии осуществляется по критерию Фишера.

Поскольку близко расположенные 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 (рис. 13), где  $y$  – параметр сдвига ( $y = 0, 1, 2, \dots, n-1$ );  $n$  – количество интервалов квантования ( $n \geq 100$ ).



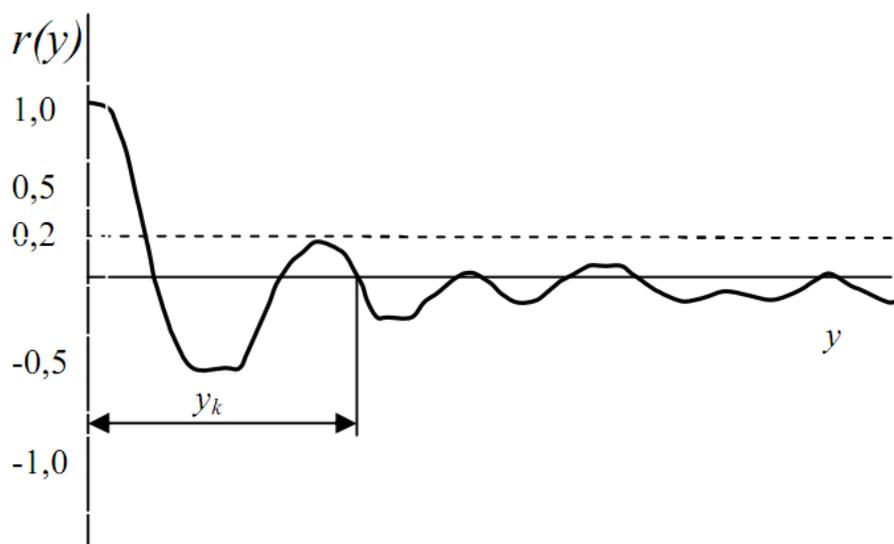


Рис. 13. Схема определения интервала корреляции  $y_k$  по корреляционной функции  $r(y)$

Значения  $r(y)$  определяются по формуле

$$r(y) = \frac{\sum_{i=0}^{n-y} \Delta Y_{i+1} \Delta Y_i}{(n-y)D},$$

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 параметров от наработки определяют среднюю скорость изменения по формуле (33).

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

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

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

Определение верхней доверительной границы коэффициента вариации скорости осуществляют по формуле:

$$V_E = V \left( 1 + U_\gamma \sqrt{\frac{3}{N}} \right). \quad (35)$$

Определение коэффициента вариации остаточного ресурса осуществляют по формуле:

$$V_T = V_E \sqrt{\frac{\Delta \bar{Y}}{Y_{\text{пр}} - Y_k}}. \quad (36)$$

Оценка среднего и гарантированного остаточного ресурса осуществляется по формулам диффузионных распределений (37) для монотонных зависимостей параметров от наработки и (38) – для немонотонных.

$$T_Y = \frac{1}{a_E} \left[ 1 + U_Y^2 V_T^2 / 2 - U_Y V_T (1 + U_Y^2 V_T^2 / 4)^{1/2} \right], \quad (37)$$

где  $a = w / (Y_{\text{пр}} - Y_{\text{к}})$ ;  $a_E = wa / (Y_{\text{пр}} - Y_{\text{к}})$ ;  $Y_{\text{пр}}$ ,  $Y_{\text{к}}$  – соответственно предельное и контрольное значение параметра.

$$T_{\text{ср}} = 1/a;$$

$$T_Y = \frac{1}{a(1 + V_T^2/2)} \left[ 1 + U_Y^2 V_T^2 / 2 - U_Y V_T (1 + U_Y^2 V_T^2 / 4)^{1/2} \right]. \quad (38)$$

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.

## ГЛАВА 5. ОРГАНИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ

Элементы устройств диагностирования проектируются таким образом, чтобы их отказы не приводили к нарушению объекта диагностики. Хотя логическая связь между отказами системы для проведения диагностики и объектом контроля существует. Она выражается в том, что если в системе контроля происходят отказы, то это ведет к получению ложных результатов диагностики, поскольку обслуживающий персонал на основании данных, получаемых от устройств контроля, а также на основании непосредственного наблюдения за работой системы делает вывод о ее исправности. В том случае, если система диагностики обнаружила неисправность, а в действительности она отсутствовала, то это ведет к материальным затратам, вызванным простоем оборудования.

Диагностика состояния системы приводит к улучшению количественных характеристик надежности, но при неисправном состоянии системы диагностирования это преимущество может быть заниженным и экономически нецелесообразным. Важным мероприятием, позволяющим существенно уменьшить влияние надежности контролирующей системы, является применение системы самоконтроля. Если самопроверка системы контроля осуществляется всякий раз перед контролем системы, то вероятность отказа контролирующей системы будет определяться за сравнительно короткий отрезок времени проверки и окажется весьма малой.

Понятно, что когда мы имеем дело с внешними, автономными системами диагностики, то подключение их к объекту диагностирования производится только на период контроля, следовательно, они не оказывают влияния на надежность проверяемого объекта. В тоже время встроенные системы контроля могут оказывать влияние на надежность объекта.

Важно отметить, что диагностика параметров и характеристик объекта может осуществляться при работающем или неработающем объекте. (Например, контроль АСУ самолета перед стартом осуществляется в условиях, когда система не работает или работает в режимах, отличных от расчетных).

В тех случаях, когда диагностируется неработающий объект, то для получения достоверной информации необходимо подать на вход «испытательные» сигналы. Эти сигналы могут иметь различную природу. Надо отметить, что число входных сигналов может не равняться числу выходных. В каждом конкретном случае в качестве контролируемых параметров выбираются такие, которые позволяют однозначно и достаточно полно оценить работоспособность того или иного элемента системы. Так как системы контроля перерабатывают информацию, носителями которой являются сигналы, а контролируемые параметры могут иметь различную природу, то в объекте контроля обычно устанавливаются датчики, выходные сигналы которых пропорциональны контролируемым параметрам.

Если мы имеем дело с АСУ, то можно выделять следующие моменты обнаружения неисправностей:

- 1) сразу же после включения системы;
- 2) в процессе нормальной работы системы;
- 3) когда неисправность вне зависимости от момента появления

сопровождается признаками аварийного характера.

Если **неисправности** проявляются **сразу же после включения АСУ**, это говорит о том, что скорее всего, они возникли из-за нарушения правил транспортировки, после профилактики. В этом случае часто наблюдается появление нескольких неисправностей и рекомендуется следующая последовательность обнаружения неисправностей:

- проверить правильность установки исходных положений рабочих органов переключения и регулировки;

- проверить источники питания на соответствие выдаваемых ими напряжений номинальным значениям;

- если возможно, необходимо устранить влияние возможных расстроек, т. е. органами регулировки и настройки попытаться добиться нормального режима работы. В том случае, когда подстройкой и регулировкой нельзя достигнуть нормальных показателей работы и исправности источников питания, это говорит о том, что имеют место повреждения.

Для обнаружения элемента с повреждением необходимо придерживаться следующей последовательности:

- применить имеющиеся в АСУ органы регулировки (переключения), добиться максимально возможного сужения границ неисправного участка системы;

- произвести анализ признаков повреждения и возможных причин его появления;

- используя способ промежуточных измерений и другие способы, найти поврежденный элемент и установить причину отказа.

Последовательность испытаний для обнаружения неисправностей в процессе **нормальной работы** системы заключается в следующем. Поиск неисправностей необходимо начинать с опроса персонала об обстоятельствах, которые сопутствовали появлению неисправности. Эта информация является полезной, так как она может также выявить неправильные действия людей. Дальнейшие поиски неисправности проводятся по вышеизложенной схеме.

Другая последовательность испытаний рекомендуется при обнаружении неисправностей, которые возникают в процессе нормальной работы системы. Поиск неисправностей надо начинать с опроса персонала об обстоятельствах, которые сопутствовали появлению неисправности. Эта информация является полезной, так как она может выявить неправильные действия людей. Дальнейшие поиски неисправности проводятся по вышеизложенной схеме.

Если обнаружение неисправностей сопровождается **признаками аварийного характера**, то их обнаружение проводится следующим образом:

- выключают систему или ее часть, в которой наблюдается признак аварийного характера;

- производят внешний осмотр в аварийном участке для того, чтобы обнаружить поврежденный элемент.

При этом заменять поврежденный элемент нельзя до тех пор, пока не установлена причина неисправности [6].

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ГОСТ 19919-74 Контроль автоматизированный технического состояния изделий авиационной техники. Термины и определения : государственный стандарт СССР : издание официальное : утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета стандартов Совета Министров СССР от 12 июля 1974 г. № 1674 : введен впервые : дата введения 1975-07-01.
2. ГОСТ 20911-89 Техническая диагностика. Термины и определения : межгосударственный стандарт: издание официальное : утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета СССР по управлению качеством продукции и стандартам от 26 декабря 1989 г. № 4143 : введен взамен 20911-85 : дата введения 1991-01-01.
3. ГОСТ 16504-81 Испытания и контроль качества продукции. Основные термины и определения : межгосударственный стандарт: издание официальное : утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 8 декабря 1981 г. № 5297 : введен взамен 16504-74 : дата введения 1982-01-01.
4. ГОСТ Р 27.102-2021 Надежность в технике. Надежность объекта. Термины и определения : национальный стандарт : издание официальное : утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 8 октября 2021 г. N 1104-ст : введен впервые : дата введения 2022-01-01.
5. Дмитриенко, А. Г. Техническая диагностика. Оценка состояния и прогнозирование остаточного ресурса технически сложных объектов: учебное пособие / А. Г. Дмитриенко, А. В. Блинов, Д. В. Волков, В. С. Волков; под редакцией Д. И. Нефедьева, Б. В. Цыпина. – Пенза: Изд-во ПГУ, 2013. – 62 с. – Текст: непосредственный.
6. Хмельницкий, А. К. Диагностика и надежность автоматизированных систем: учебное пособие / А. К. Хмельницкий, В. В. Пожитков, Г. А. Кондрашкова. – Часть 3. – СПб: ГОУ ВПО СПбГТУ РП, 2005. – 56 с. – Текст: непосредственный.
7. Гмурман В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика. – М.: Высшее образование, 2005. – 400 с. – Текст: непосредственный.
8. Гнеденко Б. В. Курс теории вероятностей. – М., Наука, 1969. – 399 с. – Текст: непосредственный.
9. Фандеев, В. П. Методический подход к выбору диагностических параметров для прогнозирования технического состояния электронных приборов и аппаратуры / В. П. Фандеев, В. И. Тутушкин // Известия вузов Поволжского региона: Технические науки. – № 3. – 2011. – С. 124 – 131. – Текст: непосредственный.
10. 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 : государственный стандарт Российской Федерации : издание официальное : утвержден и введен в действие Постановлением Госстандарта России от 26 декабря 1994 г. N 362 : введен впервые : дата введения 1996-01-01.

11. ГОСТ Р ИСО/МЭК 15288-2005 Информационная технология. Системная инженерия. Процессы жизненного цикла систем : национальный стандарт Российской Федерации : издание официальное : утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 29 декабря 2005 г. N 476-ст : введен впервые : дата введения 2007-01-01.

12. Стандарты серии ГОСТ Р ИСО 10303-...-... Системы автоматизации производства и их интеграция. Представление данных об изделии и обмен этими данным государственный стандарт Российской Федерации : издание официальное : утвержден и введен в действие Постановлением Госстандарта России от 22 сентября 1999 г. N 301-ст : введен впервые : дата введения 2000-07-01.

Учебное издание

**Сидельников Владимир Иванович**

**Диагностика и надежность  
автоматизированных систем**

**Часть 2**

*Учебное пособие*

Редактор и корректор Е. О. Тарновская  
Техн. редактор Д. А. Романова

Темплан 2023 г., поз. 5268

---

Подписано к печати 06.12.23.	Формат 60x84/16.	Бумага тип № 1.
Печать офсетная.	Печ. л. 3,4.	Уч.-изд. 3,4.
Тираж 30 экз.	Изд. № 5268.	Цена «С». Заказ №

---

Ризограф Высшей школы технологии и энергетики СПбГУПТД,  
198095, Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, 4.