

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ  
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ТРАНСПОРТА»

Кафедра «Неразрушающий контроль и техническая диагностика»

С. Г. ДОДОЛЕВ, О. В. ХОЛОДИЛОВ

ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ  
МЕТОДАМИ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

*Одобрено методической комиссией заочного факультета в качестве  
учебно-методического пособия для студентов технических специальностей*

Гомель 2013

УДК 629.017 (075.8)  
ББК 34.41  
Д60

**Р е ц е н з е н т** – директор Института повышения квалификации и переподготовки руководителей и специалистов транспортного комплекса Республики Беларусь канд. техн. наук, доцент *С. И. Сухопаров* (УО «БелГУТ»)

**Додолев, С. Г.**

Д60 Диагностика технических объектов методами неразрушающего контроля : учеб.-метод. пособие / С. Г. Додолев, О. В. Холодилов; М-во образования Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель : БелГУТ, 2013. – 40 с.  
ISBN 978-985-554-234-7

Приведена краткая информация по теории надежности и диагностики.  
Предназначено для студентов технических специальностей, а также может быть полезно для инженеров и слушателей курсов повышения квалификации.

**УДК 629.017 (075.8)**  
**ББК 34.41**

**ISBN 978-985-554-234-7**

© Додолев С. Г., Холодилов О. В., 2013  
© Оформление. УО «БелГУТ», 2013

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....	4
<b>1 КЛАССИФИКАЦИЯ ОТКАЗОВ</b> .....	5
1.1 Факторы, влияющие на надежность подвижного состава .....	5
1.2 Процессы, снижающие работоспособность объекта .....	6
1.3 Классификация отказов.....	8
1.4 Шкала для установления категории тяжести последствий отказов .....	9
1.5 Дефект. Виды дефектов .....	16
1.6 Брак .....	18
<b>2 ПРОЦЕСС ПОЛУЧЕНИЯ И ОБРАБОТКИ ДИАГНОСТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ</b> .....	19
2.1 Получение и обработка диагностической информации .....	19
2.2 Классификация и характеристика средств получения и обработки диагностической информации .....	20
2.3 Визуально-оптические методы получения информации и ее обработки .....	22
2.4 Датчики, или первичные преобразователи, диагностической информации .....	25
2.5 Вибродиагностика. Цели и задачи вибродиагностики .....	34
2.6 Температура как диагностический параметр .....	36
<b>3 РАЗРАБОТКА И АНАЛИЗ АЛГОРИТМОВ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ МЕТОДАМИ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ</b> .....	38
<b>ВОПРОСЫ К ЗАЧЕТУ</b> .....	39
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ</b> .....	40

## **ВВЕДЕНИЕ**

С начала 1970-х годов проблеме диагностики оборудования стали уделять все большее внимание. Было изучено и разработано большое количество методологий, основанных на физической и аналитической избыточности. В 1973 году Джонс представил, например, хорошо известный метод «фильтров выявления отказов» для линейных систем. Вилски обобщил ранние исследования в этой области. Ролт рассмотрел применение методов идентификации к выявлению отказов реактивных двигателей. Методы корреляции были применены для выявления протечек Изерманом.

Первая книга по методам диагностики, основанным на моделях, применительно к химическим процессам была опубликована Химмельблау в 1978 году. Выявление отказов датчиков, основанное на аналитической избыточности наблюдателей было предложено Кларком.

Использование методов оценки параметров для выявления отказов технических систем было продемонстрировано Холлманом, Гейгером, Филбертом и Метсгером. Развитие методов выявления отказов процесса, основанное на моделировании, оценке параметров и состоянии, было обобщено Изерманом. Методы вектора равенства были изначально предложены Шой и Вилски, а затем в дальнейшем доработаны Патонем и Ченом.

Методы частотной области обычно применяются, когда воздействие, как отказов, так и возмущений имеет частотные характеристики, отличающиеся друг от друга и, следовательно, частотный спектр служит критерием различения отказов. Данные методы рассматриваются в работах Франка и Динга.

Задача отделения рассогласований от возмущений рассматривается в нескольких статьях. Например, Шоу и Вилски, Чанг, Спейер, Лю и др. предложили оптимальные отношения равенства, а Энами и Наэни выдвинули концепцию порогового селектора. Чен и Патон для выполнения надежной диагностики использовали метод отделения возмущений. Метод Патона и Чена интересен в противопоставлении с методом Шоу и Вилски, которые минимизировали моделируемую неопределенность для нескольких рабочих точек. Патон и Чен рассматривали эту проблему непосредственно при оценке оптимальной матрицы неизвестных входных возмущений в

диапазоне рабочих точек и использовали метод распределения собственных чисел.

Широко распространены традиционные подходы диагностики отказов, основанные на методах «аппаратной (или физической)» избыточности, которые используют дополнительные наборы датчиков, исполнительных механизмов, компьютеров и программного обеспечения для измерения и/или управления отдельными переменными. Основные недостатки этих методов аппаратной избыточности – дополнительное оборудование и стоимость технического обслуживания, а также дополнительное пространство, требуемое для размещения оборудования.

В последнее десятилетие были разработаны несколько эффективных методов обнаружения основных дефектов машин и оборудования по вибрации на этапе их зарождения. Они основаны, главным образом, на анализе высокочастотной вибрации, для возбуждения которой не нужны большие колебательные силы, но и проявляется она только в месте их действия, быстро затухая при распространении. Такие методы стали использоваться диагностами многих стран для перехода от вибрационного мониторинга к глубокой диагностике. Параллельно развивались методы автоматизации алгоритмов диагностики, что позволило ряду производителей диагностических систем заменить программным обеспечением экспертов при решении типовых диагностических задач. Доля таких задач очень высока и превышает девяносто процентов от всех задач, решаемых путем анализа сигналов вибрации. Первые автоматические системы вибрационной диагностики были разработаны в 1991–1992 годах и постоянно совершенствовались.

В 1998 году появилось новое поколение систем автоматической диагностики машин по вибрации, разработанное совместно специалистами России и США и объединившее лучшие свойства, как систем мониторинга, так и систем диагностики.

## **1 КЛАССИФИКАЦИЯ ОТКАЗОВ**

### **1.1 Факторы, влияющие на надежность подвижного состава**

Те изменения, которые происходят с течением времени в любом объекте и приводят к потере им работоспособности, связаны с внешними и внутренними энергетическими воздействиями, которым подвергается объект во время эксплуатации. При этом имеется три основных источника возникновения отказов:

- 1) энергия окружающей среды (внешняя), включая человека, выполняющего функции оператора и ремонтника;
- 2) внутренние источники энергии, связанные с рабочими процессами,

протекающими в объекте;

3) накопленная потенциальная энергия материалов, из которых изготовлен объект (внутренние напряжения в отливках, монтажные напряжения и т.п.)

Различные виды энергии (механическая, тепловая, химическая, электромагнитная, ядерная, биоэнергия), действуя на объект, инициируют в его составных частях процессы, изменяющие свойства или состояние материалов. Возникающие процессы связаны, как правило, со сложными физико-химическими явлениями и приводят к деформации, износу, поломке и другим видам повреждений (отклонений контролируемых свойств материалов от их первоначального уровня). Накопление повреждений, в свою очередь, влечет за собой изменение выходных качественных параметров объекта, что, в конечном счете, приводит к отказу.

Эти взаимосвязи упрощенно можно выразить схемой, представленной на рисунке 1. Например, механическая энергия, действующая в звеньях кинематической цепи металлорежущего станка, инициирует процесс изнашивания в подвижных сопряжениях звеньев. Следствием протекания этого процесса является накопление повреждений в контактных зонах, что вызывает искажение начальной формы сопряжений, приводящее к потере кинематической точности станка и снижению точности обработки деталей (выходной параметр). При достижении погрешности обработки определенного предельного уровня, установленного в паспортных данных станка, возникает параметрический отказ станка из-за уменьшения точности обработки.

## **1.2 Процессы, снижающие работоспособность объекта**

Процессы, снижающие работоспособность объекта, по признаку скорости их протекания можно разделить на три группы:

1 Быстропротекающие процессы имеют периодичность изменения, составляющую малую долю продолжительности рабочего цикла объекта. Сюда можно отнести:

- вибрации деталей и узлов;
- изменения сил трения в подвижных сопряжениях;
- колебания уровня рабочих нагрузок и другие процессы, искажающие рабочий цикл объекта.

2 Процессы средней скорости, имеющие периодичность, сравнимую с длительностью рабочего цикла объекта. Они приводят к монотонному изменению выходных параметров объекта. Сюда можно отнести:

- необратимый процесс изнашивания режущего инструмента, периодичность которого определяется периодом стойкости режущего

инструмента (интенсивность изнашивания инструмента на несколько порядков превосходит интенсивность изнашивания деталей подвижных сопряжений);

– обратимые (необратимые) процессы тепловых деформаций, обусловленные как диссипацией энергии рабочих процессов, так и суточными колебаниями температуры окружающей среды.

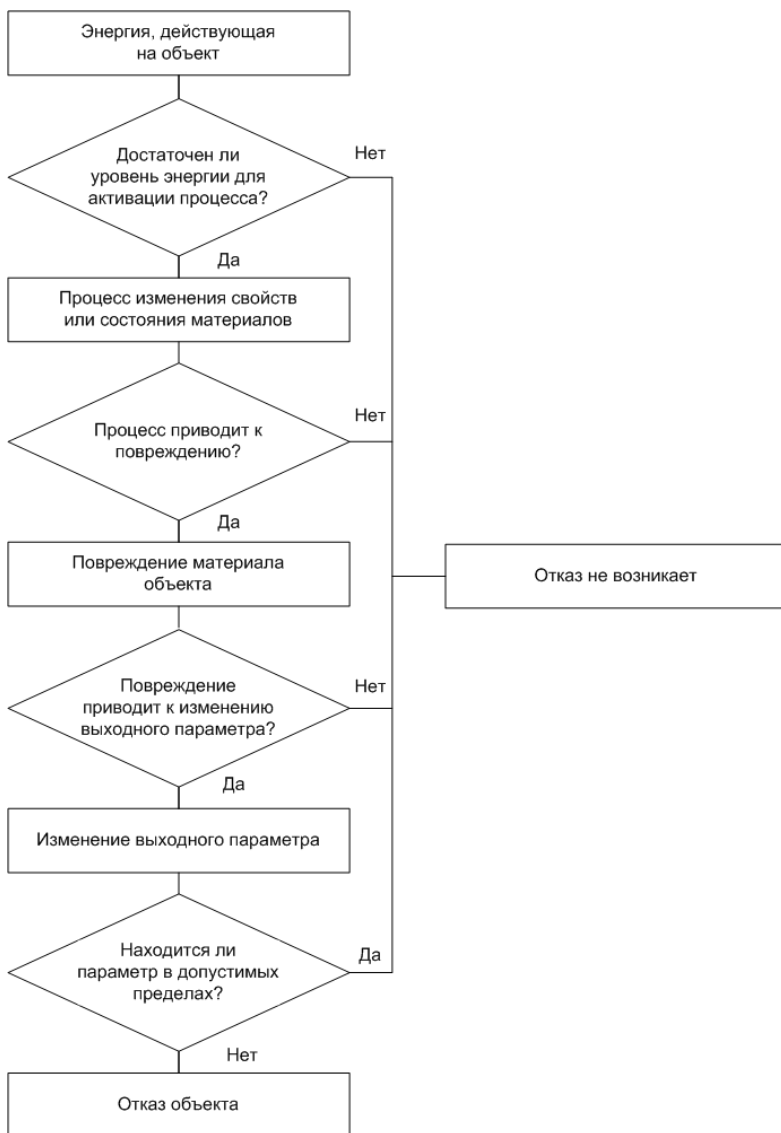


Рисунок 1 – Упрощенная схема возникновения отказа объекта

Обратимые процессы (в отличие от необратимых) временно изменяют выходные параметры объекта без тенденции прогрессивного ухудшения. Однако в ряде случаев обратимый процесс может инициировать



необратимый процесс, приводящий к накоплению повреждений. Например, тепловая деформация шпинделя металлорежущего станка может привести к возрастанию нагрузки на подшипники и их ускоренному износу или поломке, т.е. отказу.

3 Медленные процессы, периодичность которых сравнима с длительностью межремонтного периода. К ним можно отнести:

- процессы изнашивания деталей подвижных сопряжений;
- перераспределение внутренних напряжений в деталях вследствие процесса старения материалов;
- ползучесть материалов;
- процессы коррозии;
- загрязнение трущихся поверхностей деталей.

Обычными методами борьбы с последствиями медленных процессов являются периодические ремонты и технические обслуживания.

Момент и место отказа в объекте являются случайными, если отсутствует контроль его технического состояния. Однако с углублением контроля области случайного времени и места отказа объекта контроля сужаются (имеется в виду, что внешние случайные воздействия на объект находятся в области допустимых значений, т. е. они правильно учтены при создании объекта).

Как показал опыт других отраслей народного хозяйства, в результате применения технических средств контроля и прогнозирования состояния сложных объектов значительно повышается эффективность их эксплуатации.

Технико-экономический анализ подтверждает, что контрольно-диагностическое оборудование позволяет повысить надежность и безопасность работы троллейбусов на линии, а значит, улучшить обслуживание пассажиров наиболее экономичным способом.

### 1.3 Классификация отказов

**Отказ** – переход изделия из работоспособного состояния в неработоспособное в заданных условиях (нарушение работоспособности объекта).

*Если работоспособность объекта характеризуют совокупностью значений некоторых технических параметров, то признаком возникновения отказа является выход значений любого из этих параметров за пределы допусков. Кроме того, в критерии отказов могут входить также качественные признаки, указывающие на нарушение нормальной работы объекта.*

Различают следующие виды отказов:

- *полные и неполные* (оценивается степень влияния на работоспособность

изделия);

– *катастрофические* (внезапные) и параметрические (классифицируются по физическому характеру непосредственного проявления отказа);

– *зависимые и независимые* (характеризуются связью с другими отказами);

– *устойчивые* (необратимые), временные (обратимые, устранимые) и перемежающиеся (мерцающие) характеризуются временем существования.

*Вид отказа* – совокупность возможных или наблюдаемых отказов элемента и/или системы, объединенных в некоторую классификационную группу по общности одного или нескольких признаков (причины, механизм возникновения, внешние проявления и другие признаки, кроме последствий отказа).

*Тяжесть последствий отказа* – качественная или количественная оценка вероятного (наблюдаемого) ущерба от отказа элемента и/или системы.

#### **1.4 Шкала для установления категории тяжести последствий отказов**

Тяжесть последствий отказов может характеризоваться следующими категориями:

*IV категория.* Отказ, который быстро и с высокой вероятностью может повлечь за собой значительный ущерб для самого объекта и/или окружающей среды, гибель или тяжелые травмы людей, срыв выполнения поставленной задачи.

*III категория.* Отказ, который быстро и с высокой вероятностью может повлечь за собой значительный ущерб для самого объекта и/или для окружающей среды, срыв выполняемой задачи, но создает пренебрежимо малую угрозу жизни и здоровью людей.

*II категория.* Отказ, который может повлечь задержку выполнения задачи, снижение готовности и эффективности объекта, но не представляет опасности для окружающей среды, самого объекта и здоровья людей.

*I категория.* Отказ, который может повлечь снижение качества функционирования объекта, но не представляет опасности для окружающей среды, самого объекта и здоровья людей.

*Критический отказ* – отказ системы или ее элемента, тяжесть последствий которого в пределах данного анализа признана недопустимой и требует принятия специальных мер по снижению вероятности данного отказа и/или возможного ущерба, связанного с его возникновением.

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

Если работоспособность объекта характеризуют совокупностью значений некоторых технических параметров, то признаком возникновения отказа является выход значений любого из этих параметров за пределы допусков. Кроме того, в критерии отказов могут входить также качественные признаки, указывающие на нарушение нормальной работы объекта.

Критерии отказов следует отличать от критериев повреждений. Под критериями повреждений понимают признаки или совокупность признаков неисправного, но работоспособного состояния объекта.

*Причина отказа* – явления, процессы, события и состояния, вызвавшие возникновение отказа объекта.

*Последствия отказа* – явления, процессы, события и состояния, обусловленные возникновением отказа объекта.

*Критичность отказа* – совокупность признаков, характеризующих последствия отказа. Понятие критичности отказа введено для того, чтобы проводить классификацию отказов по их последствиям.

*Примечание* – классификация отказов по критичности (например по уровню прямых и косвенных потерь, связанных с наступлением отказа, или по трудоемкости восстановления после отказа) устанавливается нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документацией по согласованию с заказчиком на основании технико-экономических соображений и соображений безопасности.

При классификации отказов по последствиям могут быть введены две, три и большее число категорий отказов. В международных документах ИСО, МЭК, ЕОКК различают критические и некритические. Последние подразделяют на существенные и несущественные отказы. Границы между категориями отказов достаточно условны.

Отказ одного и того же объекта может трактоваться как критический; существенный или несущественный в зависимости от того, рассматривается объект как таковой или он является составной частью другого объекта. Несущественный отказ объекта, входящего в состав более ответственного объекта, может рассматриваться как существенный и даже критический в зависимости от последствий отказа сложного объекта. Для проведения классификации отказов по последствиям необходим анализ критериев, причин и последствий отказов и построение логической и функциональной связи между отказами.

Классификация отказов по последствиям необходима при нормировании надежности (в частности, для обоснованного выбора номенклатуры и численных значений нормируемых показателей надежности), а также при установлении гарантийных обязательств.

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

*Независимый отказ* – отказ, не обусловленный другими отказами.

*Зависимый отказ* – отказ, обусловленный другими отказами.

*Внезапный отказ* – отказ, характеризующийся скачкообразным

изменением значений одного или нескольких параметров объекта. Внезапный отказ – это отказ, наступление которого не может быть предсказано предварительным контролем или диагностированием.

Внезапные отказы обычно проявляются в виде механических повреждений элементов (трещины – хрупкое разрушение, пробои изоляции, обрывы и т. п.) и не сопровождаются предварительными видимыми признаками их приближения. Внезапный отказ характеризуется независимостью момента наступления от времени предыдущей работы.

*Постепенный отказ* – отказ, возникающий в результате постепенного изменения значений одного или нескольких параметров объекта. Постепенные отказы связаны с износом деталей и старением материалов.

Внезапный и постепенный отказы позволяют разделять отказы на две категории в зависимости от возможности прогнозировать момент наступления отказа. В отличие от внезапного отказа, наступлению постепенного отказа предшествует непрерывное и монотонное изменение одного или нескольких параметров, характеризующих способность объекта выполнять заданные функции. Ввиду этого удастся предупредить наступление отказа и (или) принять меры по устранению (локализации) его нежелательных последствий.

Четкой границы между внезапными и постепенными отказами, однако, провести не удастся. Механические, физические и химические процессы, которые составляют причины отказов, как правило, протекают во времени достаточно медленно. Так, усталостная трещина в стенке трубопровода или сосуда давления, зародившаяся из трещинообразного дефекта, медленно растет в процессе эксплуатации; этот рост в принципе может быть прослежен средствами неразрушающего контроля. Однако собственно отказ (наступление течи) происходит внезапно. Если по каким-либо причинам своевременное обнаружение сквозной трещины оказалось невозможным, то отказ придется признать внезапным.

По мере совершенствования расчетных методов и средств контрольно-измерительной техники, позволяющих своевременно обнаруживать источники возможных отказов и прогнозировать их развитие во времени, все большее число отказов будет относиться к категории постепенных.

*Перебегающий отказ* – многократно возникающий самоустраняющийся отказ одного и того же характера.

*Явный отказ* – отказ, обнаруживаемый визуально или штатными методами и средствами контроля и диагностирования при подготовке объекта к применению или в процессе его применения по назначению.

*Скрытый отказ* – отказ, не обнаруживаемый визуально или штатными методами и средствами контроля и диагностирования, но выявляемый при проведении технического обслуживания или специальными методами диагностики.

*Частота отказов* – число отказов в заданный промежуток времени, отнесенное к общему числу работающих в этот период однотипных элементов.

*Частичный отказ* – это отказ до устранения которого остается возможность использовать систему по назначению.

*Полный отказ* – это отказ, до устранения которого вся система не пригодна для выполнения работы.

*Среднее время безотказной работы* – это время работы изделия или системы до первого отказа.

*Вероятность отказа* – вероятность того, что в течение межремонтного периода возникнет хотя бы один отказ изделия или системы в целом.

*Интенсивность отказов* – количество отказов в единицу времени, отнесенное к числу элементов, оставшихся исправными к началу рассматриваемого промежутка времени (условная плотность вероятности возникновения отказа объекта, определяемая при условии, что до рассматриваемого момента времени отказ не возник).

Математически интенсивность отказов  $\lambda(t)$  можно оценить следующим образом

$$\mathbf{Error!}, \quad (1)$$

где  $f(t)$  – плотность вероятности отказов;

$P(t)$  – вероятность безотказной работы.

Для высоконадежных систем  $P(t) \approx 1$ , в этом случае интенсивность отказов приближенно равна плотности распределения наработки до отказа.

Статистическая оценка для интенсивности отказов

$$\lambda'(t) = \mathbf{Error!}, \quad (2)$$

где  $N$  – число объектов, работоспособных в начальный момент времени;

$n(t)$  – число объектов, оказавших на отрезке от 0 до  $t$ .

Статистическая оценка вероятности безотказной работы

$$P'(t) = \mathbf{Error!}. \quad (3)$$

Опыт эксплуатации сложных систем показывает, что изменение интенсивности отказов  $\lambda(t)$  большинства количества объектов описывается  $U$  образной кривой (рисунок 2). Из рисунка 2 видно, что можно условно выделить три характерных участка:

I Период приработки.

II Период нормальной эксплуатации.

III Период старения объекта.

Период приработки объекта имеет повышенную интенсивность отказов, вызванную приработочными отказами, обусловленными дефектами производства, монтажа и наладки. Иногда с окончанием этого периода

связывают гарантийное обслуживание объекта, когда устранение отказов производится изготовителем.



Рисунок 2 – Изменение интенсивности отказов от времени

В период нормальной эксплуатации интенсивность отказов практически остаётся постоянной, при этом отказы носят случайный характер и появляются внезапно, прежде всего из-за случайных изменений нагрузки, несоблюдения условий эксплуатации, неблагоприятных внешних факторов и т.п. Именно этот период соответствует основному времени эксплуатации объекта. Возрастание интенсивности отказов относится к периоду старения объекта и вызвано увеличением числа отказов из-за износа, старения и других причин, связанных с длительной эксплуатацией. То есть вероятность отказа элемента, дожившего до момента  $t$  в некотором последующем промежутке времени  $(t, t + x)$  зависит от значений  $\lambda(t)$  только на этом промежутке, а следовательно интенсивность отказов – локальный показатель надёжности элемента на данном промежутке времени.

*Конструктивный отказ* – отказ, возникший по причине, связанной с несовершенством или нарушением установленных правил и (или) норм проектирования и конструирования.

*Производственный отказ* – отказ, возникший по причине, связанной с несовершенством или нарушением установленного процесса изготовления или ремонта, выполняемого на ремонтном предприятии.

*Эксплуатационный отказ* – отказ, возникший по причине, связанной с нарушением установленных правил и (или) условий эксплуатации.

*Параметр потоков отказа* – отношение математического ожидания числа отказов восстанавливаемого объекта за достаточно малую его наработку к значению этой наработки.

Параметр потока отказов

$$\mu(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{M\{r(t + \Delta t) - r(t)\}}{\Delta t}, \quad (4)$$

где  $\Delta t$  – малый отрезок наработки;  
 $r(t)$  – число отказов, наступивших от начального момента времени до достижения наработки  $t$ .  
 $\{r(t + \Delta t) - r(t)\}$  – число отказов на отрезке  $\Delta t$ .

*Осредненный параметр потока отказов* – отношение математического ожидания числа отказов восстанавливаемого объекта за конечную наработку к значению этой наработки.

Наряду с параметром потока отказов в расчетах и обработке экспериментальных данных часто используют осредненный параметр потока отказов

$$\bar{\mu}(t) = \frac{M\{r(t_2) - r(t_1)\}}{t_2 - t_1}. \quad (5)$$

По сравнению с формулой (4) здесь рассматривается число отказов за конечный отрезок  $[t_1, t_2]$ , причем  $t_1 \leq t \leq t_2$ . Если поток отказов стационарный, то параметры, определяемые по формулам (4) и (5) от  $t$  не зависят.

Статистическая оценка для параметра потока отказов

$$\mu'(t) = \frac{r(t_2) - r(t_1)}{t_2 - t_1}, \quad (6)$$

которая по структуре аналогична формуле (5). Для стационарных потоков можно применять формулу

$$\mu' = \frac{1}{T'}, \quad (7)$$

где  $T'$  – оценка формулы (6) для средней наработки на отказ.

Классификация отказов по причинам возникновения введена с целью установления, на какой стадии создания или существования объекта следует провести мероприятия для устранения причин отказов.

Допускается выделить отказы комплектующих изделий, изготавливаемых не на том предприятии, где производится объект в целом. Отказы комплектующих элементов также могут быть конструктивными, производственными и эксплуатационными. Классификация не является

исчерпывающей, поскольку возможно возникновение отказов, вызванных двумя или тремя причинами.

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

При анализе надежности различают ранние отказы, когда проявляется влияние дефектов, не обнаруженных в процессе изготовления, испытаний и (или) приемочного контроля, и поздние, деградационные отказы. Последние происходят на заключительной стадии эксплуатации объекта, когда вследствие естественных процессов старения, изнашивания и т. п. объект или его составные части приближаются к предельному состоянию по условиям физического износа. Вероятность возникновения деградационных отказов в пределах планируемого полного или межремонтного срока службы (ресурса) должна быть достаточно мала. Это обеспечивается расчетом на долговечность с учетом физической природы деградационных отказов, а также надлежащей системой технического обслуживания и ремонта.

В принципе можно практически исключить возникновение ранних отказов, если до передачи объекта в эксплуатацию провести приработку, обкатку, технологический прогон и т.п. При этом соответственно может варьироваться цена объекта.

Отказ вспомогательных элементов, не влияющих на надежность, называют второстепенной неисправностью.

**Наработка** – продолжительность или объем работы объекта. Нарботка может быть как непрерывной величиной (продолжительность работы в часах, километраж пробега и т.д.), так и целочисленной величиной (число рабочих циклов, запусков и т.п.).

*Наработка до отказа* – наработка объекта от начала эксплуатации до возникновения первого отказа.

*Средняя наработка до отказа* – математическое ожидание наработки объекта до первого отказа.

*Средняя наработка на отказ* – отношение суммарной наработки восстанавливаемого объекта к математическому ожиданию числа его отказов в течение этой наработки.

Этот показатель введен применительно к восстанавливаемым объектам, при эксплуатации которых допускаются многократно повторяющиеся отказы. Очевидно, что это должны быть несуществующие отказы, не приводящие к серьезным последствиям и не требующие значительных затрат на восстановление работоспособного состояния. Эксплуатация таких объектов может быть описана следующим образом: в начальный момент времени объект начинает работать и продолжает работать до первого отказа;



после отказа происходит восстановление работоспособности, и объект вновь работает до отказа и т. д. На оси времени моменты отказов образуют поток отказов, а моменты восстановлений – поток восстановлений. На оси суммарной наработки (когда время восстановления не учитывается) моменты отказов образуют поток отказов. Полное и строгое математическое описание эксплуатации объектов по этой схеме построено на основе теории восстановления.

Определение средней наработки на отказ

$$\text{Error!}, \quad (8)$$

где  $t$  – суммарная наработка;

$r(t)$  – число отказов, наступивших в течение данной наработки;

$M(r(t))$  – математическое ожидание данного числа.

В общем случае средняя наработка на отказ оказывается функцией  $t$ . Для стационарных потоков отказов средняя наработка на отказ от  $t$  не зависит.

Статистическую оценку средней наработки на отказ  $T$  вычисляют по формуле, которая аналогична формуле (8),

$$T' = \text{Error!}. \quad (9)$$

В отличие от формулы (8),  $r(t)$  – число отказов, фактически происшедших за суммарную наработку  $t$ .

Формула (9) допускает обобщение на случай, когда объединяются данные, относящиеся к группе однотипных объектов, которые эксплуатируются в статистически однородных условиях. Если поток отказов – стационарный, то в формуле (9) достаточно заменить  $t$  на сумму наработок всех наблюдаемых объектов и заменить  $r(t)$  на суммарное число отказов этих объектов.

*Вероятность безотказной работы* – вероятность того, что в пределах заданной наработки отказ объекта не возникнет.

*Интенсивность отказов* называется отношение числа отказавших изделий в единицу времени к среднему числу изделий, исправно работающих в данный отрезок времени.

### 1.5 Дефект. Виды дефектов

**Дефект** (изъян, недостаток) – каждое отдельное несоответствие продукции установленным требованиям (выход размера детали за пределы допуска, неправильная сборка или регулировка (настройка) аппарата (прибора), царапина на защитном покрытии изделия, недопустимо высокое содержание вредных примесей в продукте, наличие заусенцев на резьбе и т. д.).

*Дефектами называются неисправности, которые в момент их*

*обнаружения не приводят к повреждению или нарушению работы и регулировке прибора, но могут в будущем вызвать подобные явления.*

Если рассматриваемая единица продукции имеет дефект, то это означает, что по меньшей мере один из показателей ее качества или параметров вышел за предельное значение или не выполняется (не удовлетворяется) одно из требований нормативной документации к признакам продукции.

*Конструктивный дефект* – несоответствие требованиям технического задания или установленным правилам разработки (модернизации) продукции.

*Производственный дефект* – несоответствие требованиям нормативной документации на изготовление или поставку продукции.

Примерами дефектов могут быть выход размера детали за пределы допуска, неправильная сборка или регулировка (настройка) аппарата (прибора), царапина на защитном покрытии изделия, недопустимо высокое содержание вредных примесей в продукте, наличие заусенцев на резьбе и т. д.

Термин «дефект» связан с термином «неисправность», но не является его синонимом. Неисправность представляет собой определенное состояние изделия. Находясь в неисправном состоянии, изделие имеет один или несколько дефектов.

Термин «дефект» применяют при контроле качества продукции на стадии ее изготовления, а также при ее ремонте, например, при дефектации, составлении ведомостей дефектов и, контроле качества отремонтированной продукции.

Термин «дефект» следует отличать также от термина «отказ».

Отказом называется событие, заключающееся в нарушении работоспособности изделия, которое до возникновения отказа было работоспособным. Отказ может возникнуть в результате наличия в изделии одного или нескольких дефектов, но появление дефектов не всегда означает, что возник отказ, т. е. изделие стало неработоспособным.

*Явный дефект* – дефект, для выявления которого в нормативной документации, обязательной для данного вида контроля, предусмотрены соответствующие правила, методы и средства.

*Многие явные дефекты выявляются при внешнем осмотре (визуально). Однако, если нормативной документацией предусмотрена проверка отсутствия какого-либо дефекта инструментом, прибором или разборкой контролируемого изделия; то такой дефект относится к категории явных, несмотря на невозможность его визуального обнаружения.*

*Скрытый дефект* – дефект, для выявления которого в нормативной документации, обязательной для данного вида контроля, не предусмотрены соответствующие правила, методы и средства.

Скрытые дефекты, как правило, выявляются после поступления

продукции к потребителю или при дополнительных ранее не предусмотренных проверках, в связи с обнаружением других (явных) дефектов.

*Критический дефект* – дефект, при наличии которого использование продукции по назначению практически невозможно или недопустимо.

*Значительный дефект* – дефект, который существенно влияет на использование продукции по назначению и (или) на ее долговечность, но не является критическим.

*Малозначительный дефект* – дефект, который существенно не влияет на использование продукции по назначению и ее долговечность.

*Устранимый дефект* – дефект, устранение которого технически возможно и экономически целесообразно.

*Неустранимый дефект* – дефект, устранение которого технически невозможно или экономически нецелесообразно.

По признаку стадии происхождения д е ф е к т ы можно разделить на три группы.

1 *Дефекты (ошибки) проектирования:*

- недостаточная защищенность узлов трения;
- наличие концентраторов напряжений на деталях;
- неправильный расчет несущей способности деталей (приводит к их статическому разрушению или малоциклового усталости);
- неправильный выбор материалов;
- неправильное определение предполагаемого уровня эксплуатационных нагрузок и т. п.;

2 *Дефекты изготовления (производственные):*

- заготовок (пористость, усадочные раковины, неметаллические включения, охрупчивающие примеси и т.п.);
- механической обработки (прижоги, задиры, заусенцы, избыточная локальная пластическая деформация и т.п.);
- сварки (трещины, остаточные напряжения, термические повреждения основного материала и т.п.);
- термообработки (перегрев, закалочные трещины, поводка, коробление, обезуглероживание поверхностного слоя);
- сборки (повреждения поверхностей, задиры, перекосы, внесение абразива и т. п.).

3 *Дефекты эксплуатации:*

- нарушение условий применения;
- неправильное техническое обслуживание и ремонт;
- наличие перегрузок и непредвиденных нагрузок;
- применение некачественных эксплуатационных материалов.

## **1.6 Брак**

**Брак** – продукция, передача которой потребителю не допускается из-за наличия дефектов.

*Исправимый брак* – брак, все дефекты, в котором, обусловившие забракование продукции, являются устранимыми.

*Неисправимый брак* – брак, в котором хотя бы один из дефектов, обусловивших забракование продукции, является неустранимым.

Если продукция, состоящая из нескольких единиц (например, партия изделий), забракована по результатам выборочного контроля, то в ней, кроме дефектных единиц (дефектных изделий) могут содержаться также и годные единицы (годные изделия). В этом случае брак может выделяться из забракованной продукции при ее разбраковке методом сплошного контроля. Продукция, состоящая из годных единиц, может быть забракована в связи с получением при испытаниях неудовлетворительного значения показателя однородности.

В приведенных случаях понятия «брак» и «забракованная продукция» не совпадают.

Понятие «брак» относится, как правило, к условиям создания продукции. Однако, если брак обнаруживается при эксплуатации или потреблении продукции, то ответственность за выпуск брака и поставку его потребителю несет изготовитель (поставщик) продукции.

## **2 ПРОЦЕСС ПОЛУЧЕНИЯ И ОБРАБОТКИ ДИАГНОСТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ**

### **2.1 Получение и обработка диагностической информации**

Исследования Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ) показали, что вся информация о техническом состоянии подвижного состава (ПС) на 76 % состоит из описаний внешних проявлений неисправностей. Данная информация на 96 % имеет достаточно высокую достоверность, но до 40 % обладает низким качеством, так как содержит значительное количество неоднозначных сведений. Поэтому необходима индивидуальная информация о скрытых и назревающих отказах, которая предотвратит преждевременные или запоздалые ТО и ремонт. Средством получения такой информации является техническая диагностика, которая изучает признаки неисправности элементов ПС; методы, средства и алгоритмы определения технического состояния желательны без разборки, так как разборка и нарушение взаимного положения приработавшихся деталей приводят к сокращению остаточного ресурса до 30–40 %.

Диагностирование дает возможность спланировать появление предельного состояния элементов автомобиля, имея закономерности из

изменения.

**Диагностическая информация** – это методы диагностирования, выявляющие сведения о самом контролируемом процессе, косвенных показателях, сопутствующих продолжению процесса.

Диагностическую информацию получают путем измерения ряда параметров: величины вибраций, акустических колебаний, собственных деформаций одной или нескольких деталей технологической системы, деформаций в стыках пар сопрягаемых неподвижных и подвижных деталей, усилий, параметров, сопутствующих процессу обработки (режимы, температура отдельных элементов, длительность циклов обработки, производительность), и т.д.

По архитектонике построения процесса диагностирования оборудования различают: поэлементные проверки, групповые проверки, логический анализ симптомов отказа.

При решении диагностической задачи имеется существенный риск допустить две ошибки, первая из которых состоит в ложной тревоге, а вторая – пропуске цели (дефекта). Соотношение между этими ошибками таково, что, пытаясь застраховаться от одной, мы неизбежно повышаем риск допустить другую. Цена каждой из этих ошибок должна быть соответственно учтена при принятии решения. Для принятия правильного решения с учетом этого обстоятельства рекомендуют применять теорию статистических решений.

Диагностические алгоритмы, или алгоритмы распознавания, представляют собой последовательность действий в процессе диагностирования. Алгоритмы распознавания, в частности, используют диагностические модели и модели отказов. Модели отказов, изучаемые теорией надежности, позволяют заблаговременно предсказывать время возможного отказа.

Помимо теории распознавания в технической диагностике также используется теория контролеспособности. Контролеспособность – свойство объекта обеспечивать достоверную оценку его технического состояния и своевременное обнаружение неисправностей, она определяется конструкцией объекта и используемыми контрольно-измерительными и диагностическими средствами. Теория контролеспособности занимается задачами проектирования систем контроля и диагностики, их оптимизацией (минимизацией) и разработкой алгоритмов поиска неисправностей, способов диагностического тестирования.

Таким образом, теория распознавания и теория контролеспособности составляют двуединую теорию технической диагностики.

## **2.2 Классификация и характеристика средств получения и обработки диагностической информации**

Технические средства диагностирования выбирают или разрабатывают в процессе проектирования систем диагностирования. Для обеспечения эффективности взаимодействия объекта и технических средств диагностирования (ТСД) должны характеризоваться рядом показателей, основными из которых являются: надежность, эффективность и экономичность. Каждый из этих показателей определяет те или иные свойства технических средств диагностирования.

Показатели надёжности ТСД включают комплексный показатель коэффициента готовности (вероятность того, что ТСД окажутся работоспособными в произвольный момент времени), вероятность безотказной работы (вероятность того, что в пределах заданной наработки отказ ТСД не возникнет).

Эффективность ТСД зависит:

- от *инструментальной достоверности* – характеризует степень правильности оценки состояния объекта диагностирования техническими средствами;

- *производительности* – задается временем, затрачиваемым на постановку диагноза, или количеством объектов, диагностируемых за выбранный интервал времени  $T$ .

*Экономические показатели ТСД* – требования минимально возможной стоимости, малой массы и габаритов.

Различают:

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

Встроенные средства выполнены в общей конструкции с объектом и применяются для непрерывного или периодического контроля агрегатов, состояние которых может быть определено только при рабочих нагрузках.

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

Внешние средства диагностирования выполняют в виде переносных приборов.

*Специализированное средство технического диагностирования* (контроля технического состояния) – средство, предназначенное для диагностирования (контроля) одного объекта или группы однотипных объектов.

*Универсальное средство технического диагностирования* (контроля технического состояния) – средство, предназначенное для диагностирования (контроля) объектов различных типов.

*Автоматизированное средство технического диагностирования* (контроля технического состояния) – средство, предназначенное для диагностирования (контроля) объектов различных типов.

*Автоматическое средство технического диагностирования* (контроля технического состояния) – средство, предназначенное для диагностирования (контроля) объектов различных типов.

Различают средства аппаратурные и программные:

– к *аппаратурным средствам* относят различные устройства: приборы, пульта, стенды, специальные вычислительные машины;

– *программные средства* представляют собой программы.

Некоторые примеры получения диагностической информации и ее обработки приведены далее.

### **2.3 Визуально-оптические методы получения информации и ее обработки**

Оптические методы основаны на регистрации света, отраженного от поверхности контролируемого объекта. Различают визуальный осмотр (наиболее простой, невооруженным глазом), визуально-оптические методы (осмотр с помощью оптических приборов – луп, микроскопов, перископов и т.д.), оптические методы с автоматической регистрацией изображений.

*Свет* – электромагнитное излучение. Свет обладает свойствами волны и свойствами частиц (корпускулярно-волновой дуализм. Корпускулярно-волновой дуализм, лежащее в основе квантовой механики положение о том, что в поведении микрообъектов проявляются как корпускулярные, так и волновые черты).

*Оптическое излучение* представляет собой электромагнитные волны с длиной волны  $10^{-9} - 10^{-3}$  м. Человеческий глаз обладает чувствительностью в области спектра электромагнитных излучений с длиной волны 0,4–0,8 мкм и имеет максимальную чувствительность в области около 0,55 мкм, являясь селективным приемником света в отличие от неселективных, у которых чувствительность слабо зависит от длины волны в широком диапазоне. Чувствительность адаптированного к темноте человеческого глаза обеспечивает восприятие нескольких десятков фотонов в секунду.

Принцип действия оптических методов – осмотр с помощью оптических средств поверхностей объекта контроля на наличие дефектов и аномалий. Осуществляется независимо и в сочетании с другими методами контроля.

*Используется для следующих целей:*

– выявление дефектов типа нарушения сплошности (трещины, раковины, поры и включения);

– измерение размеров и метрология;

– определение физико-механических свойств (шероховатость, зерно и

пленка);

- определение компонентного и химического состава;
- определение динамических характеристик (видимые реакции напряженности слоя).

С помощью визуального осмотра выявляются поверхностные трещины, нарушение качества поверхности, искажения формы и другие видимые дефекты. Невооруженным глазом могут быть обнаружены дефекты с раскрытием 0,1 мм, с помощью оптических устройств, например лупы, – 0,01 мм.

Достоинством оптических методов является неподверженность сигналов электромагнитным помехам, эти сигналы безопасны в пожаро- и взрывоопасных средах. Ряд оптических испытаний основан на простых законах геометрической оптики. Оптические методы наиболее пригодны для контроля доступных поверхностей непрозрачных объектов и объема прозрачных деталей. При этом выявляются трещины, разрывы, зазоры, качество поверхности и т.д.

Визуальный осмотр, ввиду его простоты и наглядности результатов, до настоящего времени находит достаточно широкое применение во всех областях техники, в том числе и в энергетике. Например, он используется в ходе технологического процесса изготовления таблеток ядерного топлива из двуокиси урана, при сборке корпусов реакторов и многих других операциях. Возможно его применение и для контроля состояния упрочняющей поверхности поршневой пары. Для проведения контроля изготавливают сканирующие системы, являющиеся достаточно сложными устройствами, позволяющими регистрировать координату поверхности осмотра, освещать ее, передавать увеличенное телевизионное изображение поверхности на расстояние и т. д.

Интенсивно разрабатываются системы эксплуатационного контроля с использованием передающих трубок (видиконов), преобразующих видимое изображение в электрические сигналы и пригодных при воздействии повышенной температуры и ионизирующих излучений.

Оптические сигналы, возникающие в результате взаимодействия первичного светового потока с контролируемой поверхностью, могут быть обнаружены и измерены с помощью фотоэлектрических преобразователей различного типа.

Фотоэлектрические преобразователи разделяют на две группы. К преобразователям с внешним фотоэффектом относят фотоэлементы и фотоэлектронные умножители.

Фотокатод под влиянием фотонов эмитирует электроны, которые увлекаются напряжением, приложенным между анодом и катодом.

Преобразователи с внутренним фотоэффектом (фоторезисторы) имеют красную границу в инфракрасной области.



*Инфракрасное излучение* – электромагнитное излучение, невидимое глазом, с длиной волны приблизительно от 0,7–4 мкм до 1–2 мм, непосредственно примыкает к красному концу видимого спектра.

Для диагностики используют:

– *фотометрический метод*, основанный на пространственной локализации светового потока и его регистрации приемником с заданной спектральной чувствительностью. Оптический блок фотометра (фотометрическая головка) содержит линзы, светорассеивающие пластинки, ослабители света, светофильтры, диафрагмы и приемник излучения, с помощью которого световой поток преобразуется в электрический сигнал;

*фотограмметрию* – обмер фотографических (телевизионных, компьютерных) изображений. В настоящее время обмер изображений производят непосредственно в памяти компьютера без получения промежуточного изображения с использованием принципов цифровой фотографии. При контроле состояния труб и сосудов давления определяют внешний диаметр, положение фланцев, тройников, вентиля и т.д. Подобные обследования проводят и под водой.

Источниками излучения являются лампы накаливания, газоразрядные и люминесцентные лампы, светодиоды, лазеры.

Достоинствами оптических преобразователей при измерении тех или иных не световых величин являются:

– дистанционность измерений без непосредственного контакта с объектом;

– отсутствие механических воздействий на объект;

– независимость результатов измерений от материала контролируемого объекта;

– высокая точность;

– быстродействие.

**Приборы, применяемые для измерения при визуально-оптических методах:**

*Интерферометры* – оптические приборы, основанные на явлении интерференции света.

*Техническая эндоскопия* – это современная методика неразрушающего контроля материалов и оборудования путем визуального осмотра поверхностей и узлов технических средств в случае затрудненности доступа к этим поверхностям при помощи обычных средств измерений. В зависимости от степени доступности для проведения осмотров применяют различные виды эндоскопов.

*Световолоконная оптика или оптопары и оптико-электронные приборы* широко применяют для контроля состояния энергетических установок. Световоды выполняют функцию гальванической развязки (силовых цепей от контроля и защиты).

На видеодиагностйку в значительной мере опирается эксплуатационный мониторинг сложных объектов. При этом в последнее время наряду с традиционными системами промышленного телевидения значительное внимание уделяется средствам видеоэндоскопии на основе микротелевизионных систем передачи и воспроизведения изображения. Сочетание таких систем с волоконно-оптическими и линзовыми эндоскопами (бароскопами), а также использование ЭВМ для архивирования и обработки изображений существенно расширяет возможности видеодиагностики и обеспечивает документирование состояния объектов на различных стадиях их жизненного цикла, снижает уровень световых нагрузок на зрение оператора, существенно повышает качество изображения за счет применения программно-аппаратных средств их обработки. Микроминиатюризация телевизионных систем и применение ЭВМ делают возможным создание автономных мобильных средств видеодиагностики в полевых условиях.

#### **2.4 Датчики, или первичные преобразователи, диагностической информации**

Датчиком, или первичным преобразователем, называют устройство, осуществляющее восприятие контролируемой величины и преобразование ее в величину, удобную для передачи по линиям связи и дальнейшего преобразования.

Основными характеристиками датчиков являются: входная величина и выходной сигнал.

**Входная величина** – величина, воспринимаемая и преобразуемая датчиком.

Все входные величины могут быть разделены на два класса:

*1 Величины, характеризующие протекание процессов.*

Этот класс, в свою очередь, объединяет две группы:

а) энергетических величин, характеризующих интенсивность протекания процесса или параметры источника энергии (ток, напряжение, перемещение, скорость и т. п.);

б) параметрических величин, характеризующих нагрузку (сопротивление, упругость, масса и т. п.).

*2 Величины, характеризующие свойства и состав веществ.*

**Выходной сигнал** датчика представляет собой определенное изменение несущей величины (тока, напряжения, давления), используемое для передачи информации. Изменение (модуляция) несущей величины может осуществляться по амплитуде, по временному признаку (изменение частоты, длительности воздействия, порядка чередования воздействий), а также по пространственному признаку (чередование сигналов в каналах связи).

Наиболее употребительными сигналами являются: напряжение постоянного тока низкого уровня, изменяющееся от 0 до 20–50 мВ, получаемое от термопар, проволочных тензометров и т. п.; напряжение переменного тока до 0,5–1 В, получаемое от индуктивных и трансформаторных датчиков; давление воздуха 0,2–1 кг/см<sup>2</sup>.

Расширение использования машин централизованного контроля и управляющих цифровых машин определило ряд новых требований к выходным сигналам датчиков.

**Требования, предъявляемые к выходным сигналам датчиков:**

- максимальную унификацию выходных сигналов;
- легкость преобразования их в цифровую форму;
- возможность коммутации сигналов простыми средствами без снижения точности передачи информации.

Этим требованиям удовлетворяют сигналы высокого уровня, сигналы, выраженные в виде частоты переменного тока или следования импульсов, времяимпульсные сигналы (длительность импульса или время между двумя импульсами), а также кодовые или цифровые сигналы.

В ряде случаев датчики имеют на выходе изменяющиеся омическое, индуктивное и емкостное сопротивления и рассчитаны на использование совместно с измерительными схемами, которые не являются их конструктивными элементами. В данном случае датчик характеризуется не выходным сигналом (получаемым только после измерительной схемы), а выходным параметром, выражаемым в пределах изменения сопротивления, индуктивности или емкости.

Первичные измерительные преобразователи очень разнообразны по принципу действия, устройству, виду энергии входного сигнала, метрологическим и эксплуатационным характеристикам.

Целесообразно классифицировать их по физической природе явлений, лежащих в основе их работы, с учетом вида преобразуемой энергии. По указанным признакам первичные преобразователи можно подразделить:

- на механические резистивные (контактные, реостатные, тензометрические);
- электростатические (емкостные, пьезоэлектрические);
- электромагнитные (индуктивные, индукционные, магнитоупругие);
- теплоэлектрические (термоэлектрические, терморезистивные);
- электрохимические (резистивные электролитические, кулонометрические, химотронные);
- оптико-электрические;
- гальванокинетические;
- атомные (ионизиционного излучения, квантовые).

*Статическая характеристика датчика – функциональная зависимость*

между изменениями входной  $x$  и выходной  $y$  величинами. Наиболее приемлемой для большинства случаев является линейная характеристика  $y = Cx$ . Величина  $C = \Delta y / \Delta x$  называется чувствительностью датчика. При  $S = \infty$  характеристика принимает реальный характер.

На рисунке 3 приведены различные виды характеристик датчиков.

Реле, как частный вид датчика, характеризуется скачкообразными изменениями выходной величины  $y$  при определенных значениях входной величины  $x_{ср}$  и  $x_{0min}$  (рисунок 4), называемых соответственно параметром срабатывания и параметром отпускания реле. Отношение  $x_{0min}/x_{ср} = k_v$  называется коэффициентом возврата, а разность  $x_{ср} - x_{0min} = \Delta$  – дифференциальном реле.

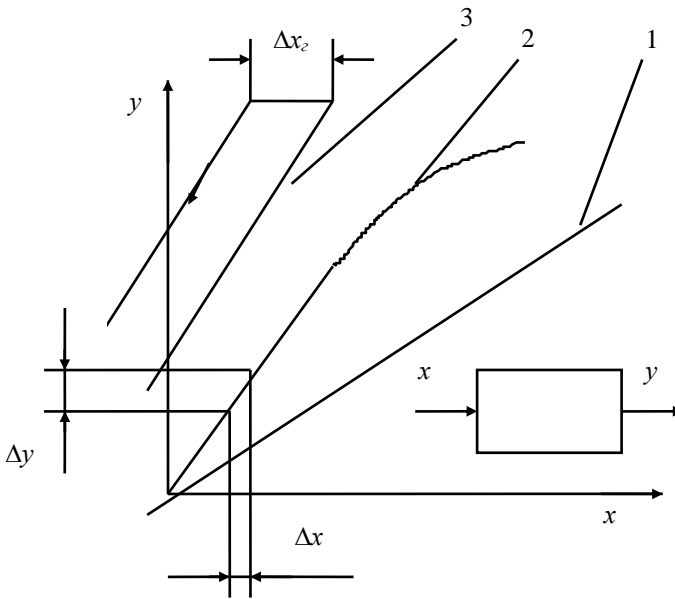


Рисунок 3 – Статические характеристики датчиков.  
1 – линейная; 2 – нелинейная; 3 – линейная с гистерезисом.

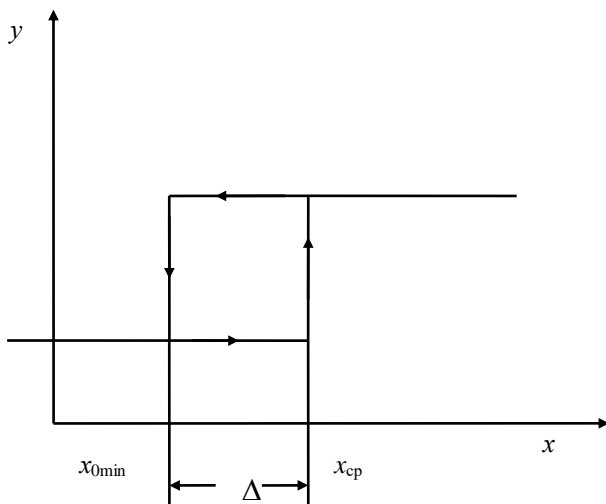


Рисунок 4 – Характеристика реле.

*Основная погрешность датчика* – максимальная разность между получаемой величиной выходного сигнала и его номинальным значением, определяемым по статической характеристике для данной входной величины при нормальных условиях. Она выражается как в абсолютных единицах  $\delta y = y - y_n$ , так и в относительных. В последнем случае ее обычно относят к разности предельных значений выходной величины и выражают в процентах:

$$\delta = \frac{\delta y \cdot 100}{y_{\max} - y_{\min}}, \quad (10)$$

*Дополнительные погрешности* — погрешности, вызываемые изменением внешних условий по сравнению с их нормальными значениями. Они выражаются обычно в процентах, отнесенных к изменению мешающего фактора на определенную величину (например, температурная погрешность 1,5 % на 10 °С и т. д.).

*Нормальными условиями эксплуатации* считаются: температура окружающей среды  $20 \pm 5$  °С; атмосферное давление  $760 \pm 20$  мм рт. ст.; относительная влажность  $60 \pm 20$  %; вибрации, электрические и магнитные поля отсутствуют.

*Динамическая характеристика датчика* определяет поведение датчика при быстрых изменениях входной величины. Динамическая характеристика

зависит от внутренней структуры датчика и его элементов.

### **Требования, предъявляемые к датчикам**

В зависимости от условий применения датчиков к ним предъявляются следующие требования:

- 1) однозначная зависимость выходной величины от входной (отсутствие гистерезиса);
- 2) высокая избирательность (датчик должен реагировать только на изменения той величины, для которой он предназначен);
- 3) минимальное изменение характеристик под влиянием внешних факторов (температуры, угла наклона, вибраций и т. п.);
- 4) определенный вид зависимости между выходной и входной величинами (обычно линейной);
- 5) высокая чувствительность (отношение приращения выходной величины к приращению входной);
- 6) стабильность характеристик во времени;
- 7) направленность действия (отсутствие влияния нагрузки в выходной цепи датчика на режим входной цепи);
- 8) определенные динамические характеристики (обычно требуется минимальная постоянная времени);
- 9) высокая перегрузочная способность (отношение предельно допустимого значения входной величины к номинальному ее значению);
- 10) устойчивость к химическим воздействиям измеряемой и окружающей сред;
- 11) взрывобезопасность;
- 12) устойчивость против механических, термических, электрических и т. п. перегрузок;
- 13) простота и технологичность конструкции;
- 14) повторяемость характеристик (взаимозаменяемость);
- 15) удобство монтажа и обслуживания.

### **Классификация датчиков**

Исключительное многообразие датчиков, применяемое в современной автоматике, вызывает необходимость их классификации. В настоящее время известны следующие типы датчиков, которые наиболее целесообразно классифицировать по входной величине, практически соответствующей принципу действия:

Наименование датчика	Входная величина
Механический	Перемещение твердого тела
Электрический	Электрическая величина
Гидравлический	Перемещение жидкости
Пневматический	Перемещение газа
Термический	Теплота

Оптический	Световая величина
Акустический	Звуковая величина
Радиоволновой	Радиоволны
Ядерный	Ядерные излучения

Здесь рассматриваются наиболее распространенные датчики, у которых хотя бы одна из величин (входная или выходная) – электрическая.

Датчики различают также по диапазону изменения входного сигнала. Например, одни электрические датчики температуры предназначены для измерения температуры от 0 до 100 °С, а другие – от 0 до 1600 °С. Очень важно, чтобы диапазон изменения выходного сигнала был при этом одинаков (унифицирован) для разных приборов. Унификация выходных сигналов датчиков позволяет использовать общие усилительные и исполнительные элементы для самых разных систем автоматики.

*Электрические датчики* относятся к наиболее важным элементам систем автоматики. С помощью датчиков контролируемая или регулируемая величина преобразуется в сигнал, в зависимости от изменения которого и протекает весь процесс регулирования. Наибольшее распространение в автоматике получили датчики с электрическим выходным сигналом. Объясняется это, прежде всего удобством передачи электрического сигнала на расстояние, его обработки и возможностью преобразования электрической энергии в механическую работу. Кроме электрических распространение получили механические, гидравлические и пневматические датчики.

Электрические датчики в зависимости от принципа производимого ими преобразования делятся на два типа – модуляторы и генераторы (рисунок 5).

У *модуляторов* (параметрических датчиков) энергия входа воздействует на вспомогательную электрическую цепь, изменяя ее параметры и модулируя значение и характер тока или напряжения от постороннего источника энергии. Благодаря этому одновременно усиливается сигнал, поступивший на вход датчика. Наличие постороннего источника энергии является обязательным условием работы датчиков – модуляторов.

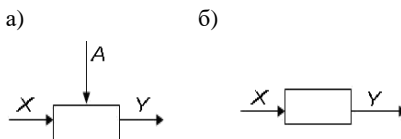


Рисунок 5 – Функциональные блоки датчика – модулятора (а) и датчика – генератора (б)

Модуляция осуществляется с помощью изменения одного из трех

параметров – омического сопротивления, индуктивности, емкости. В соответствии с этим различают группы омических, индуктивных и емкостных датчиков.

Каждая из этих групп может делиться на подгруппы. Так, наиболее обширная группа омических датчиков может быть разделена на подгруппы: тензорезисторы, потенциометры, терморезисторы, фоторезисторы. Ко второй подгруппе относятся варианты индуктивных датчиков, магнитоупругие и трансформаторные. Третья подгруппа объединяет различного типа емкостные датчики.

Второй тип – *датчики-генераторы* являются просто преобразователями. Они основаны на возникновении электродвижущей силы под влиянием различных процессов, связанных с контролируемой величиной. Возникновение такой электродвижущей силы может происходить, например, вследствие электромагнитной индукции, термоэлектричества, пьезоэлектричества, фотоэлектричества и других явлений, вызывающих разделение электрических зарядов. Соответственно этим явлениям генераторные датчики подразделяются на индукционные, термоэлектрические, пьезоэлектрические и фотоэлектрические.

Возможны еще группы электротехнических, электростатических датчиков, датчиков Холла и др.

**Различают следующие типы датчиков:**

1 *Датчики перемещения, угла поворота и силы.*

1.1 Омические датчики.

1.2 Индуктивные и трансформаторные датчики перемещения.

1.3 Магнитомодуляционные датчики.

1.4 Емкостные и пьезоэлектрические датчики.

1.5 Радиационные, акустические и термические датчики перемещения и силы.

1.6 Пневматические и гидравлические датчики перемещения. Реле перемещения.

2 *Компенсационные датчики, датчики с частотным, импульсным и цифровым выходами.*

2.1 Компенсационные датчики.

2.2 Датчики с импульсным выходом.

2.3 Датчики с частотным выходом.

3 *Датчики момента вращения, размеров и уровня.*

3.1 Датчики момента вращения.

3.2 Датчики размеров и толщины.

3.3 Датчики уровня.

4 *Датчики скорости, ускорения и параметров вибраций.*

4.1 Датчики скорости.



4.2 Датчики ускорения и параметров вибраций.

5 Датчики давления.

5.1 Датчики давления с механическими воспринимающими органами.

5.2 Датчики давления с электрическими и термическими воспринимающими органами.

6 Датчики расхода.

6.1 Расходомеры переменного перепада.

6.2 Датчики расхода с переменным сечением сужающего устройства.

6.3 Датчики скоростного напора.

6.4 Механические датчики объемного расхода.

6.5 Датчики расхода, основанные на измерении времени прохождения средой определенного расстояния.

6.6 Индукционные (электромагнитные) датчики расхода.

6.7 Датчики массового расхода.

6.8 Датчики расхода, основанные на использовании явления ядерного магнитного резонанса.

6.9 Термические датчики расхода.

6.10 Ионизационные датчики.

6.11 Электрокинетические датчики.

7 Датчики и реле температуры.

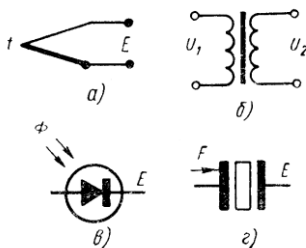
7.1 Датчики с механическими воспринимающими органами.

7.2 Датчики с электрическими воспринимающими органами.

7.3 Радиационные датчики температуры.

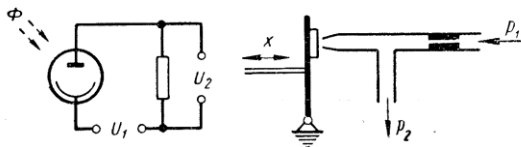
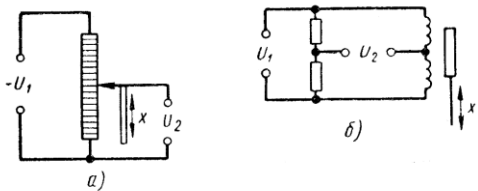
### Простейшие преобразовательные звенья

1 Звенья-преобразователи, осуществляющие непосредственное энергетическое преобразование входного сигнала в выходной:



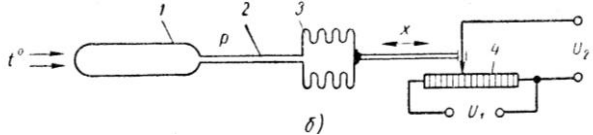
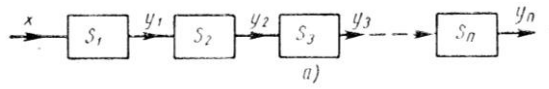
*а* – термопара; *б* – трансформатор;  
*в* – фотодиод в вентильном режиме; *г* – пьезокристалл

2 Звенья-модуляторы, в которых входная величина тем или иным способом модулирует энергию внешнего источника:



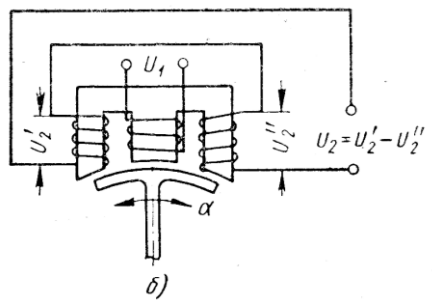
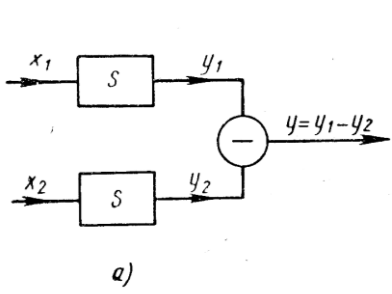
а – реостатный датчик; б – индуктивный датчик;  
в – фотоэлемент; г – сопло-заслонка

3 Каскадное соединение звеньев:



а – структурная схема; б – схема манометрического термометра;  
1 – баллон; 2 – капилляр; 3 – сифон; 4 – реостатный датчик.

4 Дифференциальные датчики

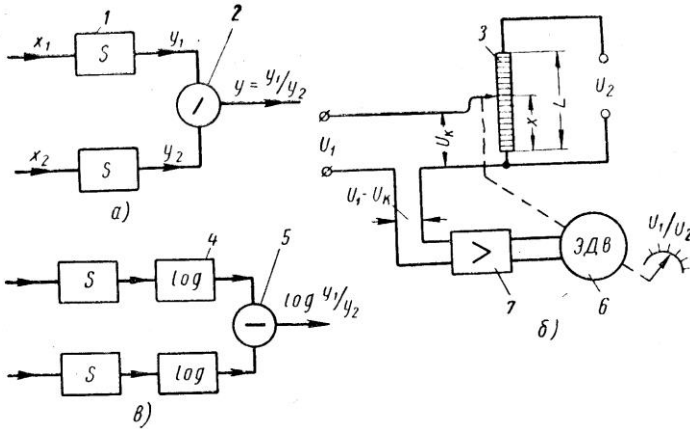


$S$  – преобразовательное звено;  $V$  – делительное звено.  
а – структурная схема; б – дифференциальный трансформаторный датчик

Для дифференциального трансформаторного датчика

$$U_2 = U_2' - U_2''$$

5 Логометрические преобразователи – выходная величина пропорциональна отношению двух других, одна из которых (или обе) являются функцией входной величины:



*a* – структурная схема; *б* – схема электронного потенциометра, используемого в качестве делительного звена; *в* – схема делителя с логарифмическими преобразователями; 1 – преобразовательное звено; 2 – делительное звено; 3 – реохорд; 4 – логарифмирующее звено; 5 – вычитающее звено; 6 – электродвигатель; 7 – усилитель

## 2.5 Вибродиагностика. Цели и задачи вибродиагностики

Методы вибродиагностики направлены на обнаружение и идентификацию таких неисправностей агрегата, которые оказывают влияние на его вибрацию: дефектов роторов, опорной системы и узлов статора, испытывающих либо генерирующих динамические нагрузки.

Цели вибродиагностики:

- предупреждение развития дефектов агрегата и сокращение затрат на его восстановление,
- определение оптимальной технологии восстановления работоспособности агрегата, если возникший дефект исключает возможность его нормальной эксплуатации.

Основной из задач вибродиагностики является разделение множества возможных технических состояний агрегата на два подмножества: исправных и неисправных.

Следующей задачей является постановка диагноза, состоящего в

определении характера и локализации одного или группы дефектов, соответствующих вибрационному состоянию агрегата.

Одной из задач вибродиагностики является возможное обнаружение дефекта на ранней стадии и прогнозирование его развития во времени.

На основании диагноза определяется оптимальный режим эксплуатации агрегата в условиях возникшей неисправности, технология устранения дефекта и восстановления работоспособности агрегата.

Чем надежней и конкретней диагноз, тем ниже затраты, связанные с восстановлением агрегата.

Наиболее простой и дешевой технологией вибродиагностики является периодический контроль интенсивности вибрации статорных элементов (подшипников) простейшими переносными виброметрами. При этом диагностическими признаками дефектов служит уровень интенсивности вибрации, соотношение между его значениями в разных точках и изменение во времени (тренд).

Трудность диагностирования при этом состоит в том, что не существует надежных признаков для идентификации конкретных дефектов, кроме того, в ряде случаев при существенном возрастании некоторой диагностической информативной гармоникой вибрации общий уровень интенсивности вибрации может меняться незначительно. В то же время по уровню вибрации и росту ее во времени в большинстве случаев можно достаточно надежно квалифицировать состояние агрегата как исправное и неисправное. У некоторых дефектов есть признаки, позволяющие в определенной ситуации установить дефект как наиболее вероятный.

Наиболее распространена технология диагностирования, предусматривающая определение неисправного состояния агрегата по данным штатных контрольных измерений вибрации с последующим определением характера неисправности по данным специальных виброизмерений и диагностического тестирования (вибрационных исследований). При специальных виброизмерениях производится гармонический анализ вибрационных сигналов, определяются амплитуды и фазы оборотной и двойной оборотной вибрации. Вибрационные измерения производятся на разных, целесообразным образом осуществляемых режимах агрегата при выбеге и развороте агрегата.

#### **Методика диагностирования дефектов**

Определение технического состояния агрегата по вибрационным параметрам производится как по содержанию соответствующей информации в текущий момент времени, так и на основе анализ изменений ее во времени.

В качестве диагностических параметров используются разнообразные параметры вибрации (в том числе и спектры вибрации), параметры случайного процесса изменения вибрации, специальные функции параметров вибрации (например, полусумма и полуразность оборотной

вибрации в двух выбранных точках, отношение некоторых параметров вибрации в разных направлениях). В ряде случаев необходимо измерять и учитывать невибрационные параметры, влияющие на вибрацию.

Количественные и качественные характеристики значений диагностических параметров и их изменений, характерные для некоторого дефекта, являются признаками этого дефекта. У дефекта может быть несколько признаков, а некоторый признак может быть общим для группы разных по природе дефектов. Например, наличие в спектре вибрации некоторых низкочастотных гармоник может быть признаком и задеваний ротора за статорные элементы, и субгармонических колебаний под действием дисбаланса, и несовершенства формы расточки подшипника скольжения. В совокупности признаков дефекта может не оказаться ни одного, который сам по себе был бы необходимым и (или) достаточным для диагностирования.

В принципе возможно экспериментальными и математическими методами получить количественные оценки влияния любого дефекта на диагностические параметры для любых условий, хотя это, как правило, связано с большими трудностями и затратами. Однако такая работа обесценивается тем обстоятельством, что неуловимые отличия динамических характеристик агрегата оказывают на эти оценки решающее влияние. Разные эксперты оценивают максимально возможные отличия значений влияния заданных дефектов на вибрационные параметры однотипных машин в пределах от 10 до 1000 раз. Наибольшие отличия относятся к высокочастотным составляющим спектра вибрации.

В качестве диагностических, помимо параметров спектра, используются другие параметры вибрационного процесса, соответствующие потребностям конкретных диагностических алгоритмов, которые получают путем специальной вычислительной обработки вибрационных сигналов.

## **2.6 Температура как диагностический параметр**

**Температура** – физическая величина, определяемая как параметр состояния термодинамического равновесия микроскопических систем. Термодинамическая температура (Т) всегда положительна и измеряется с помощью термодинамической шкалы, единицей которой служит 1 кельвин (К).  $T = 273,15 + t$ , К, где  $t$  – температура по шкале Цельсия.

**Температура** – величина экстенсивная (*противоположность интенсивная*), т.е. измеряемая косвенным образом в результате преобразования ее в какую-либо интенсивную (непосредственно измеряемую) величину (ток, расширение материала, изменение свойств).

Измерение температуры необходимо для определения как исправности-неисправности объекта диагностирования, так и для определения теплоизоляционных свойств материалов, ограждений и конструкций.

Например – перегрев трансформатора на подстанции, обмотка двигателя, обшивка вагона. При получении снимка вагона или здания тепловизором в холодное время года можно определить места "утечки" тепла.

На практике теплотехнические характеристики ограждающих конструкций определяют расчетным путем по нормативным значениям теплотехнических показателей материалов, из которых они будут выполнены, либо лабораторным способом на отдельных фрагментах конструкции. Однако расчетные методы не учитывают следующие особенности:

- изменение теплофизических свойств материалов, используемых для теплоизоляции, в процессе длительного времени эксплуатации;
- реальное качество изготовления элементов ограждающих конструкций;
- реальное качество монтажных работ;
- особенности инженерных решений;
- особенности эксплуатации подвижной единицы в реальных условиях.

Но эти методы в реальных условиях эксплуатации не позволяют отслеживать динамику изменения в течение длительного времени.

Последние достижения в области пирометрии и тепловидения позволяют широко использовать бесконтактные методы измерения теплотехнических характеристик конструкций и объектов:

- общей качественной оценки теплового режима объекта;
- обнаружение скрытых дефектов;
- анализ эффективности применения новых изоляционных и утеплительных материалов;
- оценки теплопотерь.

### **Контактные методы измерения температуры**

- *термометры расширения* от  $-100$  до  $+700$ ;
- *жидкостные стеклянные термометры* (на изменении объема жидкости при нагреве и охлаждении);
  - *монометрические термометры* (зависимость давления жидкости, газа или пара с жидкостью в замкнутой системе постоянного объема);
  - *дилатометрические термометры* (два тела с различными температурными коэффициентами линейного расширения);
  - *биметаллические термометры* (спаянная пластина из двух металлов с различным коэффициентом расширения);
  - *термоэлектрические термопарные датчики* (в замкнутой цепи, состоящей из разнородных проводников (полупроводников) возникает электрический ток, если температура мест соединения их различна);
  - *терморезистивные* (изменение электрического сопротивления металла от температуры);
  - *термошумовые* (на концах проводника возникают случайные напряжения от теплового хаотичного движения носителей зарядов);

- *магнитные термометры* (зависимость магнитной восприимчивости парамагнетиков);
- *термочастотные кварцевые термометры* (температурная зависимость собственной резонансной частоты кварцевых пьезоэлементов);
- *термемкостные* (изменение диэлектрической постоянной в зависимости от температуры);
- *термотранзисторные* (датчики на основе транзисторов);
- *волоконно-оптические* (кварцевое моноволокно  $\varnothing$  0,2–1 мм длиной до 100 м, на торце которого вводимого в контролируемый объем, располагается микрокапсула с веществом, изменяющим свои оптические свойства при нагреве);
- *термохромные* (термоиндикаторы с химическим взаимодействием компонентов (обратимые и необратимые));
- *жидкокристаллические* (органические соединения, обладающие свойством жидкости (текучести) и кристаллического тела);
- *плавящиеся* (плавкие покрытия и термосвидетели);
- *люминофорные* (температурная зависимость цвета или интенсивности люминисценции);
- *изооптические термоиндикаторы* (основаны на эффекте Христиансона – рассеивание света смесью двух прозрачных сред).

### **Бесконтактные методы измерения температуры**

Бесконтактные методы термометрии основаны на фотоэлектрической визуальной и фотографической регистрации интенсивности теплового излучения нагретых тел, пропорционально их температуре.

- *яркостные пирометры* (измеряют спектральную яркость объекта на определенной длине волны, которая сравнивается с яркостью абсолютно черного тела. В качестве абсолютно черного тела используется спираль специальной лампы накаливания);
- *цветовые* (измеряют интенсивность излучения объекта в двух узких зонах спектра);
- *радиационные пирометры* (используют обычно оптические системы из материалов, прозрачных в инфракрасной области спектра);
- *оптико-механические тепловизоры* (применяют в качестве чувствительных элементов фотоспротивления);
- *лазерные пирометры* (работают на оптико-физическом эффекте);
- *спектрофотометрические пирометры* (измерение интенсивности характерных для нагретых газов (пламен) спектральных линий поглощения оптического излучения, которые определяются температурой среды);
- *акустические пирометры* (зависимость скорости звука от температуры (измерение скорости распространения звука в среде)).

## **3 РАЗРАБОТКА И АНАЛИЗ АЛГОРИТМОВ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ МЕТОДАМИ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ**

*Алгоритм технического диагностирования* (контроля технического состояния) – совокупность предписаний, определяющих последовательность действий при проведении диагностирования (контроля).

Алгоритм диагностирования (контроля) устанавливает состав и порядок проведения элементарных проверок объекта и правила анализа их результатов. Элементарная проверка определяется рабочим или тестовым воздействием, поступающим или подаваемым на объект, а также составом признаков и параметров, образующих ответ объекта на соответствующее воздействие. Конкретные значения признаков и параметров, получаемых при диагностировании (контроле), являются результатами элементарных проверок или значениями ответов объекта.

Различают *безусловные алгоритмы диагностирования* (контроля), у которых порядок выполнения элементарных проверок определен заранее, и *условные алгоритмы диагностирования* (контроля), у которых выбор очередных элементарных проверок определяется результатами предыдущих.

Если диагноз составляется после выполнения всех элементарных проверок, предусмотренных алгоритмом, то последний называется *алгоритмом с безусловной остановкой*. Если же анализ результатов делается после выполнения каждой элементарной проверки, то алгоритм является алгоритмом с *условной остановкой*.

*Диагностическое обеспечение* – комплекс взаимодействующих правил, методов, алгоритмов и средств, необходимых для осуществления диагностирования на всех этапах жизненного цикла объекта.

Диагностическое обеспечение объекта включает правила, методы, алгоритмы и средства технического диагностирования.

Для того чтобы объект был приспособлен к диагностированию, необходимо при его проектировании разрабатывать диагностическое обеспечение.

Диагностическое обеспечение проектируемого объекта получают в результате анализа его диагностической модели. Строится диагностическая модель на основе предполагаемой конструкции, условий использования и эксплуатации объекта. В результате исследования диагностической модели устанавливают диагностические признаки, прямые и косвенные параметры и методы их оценки, определяют условия работоспособности, разрабатывают алгоритмы диагностирования. Совокупность этих данных называют диагностическим обеспечением.

*Диагностическая модель* – формализованное описание объекта, необходимое для решения задач диагностирования.

В качестве *диагностических моделей* могут рассматриваться дифференциальные уравнения, логические соотношения, диаграммы



прохождения сигналов и др. По методам представления взаимосвязей между состоянием объекта, его элементами и параметрами, диагностические модели подразделяют на следующие виды: непрерывные, дискретные, специальные.

Выбор того или иного типа модели для представления конкретного объекта зависит от целого ряда таких факторов, как условия эксплуатации, возможное конструктивное выполнение, тип комплектующих элементов и т.п.

Выбор диагностических моделей производится с учетом:

- специфики объекта;
- условий использования;
- методов диагностирования.

*Примечание* – Описание может быть представлено в аналитической, табличной, векторной, графической и других формах.

## **ВОПРОСЫ К ЗАЧЕТУ**

### **по дисциплине «Основы теории надежности и диагностики. Часть 2»**

- 1 Причины возникновения отказов.
- 2 Процессы, снижающие работоспособность объекта.
- 3 Отказ. Классификация отказов по признакам.
- 4 Пример шкалы для установления категории тяжести последствий отказов.
- 5 Критический отказ. Критерий отказа. Причина отказа. Последствия отказа.
- 6 Критичность отказа. Ресурсный отказ. Независимый отказ. Зависимый отказ.
- 7 Внезапный отказ. Постепенный отказ. Переменяющийся отказ. Явный отказ. Скрытый отказ.
- 8 Частота отказов. Частичный отказ. Полный отказ. Среднее время безотказной работы.
- 9 Вероятность отказа. Интенсивность отказов. График интенсивности отказов от времени эксплуатации.
- 10 Конструктивный отказ. Производственный отказ. Эксплуатационный отказ. Деградационный отказ.
- 11 Нарботка. Нарботка до отказа. Средняя наработка до отказа. Средняя наработка на отказ. Вероятность безотказной работы. Интенсивность отказов.
- 12 Дефект. Конструктивный, производственный дефект. Явный, скрытый дефект.
- 13 Критический, значительный, малозначительный дефект. Устранимый, неустраняемый дефект.
- 14 Стадии происхождения дефектов (дефекты проектирования, изготовления, эксплуатации).
- 15 Брак. Исправимый, неисправимый брак.
- 16 Методы получения диагностической информации.
- 17 Встроенные, внешние средства технического диагностирования. Специализированные, универсальные технические средства диагностирования (ТСД).

18 Автоматизированные и автоматические ТСД. Аппаратурные и программные средства.

19 Визуально-оптические методы получения информации.

20 Достоинства и недостатки оптических методов контроля.

21 Приборы, применяемые в визуально-оптических методах (эндоскопы, оптоволоконно, оптопары).

22 Датчики или первичные преобразователи диагностической информации.

23 Требования, предъявляемые к выходным сигналам датчиков.

24 Физическая природа явлений в первичных преобразователях (датчиках).

25 Статические характеристики датчиков.

26 Основная погрешность датчика. Дополнительные погрешности.

27 Требования, предъявляемые к датчикам.

28 Классификация датчиков.

29 Типы датчиков.

30 Простейшие преобразовательные звенья.

31 Вибродиагностика. Цели и задачи вибродиагностики.

32 Температура как диагностический параметр.

33 Контактные методы измерения температуры.

34 Бесконтактные методы измерения температуры.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 ГОСТ 27.310-95. Межгосударственный стандарт. Надежность в технике. Анализ видов, последствий и критичности отказов. Основные положения. – Введ. 26.06.1996. – М.: Изд-во стандартов, 1996. – 14 с.

2 ГОСТ 27.002-89. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения. – Введ. 01.07.1990. – М.: Изд-во стандартов, 1990. – 24 с.

3 Технические средства диагностирования : справ. / В. В. Клюев [и др.]; под общ. ред. В. В. Клюева. – М. : Машиностроение, 1989. – 672 с.

4 Надежность и эффективность в технике. Справочник. В 10 т./ред. совет: В. С. Авдеевский (пред.) [и др.]. Т. 2: Математические методы в теории надежности и эффективности / под ред. Б. В. Гнеденко. – М.: Машиностроение, 1987. – 280 с.

5 **Кириченко, И. А.** Диагностика транспортных средств : конспект лекций / И. А. Кириченко, А. Н. Киреев; Восточноукраинский национальный ун-т им. Владимира Даля. Кафедра метрологии. – Луганск, 2007. – 65 с.