

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Омский государственный технический университет»

А. П. Науменко

ВВЕДЕНИЕ
В ТЕХНИЧЕСКУЮ ДИАГНОСТИКУ
И НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ

Учебное пособие

Омск
Издательство ОмГТУ
2019

УДК 620.179(075)
ББК 30.820.51я73
НЗ4

Рецензенты:

А. А. Кузнецов, д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой
«Теоретическая электротехника» ФГБОУ ВО «ОмГУПС»;

Д. А. Титов, канд. техн. наук, доцент, зав. кафедрой
«Электросвязь» НОУ ВПО «ИРСИД»

Науменко, А. П.

НЗ4 Введение в техническую диагностику и неразрушающий контроль :
учеб. пособие / А. П. Науменко ; Минобрнауки России, ОмГТУ. – Омск :
Изд-во ОмГТУ, 2019. – 152 с. : ил.

ISBN 978-5-8149-2812-2

Рассмотрены основные термины, понятия и теоретические основы
технического и неразрушающего контроля, технической диагностики
и мониторинга состояния объектов техногенной среды.

Учебное пособие соответствует рабочим программам учебных дис-
циплин «Теория и методы мониторинга и диагностики», «Методы тех-
нической диагностики» и предназначено для обучающихся по направле-
нию 12.04.01, 12.03.01 «Приборостроение», а также может быть полезно
студентам других радиотехнических направлений.

УДК 620.179(075)

ББК 30.820.51я73

*Печатается по решению редакционно-издательского совета
Омского государственного технического университета*

ISBN 978-5-8149-2812-2

© ОмГТУ, 2019

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1. ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА И КОНТРОЛЬ	7
1.1. Термины и определения	7
1.2. Технический контроль в производстве.....	11
1.3. Техническое состояние и его виды.....	14
1.4. Основные понятия технической диагностики.....	22
1.5. Взаимосвязь контроля и диагностики.....	26
1.6. Общие требования к методам НК и ТД.....	29
1.7. Классификация средств НК и ТД	30
2. ВИДЫ И МЕТОДЫ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ	34
2.1. Виды неразрушающего контроля	34
2.2. Классификация методов неразрушающего контроля	35
2.3. Характеристики видов неразрушающего контроля	40
2.3.1. Магнитный вид НК	40
2.3.2. Электрический вид НК	42
2.3.3. Вихретоковый вид НК	43
2.3.4. Радиоволновой вид НК	45
2.3.5. Тепловой вид НК.....	45
2.3.6. Оптический вид НК	46
2.3.7. Радиационный вид НК.....	47
2.3.8. Акустический вид НК.....	48
2.3.9. НК проникающими веществами	51
2.3.10. Виброакустический вид НК.....	52
3. ДЕФЕКТЫ.....	54
3.1. Основные виды дефектов	54
3.2. Виды объектов и их дефектов	56
4. ХАРАКТЕРИСТИКИ НАДЁЖНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ.....	60
4.1. Отказ.....	60
4.2. Основные понятия надёжности	63
4.3. Параметры надёжности, связанные со временем.....	67
4.4. Статистические показатели надёжности	71

5. ОСНОВЫ МЕТОДОЛОГИИ ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ	77
5.1. Терминология технического диагностирования	77
5.2. Параметры технических состояний	80
5.3. Характеристики параметров состояния	84
5.4. Диагностические признаки	85
5.5. Общая постановка задачи диагностирования	91
5.6. Функциональная схема технического диагностирования	93
6. ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ОБЪЕКТОВ	96
6.1. Аналитические модели	96
6.2. Структурно-функциональные модели	97
6.3. Логические модели	99
6.4. Графы причинно-следственных связей	100
7. СВОЙСТВА ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ПРИЗНАКОВ	102
7.1. Понятие энтропии	102
7.2. Информативность	104
7.3. Диагностическая ценность	113
7.4. Чувствительность	117
7.5. Формирование диагностических признаков	118
8. МЕТОДЫ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ	126
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	143
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	144

ВВЕДЕНИЕ

Обеспечение качества продукции предприятий различных сфер жизнедеятельности человека являлось и продолжает являться основной и главной задачей всех отраслей промышленности. Особое место занимает обеспечение надёжности и безопасной эксплуатации техногенных объектов повышенной опасности, к которым относят объекты авиационной, космической и ракетной техники, объекты атомной и гидроэнергетики, взрывопожароопасные производства нефтегазодобывающей, нефтегазоперерабатывающей и химической отраслей промышленности.

Указанные проблемы решаются путём минимизации риска возникновения основных ошибок производственно-эксплуатационной деятельности человека. К таким ошибкам относят:

1. Технические ошибки, которые обусловлены:

– неправильным проектированием (неверные исходные данные, ошибки в расчётах, неправильный выбор сырья, материалов, технологии изготовления, неточности в проектировании и т. д.);

– неправильным изготовлением (некорректная замена сырья, материалов, комплектующих, несоблюдение размеров деталей, узлов и комплектующих, нарушение технологических режимов изготовления и обработки изделий, использование бракованных комплектующих и деталей и т. п.), т. е. элементы изделия или конструкции не соответствуют разработанному, верному проекту;

– неправильной эксплуатацией (эксплуатация на нерасчётных режимах, перегрузки, использование при производстве продукции некачественного сырья и т. п.).

2. Организационные ошибки, вызванные тем, что руководитель при проектировании, производстве, эксплуатации не предусмотрел организационные меры, предотвращающие перечисленные технические ошибки.

3. Недостаток квалификации, в результате чего руководитель или ответственное лицо не были достаточно качественно подготовлены, обучены по направлению существования продукции на всех этапах его жизненного цикла для того, чтобы избежать технических и организационных ошибок.

Указанные ошибки минимизируются путём проведения технического контроля процессов проектирования, производства, эксплуатации, ремонта, утилизации изделий и объектов, т. е. путём технического контроля всех этапов жизненного цикла продукции.

Именно на решение задач обеспечения технического контроля продукции на всех этапах жизненного цикла направлен профессиональный стандарт 40.010 «Специалист по техническому контролю качества продукции», зарегистрированный в Министерстве юстиции Российской Федерации в 2017 г.

Следует отметить, что технический контроль оперирует методами и средствами разрушающего и неразрушающего контроля, а также является «поставщиком» исходных данных для диагностирования и мониторинга состояния любых техногенных объектов.

Следует подчеркнуть, что речь идёт о техническом контроле техногенного объекта независимо от сферы его назначения и существования, т. е. совершенно неважно, что это за объект: проектирование и выпуск микросхем, ракетная, авиационная, космическая техника или эксплуатация объектов атомной энергетики, опасных производств нефтегазовой, химической отрасли.

В учебном пособии представлены основы технического контроля, диагностики и мониторинга технического состояния на основе методов неразрушающего контроля. Основное внимание уделено терминологии в этой области, которая достаточно стремительно изменяется в последнее десятилетие. При этом важно не только владеть терминами и понимать их на русском языке, но знать их адекватные эквиваленты на английском языке.

1. ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА И КОНТРОЛЬ

1.1. Термины и определения

Любая техническая наука или отрасль знаний начинается с определения понятий и терминологии. Поэтому для формирования понятийного аппарата прежде всего следует рассмотреть основную терминологию в области технической диагностики, которая сформирована на основе нормативных документов (международных, межгосударственных, национальных и отраслевых стандартов) и научно-технической литературы.

Под любым **объектом контроля** понимают техническое устройство, здание или сооружение, подвергаемое техническому или неразрушающему контролю [1].

На опасном производственном объекте, согласно № 116-ФЗ, технические устройства – это машины, технологическое оборудование, системы машин и (или) оборудования, агрегаты, аппаратура, механизмы, применяемые при эксплуатации объекта. Таким образом, под техническим устройством в общем смысле будем понимать любой техногенный объект, т. е. объект, полученный в процессе или связанный с технической и технологической деятельностью людей [1].

Технический контроль (ТК) – это проверка соответствия объекта контроля, диагностики или мониторинга установленным техническим требованиям. Как правило, контроль состоит из двух этапов: получения первичной информации о состоянии объекта и сопоставления её с установленными нормами.

Неразрушающий контроль (НК) – это проверка, контроль, оценка надёжности, параметров и свойств технических устройств, зданий и сооружений, при которых не должна быть нарушена их пригодность к применению и эксплуатации.

Техническая диагностика (ТД) – это научно-техническая дисциплина, изучающая и устанавливающая признаки дефектов технических объектов, а также методы и средства обнаружения и поиска (указания местоположения) дефектов [57].

Техническая диагностика основывается на результатах и информации технического и/или неразрушающего контроля.

Дефект (*defect*) (ГОСТ Р 27.002–2015, п. 3.4.2) – это каждое отдельное несоответствие объекта требованиям, установленным документацией [12].

Повреждение (*degraded state*) (ГОСТ Р 27.002–2015, п. 3.4.3) – это событие, заключающееся в нарушении исправного состояния объекта при сохранении работоспособного состояния [12].

Дефектоскопический контроль – это одно из направлений НК, при котором осуществляется контроль качества материалов, деталей, узлов и покрытий, а также контроль состояния скрытых элементов, механизмов, агрегатов и конструкций с помощью проникающих физических полей и химических веществ.

Дефектоскопия – наука о принципах, методах и средствах обнаружения дефектов. Под дефектоскопией понимают также комплекс физических методов и средств выявления дефектов в материале заготовок, полуфабрикатов и деталей (в том числе и деталей в сборе), а также в сварных швах, клёпаных и паяных соединениях и др.

Интроскопия – направление НК и ТД, связанное с визуализацией физических полей, прошедших или отражённых от объекта контроля, для определения дефектов материала и состояния конструкций. В условиях эксплуатации объекта контроля наиболее часто появляются дефекты усталости, коррозии и др.

Результатом НК является установленная оценка соответствия объекта контроля предъявляемым техническим требованиям, применяемая как результат сопоставления окончательной информации об объекте контроля с требованиями нормативно-технической документации.

В **задачу НК** входит выявление возможных отклонений от установленных технических характеристик объекта контроля. Такими отклонениями могут быть дефекты типа нарушений сплошности, изменение структуры и физико-механических свойств материала, размеров, покрытий, соединений и т. п. Конечным результатом НК является регистрация всех обнаруженных отклонений и по возможности количественная оценка их параметров (координат, размеров и формы дефектов, величин, зависящих от физико-механических характеристик материала и т. п.). Отбраковка негодных изделий проводится на основе заранее установленных норм.

Измерение – нахождение физической величины опытным путём с помощью специальных технических средств [44].

Испытание – экспериментальное определение количественных и (или) качественных характеристик свойств объекта испытаний как результат воздействия на него, при его функционировании, при моделировании объекта и (или) воздействий [3].

В производстве и особенно при эксплуатации сложных объектов контроля (самолётов, турбин, ракетных комплексов, атомных станций и других крупных сооружений и т. п.) требуется оценка их технического состояния и остаточного ресурса. Для этого необходимы постоянный мониторинг и наличие методик и стандартов по определению остаточного ресурса и риска эксплуатации изделий на основе экспериментальных и теоретических статистических данных.

Подобный же подход используется в медицинской практике. Диагностирование болезней и постановку диагноза для лечения осуществляют по известным методикам и проверенным рекомендациям посредством анализа диагностических данных врачебного осмотра, а также лабораторных, аппаратурных, химических исследований.

Техническая диагностика является высшим уровнем ТК и даёт ответы на главные вопросы: когда должна быть прекращена эксплуатация изделия и что необходимо сделать для её продления? При проведении ТД в качестве основного средства получения информации о состоянии объекта контроля служит ТК, основанный на результатах измерений и испытаний.

Различие между ТД и ТК представлено в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Характеристики ТД и ТК

Технический контроль	Техническая диагностика
1. Применяется в основном для измерения параметров материалов, деталей и узлов конструкций	Объектами являются более сложные агрегаты и механизмы, для которых необходимо определять техническое состояние, остаточный ресурс и риск эксплуатации
2. Характер и размеры допустимых дефектов регламентированы заранее установленными нормами	Результаты анализируются с учётом влияния дефектов на работоспособность объекта контроля в соответствии с конкретными методиками, программами и стандартами по расчёту остаточного ресурса и риска эксплуатации на основании данных ТК

Метод контроля – правила применения определённых принципов и средств контроля [25].

Метод НК – это метод контроля, при котором не должна быть нарушена пригодность объекта в применении, основанная на том или ином физическом явлении [49].

Вид НК – группа методов неразрушающего контроля, объединённых общностью физических явлений, положенных в его основу [25].

Виды НК классифицируются по следующим признакам:

а) по характеру полей или излучений, взаимодействующих с объектом контроля;

б) характеру взаимодействия физических полей или веществ с объектом контроля;

в) первичным информативным признакам;

г) способам индикации первичной информации;

д) способам представления окончательной информации.

Контролепригодность – это свойство объекта, обеспечивающее возможность, удобства и надёжность его контроля (диагностирования) на всех стадиях жизненного цикла [5].

Технологическая инструкция по НК – это документ, предназначенный на решение задач НК объекта с указанием последовательности операций контроля, их параметров и средств.

Технологическая карта НК – это документ в виде карты, таблицы, инструкции, который содержит основные данные технической документации, операций и средств контроля.

Заключение по результатам НК – это документ, составленный по результатам проведения НК, содержит данные о выполненном контроле, его результате и заключение или выводы.

Достоверность НК – это показатель НК (количественный и качественный), связанный с вероятностями принятия решений – вероятностями пропуска дефекта или ложного его обнаружения.

Основные параметры НК – это совокупность параметров или характеристики НК, обеспечивающая выполнение установленных нормативно-технической документацией требований по обнаружению дефекта или неисправности, измерению параметров дефекта и оценке влияния дефектов на состояние объекта.

Специалист в области НК – это сотрудник, допущенный к выполнению НК технических устройств, зданий, сооружений (на опасных производственных объектах).

1.2. Технический контроль в производстве

На этапе производства ТК разделяют на входной, операционный, приёмочный.

На этапе *входного контроля* осуществляется проверка соответствия поступивших материалов, полуфабрикатов, заготовок, комплектующих деталей и сборочных единиц требованиям, установленным в стандартах, технических условиях, договорах о поставках.

При *операционном контроле* осуществляется проверка соответствия деталей и сборочных единиц в процессе изготовления или ремонта предъявляемым к ним требованиям.

В процессе *приёмочного контроля* осуществляется проверка соответствия качества готовых изделий требованиям, установленным в нормативно-технической документации, в том числе: комплектности, упаковки, консервации, пригодности к транспортированию.

По полноте охвата контроль бывает сплошным, выборочным, непрерывным, периодическим, летучим.

Сплошной контроль применяется в следующих случаях:

- в условиях высоких требований к уровню качества изделий, для которых недопустим пропуск дефектов или неисправностей при дальнейшем производстве или эксплуатации;
- количество объектов контроля недостаточно для получения выборок или проб для определения установленных требований по рискам изготовителя или потребителя;
- качество изделия не может быть проверено на последующих этапах его изготовления и/или испытания;
- для продукции на стадии её освоения в производстве;
- когда технологический процесс (оборудование) не обеспечивает необходимую стабильность качества изделий.

При выборочном контроле, как правило, пользуются статистическими методами контроля, и он применяется в следующих случаях:

- для изделий, если их количество достаточно для получения выборок или проб с установленным риском изготовителя и потребителя;
- при большой трудоёмкости контроля;
- при контроле, связанном с разрушением изделий.

Непрерывный контроль осуществляется, как правило, автоматическими или полуавтоматическими средствами контроля и применяется для проверки технологических процессов при их нестабильности и необходимости постоянного обеспечения количественных и качественных характеристик.

Периодический контроль применяется для проверки изделий и технологических процессов при установившемся производстве и стабильных технологических процессах.

Летучий контроль используется в специальных случаях, установленных в нормативах предприятия.

Объектами контроля являются: материал, полуфабрикат, заготовка, деталь, сборочная единица, комплекс, комплект, технологический процесс.

Состав контролируемых признаков для объектов:

- для материала: марка, геометрические параметры, физико-химические параметры, внешние и внутренние дефекты;
- полуфабриката и заготовки – те же параметры, что и для материала, а также клейма;
- детали: геометрические параметры, физико-механические параметры, внешние и внутренние дефекты, клейма;
- сборочной единицы, комплекса, комплекта: геометрические параметры, функциональные параметры, внешние и внутренние дефекты, клейма;
- технологического процесса: качественные и количественные характеристики технологического процесса.

Алгоритм контроля позволяет осуществлять привязку существующих схем контроля к условиям конкретного производства.

Основные понятия, относящиеся к качеству продукции, определяются стандартами ГОСТ 15467–79 [2] и ГОСТ 27.002–2015 [12] (рис. 1.1).

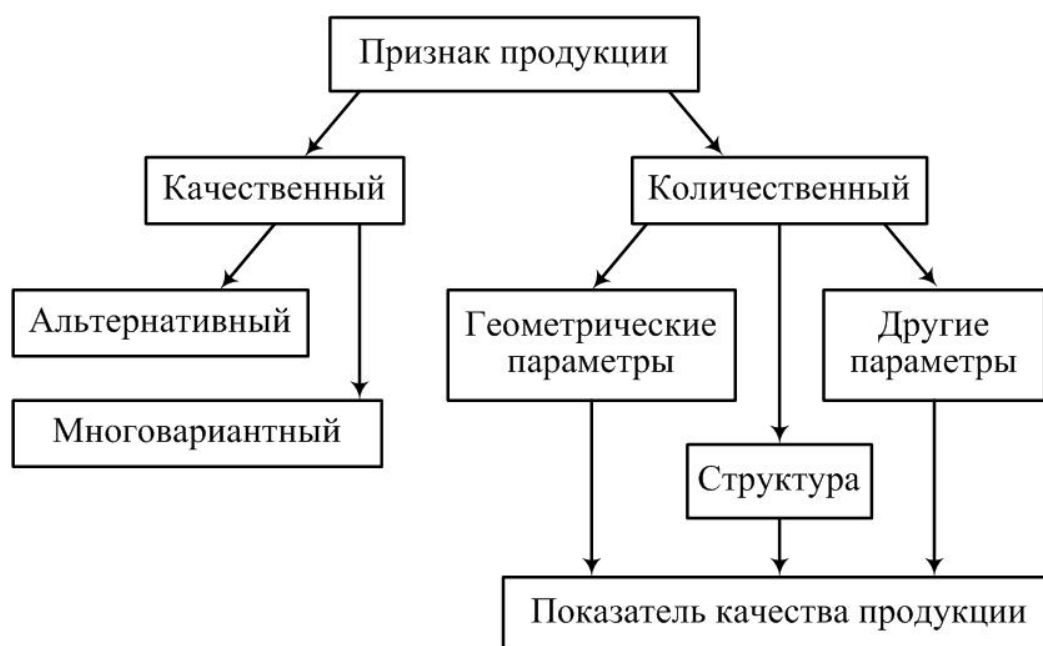


Рис. 1.1. Связь понятий «признак», «параметр»
и «показатель качества продукции»

Качество продукции – совокупность свойств продукции, обуславливающих её пригодность удовлетворять определенным требованиям в соответствии с её назначением [2, 12].

Показатель качества продукции – количественная характеристика одного и нескольких свойств продукции, входящих в её качество, рассматриваемая применительно к определенным условиям её создания, эксплуатации или потребления [2, 12].

Признак продукции – качественная или количественная характеристика любых свойств или состояний продукции [2, 12]. Качественные характеристики, например цвет металла, форма проката, антикоррозийное покрытие, могут быть *альтернативными* или *многовариантными*. Количественные признаки являются её параметрами и могут быть показателями качества.

Параметр продукции – признак продукции, количественно характеризующий любые ее свойства [2, 12].

1.3. Техническое состояние и его виды

По ГОСТ Р 27.002–2015 (п. 3.2.10) **техническое состояние** (*technical condition*) – это состояние объекта, характеризуемое совокупностью установленных в документации параметров, описывающих его способность выполнять требуемые функции в рассматриваемых условиях [12].

В научно-технической литературе, а также в ГОСТ 20911 **техническое состояние объекта** (ТСО) определено как совокупность его свойств, которые характеризуются в определённый момент времени при определённых условиях внешней среды значениями структурных параметров, установленных технической документацией на объект диагностирования [5].

Другими словами, **техническое состояние** – это совокупность свойств, подверженных изменению в процессе производства или эксплуатации технического устройства. Характеризуется признаками, установленными технической документацией.

Процесс определения ТСО называется **техническим диагностированием**. Результатом технического диагностирования является оценка ТСО в определённый момент времени, оформленная надлежащим образом. Совокупность таких оценок на определённом интервале времени жизни объекта есть наблюдение за его техническим состоянием, т. е. **мониторинг** ТСО на этом интервале.

Контроль ТСО – проверка соответствия значений параметров объекта требованиям технической документации и определение на этой основе одного из заданных видов ТСО в данный момент времени [5].

Прогнозирование ТСО – определение ТСО с заданной вероятностью на предстоящий интервал времени. Целью прогнозирования ТСО может быть определение с заданной вероятностью интервала времени ресурса, в течение которого сохраняется работоспособное исправное состояние объекта; определение вероятности сохранения работоспособного исправного состояния объекта на заданный интервал времени [5].

Функционирование средств технического контроля и диагностики основывается на том, что в общем случае, исходя из совокупности диагностических признаков, каждый из которых с определённой вероятностью характеризует состояние контролируемого или диагностируемого объекта, необходимо сформировать решающее правило, с помощью которого выделенная совокупность признаков была бы отнесена к одному из возможных состояний (диагнозов).

В частном случае необходимо провести выбор одного из двух диагнозов (дифференциальная диагностика, или дихотомия), например «исправное состояние» и «неисправное состояние» [45, 65].

В то же время в соответствии с ГОСТ 20911–89 «Техническая диагностика. Термины и определения» [5] видами ТСО в зависимости от значений параметров в данный момент времени являются:

- исправное / неисправное;
- работоспособное / неработоспособное;
- предельное.

В соответствии с ГОСТ Р 27.002–2015 «Надёжность в технике. Термины и определения» [12] видами ТСО являются:

- исправное (исправность) / неисправное (неисправность) состояние;
- работоспособное / неработоспособное состояние;
- рабочее / нерабочее состояние;
- предельное состояние;
- опасное состояние;
- предотказное состояние.

Исправное состояние (исправность) (*perfect (flawless) state*) (ГОСТ Р 27.002–2015, п. 3.2.1) – это состояние объекта, в котором он соответствует всем требованиям, установленным в документации на него [12].

Соответствие всем требованиям документации может быть определено как состояние, в котором значения всех параметров объекта соответствуют всем требованиям документации на этот объект [12].

Применительно к системам агрегата исправное состояние системы будет обеспечиваться, когда её элементы (гидроагрегаты, трубопроводы и др.) будут полностью соответствовать всем требованиям нормативно-технической документации или конструкторской (проектной) документации (КД), техническим требованиям или техническим условиям (ТУ).

Если объект не соответствует хотя бы одному из таких требований, он считается неисправным. Свойства изделия, характеризующие возможность нормально выполнять возложенные на него функции в определенных условиях эксплуатации, называются *основными*.

Неисправное состояние (неисправность) (*imperfect state (flaw)*) (ГОСТ Р 27.002–2015, п. 3.2.1) – это состояние объекта, в котором он не соответствует хотя бы одному из требований, установленных в документации на него [12].

Несоответствие хотя бы одному из предъявляемых требований может быть определено как состояние, в котором значение хотя бы одного параметра объекта не соответствуют требованиям документации на этот объект [12].

Неисправность (*fault*) (ГОСТ Р ИСО 13372–2013, п. 1.8) – это состояние объекта, когда один из его элементов или группа элементов проявляют признаки деградации или нарушения работы, что может привести к отказу машины [12].

Примечание 1. Неисправность часто является следствием отказа, но может иметь место и при его отсутствии [12].

Примечание 2. Состояние объекта не рассматривают как неисправное, если оно возникло вследствие запланированных процедур или нехватки внешних ресурсов [12].

Иногда, особенно в зарубежной литературе, под **неисправностью** понимают состояние изделия, характеризующееся неспособностью выполнить требуемую функцию, исключая такую неспособность во время профилактического технического обслуживания или других запланированных действий или из-за нехватки внешних ресурсов (взято из ГОСТ Р 27.002–2009).

Возможные неисправности в агрегатах (источник энергии – привод, и потребитель энергии – функциональное устройство) разделяют на неисправности составляющих узлов и механизмов (или их отдельных функциональных участков), которые:

- определяются как недопустимые количественные изменения какого-либо параметра (характеристики) узла вследствие необратимых физико-химических изменений или разрушений;
- трактуются как недопустимые количественные изменения функциональных параметров (либо характеристик системы);
- связаны с изменениями структурных связей между их функциональными участками.

Проверка *исправности* агрегатов производится при их изготовлении и последующих испытаниях, а также при капитальных ремонтах.

Работоспособное состояние (*up state*) (ГОСТ Р 27.002–2015, п. 3.2.3) – это состояние объекта, в котором он способен выполнять требуемые функции [12].

Иногда, особенно в зарубежной литературе, под **работоспособным состоянием** понимают состояние изделия, при котором оно способно выполнить требуемую функцию при условии, что предоставлены необходимые внешние ресурсы. При этом изделие в одно и то же время может находиться в работоспособном состоянии для некоторых функций и в неработоспособном состоянии для других функций.

Работоспособное состояние может быть определено, например, как состояние объекта, в котором значения всех параметров, характеризующих способность выполнять заданные функции, соответствуют требованиям, установленным в документации на этот объект.

Отсутствие необходимых внешних ресурсов может препятствовать работе объекта, но это не влияет на его пребывание в работоспособном состоянии.

Неработоспособное состояние (*down state*) (ГОСТ Р 27.002–2015 (п. 3.2.4)) – это состояние объекта, в котором он не способен выполнять хотя бы одну требуемую функцию по причинам, зависящим от него или из-за профилактического технического обслуживания [12].

Неработоспособное состояние может быть определено как состояние, в котором значение хотя бы одного из параметров, характеризующих способность выполнять заданные функции, не соответствует требованиям документации на этот объект [12].

Объект может быть способен выполнять одни функции и одновременно не способен выполнять другие – в этом случае он находится в частично работоспособном состоянии – это примечание относится также и к термину «работоспособное состояние» [12].

Иногда, особенно в зарубежной литературе, под **неработоспособным состоянием** понимают состояние изделия, при котором оно неспособно выполнить требуемую функцию по любой причине.

Из приведённых определений видно, что к работоспособному состоянию объекта предъявляются только основные требования, характеризующие нормальную его работу в данных условиях, а к исправному состоянию – как основные, так и неосновные. Если объект исправен, то он будет работоспособным. Например, если на автомобиле повреждено лакокрасочное покрытие или помята облицовка, то его используют по назначению в соответствии с требованиями

технических условий на такое применение (обеспечение управляемости, проходимости, тягового усилия при нормальном расходе топлива и др.), т. е. машину считают работоспособной. В то же время автомобиль считается неисправным, так как не соответствует требованию нормативно-технической документации, хотя и не по основному, а только по внешнему виду. Такое нарушение неисправности называют повреждением.

Проверка работоспособности агрегата и его отдельных функциональных участков обычно осуществляется при периодическом техническом обслуживании машин.

При изготовлении и эксплуатации агрегатов проверяется их исправность, работоспособность и правильность функционирования.

Оценка правильности функционирования агрегата, как правило, производится оператором в процессе выполнения производственного задания, а также техническим персоналом, выполняющим техническое обслуживание машины. Таким образом, проверка правильности функционирования по сравнению с проверкой работоспособности позволяет убедиться только в том, что агрегат правильно функционирует в данном режиме работы в данный момент времени.

Рабочее состояние (*operating state*) (ГОСТ Р 27.002–2015, п. 3.2.5) – это состояние объекта, в котором он выполняет какую-либо требуемую функцию [12].

Рабочее состояние отличается от работоспособного отсутствием упоминания о способности (возможности) выполнить функцию, т. е. в рабочем состоянии объект уже выполняет какую-либо требуемую функцию, а в работоспособном состоянии объект потенциально способен её выполнить, но не обязательно выполняет в данный момент [12].

Нерабочее состояние (*non-operating state*) (ГОСТ Р 27.002–2015, п. 3.2.6) – это состояние объекта, в котором он не выполняет ни одной из требуемых функций. *Отличие нерабочего состояния от неработоспособного такое же, как и отличие рабочего состояния от работоспособного [12].*

Предельное состояние (*limiting state*) (ГОСТ Р 27.002–2015, п. 3.2.7) – это состояние объекта, в котором его дальнейшая эксплуатация недопустима или нецелесообразна либо восстановление его работоспособного состояния невозможно или нецелесообразно [12].

Недопустимость дальнейшей эксплуатации устанавливается на основе оценки рисков, тогда как нецелесообразность или невозможность восстановления может устанавливаться различными способами [12].

Критерий предельного состояния (*limiting state criterion*) (ГОСТ Р 27.002–2015, п. 3.2.8) – это признак или совокупность признаков предельного состояния объекта, установленные в документации на него [12].

Если исключить из рассмотрения выходы из строя изделий вследствие реализации непредусмотренных режимов эксплуатации, не поддающихся контролю природных воздействий, грубых ошибок при проектировании или эксплуатации, то остальные случаи наступления предельных состояний можно отнести к одной из трёх основных групп.

Первую группу образуют предельные состояния, наступившие в результате постепенного накопления повреждений (старения), приводящих к зарождению и развитию макроскопических трещин. Причиной выхода изделия из строя являются процессы развития наиболее опасных трещин до критических размеров и возникновение аварийных ситуаций. Предельное состояние первой группы типично для несущих элементов, работающих при высоких уровнях нестационарных термомеханических нагрузок (сосуды и трубопроводы высокого давления), вибрационных нагрузок и т. д.

Вторую группу образуют предельные состояния, связанные с чрезмерным износом трущихся деталей и поверхностей, находящихся в контакте с рабочей или окружающей средой (коррозия).

Третья группа состоит из предельных состояний, связанных с большим формоизменением начальных геометрических размеров деталей оборудования вследствие процессов ползучести материала в условиях нестационарных высоких температур.

Опасное состояние (*hazardous state*) (ГОСТ Р 27.002–2015, п. 3.2.9) – это состояние объекта, в котором возникает недопустимый риск причинения вреда людям или окружающей среде, или существенных материальных потерь, или других неприемлемых последствий.

Опасное состояние может возникнуть как в результате отказа, так и в процессе работы объекта [12].

Предотказное состояние (*prefault state*) (ГОСТ Р 27.002–2015, п. 3.2.11) – это состояние объекта, характеризующееся повышенным риском его отказа [12].

Предотказное состояние может возникнуть как в результате внутренних процессов/причин, так и внешних воздействий на объект в процессе его функционирования [12].

Критерий предотказного состояния (*prefault state criteria*) (ГОСТ Р 27.002–2015, п. 3.2.12) – это признак или совокупность признаков предотказного состояния объекта [12].

Некоторое время в нормативной литературе использовался термин **«критическое состояние»** – состояние изделия, которое может привести к тяжёлым последствиям: травмированию людей, значительному материальному ущербу или неприемлемым экологическим последствиям.

Применение (использование) объекта по назначению прекращается в следующих случаях:

- при неустранимом нарушении безопасности;
- неустранимом отклонении величин заданных параметров;
- недопустимом увеличении эксплуатационных расходов.

Для некоторых объектов предельное состояние является последним в его функционировании, т. е. объект снимается с эксплуатации, для других – определенной фазой в эксплуатационном графике, требующей проведения ремонтно-восстановительных работ.

В связи с этим объекты могут быть:

- **невосстанавливаемые**, для которых работоспособность в случае возникновения отказа не подлежит восстановлению;
- **восстанавливаемые**, работоспособность которых может быть восстановлена, в том числе и путём замены.

К числу восстанавливаемых объектов можно отнести, например, подшипники качения, полупроводниковые изделия, зубчатые колеса и т. п. Объекты, состоящие из многих элементов, например станок, автомобиль, электронная аппаратура, являются восстанавливаемыми, поскольку их отказы связаны с повреждением одного или немногих элементов, которые могут быть заменены.

В ряде случаев один и тот же объект в зависимости от особенностей, этапов эксплуатации или назначения может считаться восстанавливаемым или невосстанавливаемым.

Согласно межгосударственным, национальным и отраслевым стандартам в области мониторинга состояния оборудования опасных производств [13, 33, 34] применяются четыре оценки технического состояния:

- оценка **«ХОРОШО» (Х)**. Допустимо при приёмочных испытаниях после монтажа или капитального (среднего) ремонта. Соответствует исправному состоянию объекта и характеризует высокое качество ремонтных, монтажных работ и обкатки под нагрузкой;

– оценка «ДОПУСТИМО» (Д). Допустимо при длительной эксплуатации. Характеризует полностью работоспособное состояние объекта при малой вероятности отказа. При достижении уровня «Д» контролируют скорость изменения измеряемых параметров;

– оценка «ТРЕБУЕТ ПРИНЯТИЯ МЕР» (ТПМ) (или «ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ»). Допустимо при непродолжительной эксплуатации. Техническое состояние объекта соответствует «ТПМ», если величина измеряемого параметра превышает уровень «ТПМ» или скорость роста параметра превышает уровень «ТПМ» при абсолютном значении параметра, превышающем уровень «Д». Предупреждает о приближении технического состояния к предельному, наличии развивающихся дефектов, устойчивой постепенной утрате работоспособности и росте вероятности отказа. Служит основанием для проведения более частого текущего обслуживания и/или планомерного вывода объекта в ремонт;

– оценка «НЕДОПУСТИМО» (НДП) («ОСТАНОВ»). Недопустимо при эксплуатации. Техническое состояние объекта соответствует «НДП», если величина измеряемого параметра превышает уровень «НДП» или скорость роста параметра превышает уровень «НДП» при абсолютном значении параметра, превышающем уровень «Д». Характеризует наличие развитых дефектов либо высокую скорость их развития и достижение объектом предельного либо опасного состояния с высокой вероятностью отказа. Служит для немедленного останова объекта и вывода его в ремонт. Продолжительность работы объекта в состоянии НДП должна быть минимальна и определяется регламентом по выводу его из этого состояния.

Для оценки качества монтажа оборудования новых производств целесообразно устанавливать уровень технического состояния «ОТЛИЧНО», которому соответствуют границы измеряемых параметров (диагностических признаков) на 30 % ниже уровней, установленных для оценки «ХОРОШО».

Каждая оценка технического состояния объекта определяет соответствующую совокупность действий персонала по управлению этим состоянием, т. е. каждой оценке должен соответствовать определённый набор операций для поддержания объекта в состоянии, как минимум, ТПМ.

1.4. Основные понятия технической диагностики

Основные понятия технической диагностики определены в ГОСТ 20911–89 [5] и ГОСТ 27.002–2015 [12].

Термин «диагностика» происходит от греческого слова «диагнозис», что означает распознавание, определение.

В процессе диагностирования устанавливается диагноз, т. е. определяется состояние, например, больного – медицинская диагностика, или состояние технической системы – техническая диагностика.

Технический диагноз (диагноз) – это результат диагностирования, привязанный к определённом моменту времени [5].

В то же время ГОСТ Р ИСО 13372 (п. 5.1) определяет **диагноз** (*diagnosis*) как заключение или совокупность заключений о состоянии обследуемой системы или её узлов [27].

Примечание: диагноз содержит детализированную информацию о виде, обстоятельствах и степени развития наблюдаемой неисправности или отказа.

Технической диагностикой (ТД) называется наука о распознавании состояния технической системы.

С другой стороны, согласно ГОСТ 20911 **техническая диагностика** – это область знаний, охватывающая теорию, методы и средства определения технического состояния объектов [5].

С третьей стороны, **техническая диагностика** – это научно-техническая дисциплина, изучающая и устанавливающая признаки дефектов технических объектов, а также методы и средства обнаружения и поиска (указания местоположения) дефектов. Техническая диагностика изучает методы получения и оценки диагностической информации, диагностические модели и алгоритмы принятия решений [57].

Вместе с тем **техническая диагностика** машин и механизмов – это установление и изучение признаков, характеризующих наличие дефектов в машинах, устройствах, их узлах, элементах и т. д., для предсказания возможных отклонений в режимах их работы (или состояниях), а также разработка методов и средств обнаружения и локализации дефектов и неисправностей [57].

Основной предмет ТД – организация эффективной проверки *исправности, работоспособности*, правильности функционирования технических объектов (деталей, элементов, узлов, блоков, заготовок, устройств, изделий, агрега-

тов, систем, а также процессов передачи, обработки и хранения материи, энергии и информации), т. е. организация процессов диагностирования технического состояния объектов при их изготовлении и эксплуатации, в том числе во время, до и после применения по назначению, при профилактике, ремонте и хранении.

Целью технической диагностики является разработка, исследование методов получения и оценки диагностической информации, диагностических моделей и алгоритмов принятия решений. С точки зрения обеспечения безопасности техногенной среды **целью технической диагностики является повышение надёжности и ресурса технических систем** [57].

Диагностика как наука о распознавании состояния технической системы определяет следующие основные задачи в области диагностирования состояния технических устройств:

- определение технического состояния, в котором находилось оборудование в прошлом (генезис), находится в настоящем (диагноз) и будет находиться в будущем (прогноз);
- поиск места и определение причин неисправности;
- контроль технического состояния, т. е. определение вида технического состояния. Видами технического состояния являются исправное и неисправное, работоспособное и неработоспособное и т. д.

Техническое диагностирование – это процесс определения технического состояния объекта или получения оценки технического состояния, включающего диагнозы наиболее важных субъектов, составляющих объект диагностирования и определяющих полноту диагностирования объекта [5].

Задачами технического диагностирования являются:

- проведение контроля технического состояния;
- поиск места и определение причин отказа (неисправности);
- прогнозирование технического состояния.

В общем виде задачу диагностирования допустимо рассматривать как двойственную задачу: задачу построения характеристики класса состояний, которому принадлежит совокупный диагностический образ, и задачу принятия решения о принадлежности к одному из классов состояний испытуемого диагностического образа [57].

Диагностический образ представляет собой описание технического состояния в виде параметров диагностического сигнала. Информативный параметр или совокупность параметров диагностического сигнала в общем случае называют диагностическим признаком.

Более строго под диагностическим признаком следует понимать один параметр одной характеристики диагностического сигнала, а в некоторых случаях – один или несколько параметров одной или нескольких характеристик диагностического сигнала.

При этом следует учитывать, что увеличение числа *зависимых* диагностических признаков **не способствует** более полному описанию объекта диагностирования и надёжному распознаванию.

Решение этих задач необходимо для организации технического обслуживания оборудования по фактическому техническому состоянию вместо обслуживания по назначенному ресурсу. Кроме того, это позволяет реализовать безопасную ресурсосберегающую эксплуатацию оборудования всех отраслей промышленности.

Согласно ГОСТ Р ИСО 13372–2013 (п. 1.3) **контроль (технического) состояния (*condition monitoring*)** – это сбор и обработка данных, характеризующих техническое состояние машины в разные моменты времени [12].

Примечание: техническое состояние машины ухудшается при появлении неисправностей и отказов.

В этом определении ключевое слово «*monitoring*». Поэтому часто термин «*condition monitoring*» переводят как «мониторинг технического состояния».

Однако согласно ГОСТ Р 27.002–2015 (п. 3.5.12) **мониторинг технического состояния (*condition monitoring*)** – это составная часть технического обслуживания, заключающаяся в наблюдении за объектом с целью получения информации о его техническом состоянии и рабочих параметрах [12].

Но по ГОСТ Р ИСО 13372–2013 (п. 1.14) **мониторинг (технического) состояния (*machinery health monitoring*)** – это процесс, обеспечивающий возможность определения текущей эксплуатационной готовности машин и узлов без необходимости их демонтажа или обследования [27].

Согласно ГОСТ Р ИСО 13372–2013 (п. 6.4) **периодический контроль (контроль состояния и диагностика) (*off line*)** – это сбор данных в фиксированные, регулярно или нерегулярно повторяющиеся моменты времени [27].

Примечание: при периодическом контроле первичный преобразователь или систему сбора данных подсоединяют к машине на короткое время.

ГОСТ Р ИСО 13372–2013 (п. 6.5) определяет и понятие **непрерывный контроль (контроль состояния и диагностика) (*on line*)** – это постоянный и непрерывный сбор данных [27].

Примечание: к данному виду контроля относят и случаи, когда преобразователь или система сбора данных постоянно соединены с машиной, хотя сбор данных не осуществляется в непрерывном режиме [27].

Следует обратить внимание на термины ***off line*** и ***on line***, поскольку очень часто в литературе и рекламе можно встретить такие словосочетаний, как ***off line monitoring*** или ***on line monitoring***. При этом большинство людей и даже специалистов в области диагностики и мониторинга считают, что первый термин обозначает периодический контроль параметров и оценку технического состояния, а второй – непрерывный контроль параметров и непрерывную оценку состояния. При этом теряется различие между *сбором* данных и *контролем* параметров.

В то же время согласно стандартам [32, 32, 35] под понятием **мониторинг технического состояния** технического устройства понимают наблюдение за техническим состоянием технического устройства (агрегата, конструкции, машины, узла, механизма) для определения и предсказания момента перехода его в предельное состояние. Результат мониторинга технического устройства представляет собой совокупность диагнозов составляющих его субъектов (конструкций, машин, узлов, механизмов), получаемых на неразрывно примыкающих друг к другу интервалах времени, в течение которых состояние технического устройства существенно не изменяется [33, 34, 35, 36].

Принципиальным отличием мониторинга состояния от мониторинга параметров является наличие интерпретатора измеренных параметров в терминах технического состояния (экспертной системы поддержки принятия решения о состоянии объекта и дальнейшем управлении) [32, 32, 35].

Таким образом, мониторинг состояния требует наличия интерпретирующей модели (экспертная система), связывающей диагностические признаки, измеряемые системой мониторинга, со структурными параметрами, определяющими техническое состояние объекта мониторинга.

Поэтому система мониторинга ТСО отображает не только значения измеряемых диагностических признаков, но и значения, оцениваемые по результатам косвенных измерений структурных параметров.

В отличие от мониторинга состояния **мониторинг параметров** – это наблюдение за измерением каких-либо параметров (вибрации, температуры и т. д.). Результат мониторинга параметров представляет собой совокупность измеренных значений параметров, получаемых на неразрывно примыкающих друг к другу интервалах времени, в течение которых значения параметров существенно не изменяются [32].

Таким образом, приведённые в [32, 32, 35] определения понятия «мониторинг технического состояния» наиболее **адекватно** отражают суть процесса наблюдения за техническим состоянием объекта и учитывают все технические особенности процесса контроля состояния объекта, обеспечивая минимизацию риска пропуска опасного состояния объекта.

1.5. Взаимосвязь контроля и диагностики

В самом общем виде понятие «техническая диагностика» представлено на рис. 1.2 академиком РАН Ключевым В.В. [37] в виде обобщённой структурной схемы взаимосвязей ТД с ТК, измерениями и испытаниями, в которой перечислены основные задачи в области обеспечения медицинской, техногенной, экологической и террористической безопасности с учётом объектов контроля каждого направления:

- медицинская диагностика – для человека;
- экодиагностика – для окружающей среды: земли, атмосферы и гидросферы;
- технодиагностика – для разработки, производства, эксплуатации и хранения продукции;
- террордиагностика – для предупреждения и раскрытия преступлений, терактов, обнаружения оружия, взрывчатых веществ, наркотиков, фальшивых банкнот.

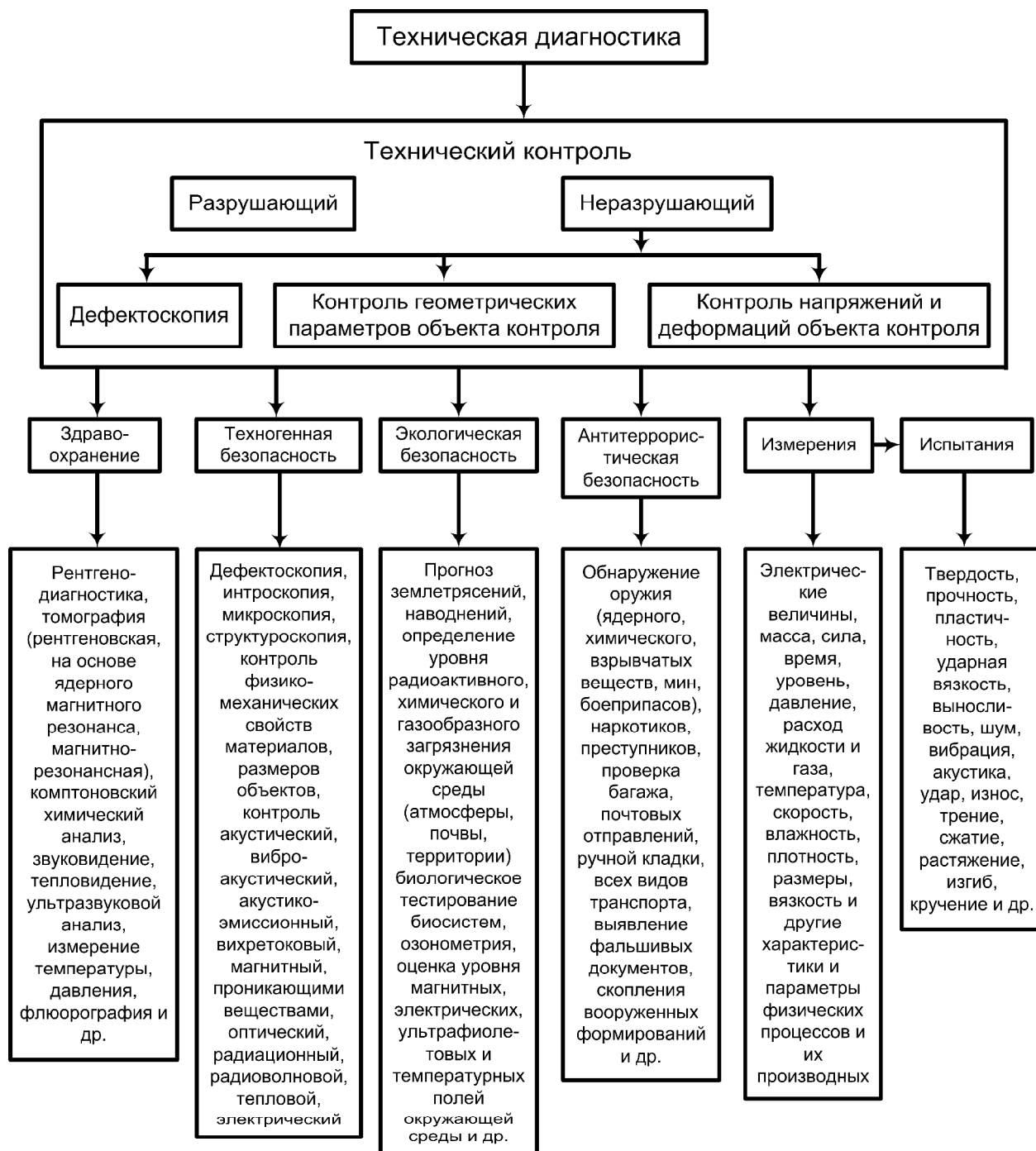


Рис. 1.2. Структурная схема взаимосвязей ТД с ТК, измерениями и испытаниями

При глобализации ТД и НК главным остаётся дальнейшая интеллектуализация диагностических операций, переход на обязательное определение остаточного ресурса и рисков эксплуатации технически и экологически опасных объектов, составление банков и баз данных дефектов, аварий, наблюдаемых объектов и их особенностей и связанных с ними статистических измерений физических полей и химического состава вещества [37]. Глобализация ТД и НК связана с развитием систем космического, авиационного, морского и автомо-

бильного мониторинга, минимизацией влияния обслуживающего персонала на принятие конечного решения, а также с применением полного спектра методов и средств электрометрии, интроскопии, виброметрии, измерения размеров, температуры, давления, массы, времени и других характеристик для интегрированных систем ТД и НК и диагностирования безопасности в широком диапазоне их использования. В табл. 1.2 [37] приведены основные физические методы, которые применяют для медицинской, эко-, техно- и терродиагностики с ориентировочными объёмами продаж в России применительно к объектам и выполняемым задачам.

Таблица 1.2

Физические методы диагностики безопасности

Физические поля, излучения, методы	Медицинская диагностика	Экологическая диагностика				Техногенная диагностика			Террористическая диагностика			
		Земля	Вода	Воздух	Космос	Производство	Эксплуатация	Хранение	Ценные бумаги	Оружие	Взрывчатые вещества	Сооружения
Низкочастотные ($0 \dots 10^3$ Гц)	–	+	–	–	–	+	+	+	–	+	–	–
Радиоволновые ($10^4 \dots 10^{10}$ Гц)	+	+	–	+	+	+	+	+	–	+	+	+
Инфракрасные ($10^{11} \dots 4 \cdot 10^{14}$ Гц)	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Видимые ($4 \cdot 10^{14} \dots 7,5 \cdot 10^{14}$ Гц)	+	–	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Ультрафиолетовые ($7,5 \cdot 10^{14} \dots 3 \cdot 10^{16}$ Гц)	+	–	–	+	+	+	+	+	+	–	–	–
Рентгеновские ($3 \cdot 10^{16} \dots 3 \cdot 10^{20}$ Гц)	50 %	+	–	–	+	+	+	+	+	+	+	+
Гамма-излучение ($3 \cdot 10^{19} \dots 3 \cdot 10^{22}$ Гц)	10 %	+	–	–	+	+	–	–	+	+	+	–
Космические (свыше $3 \cdot 10^{23}$ Гц)	–	–	–	–	+	–	–	–	–	–	–	–
Корпускулярное излучение (нейтронов, фотонов, электронов, позитронов)	+	+	–	–	+	+	–	–	+	–	+	–
Постоянное магнитное поле	+	+	–	+	+	+	+	+	+	+	–	+
Электрическое поле	10 %	+	+	–	–	+	+	+	+	–	–	+
Ультразвуковое поле	20 %	+	+	–	–	+	+	+	+	–	–	+
Акустика, виброакустика, удар	+	+	+	+	–	+	+	+	–	–	–	+
Измерение механических и химических параметров (время, размеры, сила, давление, масса, концентрация, сравнительная масса молекул)	+	+	+	+	+	+	+	+	+	–	+	+
Капиллярный контроль	+	+	–	–	–	+	+	+	+	–	–	–
Объёмы продаж (100 %)	50 %	10 %				15 %			25 %			

Глобализация потребует применения универсальных систем диагностирования физико-химических параметров для обеспечения эко-, техно- и терробезопасности [37]. Глобальная система ТД и НК – это система повышенной надёжности методов и средств, для которой характерны:

- единство измерений в международной системе единиц СИ;
- объективность в рамках допустимой неопределённости ТД и НК;
- соблюдение международно признанных и действующих систем качества;
- соблюдение прозрачных процедур проверки компетентности персонала.

1.6. Общие требования к методам НК и ТД

К методам НК и ТД предъявляются следующие основные общие требования:

- не должно происходить разрушения материала, заготовки, изделия, технического устройства или снижения их качества;
- возможность осуществления эффективного контроля на различных стадиях жизненного цикла технических устройств или изделий;
- возможность контроля качества и состояния материалов, заготовок, изделий и технических устройств по большинству заданных параметров;
- согласованность времени, затрачиваемого на технический контроль, с временем другого технологического этапа;
- достаточно высокая достоверность результатов НК и ТД;
- возможность автоматизации технического контроля технологических процессов с использованием систем поддержки принятия решений, а также управления ими по сигналам средств НК и ТД;
- высокая надёжность аппаратуры НК и ТД в различных производственных условиях;
- простота методики НК и ТД, техническая доступность средств НК и ТД в условиях производства, ремонта и эксплуатации.

Нормативные документы НК и ТД. К ним относятся: ГОСТ; ОСТ; ТУ; РД и ПБ Ростехнадзора РФ; СТО; методики контроля и инструкции.

Чувствительность методов НК и ТД определяется наименьшими размерами выявляемых дефектов:

- а) у поверхностных – шириной раскрытия у выхода на поверхность, протяжённостью вглубь металла и по поверхности детали;
- б) у глубинных – размерами дефекта с указанием глубины залегания;
- в) степенью износа и коррозии отдельных узлов и деталей.

Чувствительность зависит в основном от особенностей метода НК и ТД, технических данных применяемой аппаратуры и дефектоскопических материалов, методик контроля, чистоты обработки поверхности контролируемой детали, её материала, условий контроля и других факторов.

Достоверность методов и результатов НК и ТД определяется вероятностью пропуска дефекта, неисправности, деталей с явными дефектами или необоснованной браковкой материалов, заготовок, изделий и технических устройств. Этот фактор зависит от качества (уровня) аппаратуры, квалификации оператора, правильности выбора метода НК и ТД, контролепригодности (дефектоскопичности) материалов, заготовок, изделий и технических устройств.

1.7. Классификация средств НК и ТД

Средство контроля – техническое устройство, вещество и (или) материал для проведения контроля.

Согласно Общероссийского классификатора продукции (ОКПД2) по видам экономической деятельности ОК 034-2014 (КПЕС 2008) приборы неразрушающего контроля качества материалов и изделий (код 26.51.66.120) подразделяются на приборы:

- 1) акустического неразрушающего контроля (26.51.66.121);
- 2) капиллярного неразрушающего контроля (26.51.66.122);
- 3) магнитного неразрушающего контроля (26.51.66.123);
- 4) оптического и теплового неразрушающего контроля (26.51.66.124);
- 5) радиационного неразрушающего контроля (26.51.66.125);
- 6) радиоволнового неразрушающего контроля (26.51.66.126);

7) электромагнитного (вихревых токов) и электрического неразрушающего контроля (26.51.66.127);

8) неразрушающего контроля прочие (26.51.66.129).

Код ОКПД2 26.51.6 «Инструменты и приборы прочие для измерения, контроля и испытаний» даёт следующую классификацию:

1) микроскопы (кроме оптических микроскопов) и дифракционные аппараты (26.51.61);

2) машины и приборы для испытания механических свойств материалов (26.51.62);

3) счётчики потребления или производства газа, жидкости или электроэнергии (26.51.63);

4) счётчики числа оборотов и счётчики количества продукции; таксометры, спидометры и тахометры; стробоскопы (26.51.64);

5) приборы и аппаратура для автоматического регулирования или управления, гидравлические или пневматические (26.51.65);

6) инструменты, приборы и машины для измерения или контроля, не включённые в другие группировки (26.51.66).

По ОКПД2 26.51.66 к инструментам, приборам и машинам для измерения или контроля, не включённых в другие группировки, относят:

1) приборы для измерения усилий и деформаций (26.51.66.110);

2) приборы неразрушающего контроля качества материалов и изделий (26.51.66.120);

3) приборы виброметрии (26.51.66.130);

4) средства автоматизации и механизации контроля размеров (26.51.66.140);

5) инструменты, приборы и машины для измерения или контроля прочие, не включённые в другие группировки (26.51.66.190).

Например, по ОКПД2 26.51.66.130 к приборам виброметрии следует отнести аппаратуру:

1) общего назначения для определения основных параметров вибрационных процессов (26.51.66.131);

2) для балансировки вращающихся частей машин в собственных подшипниках (26.51.66.132);

3) контрольно-сигнальную для автоматической защиты агрегатов от опасных вибраций (26.51.66.133);

4) вибростендов для испытания изделий и тарировки виброизмерительных приборов и аппаратуры (26.51.66.134);

5) виброизмерительную специальную (26.51.66.135).

По техническому исполнению средства контроля можно подразделить на три класса:

– автономные приборы для контроля одной или нескольких взаимосвязанных качественных характеристик;

– комплексные системы, автоматические линии и роботы-контролёры, автоматизированные приборы и системы, предназначенные для определения ряда основных параметров, характеризующих качество объекта;

– системы НК и ТД для автоматического контроля состояния, диагностирования и управления технологическими процессами по качественным признаками, а также для мониторинга технического состояния объектов.

По видам контролируемых параметров средств НК и ТД разделяют на приборы:

- дефектоскопы (приборы или установки), предназначенные:
 - для обнаружения дефектов типа нарушений сплошности (трещин, раковин, расслоений и т. д.);
 - контроля геометрических характеристик (наружные и внутренние диаметры, толщина стенки, покрытий, слоёв, степень износа, ширина и длина изделий и т. д.);
 - измерения физико-химических характеристик (электрических, магнитных и структурных параметров, отклонений от заданного химического состава, измерения твёрдости, пластичности, коэрцитивной силы, контроля качества упрочнённых слоёв, содержания и распределения ферритной фазы и т. д.);
- технической диагностики для предсказания возникновения различного рода дефектов, в том числе нарушений сплошности, изменения размеров и физико-механических свойств изделий на период эксплуатации изделий.

Контрольные вопросы

1. Приведите определение термина «технический контроль».
2. Приведите определение термина «неразрушающий контроль».
3. Приведите определение термина «техническая диагностика».
4. Укажите различие между техническим контролем и технической диагностикой.
5. Приведите определение термина «дефектоскопический контроль».
6. Приведите определение термина «дефектоскопия».
7. Что является основным предметом технической диагностики?
8. Поясните цели и задачи технической диагностики.
9. Приведите определение термина «техническое состояние объекта».
10. Приведите определение термина «мониторинг технического состояния объекта».
11. Приведите определение термина «мониторинг параметров».
12. Приведите определение термина «контроль технического состояния объекта».
13. Приведите определение термина «прогнозирование технического состояния объекта».
14. Виды технического состояния объекта и их характеристики.
15. Оценки технического состояния объектов.

2. ВИДЫ И МЕТОДЫ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

2.1. Виды неразрушающего контроля

По ГОСТ Р 56542–2015 «Контроль неразрушающий. Классификация видов и методов» видом неразрушающего контроля является группа методов неразрушающего контроля, объединённых общностью физических явлений, положенных в его основу [25].

Виды неразрушающего контроля:

1) **акустический неразрушающий контроль** – вид неразрушающего контроля, основанный на анализе параметров упругих волн, возбуждаемых и (или) возникающих в контролируемом объекте [25, 4, 8, 51, 52].

Примечание: при использовании возбуждаемых упругих волн ультразвукового диапазона частот (выше 20 кГц) допустимо применение термина «ультразвуковой» вместо термина «акустический».

2) **виброакустический неразрушающий контроль** – вид неразрушающего контроля, основанный на регистрации параметров виброакустического сигнала, возникающего при работе контролируемого объекта [25, 40, 43, 47, 55, 57];

3) **вихретоковый неразрушающий контроль** – вид неразрушающего контроля, основанный на анализе взаимодействия электромагнитного поля вихретокового преобразователя с электромагнитным полем вихревых токов, наводимых в контролируемом объекте [25, 26, 20, 50];

4) **магнитный неразрушающий контроль** – вид неразрушающего контроля, основанный на анализе взаимодействия магнитного поля с контролируемым объектом [25, 22, 21, 28, 29, 30, 54];

5) **неразрушающий контроль проникающими веществами** – вид неразрушающего контроля, основанный на проникновении веществ в полости дефектов контролируемого объекта [25, 6, 50, 52].

Примечание: при визуальном осмотре поверхностных дефектов термин «проникающими веществами» может быть изменён на «капиллярный», а при выявлении сквозных дефектов – на «течеискание».

6) **оптический неразрушающий контроль** – вид неразрушающего контроля, основанный на регистрации параметров оптического излучения после взаимодействия с контролируемым объектом или собственного оптического излучения исследуемого объекта [25, 6, 17, 54];

7) **радиационный неразрушающий контроль** – вид неразрушающего контроля, основанный на анализе параметров проникающего ионизирующего излучения после взаимодействия с контролируемым объектом [25, 23, 49].

Примечание: в наименовании видов контроля слово «радиационный» может быть заменено словом, обозначающим конкретный метод ионизирующего излучения (например, рентгеновский, нейтронный и т. д.);

8) **радиоволновой неразрушающий контроль** – вид неразрушающего контроля, основанный на регистрации изменений параметров электромагнитных волн радиодиапазона, взаимодействующих с контролируемым объектом [25, 7, 10, 54];

9) **тепловой неразрушающий контроль** – вид неразрушающего контроля, основанный на анализе параметров тепловых полей контролируемых объектов, вызванных дефектами [25, 24, 18, 53].

10) **электрический неразрушающий контроль** – вид неразрушающего контроля, основанный на анализе параметров электрического поля или электрического тока, взаимодействующих с контролируемым объектом или возникающих в контролируемом объекте в результате внешнего воздействия [25, 11, 53].

2.2. Классификация методов неразрушающего контроля

Методом неразрушающего контроля называют правила применения определенных принципов и средств контроля.

Развитие каждого метода НК происходило и происходит своим путём в зависимости от потребности применения данного метода, научно-технических достижений и технологических возможностей производства средств НК метода на данный момент времени. Такая траектория развития видов и методов НК привела к появлению достаточно большего количества методов НК, особенно в отдельных видах НК.

Рассмотрим основные методы неразрушающего контроля.

1. Контроль неразрушающий акустический. Методы [4, 8, 51, 52]:

а) ультразвуковой (УК);

б) акустико-эмиссионный (АЭ);

в) вибрационно-диагностический (вибродиагностический) (ВД) [13, 33];

г) другие (всего 50 видов (методов)).

2. Виброакустический [40, 41, 44, 47, 55, 57].

3. Контроль неразрушающий вихретоковый (ВК) [26, 20, 50].
4. Контроль неразрушающий магнитный (МК) [22, 21, 28, 29, 30, 54]:
 - а) метод магнитной памяти металла [28, 29, 30];
 - б) магнитоферрозондовый метод [22, 54].
5. Контроль неразрушающий оптический. Методы оптического вида [6, 17, 54].
6. Контроль неразрушающий проникающими веществами. Методы [6, 50, 52]:
 - а) капиллярный (ПВК);
 - б) течеискание (ПВТ).
7. Контроль неразрушающий радиационный (РК) [23, 49].
8. Контроль неразрушающий радиоволновой. Методы радиоволнового вида [7, 10, 54].
9. Контроль неразрушающий. Методы теплового вида [24, 18, 53].
10. Контроль неразрушающий электрический (ЭК) [11, 53].

Среди методов НК можно выделить комплекс методов, объединённых общим названием «Визуальный и измерительный контроль» (ВИК).

Каждый из видов контроля подразделяют на методы по следующим трём признакам.

1. Характер взаимодействия поля или вещества с объектом.

Взаимодействие должно быть таким, чтобы контролируемый признак объекта вызывал определённые изменения поля или состояния вещества.

Например, наличие несплошности (трещины, пористости, инородного включения в объекте) вызывает изменение прошедшего через неё излучения или проникновение в неё пробного вещества.

В некоторых случаях используемое для контроля физическое поле возникает под действием других физических эффектов, связанных с контролируемым признаком.

Например, электродвижущая сила, возникающая при нагреве разнородных материалов, позволяет контролировать химический состав материалов (термо-электрический эффект).

2. Первичный информативный параметр – конкретный параметр поля или вещества (амплитуда поля, время его распространения, количество вещества и т. д.), изменение которого используют для характеристики контролируемого объекта.

Например, наличие несплошности увеличивает или уменьшает амплитуду прошедшего через неё излучения.

3. Способ получения первичной информации – конкретный тип датчика или вещества, которые используют для измерения и фиксации выбранного информационного параметра.

Классификация видов контроля по этим признакам приведена в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Классификация видов неразрушающего контроля

Вид контроля	Методы контроля		
	по характеру взаимодействия физических полей или проникающих веществ с объектом контроля	по первичному информативному параметру	по способу получения первичной информации
1	2	3	4
Магнитный [22, 21, 28, 29, 30, 54]	Магнитный	Коэрцитивной силы, намагниченности, остаточной индукции, магнитной проницаемости, эффекта Баркгаузена	Магнитопорошковый, индукционный, феррозондовый, эффекта Холла, магнитографический, пондеромоторный, магниторезисторный
Электрический [11, 53]	Электрический, трибоэлектрический, термоэлектрический	Электропотенциальный, электроемкостный	Электростатический порошковый, электропараметрический, электроискровой, рекомбинационного излучения, экзоэлектронной эмиссии, шумовой, контактной разности потенциалов
Вихретоковый [26, 20, 50]	Прошедшего поля, отражённого поля	Амплитудный, фазовый, частотный, спектральный, многочастотный	Трансформаторный, параметрический

1	2	3	4
Радиоволновой [7, 10, 54]	Прошедшего излучения, отражённого излучения, рассеянного излучения, резонансный	Амплитудный, фазовый, частотный, временной, поляризационный геометрический	Детекторный (диодный), болометрический, термисторный, интерференционный, голографический, жидких кристаллов, термобумаг, термолюминофоров, фотоуправляемых полупроводниковых пластин, калориметрический
Тепловой [24, 18, 53]	Тепловой контактный, конвективный, собственного излучения	Термометрический, теплотеметрический	Пирометрический, жидких кристаллов, термокрасок, термобумаг, термолюминофоров, термозависимых параметров, оптический интерференционный, калориметрический
Оптический [6, 17, 54]	Прошедшего излучения, отражённого излучения, рассеянного излучения, индуцированного излучения	Амплитудный, фазовый, временной, частотный, поляризационный, геометрический, спектральный	Интерференционный, голографический, рефрактометрический, визуально-оптический
Радиационный [23, 49]	Прошедшего излучения, рассеянного излучения, активационного анализа, характеристического излучения, автоэмиссионный	Плотности потока энергии, спектральный	Сцинтилляционный, ионизационный, вторичных электронов, радиографический, радиоскопический

1	2	3	4
Акустический [4, 8, 51, 52]	Прошедшего излучения, отраженного излучения, резонансный, импедансный, собственных колебаний, акустико-эмиссионный	Амплитудный, фазовый, временной, частотный, спектральный, параметры импульсов	Пьезоэлектрический, электромагнитно-акустический, микрофонный
Вибро-акустический [13, 33, 40, 43, 47, 55, 57]	Механические колебания – движение точки или механической системы, при котором происходят колебания характеризующих его скалярных величин	Статистические параметры колебательного процесса (механических колебаний)	Пьезоэлектрический, электромагнитно-акустический
Классификация методов контроля проникающими веществами (капиллярных и течеискания)	Молекулярный	Жидкостный, газовый	Яркостный (ахроматический), цветной (хроматический), люминесцентный, люминесцентно-цветной, фильтрующихся частиц, масс-спектрометрический, пузырьковый, манометрический, галогенный, радиоактивный, катарометрический, высокочастотного разряда, химический, остаточных устойчивых деформаций, акустический

2.3. Характеристики видов неразрушающего контроля

2.3.1. Магнитный вид НК

Магнитный вид НК основан на анализе взаимодействия магнитного поля с контролируемым объектом. Использует свойство металла быстро намагничиваться и размагничиваться или создавать разную магнитную индукцию в местах дефекта [22, 21, 28, 29, 30, 54].

Как правило, применяется для контроля объектов из ферромагнитных материалов (обнаружение поверхностных и скрытых дефектов). Процесс намагничивания и перемагничивания ферромагнитного материала сопровождается гистерезисными явлениями. Свойства, которые требуется контролировать (химический состав, структура, наличие несплошностей и др.), обычно связаны с параметрами процесса намагничивания и петлём гистерезиса.

Характер взаимодействия физического поля с объектом. Используется намагничивание объекта и измеряются параметры, используемые при контроле магнитными методами.

Информативные параметры:

1) магнитная проницаемость, намагниченность, остаточная намагниченность, используемые для характеристики материала ферромагнетика (например, для контроля степени закалки стали, её прочностных характеристик и других свойств) [22, 21, 28, 29, 30, 54];

2) намагниченность насыщения, используемая для определения наличия и количества ферритной составляющей в неферромагнитном материале (величина намагниченности насыщения тем больше, чем больше содержание феррита) [22, 21, 28, 29, 30, 54];

3) сила, которую необходимо приложить, чтобы оторвать пробный магнит от объекта контроля, используемая для оценки потока магнитного поля (например, чтобы измерить толщину неферромагнитного покрытия на ферромагнитном основании) [22, 21, 28, 29, 30, 54];

4) напряжённость магнитного поля, используемая для измерения (другим способом) толщины неферромагнитного покрытия на ферромагнитном основании [22, 21, 28, 29, 30, 54];

5) градиент напряжённости магнитного поля, используемый для выявления дефектов несплошности [22, 21, 28, 29, 30, 54].

Методы магнитного контроля основаны на использовании магнитных полей, создаваемых путём намагничивания контролируемых изделий. К ним относятся:

1. **Индукционный** – информацию о магнитной проницаемости и её изменении в зависимости от напряжённости магнитного поля получают с помощью катушки индуктивности [22, 21, 28, 29, 30, 54]. Применяется преимущественно для обнаружения раковин, непроваров и других скрытых дефектов. Существенным недостатком индукционного метода контроля является его малая чувствительность к поверхностным дефектам типа волосовин, шлаковых включений и т. д.

2. **Магнитопорошковый** – основан на использовании местного изменения магнитной проницаемости, обусловленного дефектом [22, 21, 28, 29, 30, 54]. Информацию о наличии дефекта в поверхностном и подповерхностном слоях ферромагнитного материала получают с помощью магнитного порошка. Этим способом можно выявить как поверхностные, так и внутренние дефекты (резко выраженная структурная неоднородность, дефекты сварочного шва, крупные раковины и включения). Глубина залегания дефекта – не более 2–3 мм от поверхности, размер дефекта – от 0,5–2,5 мм. Частицы магнитного порошка располагаются вдоль линий магнитной индукции поля рассеяния. Вблизи дефекта обнаруживается градиент магнитного поля. Для надежного выявления дефект должен пересекать линии магнитной индукции поля. Чувствительность метода зависит от способа намагничивания, вида и силы тока, глубины залегания дефектов, размера ферромагнитных частиц порошка и т. д.

3. **Магнитографический** – вместо магнитного порошка для регистрации рассеянного магнитного поля применяют магнитную ленту (типа применяемой в магнитофонах, но более широкую). Считывание сигналов о дефектах происходит прибором, датчиком которого служит магнитная головка. Метод позволяет обнаруживать дефекты в более толстом поверхностном слое, но при этом теряется наглядность, присущая магнитопорошковому методу.

4. **Феррозондовый** – датчики типа феррозондов используют для обнаружения полей рассеивания на дефектах и измерения магнитных характеристик материалов.

5. **Метод магнитной памяти (МПП)** – метод неразрушающего контроля, основанный на регистрации и анализе распределения собственных магнитных

полей рассеяния (СМПП) на поверхности изделий с целью определения зон концентрации напряжений, дефектов, неоднородности структуры металла и сварных соединений [29].

Основная задача метода МПМ – определение на объекте контроля наиболее опасных участков и узлов, характеризующихся зонами КН. Затем с использованием, например, УЗД в зонах КН определяется наличие конкретного дефекта. На основе поверочного расчёта на прочность наиболее напряжённых узлов, выявленных методом МПМ, выполняется оценка реального ресурса оборудования.

Магнитная память металла – последствие, которое проявляется в виде остаточной намагниченности металла изделий и сварных соединений, сформировавшейся в процессе их изготовления и охлаждения в слабом магнитном поле или в виде необратимого изменения намагниченности изделий в зонах концентрации напряжений и повреждений от рабочих нагрузок.

Развитие магнитного вида НК происходит по следующим направлениям:

- 1) изыскание способов отстройки от мешающих факторов;
- 2) изучение особенностей магнитных полей изделий сложной формы, содержащих дефекты;
- 3) разработка новых высокочувствительных преобразователей;
- 4) использование потенциальных возможностей эффекта Баркгаузена, а также таких магнитных эффектов, как ядерный, электронный, магнитный резонансы. Эффект Баркгаузена: высокоточное измерение кривой намагничивания $B(H)$ показало, что она имеет скачкообразный характер в области крутого подъёма.

2.3.2. Электрический вид НК

Электрический вид НК основан на регистрации параметров электрического поля, взаимодействующего с контролируемым объектом (это – **электрический метод**), или поля, возникающего в контролируемом объекте в результате внешнего воздействия (**термоэлектрический и трибоэлектрический методы**) [25, 11, 53].

Первичные информативные параметры – электрические ёмкость или потенциал.

Методы:

1. **Ёмкостной** – применяется для контроля диэлектрических или полупроводниковых материалов. По изменению диэлектрической проницаемости, в том числе её реактивной части (диэлектрическим потерям), контролируют химический состав пластмасс, полупроводников, наличие в них несплошностей, влажность сыпучих материалов и другие свойства.

2. **Электрического потенциала** – применяется для контроля проводников. Измеряя падение потенциала на некотором участке, контролируют толщину проводящего слоя, наличие несплошностей вблизи поверхности проводника. Электрический ток огибает поверхностный дефект, по увеличению падения потенциала на участке с дефектом определяют глубину несплошности.

3. **Термоэлектрический** – применяют для контроля химического состава материалов. Например, нагретый до заданной температуры медный электрод прижимают к поверхности изделия и по возникающей контактной разности потенциалов определяют марку стали, титана, алюминия или другого материала, из которого сделано изделие.

4. **Экзоэлектронной эмиссии** – с использованием эмиссии ионов с поверхности изделия под влиянием внутренних напряжений.

5. **Электроискровой** – по параметрам электрического пробоя измеряются характеристики исследуемой среды.

6. **Электростатического порошка** – с помощью наэлектризованного порошка определяют дефекты в диэлектриках.

Развитие метода – интенсивное изучение мало используемых методов:

- 1) экзоэлектронной эмиссии;
- 2) электроискрового;
- 3) электростатического порошка.

2.3.3. Вихретоковый вид НК

Вихретоковый вид НК основан на анализе взаимодействия электромагнитного поля вихретокового преобразователя с электромагнитным полем вихревых токов, наводимых в контролируемом объекте [25, 26, 50].

Практически в дефектоскопии используются вихревые токи с частотой до 1 МГц.

Применяется только для контроля изделий из электропроводящих материалов, в том числе цветных, немагнитных металлов (меди, латуни, алюминия и т. д.) [50]. Контролируются геометрические размеры изделий, определяются химический состав и структура материала изделия, внутренние напряжения, изменения электропроводности металлов и их магнитные свойства, обнаруживаются мельчайшие поверхностные и подповерхностные (на глубине несколько мм) дефекты.

Принцип контроля. Вихревые токи возбуждают в объекте с помощью преобразователя в виде катушки индуктивности, питаемой переменным или импульсным током [50]. Приёмным преобразователем (измерителем) служит та же или другая катушка.

Интенсивность и распределение вихревых токов в объекте зависят:

- от геометрических размеров объекта,
- электрических и магнитных свойств материала объекта,
- наличия в материале несплошностей,
- взаимного расположения преобразователя и объекта.

Это определяет большие возможности метода как средства контроля различных свойств объекта, но в то же время затрудняет его применение, так как при контроле одного параметра другие являются мешающими. Эти параметры нужно разделить.

Первичные информативные параметры – отдельно или совместно измеренные фаза, частота и амплитуда сигнала измерительного преобразователя, контроль сигнала одновременно на нескольких частотах; амплитудно-частотный спектр.

Методы:

1. **Отраженного излучения.**
2. **Прохождения** – возбуждающая и приемная катушки располагаются или с одной стороны, или по разные стороны от контролируемого объекта.

Развитие метода по следующим направлениям:

- 1) изыскание путей контроля изделий сложной конфигурации и многослойных объектов;
- 2) усовершенствование способов отстройки от мешающих параметров;
- 3) разработка многодатчиковых и многочастотных систем для комплексного контроля свойств объекта.

2.3.4. Радиоволновой вид НК

Радиоволновой вид НК основан на регистрации изменений параметров электромагнитных волн радиодиапазона, взаимодействующих с контролируемым объектом [7, 10, 25, 54]. Обычно применяют волны сверхвысокочастотного диапазона (СВЧ) длиной 1–100 мм.

Применяется для контроля изделий из материалов, где радиоволны не очень сильно затухают: диэлектрики (пластмассы, керамика, стекловолокно), магнитодиэлектрики (ферриты), полупроводники, тонкостенные металлические объекты [54].

Первичные информативные параметры – амплитуда, фаза, поляризация, частота, геометрия распространения вторичных волн, время их прохождения и др.

Методы. По характеру взаимодействия с объектом контроля различают методы: прошедшего, отражённого, рассеянного излучения и резонансный.

2.3.5. Тепловой вид НК

Тепловой вид НК основан на регистрации изменений тепловых или температурных полей контролируемых объектов [18, 25, 24, 53].

Применяется для объектов из любых материалов.

Первичные информативные параметры – температура или тепловой поток. Они измеряются контактными или бесконтактными способами. При бесконтактном способе передача теплоты происходит в основном за счёт радиации, т. е. излучения электромагнитных волн в инфракрасной или видимой части спектра в зависимости от температуры объекта. Наиболее эффективное средство бесконтактного наблюдения, регистрации температурных полей и тепловых потоков – сканирующий тепловизор.

Методы. По характеру взаимодействия поля с контролируемым объектом различают методы:

1. **Пассивный**, или собственного излучения, – на объект не воздействуют внешним источником энергии. Измеряют тепловые потоки или температурные поля работающих объектов. Неисправности проявляются в местах повышенного нагрева. Так выявляют места утечки теплоты в зданиях, участки электрических цепей и радиосхем с повышенным нагревом, находят трещины в двигателях и т. д.

2. **Активный** – объект нагревают или охлаждают от внешнего источника контактным или бесконтактным способом, стационарным или импульсным источником теплоты и измеряют температуру или тепловой поток с той же или с другой стороны объекта. Это позволяет обнаруживать несплошности (трещины, пористость, инородные включения) в объектах, изменения в структуре и физико-химических свойствах материалов *по изменению теплопроводности, теплоёмкости, коэффициенту теплоотдачи*. Таким способом выявляют участки с плохой теплопроводностью в многослойных панелях. Неплотное прилегание слоёв и дефекты обнаруживают как участки повышенного или пониженного нагрева поверхности панели.

2.3.6. Оптический вид НК

Оптический вид НК основан на наблюдении или регистрации параметров оптического излучения, взаимодействующего с контролируемым объектом [6, 17, 25, 54].

Применяется очень широко благодаря большому разнообразию способов получения первичной информации.

1. Наружный контроль. Возможность его применения не зависит от материала объекта.

2. Контроль прозрачных объектов. Обнаружение макро- и микродефектов, структурных неоднородностей, внутренних напряжений (по вращению плоскости поляризации).

3. Использование интерференции позволяет с точностью до 0,1 длины волны контролировать сферичность, плоскостность, шероховатость, толщину изделий.

4. Дифракцию применяют для контроля диаметров тонких волокон, толщины лент, форм острых кромок.

Первичные информативные параметры – амплитуда, фаза, степень поляризации, частота или частотный спектр, время прохождения света через объект, геометрия преломления или отражения лучей.

Методы:

1) *по характеру взаимодействия* с контролируемым объектом различают методы: прошедшего, отраженного, рассеянного и индуцированного излучения (индуцированное излучение – оптическое излучение объекта под действием внешнего воздействия, например люминесценция) [54];

2) по способу получения первичной информации различают:

- органолептический визуальный контроль, с помощью которого находят видимые дефекты, отклонения от заданных формы, цвета и т. д.;
- визуально-оптический контроль, проводимый с применением следующих инструментов: луп, микроскопов, эндоскопов, предназначенных для осмотра внутренних полостей; проекционных устройств, необходимых для контроля формы изделий, спроецированных в увеличенном виде на экран.

2.3.7. Радиационный вид НК

Радиационный вид НК основан на регистрации и анализе проникающего ионизирующего излучения после взаимодействия его с контролируемым объектом. Объект «просвечивается» рентгеновским или гамма-излучением, потоками нейтронов, электронов или протонов [23, 25, 49].

Теневое изображение объекта регистрируется на фотоплёнке (рентгенография, нейтронография и пр.) либо на специальном флюоресцирующем или телевизионном экране (рентгеноскопия) с увеличением изображения в необходимых случаях или с применением других способов улучшения наблюдаемости дефектов [49].

Применение. Наиболее широко используются для контроля рентгеновское и гамма-излучение (их можно использовать для контроля изделий из самых различных материалов, подбирая соответствующий частотный диапазон). Чем больше толщина изделия, тем более высокочастотное (более жёсткое) излучение применяют для контроля: рентгеновское, гамма (от распада ядер атомов), жёсткое тормозное (от ускорителя электронов – бетатрона, микротрона, линейного ускорителя). Предельное значение толщины стали, контролируемое с помощью жёсткого тормозного излучения, – около 600 мм.

Первичный информативный параметр – плотность потока излучения: в местах утонений и дефектов плотность прошедшего потока возрастает.

Методы:

1. По характеру взаимодействия с контролируемым объектом основным способом радиационного (рентгеновского и гамма) контроля является **метод прохождения**. Он основан на разном поглощении ионизирующего излучения материалом изделия и дефектом.

2. В зависимости от природы ионизирующего излучения выделяют: **рентгеновский, гамма, бета** (поток электронов), **нейтронный** методы контроля. Находят применение *потоки позитронов*: по степени их поглощения определяют участки объекта, обеднённые или обогащённые электронами.

3. По используемому приёмнику излучения выделяют:

- **радиографический** метод (приёмник излучения – рентгеновская плёнка);
- **радиометрический** метод (приёмник излучения – сканирующий сцинтилляционный счётчик частиц и фотонов);
- **радиоскопический** метод (приёмник излучения – флюоресцирующий экран с последующим преобразованием изображения в телевизионное).

Примечание: все рассмотренные виды контроля (магнитный, электрический, вихрековый, радиоволновой, тепловой, оптический, радиационный) основаны на применении электромагнитного излучения. Частота колебаний повышается от метода к методу.

При контроле *магнитными и электрическими* методами используются постоянные или медленно меняющиеся поля.

Методы *вихрекового* контроля используют частоты от сотен килогерц до частот мегагерцового диапазона.

Методы *радиоволнового* – частота увеличивается до сверхвысокочастотного диапазона от 10^4 до 10^{10} Гц.

В *тепловом контроле* частота излучения и приёма достигает частот инфракрасного излучения от 10^{11} до $4 \cdot 10^{14}$ Гц.

В *оптическом контроле* частота увеличивается до частоты оптического, видимого излучения от $4 \cdot 10^{14}$ до $7,5 \cdot 10^{14}$ Гц.

Рентгеновское и гамма-излучения являются наиболее коротковолновыми из всех рассмотренных выше: частота рентгеновского излучения составляет от $3 \cdot 10^{17}$ до $3 \cdot 10^{20}$ Гц; гамма-излучение происходит на частотах от $3 \cdot 10^{18}$ до $3 \cdot 10^{21}$ Гц (длина волны составляет от 10^{-10} до 10^{-13} м).

2.3.8. Акустический вид НК

Акустический вид НК основан на регистрации параметров упругих волн, возникающих или возбуждаемых в объекте [4, 8, 25, 51, 52].

В отличие от всех ранее рассмотренных методов здесь применяют и регистрируют *не электромагнитные, а упругие волны*, параметры которых тесно

связаны с такими свойствами материалов, как плотность, анизотропия (неравномерность свойств по различным направлениям) и др. Акустические свойства твёрдых материалов и воздуха настолько сильно отличаются, что акустические волны отражаются от микроскопических зазоров (трещин, непроваров, включений из другого материала) шириной от 10^{-6} мм и более, а также от дислокаций, нарушений структуры материала и т. п.

Применяется ко всем материалам, достаточно хорошо проводящим акустические волны: металлам, пластмассам, керамике, бетону и т. д.

Первичные информативные параметры: например, количество сигналов в единицу времени, амплитудно-частотный спектр сигнала, локация места возникновения упругих волн, время задержки прихода отражённого импульса, амплитуда импульса и т. п.

Методы:

1. По используемой частоте различают:

– **ультразвуковые** методы – используют упругие волны в ультразвуковом диапазоне, т. е. с частотой колебаний более 20 кГц. Эти волны возбуждаются и принимаются, как правило, пьезопреобразователями, хотя могут использоваться и другие первичные преобразователи. Учитывая сильное отражение ультразвука от воздушных зазоров, которые появляются вследствие неровности поверхности объекта контроля, для передачи волн от пьезопреобразователя к изделию используют жидкую контактную среду;

– методы, использующие **звуковые** частоты. Для возбуждения волн звукового диапазон, кроме пьезопреобразователей, применяют ударное воздействие, а для приёма – микрофоны.

2. По характеру взаимодействия с объектом различают:

1) пассивные методы – регистрируются упругие волны, возникающие в самом объекте:

– **шумовибрационный** – основан на том, что шумы работающего механизма позволяют судить о его состоянии и даже оценивать характер неисправности (используют микрофоны, анализаторы шума);

– **акустической эмиссии** – использует упругие волны ультразвукового (реже – звукового) диапазона, появляющиеся в результате перестройки структуры материала, вызываемой движением групп дислокаций, возникновением и развитием трещин, аллотропическими превращениями в кристаллической решётке;

2) активные методы:

– **ультразвуковой** – основан на использовании результатов измерения интенсивности пропускаемого контролируемым образцом или отражённого им ультразвукового сигнала. Для контроля используют *стоячие волны* (вынужденные или свободные колебания объекта контроля или его части) и *бегущие волны* по схемам *прохождения или отражения*. Метод используется для обнаружения трещин, раковин и других нарушений сплошности, а также для выявления неоднородностей структуры материала, плотности и других нарушений структуры внутри или на поверхности металлических, пластмассовых, полимерных композиционных материалов и других изделий;

– **методы колебаний** – для измерения толщин (при одностороннем доступе) и контроля свойств материалов (модуля упругости, коэффициента затухания) [51, 52];

– **импедансный** метод – основан на измерении режима колебаний преобразователя, соприкасающегося с объектом. Определяют твёрдость материала изделия, податливость его поверхности (податливость улучшается под влиянием дефектов, близких к поверхности изделия) [51, 52];

– **эхо-метод**, или метод отражения. Посланный ультразвуковой импульс отражается от нижней поверхности объекта или от дефекта, и по амплитуде и времени прихода отражённых импульсов судят о дефекте. Метод очень широко применяется для дефектоскопии металлических заготовок и сварных соединений, контроля структуры металлов, измерения толщины труб и сосудов;

– **метод прохождения** – осуществляется контроль изделий простой формы (листы), оценивается прочность бетона, дерева и др. материалов, в которых прочность коррелирует со скоростью звука [51, 52].

Развитие акустического метода происходит по следующим направлениям:

1) разработка новых способов обработки информации: очень перспективна вычислительная ультразвуковая голография;

2) разработка бесконтактных преобразователей – лазерных возбудителей и приёмников, электромагнитно-акустических преобразователей, основанных на возбуждении колебаний поверхности объекта внешним электромагнитным полем;

3) отстройка от шумов, главным образом связанных с отражением упругих волн от структурных неоднородностей, например границ кристаллов в поликристаллическом материале;

4) применение специфических типов упругих волн в твёрдом теле: поверхностных волн, волн в пластинах и стержнях;

5) разработка средств высокоточного измерения скорости ультразвуковых волн.

2.3.9. НК проникающими веществами

Неразрушающий контроль проникающими веществами основан на проникновении пробных веществ в полость дефектов контролируемого объекта [6, 25, 50, 52].

Применение: для обнаружения слабо видимых невооруженным глазом поверхностных дефектов (капиллярные методы) и выявления сквозных дефектов в перегородках (методы течеискания).

Методы:

1. **Капиллярные** – основаны на капиллярном проникновении в полость дефекта индикаторной жидкости (керосина, скипидара, пенетрантов), хорошо смачивающей материал изделия [50, 52].

2. **Течеискания** – в полость дефекта пробное вещество проникает либо под действием разности давлений, либо под действием капиллярных сил.

К НК проникающими веществами относится *люминесцентный метод*. В его основе лежит возможность видеть свет от люминесцирующих веществ, находящихся в полости дефектов [50, 52]. Метод обладает высокой чувствительностью и во многих случаях является единственно возможным для дефектоскопии немагнитных материалов. С помощью люминесцирующих веществ можно выявить поверхностные трещины шириной около 0,01 мм и глубиной до 0,02–0,03 мм. Если же наносить люминофор на объект, помещённый в вакуум, то можно обнаружить и более мелкие дефекты, так как в вакууме из полости дефектов удаляется воздух, препятствующий заполнению их люминофором. Люминесцентный метод находит применение во многих отраслях производства, но особенно успешно его используют для контроля качества поверхностей закалённых и шлифованных изделий, например режущего инструмента [50, 52].

2.3.10. Виброакустический вид НК

Вид неразрушающего контроля, основанный на регистрации параметров виброакустического сигнала, возникающего при работе контролируемого объекта, называют виброакустическим [25, 40, 43, 47, 55, 57].

Виброакустический метод – метод неразрушающего контроля, основанный на измерении, регистрации и анализе параметров виброакустических колебаний, возникающих при работе контролируемого объекта [25].

Механическими колебаниями называют движение точки или механической системы, при котором происходят колебания характеризующих его скалярных величин [25].

Акустическими называют колебания упругой среды, формирующие упругие волны, возбуждаемые соударением деталей, трением, процессами протекания жидкости или газа [25].

Виброакустическими колебаниями называют механические колебания (вибрационные, акустические, гидрогазоакустические), сопровождающие функционирование объекта [25].

Виброакустическим сигналом называют физическую величину, характеризующую виброакустические колебания [25].

Виброакустическая диагностика – раздел технической диагностики, изучающий и устанавливающий признаки дефектов и неисправностей технических объектов, а также методы и средства обнаружения и поиска (указания местоположения) дефектов и неисправностей на основе анализа параметров *виброакустического сигнала* [47, 57].

Контрольные вопросы

1. Дайте определение понятия «вид неразрушающего контроля».
2. Сколько всего видов НК существует? Перечислите их.
3. Дайте определение понятия «метод неразрушающего контроля».
4. В каком нормативном документе описаны виды НК?
5. Охарактеризуйте акустический неразрушающий контроль.
6. Охарактеризуйте виброакустический неразрушающий контроль.
7. Охарактеризуйте вихретоковый неразрушающий контроль.

8. Охарактеризуйте магнитный неразрушающий контроль.
9. Охарактеризуйте неразрушающий контроль проникающими веществами.
10. Охарактеризуйте оптический неразрушающий контроль.
11. Охарактеризуйте радиационный неразрушающий контроль.
12. Охарактеризуйте радиоволновой неразрушающий контроль.
13. Охарактеризуйте тепловой неразрушающий контроль.
14. Охарактеризуйте электрический неразрушающий контроль.
15. По каким признакам подразделяют на методы каждый из видов контроля?
16. Охарактеризуйте признак «характер взаимодействия поля или вещества с объектом».
17. Охарактеризуйте признак «первичный информативный параметр».
18. Охарактеризуйте признак «способ получения первичной информации».

3. ДЕФЕКТЫ

3.1. Основные виды дефектов

Одним из путей предотвращения нежелательных последствий от эксплуатации изделий с дефектами является систематичное использование методов НК и ТД. **Дефектом**, согласно нормативно-технической документации (ГОСТ 15467–79) [2], называется каждое отдельное несоответствие продукции требованиям.

Напомним, что согласно ГОСТ Р 27.002–2015 (п. 3.4.2) **дефект (*defect*)** – это каждое отдельное несоответствие объекта требованиям, установленным документацией [25].

По ГОСТ Р 27.002–2015 (п. 3.4.3) **повреждение (*degraded state*)** – это событие, заключающееся в нарушении исправного состояния объекта при сохранении работоспособного состояния [25].

Дефект и (или) повреждение могут служить причиной возникновения частичного или полного отказа объекта.

Наличие дефекта и (или) повреждения приводит объект в неисправное состояние.

Согласно ст. 3.6.3 ГОСТ Р ИСО 9000–2011 (п. 3.6.3) **дефект** – это невыполнение требования, связанного с предполагаемым или установленным использованием [31].

Под **несоответствием (*nonconformity*)** [31] понимают невыполнение **требования (*requirement*)**, т. е. документально изложенного критерия, который должен быть выполнен, если требуется соответствие документу, и по которому не разрешены отклонения.

Примечания:

1. Различие между понятиями «дефект» и «несоответствие» является важным, так как имеет подтекст юридического характера, особенно связанный с вопросами ответственности за качество продукции. Следовательно, термин «дефект» следует использовать чрезвычайно осторожно.

2. Использование, предполагаемое потребителем, может зависеть от характера информации, такой как инструкции по использованию и техническому обслуживанию, предоставляемые поставщиком.

Однако в практике применения средств НК и ТД нет полного соответствия понятия «дефект» определению по ГОСТ. Обычно под дефектом понимают отклонение параметра от требований проектно-конструкторской документации,

выявленное средствами НК и ТД. Связь такого понятия с определением по ГОСТ устанавливается путём разделения дефектов на *допустимые* требованиям нормативно-технической документации и *недопустимые*.

Обобщая, здесь и далее под *дефектом* будем понимать физическое проявление изменения характеристик объекта контроля с параметрами, превышающими нормативные требования.

По происхождению дефекты подразделяют:

– на производственно-технологические, возникающие в процессе проектирования и изготовления изделия и его ремонта (сварка, пайка, склеивание, клёпка, механическая, термическая и другие виды обработки, нанесение гальванических покрытий и др.), монтажа и установки [59, 61, 63, 64];

– эксплуатационные, возникающие после некоторой наработки изделия в результате процессов деградации, усталости металла деталей, коррозии, изнашивания и т. д., а также в результате неправильного технического обслуживания и эксплуатации [59, 61, 63, 64].

В дальнейшем, говоря о дефектах, выявляемых средствами и методами НК и ТД, будем иметь в виду эксплуатационные и производственно-технологические дефекты, не выявленные при изготовлении и сдаче систем в эксплуатацию.

Дефекты подразделяют на *явные, скрытые, критические, значительные* и *малозначительные, исправимые* и *неисправимые*.

Явные поверхностные дефекты выявляют глазом, а внутренние, *скрытые* и поверхностные, не различимые глазом, – специальными средствами [2]. Выявленные дефекты в зависимости от возможного влияния их на свойства детали могут быть критическими, значительными и малозначительными. При классификации учитывают характер, размеры, место расположения дефекта на детали, особенности деталей и изделий, их назначение, условия использования (эксплуатации).

Критическим называется дефект, при наличии которого использование продукции по назначению невозможно или исключается из-за несоответствия требованиям безопасности или надёжности; *значительным* – дефект, который существенно влияет на использование продукции по назначению и (или) на её долговечность, но не является критическим; *малозначительным* – дефект, который не оказывает существенного влияния на использование продукции по назначению [2].

3.2. Виды объектов и их дефектов

В зависимости от объекта вся совокупность объектов и систем может быть разбита на группы, для которых характерны однотипные дефекты:

- силовые металлоконструкции (стрелы грузоподъемных машин, установщиков, несущие форменные конструкции, силовые элементы агрегатов обслуживания);

- сосуды, теплообменные аппараты, трубопроводы (сосуды и емкости, влагомаслоотделители и холодильники компрессорных установок, теплообменные аппараты, камеры нейтрализации, магистрали газов и жидкостей и др.);

- механизмы и машинное оборудование (гидроприводы, редукторы, насосы, компрессоры, вентиляторы и приводные электродвигатели, дизельные электростанции);

- трубопроводы, корпуса систем под давлением, парогенераторы, системы газогидроснабжения;

- контрольно-измерительные приборы (КИП) и автоматика, оборудование систем управления;

- кабельное оборудование (силовые кабели, измерительные кабели, кабели систем управления, кабели связи);

- электронное оборудование;

- оборудование электроснабжения (трансформаторы, коммутационная аппаратура);

- объекты, содержащие радиоактивные вещества, активность которых определяется без разрушения исходных матриц;

- конструкции строительных сооружений.

Рассмотрим некоторые наиболее характерные дефекты приведённых систем.

Для силовых металлоконструкций характерны:

- литейные дефекты (рыхлота, пористость, ликвационные зоны, дендритная ликвация, зональная ликвация, подусадочная ликвация, газовые пузыри или раковины, песчаные и шлаковые раковины, металлические и неметаллические включения, утяжины, плены, спаи, горячие, холодные и термические трещины);

- дефекты прокатанного и ковального металла (трещины, флокены, волосовины, расслоения, внутренние разрывы, рванины, закаты и заковы, плены);

– дефекты сварных соединений (трещины в наплавленном металле, холодные трещины, микротрещины в шве, надрывы, трещины, образующиеся при термообработке, рихтовочные трещины, непровары, поры и раковины, шлаковые включения);

– дефекты, возникающие при обработке деталей (закалочные и шлифовочные трещины, надрывы);

– дефекты, возникающие при эксплуатации изделий (усталостные трещины, коррозионные повреждения, трещины, образующиеся в результате однократно приложенных высоких механических напряжений, механические повреждения поверхности).

Флокены (нем. Flocken – букв. хлопья) – дефекты внутреннего строения стали в виде серебристо-белых пятен (в изломе) или волосовин (на протравленных шлифах). Встречаются главным образом в катаных или кованных изделиях; обусловлены повышенным содержанием водорода.

Ликвационные зоны – неравномерность химического состава металла в теле отливки.

Для сосудов, теплообменных аппаратов, трубопроводов характерны производственно-технологические и эксплуатационные дефекты. Помимо этого для данной группы оборудования характерны негерметичности соединений, приводящие к утечкам рабочих сред, уменьшение проходных сечений в результате отложений на стенках продуктов коррозии и накипи. Важнейшим параметром, определяющим долговечность и надежность эксплуатации нефтегазовых труб различных диаметров, является толщина антикоррозийного трехслойного полиэтиленового покрытия.

Для механизмов и машинного оборудования характерны износ и поломка деталей, повреждение уплотнений, сопровождающиеся утечкой рабочих жидкостей, местным аномальным нагревом частей оборудования, посторонним шумом, повышенной вибрацией.

Для КИП и автоматики, оборудования систем управления характерны выход из строя отдельных блоков и приборов, нарушение электрического контакта, уменьшение сопротивления и пробой изоляции.

Для кабельного оборудования характерны уменьшение сопротивления изоляции, старение изоляции, обрыв жил кабеля, возгорание изоляции и др.

Для электронного оборудования характерны выход из строя блоков и отдельных элементов.

Для оборудования электроснабжения характерны залипания контактов, выход из строя концевых выключателей и приводов межсекционных выключателей.

Для конструкций строительных сооружений характерны такие дефекты, как трещины, раковины, несплошности бетона, дефекты армирования бетона, разрушение фундаментов и оснований и т. д.

Для объектов с радиоактивными веществами под дефектами можно понимать уровни активности, превышающие допустимые нормы. Таким образом, для каждой из групп оборудования можно составить перечень методов НК и перечень приборов и технологий их применения для реализации этих методов.

Влияние дефектов на прочность объектов. Дефекты типа нарушений сплошности металла являются следствием несовершенства его структуры и возникают на разных стадиях технологического процесса. К дефектам тонкой структуры относят дислокации – особые зоны искажений атомной решётки. Прочность деталей резко падает при определённом числе дислокаций в единице объёма кристалла. Субмикроскопические трещины (размером порядка нескольких микрометров) образуются в процессе обработки детали (например, шлифования) и резко снижают её прочность, особенно при работе в условиях сложного напряжённого состояния или воздействия поверхностно-активных сред. Если повреждённый поверхностный слой удалить, например, путём электролитического растворения, то прочность детали существенно повышается. Наиболее грубыми дефектами являются макроскопические, в ряде случаев видимые невооружённым глазом дефекты, представляющие собой нарушения сплошности или однородности металла, особенно резко снижающие прочность детали. Эти дефекты образуются в металле вследствие несовершенства технологического процесса и низкой технологичности многокомпонентных сплавов, при обработке которых требуется особенно точно соблюдать режимы технологического процесса на каждом этапе.

Дефекты, возникающие при изготовлении объектов. Встречающиеся в металлических изделиях и полуфабрикатах дефекты различают по размерам и расположению, а также по природе их происхождения. Они могут образоваться в процессе плавки и литья (раковины, поры, зоны рыхлоты, включения, ликвационные зоны, горячие трещины, неслитины и т. д.); обработки давлением (внутренние и поверхностные трещины, расслоения, пресс-утяжины, рванины, заковы, закаты, плены, флокены и т. д.); термической и химико-термической об-

работки (зоны грубозернистой структуры, перегрева и пережога, термические трещины, несоответствующие заданному значению толщины закалённого, цементованного, азотированного и других слоев, а также толщины слоя гальванического покрытия и т. д.); механической обработки (шлифовочные трещины, прижоги); сварки, пайки, склеивания (непровар, трещины, непропай, непроклеи); хранения и эксплуатации (коррозионные поражения, усталостные трещины, трещины термической усталости, ползучести). Для указанных дефектов характерен один общий признак: они вызывают изменение физических характеристик материала, таких как удельная электрическая проводимость, магнитная проницаемость, коэффициент затухания упругих колебаний, плотность, коэффициент ослабления излучений и т. д.

Дефекты, возникающие при эксплуатации объектов. Дефекты, возникающие при эксплуатации объектов, относятся к эксплуатационным и предполагают возможность их постоянного развития под действием рабочих нагрузок (температуры, давления, агрессивности среды, динамических особенностей и т. п.). Эксплуатационные дефекты имеют большое разнообразие при зарождении (например, коррозионные или связанные с дислокационными процессами и потерей пластичности металла). Однако они всегда приводят к зарождению и развитию трещин с последующим разрушением объекта. Эксплуатационные дефекты относятся к наиболее опасным.

Контрольные вопросы

1. Поясните термины «дефект» и «повреждение».
2. Какие типы дефектов существуют?
3. Виды дефектов по характеру проявления и обнаружения.
4. Какие виды дефектов характерны для силовых металлоконструкций?
5. Какие виды дефектов характерны для сосудов, теплообменных аппаратов, трубопроводов и т. д.?
6. Какие виды дефектов характерны для механизмов и машинного оборудования?
7. Каким образом дефекты влияют на прочность объектов?
8. Какие дефекты возникают при изготовлении металлических изделий и полуфабрикатов?
9. Какие дефекты возникают при эксплуатации объектов?

4. ХАРАКТЕРИСТИКИ НАДЕЖНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

4.1. Отказ

По ГОСТ Р 27.002–2015 (п. 3.4.1) **отказ** (*failure*) – это событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния объекта [25].

Понятие отказа и представление плотности распределения ресурса являются основополагающими для характеристик безотказности и долговечности объекта.

Отказ может быть полным или частичным.

Полный отказ характеризуется переходом объекта в неработоспособное состояние.

Частичный отказ характеризуется переходом объекта в частично неработоспособное состояние.

Отказ приводит к полной или частичной утрате работоспособности объекта в процессе его эксплуатации, т. е. нарушаются основные параметры, характеризующие его нормальную работу. Сборочные единицы или детали, вызывающие отказ или неисправность объекта, называют *дефектными*.

Критерий отказа – отличительный признак или совокупность признаков, согласно которым устанавливается факт возникновения отказа [25].

По типу отказы подразделяются:

- на **отказы функционирования** (выполнение основных функций объектом прекращается, например поломка зубьев шестерни);
- **отказы параметрические** (некоторые параметры объекта изменяются в недопустимых пределах, например потеря точности станка).

По своей природе отказы могут быть [46]:

- **случайные**, обусловленные непредусмотренными перегрузками, дефектами материала, ошибками персонала или сбоями системы управления и т. п. [46];
- **систематические**, обусловленные закономерными и неизбежными явлениями, вызывающими постепенное накопление повреждений: усталость, износ, старение, коррозия и т. п. [46].

Основные признаки классификации отказов:

- характер возникновения;
- причина возникновения;
- характер устранения;
- последствия отказов;
- дальнейшее использование объекта;
- лёгкость обнаружения;
- время возникновения.

Рассмотрим подробнее каждый из классификационных признаков.

Характер возникновения:

- *внезапный отказ* – отказ, проявляющийся в резком (мгновенном) изменении характеристик объекта;
- *постепенный отказ* – отказ, происходящий в результате медленного, постепенного ухудшения качества объекта.

Различают следующие виды отказов: частичные, полные, ресурсные, нересурсные, приработочные, износные.

При внезапном отказе, например, автомобиль подвергают контролю, диагностируют в целях выявления места отказа и его устранения. К такому виду отказов относятся трещины блока, головки блока цилиндров двигателя, поломка пружины клапанного механизма, выход из строя редуционного или предохранительного клапана смазочной системы, появление подсоса воздуха во впускном воздушном тракте и др.

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

В процессе технического обслуживания машин обычно измеряют параметры состояния, обуславливающие постепенные отказы. Это относится к таким параметрам, как расход газов, прорывающихся в картер, эффективная мощность двигателя и расход топлива, тепловой зазор механизма газораспределения, подача масляного насоса, износ подшипников качения, шестерён и т. д.

Постепенные отказы связаны с износом деталей и старением материалов.

Причина возникновения:

- *конструкционный отказ*, вызванный недостатками и неудачной конструкцией объекта;
- *производственный отказ*, связанный с ошибками при изготовлении объекта по причине несовершенства или нарушения технологии;
- *эксплуатационный отказ*, вызванный нарушением правил эксплуатации.

Характер проявления:

- *устойчивый отказ*;
- *перемежающийся отказ* (возникающий/исчезающий).

Последствия отказа:

- *лёгкий отказ* (легкоустранимый);
- *средний отказ* (не вызывающий отказы смежных узлов – вторичные отказы);
- *тяжёлый отказ* (вызывающий вторичные отказы или приводящий к угрозе жизни и здоровью человека).

Дальнейшее использование объекта:

- *полные отказы*, исключающие возможность работы объекта до их устранения;
- *частичные отказы*, при которых объект может частично использоваться.

Лёгкость обнаружения:

- *очевидные (явные) отказы*;
- *скрытые (неявные) отказы*.

Время возникновения:

- *прирабочные отказы*, возникающие в начальный период эксплуатации;
- *отказы при нормальной эксплуатации*;
- *износные отказы*, вызванные необратимыми процессами износа деталей, старения материалов и пр.

Достижение параметрами состояния совокупности одноименных объектов предельного значения, обуславливающего исчерпание их технического ресурса, можно графически представить в виде плотности распределения ресурса. В случае реализации параметра (изменения параметра конкретного объекта) в виде ломаной кривой пучок будет состоять из переплетающихся в большей или меньшей степени линий. По абсолютному значению параметры состояния

в процессе эксплуатации могут увеличиваться или уменьшаться. В этой связи различают параметры с верхним, нижним и двухсторонними пределами изменения (рис. 4.1).

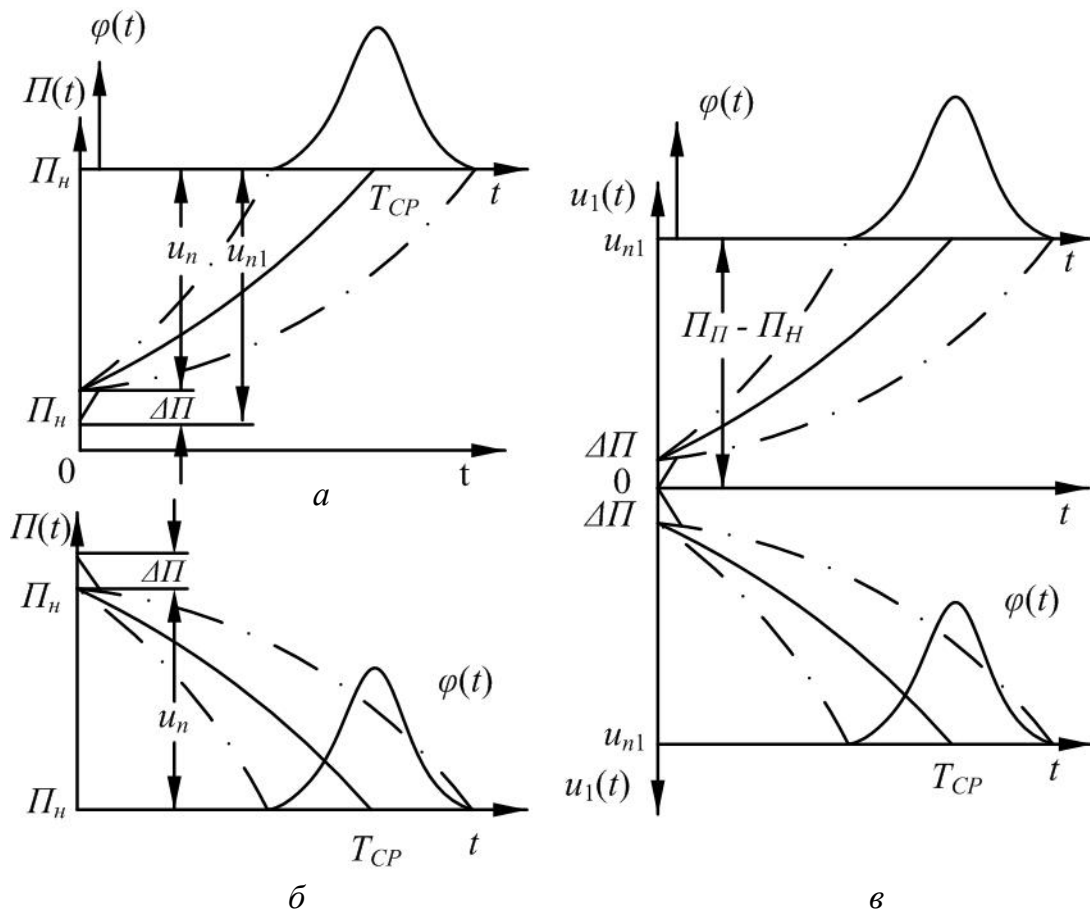


Рис. 4.1. Параметры состояния с верхним (а), нижним (б) и двухсторонним (в) пределами отклонения

4.2. Основные понятия надёжности

Для оценки технического состояния машины важное значение имеет такой показатель, как эксплуатационная надёжность [46].

Надёжность (ependability) (ГОСТ Р 27.002–2015, п. 3.1.5) – это свойство объекта сохранять во времени способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, хранения и транспортирования [25].

Надёжность – одно из важнейших свойств, характеризующих качество изделия (объекта) [46].

Слова «во времени» означают естественный ход времени, в течение которого имеет место применение, техническое обслуживание, хранение и транспортирование объекта, а не какой-либо конкретный интервал времени.

Надёжность является комплексным свойством, которое в зависимости от назначения изделия, технического устройства и условий его применения может включать в себя безотказность, ремонтпригодность, восстанавливаемость, долговечность, сохраняемость, готовность, ресурс, наработку до отказа или определенные сочетания этих свойств.

Требуемые функции и критерии их выполнения устанавливаются в нормативной, конструкторской, проектной, контрактной или иной документации на объект (далее – документации).

Критерии выполнения требуемых функций могут быть установлены, например, заданием для каждой функции набора параметров, характеризующих способность её выполнения, и допустимых пределов изменения значений этих параметров. В этом случае надёжность можно определить, как свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих его способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, хранения и транспортирования [25, 46]. Аналогичным образом в этом случае могут быть определены и термины 3.1.6, 3.1.7, 3.1.9–3.1.11.

Надёжность изделия характеризуется его безотказностью, долговечностью, ремонтпригодностью и сохраняемостью.

Безотказность (*reliability*) (ГОСТ Р 27.002–2015, п. 3.1.6) – это свойство объекта непрерывно сохранять способность выполнять требуемые функции в течение некоторого времени или наработки в заданных режимах и условиях применения. Характеризуется частотой появления отказов [25].

При оценке продолжительности обнаружения причин отказов, повреждения и устранения их последствий путём проведения ремонта и технического обслуживания можно определить ремонтпригодность объекта.

Ремонтпригодность (*maintainability*) (ГОСТ Р 27.002–2015, п. 3.1.7) – это свойство объекта, заключающееся в его приспособленности к поддержанию и восстановлению состояния, в котором объект способен выполнять требуемые функции, путём технического обслуживания и ремонта [25].

Восстанавливаемость (*recoverability*) (ГОСТ Р 27.002–2015, п. 3.1.8) – это свойство объекта, заключающееся в его способности восстанавливаться после отказа без ремонта [25].

Для восстановления могут требоваться или не требоваться внешние воздействия. Для случая, когда внешние воздействия не требуются, может использоваться термин «самовосстанавливаемость».

Долговечность (*durability*) (ГОСТ Р 27.002–2015, п. 3.1.9) – это свойство объекта, заключающееся в его способности выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях использования, технического обслуживания и ремонта до достижения предельного состояния [25].

Долговечность – свойство объекта (изделия, машины и т. д.) сохранять работоспособность до наступления предельного состояния с необходимыми перерывами для технического обслуживания и ремонта.

Долговечность машин закладывается при их проектировании и конструировании, обеспечивается в процессе производства и поддерживается в процессе эксплуатации. Таким образом, на долговечность влияют конструкционные, технологические и эксплуатационные факторы, которые по степени своего воздействия позволяют классифицировать долговечность на три вида: требуемую, достигнутую и действительную.

Требуемая долговечность задаётся техническим заданием на проектирование, определяется достигнутым уровнем развития техники в данной отрасли.

Достигнутая долговечность обуславливается совершенством конструкторских расчётов и технологических процессов изготовления.

Действительная долговечность характеризует фактическую сторону использования машины потребителем.

В большинстве случаев требуемая долговечность больше достигнутой, а последняя больше действительной. В то же время не редки случаи, когда действительная долговечность машин превышает достигнутую. Например, при норме пробега до капитального ремонта (КР), равной 120 тыс. км, некоторые водители при умелой эксплуатации автомобиля достигли пробега без капитального ремонта 400 тыс. км и более.

Действительная долговечность подразделяется на *физическую, моральную* и *технико-экономическую*.

Физическая долговечность определяется физическим износом детали, узла, машины до их предельного состояния. Для агрегатов определяющим является физический износ базовых деталей (у двигателя – блок цилиндров, у коробки передач – картер и др.).

Моральная долговечность характеризует срок службы, за пределами которого использование данной машины становится экономически нецелесообразным ввиду появления более производительных новых машин.

Технико-экономическая долговечность определяет срок службы, за пределами которого проведение ремонтов данной машины становится экономически нецелесообразным.

Основными показателями долговечности технических устройств являются технический *ресурс* и *срок службы*.

Срок службы (*useful life*) (ГОСТ Р 27.002–2015, п. 3.3.6) – это календарная продолжительность эксплуатации от начала эксплуатации объекта или её возобновления после капитального ремонта до момента достижения предельного состояния [25].

Ресурс (*operating life*) (ГОСТ Р 27.002–2015, п. 3.3.4) – это суммарная наработка объекта от начала его эксплуатации или её возобновления после ремонта до момента достижения предельного состояния [25].

Другими словами, **ресурс** – это наработка от начала эксплуатации нового или капитально отремонтированного объекта (изделия, машины и т. д.) (или его составной части) до наступления предельного состояния, оговорённого в технической документации.

Эти показатели для конкретных видов технических устройств могут быть выражены в виде средних значений ресурсов и сроков службы отдельно до капитального ремонта, между капитальными ремонтами и до списания технического устройства.

При наличии данных о ресурсе (сроке службы) N объектов статистическая оценка среднего ресурса T_p (среднего срока службы) определяется по формуле

$$T_p = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_{pi}, \quad (4.1)$$

где t_{pi} – ресурс i -го объекта.

Сохраняемость (*storability*) (ГОСТ Р 27.002–2015, п. 3.1.10) – это свойство объекта сохранять способность к выполнению требуемых функций после хранения и (или) транспортирования при заданных сроках и условиях хранения и (или) транспортирования [25].

Готовность (*availability*) (ГОСТ Р 27.002–2015, п. 3.1.11) – это свойство объекта, заключающееся в его способности находиться в состоянии, в котором он может выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания и ремонта в предположении, что все необходимые внешние ресурсы обеспечены [25].

Готовность зависит от свойств безотказности, ремонтпригодности и восстанавливаемости объекта.

4.3. Параметры надёжности, связанные с временем

Наработка (*operating time*) (ГОСТ Р 27.002–2015, п. 3.3.1) – это продолжительность или объём работы объекта [25].

Наработка может быть как непрерывной величиной (продолжительность работы в часах, километраж пробега и т. п.), так и дискретной величиной (число рабочих циклов, запусков и т. п.).

Наработка до отказа (*(operating) time to failure*) (ГОСТ Р 27.002–2015, п. 3.3.2) – это наработка объекта от начала его эксплуатации или от момента его восстановления до отказа [25].

Частным случаем наработки до отказа является наработка до первого отказа – наработка объекта от начала его эксплуатации до первого отказа.

Наработка между отказами (*(operating) time between failures*) (ГОСТ Р 27.002–2015, п. 3.3.3) – это наработка объекта между двумя следующими друг за другом отказами [25].

Наработка между отказами есть частный случай наработки до отказа, применимый только к восстанавливаемым объектам.

Наработка – продолжительность или объём работы технического устройства или изделия. Отклонение параметра состояния объекта от номинального значения, в частности износ детали, под действием первой группы факторов в постоянных эксплуатационных условиях характеризуется гладкой возрастающей (выпуклой или вогнутой) кривой. Если взять не одно изделие, а несколь-

ко, то получим совокупность возрастающих кривых, отличающихся одна от другой скоростью изменения параметра. Такую совокупность кривых обычно получают в результате заводских или лабораторных испытаний объектов, работающих при постоянном режиме.

Средняя наработка до отказа есть математическое ожидание наработки объекта до первого отказа.

Статистически **средняя наработка до отказа** определяется отношением суммы наработки испытуемых объектов до отказа к числу наблюдаемых объектов, если они все отказали за время испытаний [46]:

$$T_1 = \frac{\sum_{i=1}^{N_1} t_i}{N_1}, \quad (4.2)$$

где t_i – наработка i -го объекта до первого отказа;

N_1 – число отказавших объектов.

Оценка средней наработки до отказа зависит от плана испытаний и закона распределения наработки до отказа.

Для *восстанавливаемого* объекта наработка на отказ есть отношение наработки к математическому ожиданию числа его отказов в течение этой наработки. Статистически наработка на отказ определяется отношением суммарной наработки восстанавливаемых объектов к суммарному числу отказов этих объектов [46]:

$$T = \frac{\sum_{i=1}^N t_i}{\sum_{i=1}^N r_i}, \quad (4.3)$$

где t_i – наработка i -го объекта за период наблюдений;

r_i – число отказов i -го объекта за период наблюдений.

Остаточный ресурс (*residual operating life*) (ГОСТ Р 27.002–2015, п. 3.3.5) – это суммарная наработка объекта от момента контроля его технического состояния до момента достижения предельного состояния [25].

Для парка объектов определяют γ -процентный ресурс, т. е. ресурс, который имеет или будет иметь обусловленное число (γ процентов) объектов дан-

ного типа. Обусловленный процент объектов γ является регламентированной вероятностью числа объектов с указанным техническим ресурсом.

Гамма-процентный ресурс $T_{p\gamma}$ представляет собой наработку, в течение которой объект не достигает предельного состояния с заданной вероятностью. Заданный процент объектов является регламентированной вероятностью. Если $\gamma = 90 \%$, то соответствующий ресурс следует называть 90%-м.

Гамма-процентный ресурс определяется из уравнения

$$1 - Q(t) = \gamma / 100, \quad (4.4)$$

где $Q(t)$ – функция распределения ресурса или зависимость вероятности появления отказов от наработки t ;

γ – заданный процент объектов;

Гамма-процентный ресурс является квантилем вероятности отказа.

Назначенный ресурс (*assigned operating life*) (ГОСТ Р 27.002–2015, п. 3.3.11) – это суммарная наработка, при достижении которой эксплуатация объекта может быть продолжена только после принятия решения о возможности продления данного показателя [25].

Данный показатель не является показателем надёжности.

На рис. 4.2 приведена графическая интерпретация перечисленных показателей, т. е. фактически интервалы жизненного цикла изделия, при этом:

$t_0 = 0$ – начало эксплуатации;

t_1, t_5 – моменты отключения по технологическим причинам;

t_2, t_4, t_6, t_8 – моменты включения объекта;

t_3, t_7 – моменты вывода объекта соответственно в средний и капитальный ремонт;

t_9 – момент прекращения эксплуатации;

t_{10} – момент отказа объекта.

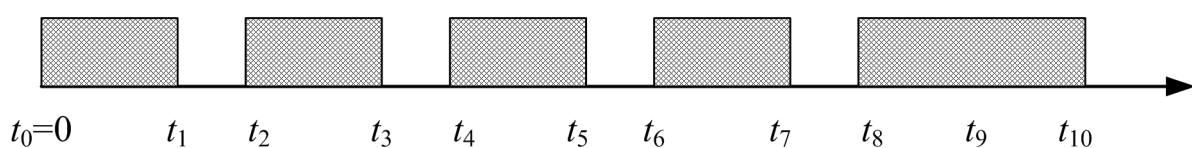


Рис. 4.2. Интервалы жизненного цикла изделия

Технический ресурс (наработка до отказа):

$$TP = t_1 + (t_3 - t_2) + (t_5 - t_4) + (t_7 - t_6) + (t_{10} - t_8).$$

Назначенный ресурс:

$$TH = t_1 + (t_3 - t_2) + (t_5 - t_4) + (t_7 - t_6) + (t_9 - t_8).$$

Срок службы объекта:

$$TC = t_{10}.$$

Средний ресурс T_{cp} – математическое ожидание ресурса.

Отличительная особенность показателей средней наработки до отказа от среднего ресурса заключается в том, что первый показатель относится к объекту, восстанавливаемому после отказа без капитального ремонта. Например, отказ форсунок дизеля не ведёт к его капитальному ремонту. Средний же ресурс относится к объекту, отказ которого обуславливает предельное состояние, т. е. проведение капитального ремонта.

Техническое состояние машины изменяется в зависимости от наработки или времени работы.

Различают ресурсы объекта: до первого капитального ремонта; между капитальными ремонтами; полный технический ресурс и остаточный.

Кроме фактических и нормативных значений срока службы и технического ресурса применяют также понятия гарантийных сроков службы и ресурса, т. е. в течение которых завод-изготовитель гарантирует исправность объекта и несёт материальную ответственность за возникшие неисправности при условии соблюдения правил эксплуатации и технического обслуживания.

Срок сохраняемости (*storing life*) (ГОСТ Р 27.002–2015, п. 3.3.7) – это календарная продолжительность хранения и/или транспортирования объекта, в течение которой он сохраняет работоспособное состояние [25].

Время (продолжительность) ремонта (*repair time*) (ГОСТ Р 27.002–2015, п. 3.3.8) – это время, затрачиваемое непосредственно на выполнение операций по ремонту объекта [25].

Время ремонта исключает технические, организационные задержки, а также задержки из-за обеспечения материальными ресурсами.

Время восстановления (*restoration time*) (ГОСТ Р 27.002–2015, п. 3.3.9) – это время, затрачиваемое непосредственно на выполнение операций по восстановлению объекта [25].

Время до восстановления (*time to restoration*) (ГОСТ Р 27.002–2015, п. 3.3.10) – это время от момента отказа до восстановления работоспособного состояния объекта [25].

Если момент отказа определить невозможно, время отсчитывается от момента обнаружения отказа.

Назначенный срок службы (*assigned useful life*) (ГОСТ Р 27.002–2015, п. 3.3.12) – это календарная продолжительность, при достижении которой эксплуатация объекта может быть продолжена только после принятия решения о возможности продления данного показателя [25].

Данный показатель не является показателем надёжности.

Назначенный срок хранения (*assigned storing life*) (ГОСТ Р 27.002–2015, п. 3.3.13) – это календарная продолжительность, при достижении которой хранение объекта может быть продолжено только после принятия решения о возможности продления данного показателя [25].

Данный показатель не является показателем надёжности.

4.4. Статистические показатели надёжности

Вероятность безотказной работы $P(t)$ есть вероятность того, что в пределах заданной наработки отказ объекта не возникает [46]. Статистически *вероятность безотказной работы* можно определить отношением числа объектов, безотказно проработавших до момента времени t , к числу объектов, работоспособных в начальный момент времени [46]:

$$P(t) = \frac{N(t)}{N}, \quad (4.5)$$

где $N(t)$ – число объектов, безотказно проработавших до момента времени t ;

N – число объектов, взятых под наблюдение.

В начальный момент времени (перед испытаниями) все объекты являются исправными, т. е. выполняется равенство $N(t) = N, P(t) = 1$.

Если испытания проводятся до отказа всех N объектов, то в конце испытаний $N(t) = 0; P(t) = 0$.

Следовательно, вероятность безотказной работы в течение конечных интервалов времени может иметь значения $0 \leq P(t) \leq 1$.

Из теории вероятностей следует, что вероятность суммы двух несовместимых противоположных событий равна единице:

$$P(t) + Q(t) = 1, \quad (4.6)$$

где $Q(t)$ – вероятность отказа.

Отсюда

$$Q(t) = 1 - P(t) = 1 - \frac{N(t)}{N} = \frac{N - N(t)}{N}, \quad (4.7)$$

где $N - N(t)$ – число отказавших объектов к моменту времени t .

С увеличением наработки вероятность безотказной работы уменьшается, а вероятность отказа возрастает. На рис. 4.3 оба графика характеризуют распределение случайного времени безотказной работы. Однако кривая $Q(t)$ показывает вероятность того, что в течение времени t отказ наступит, а кривая $P(t)$ позволяет найти вероятность того, что отказа за время t не произойдет.

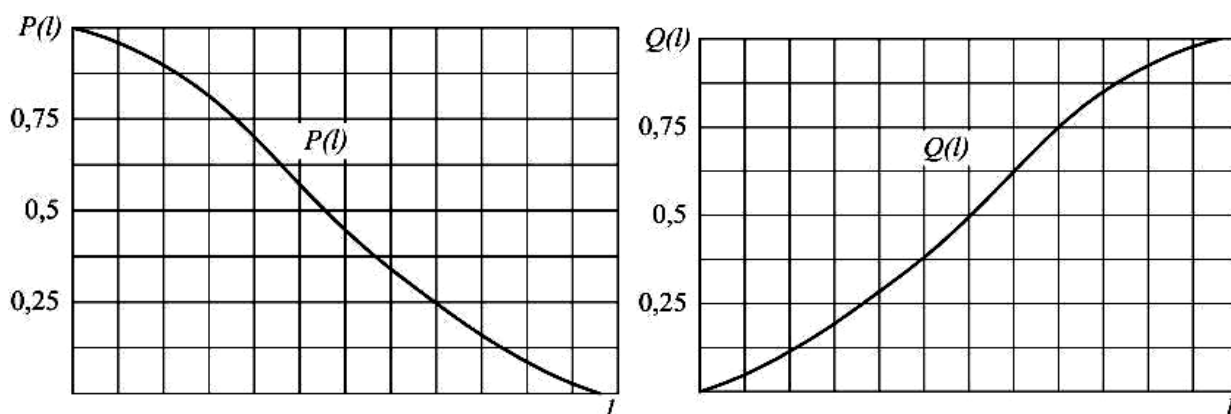


Рис. 4.3. Изменение вероятности безотказной работы $P(t)$ и вероятности появления отказов $Q(t)$ от наработки t

Надёжность, являясь комплексным свойством объекта выполнять определенные задачи в определенных условиях эксплуатации, характеризуется рядом таких свойств, как

безотказность – свойство объекта непрерывно сохранять работоспособность [38];

безаварийность – свойство объекта не достигать в ходе длительной эксплуатации предельных состояний при преднамеренных или непреднамеренных внешних воздействиях [38];

безопасность – свойство объекта не допускать аварий и ситуаций, опасных для людей и окружающей среды [38].

Количественными оценками этих показателей являются соответствующие вероятности безотказной (безаварийной, безопасной) работы $P_i(t)$ на интервале времени $(0, t)$ при условии, что отказ (авария, опасная ситуация) не произойдет. Вероятность $P_i(t)$ как функция времени называется функцией надёжности (безотказности, безопасности и т. д.). Дополнение функции $P_i(t)$ до 1 описывает вероятность возникновения противоположного события, состоящего в том, что отказ (авария, опасная ситуация или производственная неполадка) все же произойдет:

$$Q_i(t) = 1 - P_i(t). \quad (4.8)$$

Функция $Q_i(t)$ называется функцией риска возникновения отказа (аварии, опасной ситуации или производственной неполадки). Функции надёжности и риска обладают соответствующими плотностями:

$$f_i(t) = \frac{dP_i(t)}{dt}; \quad q_i(t) = \frac{dQ_i(t)}{dt} = -\frac{dP_i(t)}{dt} = \lambda_i(t)P_i(t), \quad (4.9)$$

где $\lambda_i(t)$ – интенсивность соответствующих (4.5) отказов объекта, т. е. плотность вероятности отказа объекта к моменту времени t при условии, что до этого отказ не произошёл; i – индекс соответствующего показателя надёжности объекта: $i = 1$ – безотказность; $i = 2$ – безаварийность; $i = 3$ – безопасность и т. д.

Важным свойством объекта является также ремонтпригодность, заключающаяся в его приспособленности к обслуживанию и ремонту. Безотказность и ремонтпригодность характеризуются **коэффициентом готовности** объекта $K(t)$, отражающим относительную величину времени нахождения объекта (со-

вокупности объектов) в работоспособном состоянии, и коэффициентом простоя $k(t)$ – вероятностью того, что в момент времени t объект (совокупность объектов) находится в состоянии простоя (в том числе ремонта):

$$k(t) = 1 - K(t). \quad (4.10)$$

Интенсивность отказов – это условная плотность вероятности возникновения отказа *невосстанавливаемого* объекта, определяемая для рассматриваемого момента времени, при условии, что до этого момента отказ не возник [46].

Плотность вероятности отказа в момент t – предел отношения вероятности отказа в интервале времени от t до $(t + \Delta t)$ к величине интервала Δt при $\Delta t \rightarrow 0$.

Физический смысл плотности вероятности отказа – это вероятность отказа в достаточно малую единицу времени.

Из определения интенсивности отказов $\lambda(t)$ следует, что

$$P(t)\lambda(t)\Delta t = f(t)\Delta t, \quad (4.11)$$

где $f(t)$ – плотность распределения наработки до отказа.

Отсюда

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{P(t)}. \quad (4.12)$$

Статистически интенсивность отказов определяется отношением разности между числом отказов $r(t + \Delta t)$ на момент времени $(t + \Delta t)$ и числом отказов $r(t)$ на момент времени t к длительности интервала времени Δt :

$$\lambda(t) = \frac{r(t + \Delta t) - r(t)}{N(t)\Delta t} = \frac{N(t) - N(t + \Delta t)}{N(t)\Delta t}. \quad (4.13)$$

Параметр потоков отказов $\omega(t)$ есть плотность вероятности возникновения отказов *восстанавливаемого* объекта, определяемая для рассматриваемого момента времени [46].

Рассмотрим эксплуатацию восстанавливаемых объектов. В начальный момент времени изделие начинает работу и работает до отказа. При отказе проис-

ходит восстановление объекта, и он вновь работает до отказа и т. д. Моменты отказов формируют поток отказов. В качестве характеристики потока отказов используют математическое ожидание числа отказов $\Omega(t)$ за время t :

$$\Omega(t) = M\{r(t)\}. \quad (4.14)$$

Математическое ожидание числа отказов за интервал времени (t_1, t_2) определяют по формуле

$$M\{r(t_1, t_2)\} = \Omega(t_2) - \Omega(t_1), \quad (4.15)$$

где $r(t_1, t_2)$ – число отказов за интервал времени (t_1, t_2) .

Функция

$$\omega(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{M\{r(t_1, t_2 + \Delta t)\}}{\Delta t} = \Omega(t) \quad (4.16)$$

называется **интенсивностью потока отказов** восстанавливаемого объекта.

При экспоненциальном законе распределения наработки между отказами

$$\omega(t) = \lambda. \quad (4.17)$$

Если рассматриваемые параметры состояния применяют для оценки хранения и транспортирования, то формулы (4.5) и (4.7) пригодны для характеристики сохраняемости объекта, определения, например, вероятности безотказного хранения и транспортирования.

Контрольные вопросы

1. Основные характеристики надёжности объектов.
2. Приведите определение термина «отказ».
3. Критерии отказов по типу.
4. Критерии отказов по природе.
5. Основные признаки классификации отказов.
6. Что понимают под надёжностью?
7. Приведите определение термина «сохраняемость объекта».
8. Приведите определение термина «ремонтпригодность».

9. Приведите определение термина «безотказность».
10. Приведите определение термина «долговечность».
11. Основные показатели долговечности.
12. Основные статистические показатели безотказности.
13. Поясните показатель «вероятность безотказной работы».
14. Поясните показатель «средняя наработка до отказа».
15. Поясните показатель «интенсивность отказов».
16. Поясните показатель «средний ресурс».
17. Поясните показатель «наработка».
18. Поясните показатель «долговечность».
19. Поясните показатели «технический ресурс», «срок службы», «средний ресурс».
20. Поясните показатель «срок службы».
21. Поясните показатель «гамма-процентный ресурс».

5. ОСНОВЫ МЕТОДОЛОГИИ ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ

5.1. Терминология технического диагностирования

Методы технического диагностирования обеспечивают надёжность функционирования технических систем. Другими словами, диагностирование – одна из важных мер обеспечения и поддержания надёжности технических объектов.

Возможность обнаружения изменений технического состояния объекта на ранней стадии их возникновения обусловлена достаточной параметрической избыточностью и медленно протекающими процессами снижения работоспособности. Например, установлено, что снижение работоспособности гидросистемы воздушного судна в связи с неисправностями в её агрегатах в основном происходит в течение времени, превышающего в несколько раз продолжительность одного или нескольких полётов, а также интервалы между техническими обслуживаниями. Исключение составляют разрушения шлангов и трубопроводов при экстремальных нагрузениях и отказы электрогидравлических кранов и золотниковых устройств вследствие отказов электропитания или грязевого заземления золотников [41, 48]. Аналогичным образом протекают процессы понижения работоспособности объектов сельскохозяйственных транспортных, дорожных, строительных и подъёмно-транспортных машин, морских судов, а также объектов, применяемых в других отраслях промышленности [41, 44, 46, 48, 59, 61, 63, 64].

Диагностирование осуществляется либо человеком непосредственно (например, внешним осмотром, «на слух»), либо с помощью аппаратуры. Объект и средства его диагностирования в совокупности образуют систему диагностирования. Взаимодействуя между собой, объект и средства реализуют некоторый алгоритм диагностирования. Результатом является заключение о техническом состоянии объекта – технический диагноз, например: «радиоприёмник исправен», «станок неработоспособен», «в телевизоре отказал частотный детектор».

Различают **виды тестового** и **функционального** диагностирования. Виды (и системы на их основе) *первого* типа применяют при изготовлении объекта, во время его ремонта, профилактики и при хранении, а также перед применением и после него, когда необходимы проверка исправности объекта или его

работоспособности и поиск дефектов. В этом случае на объект диагностирования подаются специально организуемые тестовые воздействия. Виды (и системы на их основе) *второго* типа применяют при использовании объекта по назначению, когда необходимы проверка правильности функционирования и поиск дефектов. При этом на объект поступают только предусмотренные его алгоритмом функционирования (рабочие) воздействия.

Разработка и создание технологий (систем) диагностирования включают:

- изучение объекта, его возможных дефектов и их признаков;
- составление математических (диагностических) моделей (формализованного описания) исправного (работоспособного) объекта и того же объекта в неисправных (неработоспособных) состояниях;
- построение алгоритмов диагностирования;
- отладку и опробование технологии (системы).

В изучении объектов большое значение имеет их классификация по различным признакам, например по характеру изменения значений параметров, по виду потребляемой энергии и т. п. Изучение дефектов проводится с целью определения их природы, причин и вероятностей возникновения, физических условий их проявления, условий обнаружения и т. п.

Математическая (диагностическая) модель объекта диагностирования (детерминированная или вероятностная) – описание объекта в исправном и неисправном его состояниях в виде формальных зависимостей между возможными воздействиями на объект и его реакциями на эти воздействия. Модели (даже исправных объектов), используемые при диагностировании, могут отличаться от моделей, используемых при проектировании тех же объектов.

Алгоритм диагностирования предусматривает выполнение некоторой условной или безусловной последовательности определённых экспериментов с объектом.

Эксперимент характеризуется *тестовым* или *рабочим воздействием* и составом контролируемых признаков, определяющих реакцию объекта на воздействие.

Различают алгоритмы *проверки* и алгоритмы *поиска*. **Алгоритмы проверки** позволяют обнаружить наличие дефектов, нарушающих исправность объекта, его работоспособность или правильность функционирования. По результатам экспериментов, проведённых в соответствии с **алгоритмом поиска**, можно

указать, какой дефект или группа дефектов (из числа рассматриваемых) имеются в объекте.

Средства диагностирования являются носителями алгоритмов контроля и диагностирования, хранят возможные реакции (образы состояния) объекта контроля на воздействия, вырабатывают и подают на объект тестовые воздействия, «считывают» фактические реакции объекта и ставят диагноз, сравнивая фактические реакции с возможными. Их делят на аппаратурные, программные и программно-аппаратурные (средства двух последних категорий применяют вычислительную аппаратуру, работающую по сменным программам, для диагностирования технического состояния). Аппаратурные средства бывают внешние (по отношению к объекту) и встроенные. Первые применяются в основном в системах тестового, вторые – функционального диагностирования. Внешние аппаратурные средства могут быть автоматическими, автоматизированными или с ручным управлением, универсальными или специализированными.

В целом подмножество исправных состояний E_1 объекта (системы, агрегата) включает все состояния, при которых объект выполняет возложенные на него функции, а его выходные параметры и характеристики полностью соответствуют техническим условиям. Каждое из состояний в этом подмножестве различается степенью или запасом работоспособности, который характеризуется приближением состояния системы к предельно допустимому. Переход из одного состояния в другое в подмножестве E_1 обусловлен возникновением изменений в объекте, которые, однако, не приводят к выходу его параметров за пределы технических условий, т. е. не вызывают перехода его состояния в подмножество E_2 . Подмножество E_2 включает состояния, соответствующие возникновению в объекте неисправностей, приводящих к увеличению (уменьшению) значений функциональных параметров по сравнению с требованиями технических условий или потере объектом работоспособности. Мощность подмножества E_2 определяется числом неисправностей, которые можно обнаружить по соответствующим признакам.

Таким образом, задачи проверки исправности, работоспособности, правильности функционирования и поиска неисправности представляют собой частные случаи общей задачи диагностики объектов.

5.2. Параметры технических состояний

При техническом диагностировании машин часто приходится оценивать состояние отдельных агрегатов по обобщённым параметрам.

Обобщённый – это диагностический параметр, характеризующий техническое состояние несколько составных частей машины, например эффективная мощность двигателя, удельный расход топлива, время подъёма навесного орудия. Например, обобщённый параметр «удельный расход топлива» характеризует состояние топливной аппаратуры, механизма газораспределения, цилиндропоршневой группы, воздухоочистительной системы дизеля. Коэффициент подачи нагнетательной магистрали обобщённо характеризует техническое состояние гидропривода. Использование обобщённых параметров состояния позволяет в значительной мере снизить трудоёмкость диагностирования, особенно при заявочном (внеплановом) техническом обслуживании машины.

Все параметры состояния можно разделить на ресурсные и функциональные.

Ресурсный параметр – параметр, предельное значение которого обуславливает утрату работоспособности объекта в силу исчерпания ресурса. Этот параметр восстанавливается посредством ремонта или замены составной части. К ресурсным параметрам относятся: зазоры в сопряжениях *гильза – поршень*, *подшипник – шейка вала*, износ сопряжений *клапан – гнездо*, *игла – корпус распылителя форсунки*, износ фрикционных накладок, шестерён, шлицев, валов.

Среди ресурсных диагностических параметров имеется группа, достижение которыми предельного значения обуславливает капитальный ремонт составной части. К таким ресурсным параметрам относятся расход прорывающихся в картер газов, суммарный зазор в верхней и нижней головках шатуна двигателя, коэффициент передачи гидропривода коробки передач и т. д.

Функциональный параметр – параметр, выход которого за предельное значение обуславливает утрату работоспособности или неисправность составных частей. Его восстанавливают при техническом обслуживании или текущем ремонте. К таким параметрам относятся: эффективная мощность двигателя, частота вращения коленчатого вала, фазы топливоподачи и газораспределения, тепловой зазор в клапанном механизме, подача масляного насоса, давление открытия перепускного и предохранительного клапанов, давление воздуха в ши-

нах, углы установки управляемых колёс, напряжение на элементах аккумуляторной батареи.

Нетрудно заметить, что **функциональные параметры** – это обычно выходные технические и рабочие характеристики машины и её составных частей, интегрально отражающие определенную совокупность структурных параметров сопряжений. Следует подчеркнуть, что если систему (машину) характеризуют совокупность элементов и связи между элементами, то функциональные параметры как раз определяют эти связи.

Качественные признаки наряду со структурными параметрами определяют техническое состояние объекта. К ним относятся: наличие или отсутствие подтекания масла, топлива, воды в картере двигателя, трещин корпусных деталей, потеря герметичности, специфический запах, цвет выпускных газов и др. Качественные признаки устанавливают без количественного измерения.

Техническое состояние объекта оценивается параметрами состояния составных его частей, которые делятся на **структурные** и **диагностические**.

Параметр состояния – физическая величина, характеризующая работоспособность, исправность, предельное или опасное состояние объекта диагностирования и изменяющаяся в процессе его работы.

Структурные параметры непосредственно характеризуют работоспособность объекта (зазоры, износы, натяги в сопряжениях, геометрическая форма, размер детали, физико-механические свойства материала, выходные и технические характеристики машины и её составных частей и др.) и обуславливают техническое состояние объекта.

Структурные параметры, в свою очередь, можно разделить на две группы: ресурсные и функциональные параметры машины или её составных частей.

Диагностические параметры косвенно характеризуют работоспособность или исправность объекта (давление и расход топлива и масла; температура масла, охлаждающей жидкости, корпусных деталей; время подъёма навесной машины; усадка штока силового цилиндра и т. п.).

Преимущество диагностических параметров перед структурными состоит в том, что их контроль не требует, как правило, разборки агрегата. Контроль по структурным параметрам широко используют при ремонте (дефектации).

Очевидно, что диагностическим можно считать такой параметр, который количественно связан со структурным параметром известной закономерностью.

*Обычно параметры характеристики диагностического сигнала, содержащие информацию о параметрах технического состояния объекта, называют **диагностическими признаками** состояния.*

Или, другими словами, **диагностический признак** – это параметры характеристики сигнала, соответствующие определенной неисправности объекта.

По ГОСТ Р ИСО 13372–2013 (п. 4.8) **диагностический признак (*sign*)** – это параметр сигнала, несущий информацию о техническом состоянии [27].

По ГОСТ Р ИСО 13372–2013 (п. 4.9) **синдром (*syndrome*)** – это группа диагностических признаков или признаков неисправности в совокупности, указывающих на некоторое нарушение в работе машины [27].

По ГОСТ Р ИСО 13372–2013 (п. 9.3) **параметр (*parameter*)** – это переменная, представляющая собой некоторую значимую измеримую характеристику системы [27].

По ГОСТ Р ИСО 13372–2013 (п. 9.4) **признак неисправности, симптом (*symptom*)** – это сделанное на основе субъективного наблюдения за работой машины и по результатам измерений контролируемых параметров заключение о возможном наличии одной или нескольких неисправностей.

В процессе технического диагностирования используют как параметры, так и признаки неисправностей. Следует отметить, что параметры несут в себе более полную, по сравнению с признаками, информацию, так как позволяют оценивать не только техническое состояние объекта в момент контроля, но и возможность дальнейшего его безотказного использования в течение определённого времени.

Действительно, такие структурные параметры, как износ, размер детали, зазор в сопряжении деталей, высота протектора шины и т. д., в зависимости от наработки монотонно отклоняются от нуля или номинального значения. Функция их отклонения всегда будет возрастающей. В то же время диагностические параметры – температура, шум, вибрация, расход масла и другие, обнаруживая общую тенденцию к возрастанию, в отдельные моменты могут быть меньше, чем в предыдущие. Это зависит от нагрузки, скорости движения деталей, состояния смазочной системы, погрешности измерения и т. п.

Количественной мерой параметра состояния является его значение, которое может быть номинальным, нормальным и предельным.

Значение параметра технического состояния изделия или его элемента в начале эксплуатации называют **номинальным**: зазор в сопряжении; давление регулировки клапана; расход масла и т. д., т. е. **номинальное значение параметра** – значение параметра, определённое его функциональным назначением и служащее началом отсчёта отклонений. Номинальное значение наблюдается у новых и капитально отремонтированных составных частей.

Допускаемое значение параметра – значение, при котором обеспечивается безотказная работа составной части до очередного планового диагностирования при высоких технико-экономических показателях [63, 64]. *Большинство основных параметров, характеризующих техническое состояние составных частей машины, имеет два допускаемых значения. Одно из них рассчитывают исходя из необходимости обеспечения надёжной работы составной части до соответствующего очередного технического обслуживания, а второе – до очередного ремонта.* Другими словами, **допускаемое значение** (отклонение) параметра характеризуется граничным его значением, при котором составную часть машины допускают после контроля к эксплуатации без операций технического обслуживания или ремонта. Это значение приводят в технической документации на обслуживание и ремонт машин. При допускаемом значении параметра составная часть надёжно работает до следующего планового контроля.

Значения параметра, не выходящие за пределы допускаемых величин, называют **нормальными**. Они находятся в диапазоне между номинальными и допускаемыми величинами.

Предельное значение параметра – наибольшее или наименьшее, которое может иметь работоспособная составная часть [63, 64]. При этом дальнейшая эксплуатация составной части или машины в целом без проведения ремонта недопустима ввиду резкого увеличения интенсивности изнашивания сопряжений, чрезмерного снижения экономичности машины или нарушения требований техники безопасности.

Достижение наибольшего значения хотя бы одного из параметров означает, что данная составная часть находится в предельном состоянии.

Эти значения устанавливают на основании соответствующих критериев.

Технические критерии. К этой группе относят случаи, когда достигшие предельного состояния детали не могут больше выполнять свои функции по техническим причинам (например, предельное увеличение шага гусеничной цепи вызывает её спадание), либо когда дальнейшая эксплуатация их доводит

до аварийного отказа (например, работа двигателя с предельными зазорами в сопряжениях палец – бобышки поршня, в шатунных и коренных подшипниках приводит к стукам, разрушениям деталей и аварийному отказу двигателя, при котором могут быть разрушены и другие сопряжённые детали).

Технико-экономические критерии определяют предельное состояние объекта в том случае, когда в результате изменения технического состояния изменяются определённые свойства объекта, снижающие эффективность его использования. Например, с износом цилиндропоршневой группы двигателей внутреннего сгорания увеличивается расход (угар) картерного масла [63, 64]. Поэтому технико-экономическим расчётом устанавливают, до какого угара масла (в % к расходу топлива) экономически целесообразно использовать двигатель, и найденное значение показателя вводят как предельное.

Технологические критерии характеризуют резкое ухудшение качества выполнения работ по причине предельного состояния узлов и деталей механизмов или машин. Например, износ подшипников в токарном станке приводит к увеличению биений вала и снижению точности обработки детали.

5.3. Характеристики параметров состояния

Случайная скорость изменения параметра обусловлена неодинаковыми конструктивно-технологическими факторами у различных объектов – технологическим рассеиванием значений твёрдости трущихся поверхностей, чистотой их обработки, установочными зазорами и т. п.

Отклонение параметра объекта под влиянием эксплуатационных факторов происходит уже не по плавной, а по ломаной возрастающей кривой, причём резкое увеличение скорости изменения параметра в отдельные моменты вызвано случайными неблагоприятными условиями или субъективными факторами (большие нагрузки, запылённость воздуха, неправильная регулировка сборочных единиц, недостаточное смазывание и т. д.). С другой стороны, периодам малой скорости изменения параметра соответствуют случайные благоприятные условия работы.

Динамика, т. е. изменение во времени диагностического параметра, косвенно характеризующего отклонение одного или нескольких структурных, также может быть выражена возрастающей кривой [63, 64]. Отличительная

особенность её заключается в относительно больших изломах и в ряде случаев немонотонном возрастании. Это объясняется влиянием на диагностический параметр других, не связанных со структурными параметрами факторов, в том числе погрешностью измерения диагностического параметра.

Основными показателями **эффективности методов и средств диагностирования** являются *достоверность и точность* получаемых результатов.

Достоверность результатов диагностирования характеризует способность методов и средств диагностирования (измерений) правильно устанавливать фактическое состояние объекта диагностирования. Зависит от совершенства методов диагностирования и правильности выбора контролируемых параметров [5].

Точность результатов диагностирования зависит, прежде всего, от правильности выбора проверяемых параметров и степени совершенства средств диагностирования, обуславливающих методическую и инструментальную погрешности.

5.4. Диагностические признаки

Объектом диагностики может быть техническое устройство или его элемент. Простейшим объектом диагностики является, например, диагностическая пара. В качестве объекта диагностики может выступать агрегат любой сложности.

Объект диагностики можно рассматривать в двух аспектах [43, 57]:

- с точки зрения структуры;
- с точки зрения способа функционирования.

Каждый из аспектов имеет свои особенности, описываемые своей системой понятий. Структура объекта определяется предписываемыми ему функциями. При структурном подходе имеют дело с размерами и формой деталей, с зазорами в кинематических парах и другими свойствами элементов объекта, обеспечивающими его нормальную работу. Основным понятием диагностики, связанным со структурным аспектом, будет *состояние объекта* [43].

Свойства структуры объекта в некоторый момент времени t могут быть охарактеризованы совокупностью параметров x_1', x_2', \dots, x_n' . Параметры x_i' – величины переменные. При изготовлении объекта они зависят от различных технологических факторов, а в период эксплуатации – от степени износа и разру-

шения деталей. Чтобы задать начало отсчёта параметра x_i' , вводится понятие *идеального объекта*. Под *идеальным объектом* подразумевается воображаемая система, структура которой с абсолютной точностью соответствует проекту. В идеальном объекте отсутствуют какие бы то ни было нарушения и дефекты. Все реальные объекты в той или иной степени отличаются от идеального. Обозначим x_i^o значение параметра состояния идеального объекта. Тогда разность

$$x_i = x_i' - x_i^o \quad (5.1)$$

будет характеризовать отклонение i -го параметра диагностируемого объекта от параметра идеального прототипа (от номинала).

Очевидно, что свойства структуры объекта могут быть охарактеризованы различными наборами параметров. Так, свойства подшипника можно задать диаметром вала d , диаметром втулки D и зазором между ними h . Таким образом, между некоторыми параметрами структуры объекта возможны зависимости вида

$$x_i = f(x_1', x_2', \dots, x_n). \quad (5.2)$$

Таким образом, техническое состояние машин и механизмов характеризуется структурными параметрами, изменение которых является причиной изменения технического состояния. Структурными параметрами являются параметры деталей, их взаимное расположение – размеры, зазоры, перекосы, нарушение геометрии, расходные характеристики и т. д. [43]. Следовательно, техническое состояние объекта определяется совокупностью технических параметров, характеризующих возможное отклонение функционирования объекта от нормального, приводящее к отказу [43, 44 т.5, с. 380, 57].

В общем случае, на совокупность параметров структуры x_i накладывается условие *минимальности*. Совокупность параметров x_1, x_2, \dots, x_n будет минимальной, если ни одна из этих величин не может функционально выражаться через значения других параметров, входящих в совокупность.

Помимо минимальности, совокупность параметров, описывающих структуру механизма, должна удовлетворять условию *полноты*. Совокупность параметров x_i будет полной, если знание их величины позволяет принимать однозначные решения о необходимости ремонта и обслуживания механизма.

Состоянием объекта называют полную минимальную совокупность параметров структуры (x_1, x_2, \dots, x_n) , характеризующих отклонение структуры объекта от структуры идеального прототипа [43, 57].

При функциональном подходе объект рассматривается как единая система, порождающая различные процессы. Любой работающий объект порождает много различных по физической природе процессов: отдает механическую энергию, излучает тепло и акустические колебания и т. д. Все эти процессы можно охарактеризовать количественно совокупностью параметров s_1, s_2, \dots, s_m . Величина этих параметров зависит от состояния объекта и режима его работы (скорости, нагрузки и т. д.). Если режим работы объекта во время диагностики строго регламентируется, то любое изменение величины указанных параметров должно быть предписано изменению формы, размеров и т. д., т. е. изменению состояния объекта. На основании этого параметры выходных процессов объекта рассматривают как *функции состояния*:

$$s_j = S_j(x_1, x_2, \dots, x_n). \quad (5.3)$$

Для каждого вида объектов можно определить бесконечное число функций состояния, поскольку любая функция от функции состояния также является функцией состояния.

Группа функций состояния, основанная на критериях эффективности объекта, представляет собой числовые характеристики способности объекта выполнять заданную работу, т. е. характеристики, характеризующие работу объекта [43, 57]. Наиболее часто применяются такие показатели, как КПД, производительность и т. д.

Другая группа функций состояния включает в себя числовые характеристики различных процессов, т. е. параметры диагностического сигнала, сопутствующие работе объекта (сопровождающие работу объекта) и доступные для непосредственного измерения. Сами по себе процессы, образующие диагностический сигнал, как правило, не имеют существенного значения с точки зрения работоспособности объекта и поэтому в машиноведении, за исключением диагностики, обычно не изучаются. Но в диагностике их роль существенна: они служат источником информации о состоянии объекта.

В процессе поиска неисправностей осуществляется разделение составляющих объекта на классы не различающихся между собой неисправностей.

Число классов (следовательно, число входящих в них неисправных состояний) определяет достигаемую при поиске неисправностей детализацию мест неисправностей. Эту степень детализации в технической диагностике принято называть глубиной поиска или глубиной диагностирования [43, 57].

На практике при техническом обслуживании машин глубина поиска неисправностей в агрегате обычно ограничивается отдельными элементами агрегата. При нахождении отказавшего узла (детали) его заменяют на исправный или проводят его регулирование, если это регулирование предусмотрено инструкцией по эксплуатации и обеспечивает устранение неисправности. На ремонтных предприятиях или станциях технического обслуживания при осуществлении капитального ремонта глубина диагностирования доводится до отдельных узлов и деталей агрегатов.

При диагностировании сложных технических систем широко используется теория информации, которая в этом случае является общей теорией связи статистических систем. В диагностике агрегатов, например насосов, компрессоров, объектов, такими статистическими системами являются система состояния агрегата, образующая множество E состояний, и связанная с ней система признаков K . При этом под диагностическим признаком (параметром) агрегата будем понимать признак, используемый для определения технического состояния диагностируемой системы и её отдельных элементов. Таким образом, в общем виде *характеристики диагностического сигнала, содержащие информацию о параметрах технического состояния объекта, часто называют **диагностическими признаками** состояния.*

Размерности совокупности структурных параметров и совокупности диагностических признаков в принципе неограничены, что и обуславливает развитие технической диагностики.

Практическое же решение прикладных задач диагностики состоит в том, чтобы отыскать такие диагностические признаки, которые однозначно связаны с соответствующими структурными параметрами, определяющими основные причины деградации технического состояния объекта. *Эти диагностические признаки должны быть практически взаимно статистически независимы между собой и должны соответствовать взаимно статистически независимым между собой классам неисправностей и дефектов объекта [57].* Слово

«практически» отражает наличие взаимосвязей между всеми дефектами и диагностическими признаками как объективного свойства природы.

Каждое техническое состояние агрегата, каждая конкретная её неисправность обычно характеризуется одним или несколькими внешними признаками. Например, неисправность качающего узла гидронасоса может привести к снижению давления в напорной линии системы, резкому увеличению пульсации давления за насосом, повышению температуры корпуса насоса, изменению шумового спектра насоса и т. д. Диагностические признаки принято разделять на *прямые* и *косвенные*.

При выборе диагностических признаков для оценки технического состояния агрегатов следует учитывать требования эффективности контроля и оптимизации системы диагностирования. Диагностические признаки должны, прежде всего, иметь однозначную связь с состоянием объекта диагностирования. Однако следует учитывать, что изменение диагностических признаков происходит не только вследствие изменения технического состояния объекта, но и вследствие изменения условий диагностирования.

Выбранные диагностические признаки должны образовывать полную систему для обеспечения достоверного определения технического состояния агрегата. При их выборе следует обязательно учитывать характеристики взаимных статистических связей признаков, которые отражают взаимосвязи между различными физическими процессами в агрегате. Знание взаимных статистических связей признаков позволяет при необходимости устанавливать значения одних признаков по значениям других. Взаимосвязанные признаки часто называют структурными.

При оптимизации номенклатуры диагностических признаков для оценки технического состояния агрегатов следует отдавать предпочтение тем признакам, которые имеют наибольшую диагностическую ценность, позволяют обнаружить неисправности на возможно более ранних стадиях их развития и которые удобно определять, измерять в процессе эксплуатации и обрабатывать при анализе. При этом следует подчеркнуть, что выбор и оптимизация диагностических признаков зависят от выбранного метода диагностирования и являются чрезвычайно сложными и ответственными задачами.

Существует много причин, изменяющих значение признака при неизменном состоянии агрегата, однако можно выделить три источника такой неинвариантности.

Одним из источников неинвариантности является сам агрегат как объект диагностирования. В результате воздействия внутренних и внешних случайных факторов характеристики агрегата обладают статистической изменчивостью. Это приводит к возможной невоспроизводимости значений признаков при повторных испытаниях и диагностировании.

Другой источник неинвариантности связан с аппаратными помехами, погрешностями измерений и неисправностями аппаратуры диагностирования.

Третий источник неинвариантности определяется физической сущностью признаков. При данном состоянии агрегата признак может проявиться или не проявиться, а значение его может быть случайным.

Поэтому в связи с отмеченными свойствами диагностических признаков при определении технического состояния агрегата необходимо знать не только связи между структурными параметрами входящих в него узлов, механизмов и его выходными параметрами, но и их статистические характеристики.

Процессы, сопровождающие работу объекта и несущие диагностическую информацию, можно представить как функции времени. Такими функциями времени могут быть температура охлаждающей жидкости, расход энергии, уровень шума и многие другие процессы.

Диагностирование можно построить на следующем принципе. Используя датчики с высокой инерционностью или интегрируя сигнал с датчика в специальном устройстве, можно охарактеризовать процесс одной постоянной величиной – средним значением изменяющегося параметра. Если среднее значение заведомо равно нулю, то в качестве характеристики протекания процесса можно взять его дисперсию. В некоторых случаях процесс может быть охарактеризован максимальным значением изменяющегося параметра, например процесс в цилиндре двигателя – максимальным индикаторным давлением.

Поскольку состояние объекта обычно описывается не одним, а целой совокупностью параметров, то при указанной выше обработке сигналов для однозначного диагностирования объекта требуется использовать большое число разнообразных процессов.

Но диагностирование может быть построено и на другом принципе. Вместо того чтобы регистрировать и усреднять большое число различных процессов, регистрируется только один из них, но для его анализа используется такой способ обработки сигнала, из которого извлекается вся диагностическая информация.

Системы диагностики, построенные на первом принципе, можно назвать *статическими*, поскольку они имеют дело с постоянными значениями сигнала. Системы, построенные на втором принципе, называют *динамическими*, так как они оперируют с переменными сигналами, главным образом имеющими колебательный характер. Такие сигналы обладают сложной временной и спектральной структурой, поэтому способны переносить большие объёмы информации.

Использование всего одного процесса вместо множества разнородных по физической природе процессов следует считать достоинством динамической системы диагностики по сравнению со статической.

5.5. Общая постановка задачи диагностирования

Состояние объекта, которое определяется n независимыми величинами x_1, x_2, \dots, x_n , в некоторый момент времени t известно, если известно значение каждой из n величин x_i . Эта задача будет также решена и в том случае, если x_i будут выражены через какие-то другие величины s_1, s_2, \dots, s_m , которые известны. Такой косвенный процесс определения неизвестных параметров x_i и называют диагностикой. Она сводится к измерению параметров диагностического сигнала s_1, s_2, \dots, s_m и к вычислению параметров состояния x_i с помощью известных заранее соотношений вида

$$x_i = X_i(s_1, s_2, \dots, s_m). \quad (5.4)$$

Конкретный вид функции определяется либо во время тарировки системы диагностики, либо на основе моделирования объекта, либо путём установления экспериментальных зависимостей.

Рассмотрим решение поставленной задачи на примере системы диагностирования по параметрам виброакустического сигнала.

В основе виброакустической диагностики лежит почти тривиальная идея о представлении объекта в виде многоканальной системы передачи информации (рис. 5.1) [43, 57].

Представление объекта в виде многоканальной системы передачи информации позволяет сформулировать две основные проблемы, решение которых составляет предмет технической диагностики, а также позволяет использовать в диагностике методы и опыт организации и функционирования систем многоканальной передачи информации.

Проблемы эти следующие:

а) необходимо найти способы разделения сигнала, полученного с датчика, на такие составляющие, каждая из которых принадлежит только одному источнику виброакустического сигнала;

б) необходимо по этой составляющей оценить состояние соответствующего источника виброакустического сигнала.

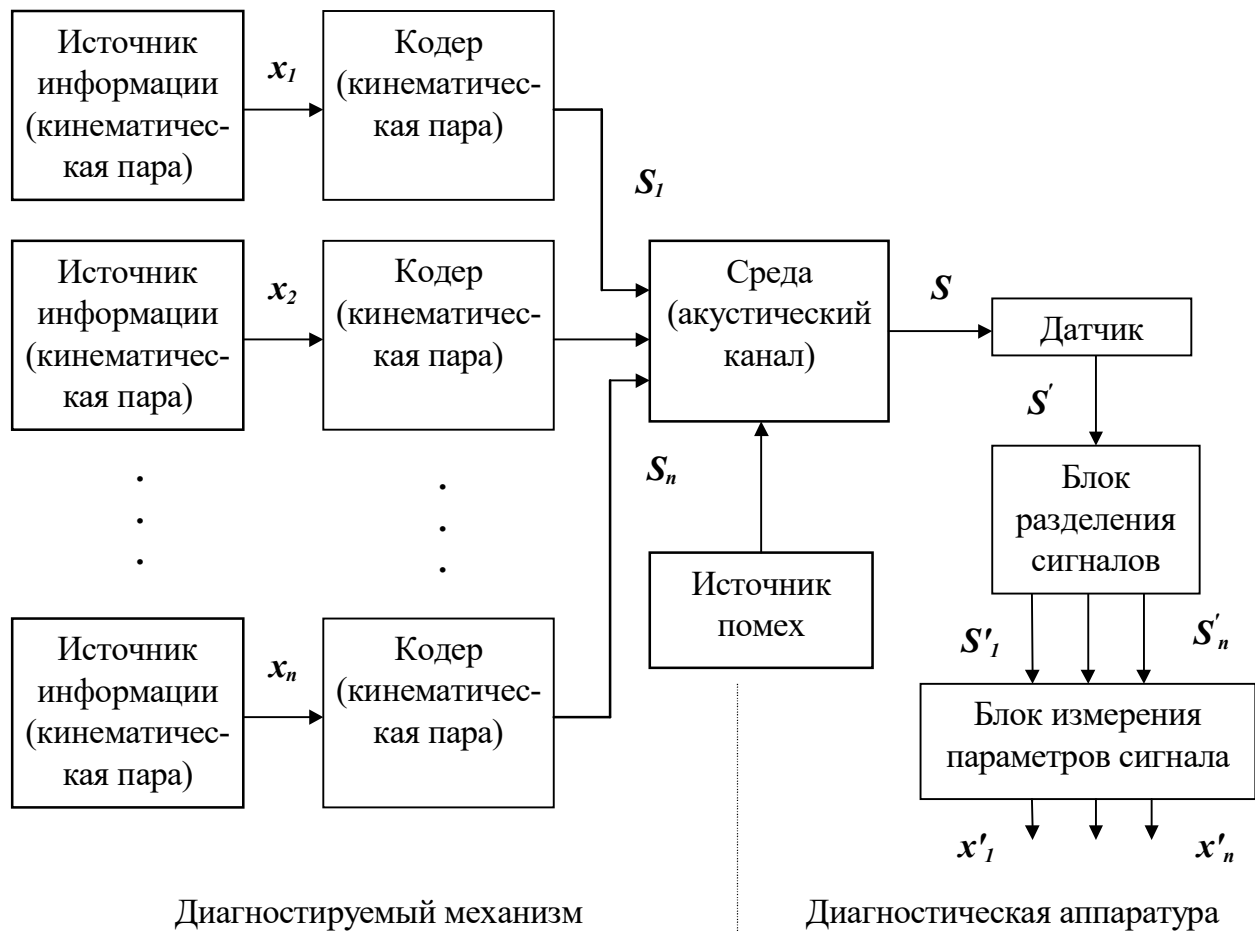


Рис. 5.1. Объект (механизм, содержащий кинематические пары) как многоканальная система передачи информации

Эффективность процессов постановки диагноза определяется не только качеством алгоритма, но и не в меньшей степени качеством средств. Эффективная организация системы сбора и обработки информации, увеличивающая достоверность диагностирования, уменьшающая влияние субъективных факторов, а также сокращающая затраты времени, труда и средств, включает разработку автоматизированной системы виброакустической диагностики сложного объекта на стадии его проектирования как необходимую составную часть объекта.

Проведение виброакустического диагностирования связано с решением ряда взаимосвязанных задач:

- 1) детальным изучением объекта с целью выявления наиболее уязвимых мест, составлением перечня параметров x_1, x_2, \dots, x_n , выходящих за допустимые нормы, и разбиением на классы технических состояний, подлежащих распознаванию;
- 2) выбором средств измерения и мест размещения первичных преобразователей на объекте на основе изучения физики процессов, протекающих в объекте;
- 3) локализацией источников излучения повышенной колебательной энергии в исследуемом объекте;
- 4) определением динамических характеристик и математических моделей отдельных узлов и объекта в целях построения диагностической модели;
- 5) формированием и доводкой системы информативных диагностических признаков, чувствительных к изменению параметров технического состояния в процессе обучения диагностической системы;
- 6) разработкой алгоритмов определения текущего состояния объекта;
- 7) прогнозированием изменений диагностического сигнала и параметров технического состояния;
- 8) разработкой процедур обратного воздействия на объект (выключение, перевод на щадящий режим и т. д.).

5.6. Функциональная схема технического диагностирования

Алгоритм технического диагностирования может быть представлен в виде функциональной схемы (рис. 5.2) [43, 57].

Как и любой алгоритм или схема распознавания образов, схема виброакустического диагностирования технического объекта состоит из собственно объекта диагностирования с набором технических состояний, подлежащих распознаванию, набора диагностических признаков, решающих правил и правил принятия решения.

Измерение обеспечивает исходной информацией о состоянии объекта, содержащейся в измеряемых сигналах, которые принято называть *диагностическими*.

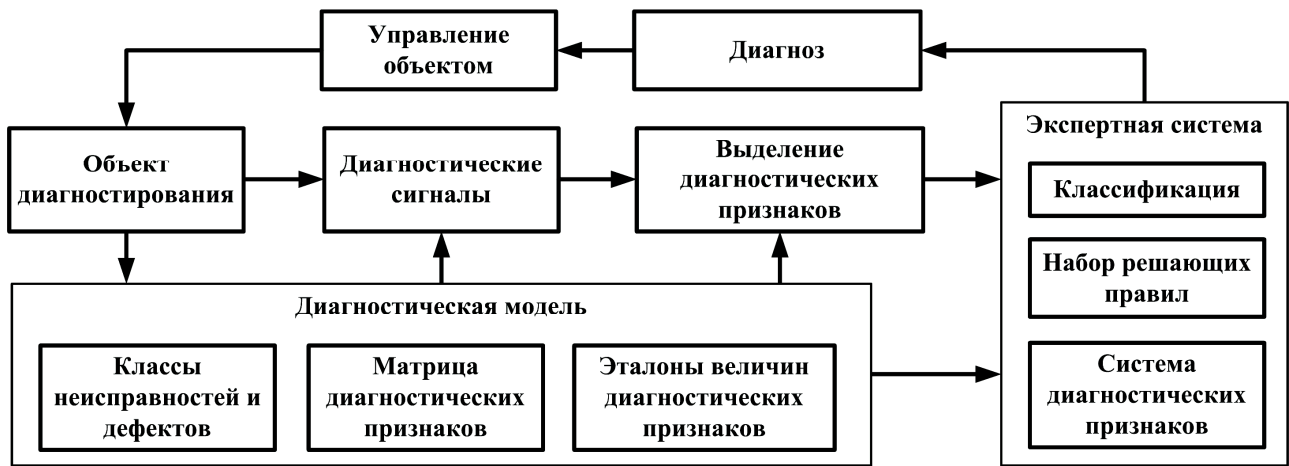


Рис. 5.2. Функциональная схема системы технической диагностики

Формирование *диагностических признаков* технического состояния объекта и отдельных его элементов позволяет выделить такие характеристики измеряемых сигналов, которые обладают требуемыми избирательными свойствами к заданному классу дефектов, подлежащих распознаванию [43].

На основании обучения диагностической системы для каждого класса технических состояний формируются *эталоны* (усреднённые для данного класса значения диагностических признаков).

Диагностическая модель должна обеспечивать формирование *системы определяющих критериев неисправностей*, которая содержит *классы неисправностей и дефектов* и соответствующие им *диагностические признаки*, каждый из которых имеет граничные значения (*эталоны*), позволяющие оценить опасность дефекта или неисправности. Исходя из представленной модели, следует отметить, что под *диагностическим признаком* следует понимать один или несколько параметров одной или нескольких характеристик диагностического сигнала.

Классификация – набор классифицирующих функций, с помощью которых производится распознавание диагностического образа и принятие решения о его принадлежности к одному из классов состояний [43].

Функция *принятия решений*, которая реализуется экспертной системой, – определение фактического состояния (постановка диагноза) объекта диагностирования и его элементов по текущим значениям диагностических признаков. Характеристики изменения последних во времени являются исходными для реализации алгоритмов упреждения (прогноза) потенциальных отказов [43].

Функция управления объектом в соответствии с принятым решением о его фактическом состоянии обеспечивает: аварийное отключение, перевод на щадящий режим, включение резервов и т. д.

Контрольные вопросы

1. Системы (методы) диагностирования.
2. Поясните алгоритм разработки и создания технологий (систем) диагностирования.
3. Приведите определение термина «математическая (диагностическая) модель объекта».
4. Поясните понятие «алгоритмы диагностирования».
5. Основные параметры технических состояний.
6. Поясните термин «обобщённый параметр».
7. Приведите определение термина «ресурсный параметр».
8. Приведите определение термина «функциональный параметр».
9. Приведите определение термина «параметры состояния».
10. Приведите определение термина «структурные параметры».
11. Приведите определение термина «диагностические параметры».
12. Приведите определение термина «диагностический признак».
13. Приведите определение термина «допускаемое значение параметра».
14. Приведите определение термина «предельное значение параметра».
15. Приведите определение термина «технические критерии».
16. Приведите определение термина «технико-экономические критерии».
17. Приведите определение термина «технологические критерии».
18. Укажите основные характеристики параметров состояния.
19. Укажите и поясните основные показатели эффективности методов и средств диагностирования.
20. Поясните структурный аспект (подход) диагностирования.
21. Поясните функциональный аспект (подход) диагностирования.
22. Что называют состоянием объекта?
23. Что называют диагностическим признаком и чем он характеризуется?
24. Источники неинвариантности диагностических признаков.
25. В чем заключается общая постановка задачи диагностирования?
26. В чем заключается основа виброакустической диагностики?
27. Нарисуйте и поясните функциональную схему технического диагностирования.

6. ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ОБЪЕКТОВ

В общем случае под диагностической моделью объекта понимают формальное её описание или графоаналитическое представление, отражающее основные изменения, происходящие в объекте диагностирования при эксплуатации.

В качестве диагностических моделей технических устройств, сложных технических систем можно использовать системы линейных и нелинейных дифференциальных уравнений, логические соотношения, составляемые с помощью булевой алгебры, диаграммы прохождения дискретных и аналоговых сигналов, графы причинно-следственных связей и др.

6.1. Аналитические модели

Аналитические модели нашли широкое применение при исследовании отдельных агрегатов объектов и их элементов.

В общем случае связь между выходными параметрами объекта (агрегата, механизма, узла), находящегося в исправном состоянии, его структурными (внутренними) параметрами и внешними воздействиями в определенный момент времени может быть представлена в виде векторной функции

$$Z = \psi(X, Y_{нач}t), \quad (6.1)$$

где Z – вектор выходных параметров агрегата;

X – вектор управляющих воздействий;

$Y_{нач}$ – вектор начальных значений структурных параметров агрегата;

t – время.

Выражение (6.1) представляет собой систему передаточных функций исправного объекта. Аналогично система передаточных функций для объекта, находящегося в q -м неисправном состоянии, будет

$$Z_q = \psi_q(X, Y_{qнач}, t). \quad (6.2)$$

При этом вектор начальных значений внутренних переменных $Y_{qнач}$ в общем случае не совпадает с вектором $Y_{нач}$ для исправного состояния агрегата.

В дальнейшем для фактических значений векторов Z , $Y_{нач}$ и X , получаемых при диагностировании объектов, вводится знак *, т. е. фактическая передаточная функция объекта по j -му параметру будет иметь вид

$$z_j^* = \psi(x_j^*, y_{нач}^*, t). \quad (6.3)$$

Передаточные функции объектов вида (6.1) или (6.2) обычно получают путём анализа системы нелинейных дифференциальных уравнений, описывающих их работу. Если для конкретного случая эту систему путем различных методов линеаризации для эксплуатационного диапазона изменения параметров векторов X и $Y_{нач}$ удастся свести к эквивалентному линеаризованному виду, то в результате аналитических преобразований диагностическая модель объекта приобретает вид

$$Z(t) = LX(t), \quad (6.4)$$

где L – линейный оператор.

Применение в качестве диагностических моделей линейных операторов позволяет сформулировать условия работоспособности объекта в общем виде как ограничения для перемещений полюсов и нулей передаточной функции на плоскости комплексных переменных и определить допустимые изменения контролируемых параметров. Однако для построения такой модели необходимо измерять с достаточной точностью большое число параметров объекта, что практически нереализуемо. В связи с этим на практике обычно ограничиваются построением модели на основе передаточных функций для ограниченного числа входов и выходов.

6.2. Структурно-функциональные модели

Более приемлемым является использование структурно-функциональных схем с применением для их анализа методов алгебры логики и теории графов.

Характерной особенностью объектов контроля является то, что их принципиальные схемы могут быть легко разбиты на блоки структурных схем. Например, для гидравлических систем блоками в этом случае являются гидро-

агрегаты (бак, фильтр, гидроаккумулятор, гидроцилиндр и др.) или отдельные узлы (например, узел регулятора подачи насоса, золотниковый распределитель следящего гидроусилителя и др.). Выходом такого блока S_i (рис. 6.1, а) является вектор Z_i параметров z_{ji} , характеризующих состояние потока рабочей жидкости на выходе объекта или состояние выходного элемента гидродвигателя. Составляющими вектора Z_i являются давление, расход, температура рабочей жидкости, её загрязненность и некоторые другие параметры для источников расхода и агрегатов гидрораспределительной аппаратуры, а также положение, скорость перемещения, угловая скорость выходного звена, развиваемое усилие, крутящий момент на выходном штоке или выходном валу для гидродвигателей. Входами для блока S_i являются вектор X_i управляющих воздействий и вектор Y_i параметров, характеризующих состояние потока рабочей жидкости на входе в гидроагрегат. Для насосов и насосных станций составляющими вектора Y_i являются также параметры механического или электрического привода (мощность, частота вращения и др.), а для электрогидравлических агрегатов – параметры электропитания.

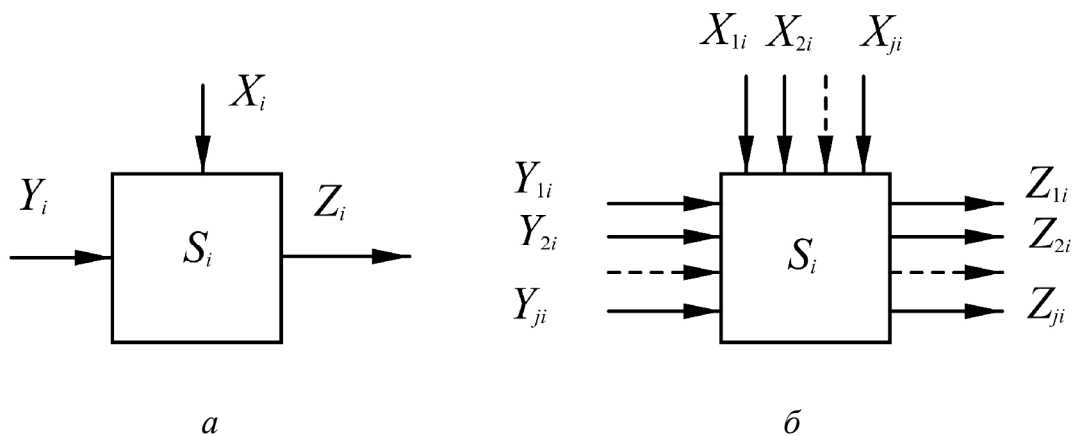


Рис. 6.1. Расщепление параметров входа и выхода блока структурной схемы объекта контроля

Переход от структурной схемы объекта системы к функциональной осуществляется путём расщепления входов и выходов блоков структурной схемы на составляющие (рис. 6.1, б), а также расщепления блоков S_i на блоки S_{ji} и их соединения в функциональные цепочки по параметрам расщепления, в которых

выходной параметр z_{ji} блока S_{ji} является входом $Y_{j(i+1)}$ блока $S_{j(i+1)}$. Если при этом сохраняется структура построения исследуемой системы объекта, то полученную схему будем называть структурно-функциональной схемой объекта с расщепленными параметрами.

6.3. Логические модели

Номинальные значения выходных функциональных параметров объектов, как правило, приведены в технических условиях. Совокупность номинальных значений выходных параметров для каждой конкретной системы объекта определяет область их допустимых значений. Аналогично определяется область допустимых значений и для выходных функциональных параметров отдельных агрегатов, входящих в систему объекта. Контроль технического состояния объектов при эксплуатации во многих случаях проводят с использованием оценок вида «в допуске – не в допуске», «в норме – не в норме», «в технических условиях – не в технических условиях», т. е. имеет место допусковый способ диагностирования.

Логическая модель системы объекта может быть построена путём преобразования её структурно-функциональной схемы с расщепленными параметрами, в которой функциональные блоки S_i заменяются на блоки логической схемы W_i . Входы и выходы таких блоков считаются двоичными логическими входными (выходными) переменными, принимающими значение «истинно» (1), если значения соответствующих их входов (выходов) допустимы (находятся в пределах допуска), и значение «ложно» (0) в ином случае.

Применение логических моделей для целей диагностики требует выполнения ряда условий и, прежде всего, правильности всех входящих в логическую схему объекта диагностирования блоков, т. е. чтобы при наличии нескольких входов $y_i = \{y_{ji}\}$ каждый i -й блок имел только один выход z_i . При этом выход z_i блока был бы допустимым только в том случае, когда все его входы допустимы ($y_{ji} = 1$) и блок W_i исправен. В этом случае выходную функцию блока можно рассматривать как конъюнкцию переменных y_i и W_i :

$$z_i = y_i W_i. \quad (6.5)$$

Логическая модель является правильной, если для значений множества входов блока значения выхода соответствуют множеству допустимых его значений. В частном случае любая комбинация двоичных значений входных данных должна соответствовать допустимому значению выходных данных или, другими словами, выходные значения должны соответствовать установленному правилу соответствия входным.

Например, если использовать « \vee » как знак логического сложения (дизъюнкции), то для комбинации

$$1 \vee 1 = 1; 0 \vee 1 = 1; 1 \vee 0 = 1; 0 \vee 0 = 0 \quad (6.6)$$

допустимыми значениями входов является комбинация «0» и «1», значениями выходов являются также «0» и «1», но их значения подчиняются правилу «логическое сложение» или «логическое ИЛИ»

$$A \vee B = C, \quad (6.7)$$

согласно которому «величина « C » является истиной ($C = 1$), если истинно ($= 1$) хотя бы одно из значений « A » или « B » или оба вместе [45, 60].

Для комбинации входных и выходных значений

$$1 \wedge 1 = 1; 0 \wedge 1 = 0; 1 \wedge 0 = 0; 0 \wedge 0 = 0 \quad (6.8)$$

логическая модель будет правильной, если в качестве знака « \wedge » принять знак логического умножения (конъюнкции), который соответствует следующему правилу принятия решений: «величина « C » является истиной только в том случае, если истинными являются значения « A » и « B » («логическое И») [45, 60]:

$$A \wedge B = C. \quad (6.9)$$

6.4. Графы причинно-следственных связей

Затруднения, возникающие при применении логических схем для диагностики технических устройств или объектов, могут быть устранены при использовании графов причинно-следственных связей. Их целесообразно применять в тех случаях, когда объект диагностирования не имеет явно выраженных функциональных блоков (например, автономные рулевые приводы летательных аппаратов), когда отсутствуют точные аналитические или экспериментальные

зависимости между параметрами объекта и известно лишь то, что один параметр каким-то образом зависит от другого.

Графом причинно-следственных связей системы объекта будем называть ориентированный граф, вершины которого представляют собой входные, внутренние и выходные параметры системы, а дуги отражают причинно-следственные связи между соответствующими вершинами. Направление дуги соответствует перемещению от причины к следствию [41, 45, 48, 63, 64].

Контрольные вопросы

1. Поясните понятие «аналитические модели».
2. Чем ограничивается применение аналитических моделей?
3. Поясните понятие «структурно-функциональные модели».
4. В чём состоит различие между структурной и структурно-функциональной схемами объекта?
5. Поясните понятие «логические модели».
6. Поясните принципы функционирования логической модели.
7. Поясните понятие «графы причинно-следственных связей».

7. СВОЙСТВА ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ПРИЗНАКОВ

7.1. Понятие энтропии

Наиболее общий подход к выбору диагностических признаков для оценки технического состояния объектов состоит в анализе потерь информации, связанных с неполнотой контроля параметров [41, 45, 65].

Центральное место в теории информации занимает понятие «энтропия системы», которая характеризует степень её неопределённости. Энтропия $H(E)$ системы E , имеющей n возможных состояний с вероятностями их возникновения $P(E_1), P(E_2), \dots, P(E_n)$, определится как

$$H(E) = \sum_{i=1}^n P(E_i) \log \frac{1}{P(E_i)} = - \sum_{i=1}^n P(E_i) \log P(E_i). \quad (7.1)$$

В выражении (7.1) логарифм может быть взят при любом основании, так как изменение основания логарифма приводит только к появлению множителя, т. е. к изменению единицы измерения.

Часто энтропию системы вычисляют с помощью двоичных логарифмов, тогда

$$H(E) = - \sum_{i=1}^n P(E_i) \log_2 P(E_i). \quad (7.2)$$

В этом случае в качестве единицы энтропии принимается степень неопределённости системы, имеющей два возможных равновероятных состояния. Эта единица измерения называется двоичной единицей или битом.

Энтропия системы представляет собой среднее значение энтропии отдельных её состояний:

$$H(E) = \sum_{i=1}^n P(E_i) H(E_i). \quad (7.3)$$

В этом уравнении $H(E_i)$ является оценкой неопределённости отдельного состояния системы и вычисляется как

$$H(E_i) = \log_2(1 / P(E_i)). \quad (7.4)$$

Энтропия системы, имеющей n равновероятностных состояний,

$$H(E) = -\sum_{i=1}^n P(E_i) \log_2 P(E_i) = n \frac{1}{n} \log_2 n = \log_2 n. \quad (7.5)$$

Энтропия сложной системы, объединяющей системы A и B ,

$$H(AB) = -\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m P(A_i B_j) \log_2 P(A_i B_j). \quad (7.6)$$

Если A и B представляют собой две статистически независимые системы, то энтропия AB будет равна сумме энтропии систем A и B :

$$H(AB) = H(A) + H(B). \quad (7.7)$$

Если системы A и B статистически зависимы, то энтропия сложной системы AB

$$H(AB) = H(A) + H(B / A) \quad (7.8)$$

или

$$H(AB) = H(B) + H(A / B), \quad (7.9)$$

где $H(B / A)$ и $H(A / B)$ – соответственно условные энтропии системы B относительно системы A и системы A относительно системы B .

Величина $H(B / A)$ представляет собой среднее (ожидаемое) значение энтропии системы B при различных возможных реализациях системы A :

$$H(B / A) = \sum_{i=1}^n P(A_i) H(B / A_i) = -\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m P(A_i) P(B_j / A_i) \log_2 P(B_j / A_i). \quad (7.10)$$

Условная энтропия $H(B / A)$ характеризует статистическую связь систем A и B . Если такая связь отсутствует, то $P(B_j / A_i) = P(B_j)$ и $H(B / A_i) = H(B / A) = H(B)$, т. е. отношения (7.8) и (7.9) преобразуются в отношение (7.7).

В технической диагностике информацию о техническом состоянии системы определяют как разность энтропии системы до и после получения информации. Если начальная энтропия системы равна $H(E)$, а после получения информации она равна $H^*(E)$, то внесённая информация

$$J = H(E) - H^*(E). \quad (7.11)$$

При диагностике объекта (системы E) информацию о его техническом состоянии получают с помощью имеющейся системы диагностирования (системы K). Средняя информация или информативность системы K относительно системы E определится как

$$J_E(K) = H(E) - H(E / K). \quad (7.12)$$

Таким образом, информация будет определяться как разность первоначальной энтропии объекта и его энтропии после того, как стали известны значения контролируемых диагностических признаков и их вероятностная связь с техническим состоянием объекта контроля.

7.2. Информативность

Так как системы E и K являются связанными, значение состояния системы E изменит априорную вероятность состояний системы K . Например, если объект находится в неисправном состоянии, то вероятность поступления тех или иных сигналов от системы диагностирования также изменится. Здесь имеет место важное для технической диагностики свойство взаимности информации, которое выражается равенством

$$J_E(K) = J_K(E), \quad (7.13)$$

где $J_K(E)$ – средняя информация, содержащаяся в системе E относительно системы K :

$$J_K(E) = H(K) - H(K / E). \quad (7.14)$$

Так как $H(E / K) = H(EK) - H(K)$, из выражения (7.12) вытекает важное соотношение, часто используемое в диагностике сложных систем:

$$J_E(K) = H(E) + H(K) - H(EK). \quad (7.15)$$

Выражение (7.15) с учётом вероятностей $P(E)$, $P(K)$ и $P(EK)$ может быть приведено к виду

$$J_E(K) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m P(E_i K_j) \log_2 \frac{P(E_i K_j)}{P(E_i)P(K_j)}. \quad (7.16)$$

Информация относительно состояний системы E_i , полученная в результате контроля признаков K , определяется соотношением

$$J_{E_i}(K) = \sum_{j=1}^m P(K_j / E_i) \log_2 \frac{P(E_i K_j)}{P(E_i)P(K_j)}, \quad (7.17)$$

где $P(K_j / E_i)$ – условная вероятность, $P(K_j / E_i) = P(E_i K_j) / [P(E_i)]$.

Информация, которую несёт признак K_j относительно состояния E_i , определится как

$$J_{E_i}(K) = \log_2 \frac{P(E_i K_j)}{P(E_i)P(K_j)}. \quad (7.18)$$

Пример 1 [41]. Требуется определить информацию при оценке технического состояния аксиально-поршневого гидронасоса переменной подачи по пульсации давления δp в линии нагнетания за насосом, установленным в гидросистеме. При эксплуатации насосов рассматриваемого типа установлено, что изнашивание деталей качающего узла насоса приводит к увеличению пульсации давления в напорной магистрали за насосом [41].

Из 50 исследуемых насосов 35 оказались в исправном состоянии (состояние E_1), а в остальных 15 насосах наблюдалось повышенное изнашивание деталей качающего узла насоса (состояние E_2). При этом амплитуда пульсаций давления за насосом в напорной магистрали гидросистемы изменялась от 0,8 до 4,0 МПа.

Разделим диапазон изменения амплитуды пульсаций давления на три участка: участок с амплитудой пульсаций давления менее 1 МПа – $K_{\delta p_1}$; участок, в котором pulsa-

ция давления составляет 1...2 МПа, – $K_{\delta p_2}$; участок, в котором амплитуда пульсаций давления более 2 МПа, – $K_{\delta p_3}$.

При проведении анализа следует учитывать, что на пульсацию давления за насосом влияют также другие факторы, в том числе избыточное давление на всасывании насоса и техническое состояние гидросистемы (исправность гидроаккумулятора и т. д.).

Результаты анализа технического состояния исследуемых насосов и данные контроля пульсации давления в гидросистемах, в которых были установлены насосы, представлены в табл. 7.1.

Вычисленные значения вероятностей $P(E_i K_{\delta p_j})$, $P(E_i)$ и $P(K_{\delta p_j})$, полученные по исходным данным, сведём в табл. 7.2.

Таблица 7.1

**Статистические данные по оценке
технического состояния насосов гидросистемы автопогрузчика**

Амплитуда пульсаций давления за насосом δp , МПа	Состояние системы измерений пульсаций давления	Состояние качающего узла насоса	
		Исправное E_1	Повышенный износ E_2
Менее 1,0	$K_{\delta p_1}$	20	0
1...2	$K_{\delta p_2}$	10	3
Более 2,0	$K_{\delta p_3}$	5	12

Таблица 7.2

**Вероятностные характеристики оценки
технического состояния насосов гидросистемы**

E_i	$K_{\delta p_j}$			$P(E_i)$
	$K_{\delta p_1}$	$K_{\delta p_2}$	$K_{\delta p_3}$	
$P(E_1)$	0.40	0.20	0.10	0.70
$P(E_2)$	0	0.06	0.24	0.30
$P(k_{\delta p_j})$	0.40	0.26	0.34	–

По выражению (7.16) и результатам контроля амплитуды пульсаций давления в напорной магистрали гидросистемы вычисляем *среднюю информацию о состоянии* качающего узла насоса:

$$J_E(K_{\delta P}) = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^3 P(E_i K_{\delta P_j}) \log_2 \frac{P(E_i K_{\delta P_j})}{P(E_i)P(K_{\delta P_j})} =$$

$$= \frac{1}{\lg 2} \left[\begin{array}{l} 0,4 \cdot \lg \frac{0,4}{0,7 \cdot 0,4} + 0,2 \cdot \lg \frac{0,2}{0,7 \cdot 0,26} + \\ + 0,10 \cdot \lg \frac{0,10}{0,70 \cdot 0,34} + 0 \cdot \lg \frac{0}{0,30 \cdot 0,40} + \\ + 0,06 \cdot \lg \frac{0,06}{0,30 \cdot 0,26} + 0,24 \cdot \lg \frac{0,24}{0,30 \cdot 0,34} \end{array} \right] = 0,3815.$$

Это значение свидетельствует о том, что пульсация давления за насосом не полностью характеризует техническое состояние качающего узла насоса.

Найдём значение получаемой информации относительно *исправного* состояния качающего узла насоса по результатам измерения амплитуды пульсаций давления δp за насосом с учётом того, что $P(K_{\delta P_j} / E_1) = P(E_1 K_{\delta P_j}) / P(E_1)$:

$$J_{E_1}(K_{\delta P}) = \sum_{j=1}^3 P(K_j / E_1) \log_2 \frac{P(E_1 K_j)}{P(E_1)P(K_{\delta P_j})} =$$

$$= \frac{1}{\lg 2} \left[\frac{0,4}{0,7} \cdot \lg \frac{0,4}{0,7 \cdot 0,4} + \frac{0,2}{0,7} \cdot \lg \frac{0,2}{0,7 \cdot 0,26} + \frac{0,1}{0,7} \cdot \lg \frac{0,1}{0,7 \cdot 0,4} \right] = 0,154.$$

Информативность пульсаций давления для исправных насосов достаточно низка, т. е. для исправных насосов пульсации давления могут изменяться в широком диапазоне.

Определим информативность значения пульсации давления за насосом как диагностического признака *неисправного* состояния качающего узла насоса:

$$J_{E_2}(K_{\delta P}) = \sum_{j=1}^3 P(K_{\delta P_j} / E_2) \log_2 \frac{P(E_2 K_{\delta P_j})}{P(E_2)P(K_{\delta P_j})} =$$

$$= \frac{1}{\lg 2} \left[\frac{0}{0,3} \cdot \lg \frac{0}{0,3 \cdot 0,4} + \frac{0,06}{0,3} \cdot \lg \frac{0,06}{0,3 \cdot 0,26} + \frac{0,24}{0,3} \cdot \lg \frac{0,24}{0,3 \cdot 0,34} \right] = 0,911.$$

Для неисправных насосов характерны повышенные пульсации давления.

Оценим значение информации относительно технического состояния качающего узла насоса, если становится известным значение пульсации давления за насосом.

Если амплитуда пульсаций давления за насосом менее 1 МПа, то

$$J_E \left(K_{\delta p_1} \right) = \sum_{j=1}^3 P \left(\frac{E_j}{K_{\delta p_1}} \right) \cdot \log_2 \frac{P(E_j K_{\delta p_1})}{P(E_j)P(K_{\delta p_1})} =$$

$$= \frac{1}{\lg 2} \left[\frac{0,4}{0,4} \cdot \lg \frac{0,4}{0,7 \cdot 0,4} + \frac{0}{0,4} \cdot \lg \frac{0}{0,3 \cdot 0,4} \right] = 0,515.$$

Если амплитуда пульсаций давления за насосом 1...2 МПа, то

$$J_E \left(K_{\delta p_2} \right) = \sum_{j=1}^3 P \left(\frac{E_j}{K_{\delta p_2}} \right) \cdot \log_2 \frac{P(E_j K_{\delta p_2})}{P(E_j)P(K_{\delta p_2})} =$$

$$= \frac{1}{\lg 2} \left[\frac{0,2}{0,26} \cdot \lg \frac{0,2}{0,7 \cdot 0,26} + \frac{0,06}{0,26} \cdot \lg \frac{0,06}{0,3 \cdot 0,26} \right] = 0,017.$$

Если амплитуда пульсаций давления за насосом более 2 МПа, то

$$J_E \left(K_{\delta p_3} \right) = \sum_{j=1}^3 P \left(\frac{E_j}{K_{\delta p_3}} \right) \cdot \log_2 \frac{P(E_j K_{\delta p_3})}{P(E_j)P(K_{\delta p_3})} =$$

$$= \frac{1}{\lg 2} \left[\frac{0,1}{0,34} \cdot \lg \frac{0,1}{0,7 \cdot 0,34} + \frac{0,24}{0,34} \cdot \lg \frac{0,24}{0,3 \cdot 0,34} \right] = 0,503.$$

Таким образом, наибольшей информацией можно обладать, когда значения пульсаций давления за насосом будут менее 1 МПа или более 2 МПа (состояния $K_{\delta p_1}$ и $K_{\delta p_3}$).

Оценим количество информации, получаемой при измерении амплитуды пульсаций давления за насосом, относительно *неисправного* состояния качающего узла насоса.

При амплитуде пульсаций давления менее 1 МПа (из формулы (7.18))

$$J_{E_2}(K_{\delta p_1}) = \log_2 \frac{P(E_2 K_{\delta p_1})}{P(E_2)P(K_{\delta p_1})} = \frac{1}{\lg 2} \lg \frac{0}{0,3 \cdot 0,4} = -\infty.$$

При амплитуде пульсаций давления менее 1...2 МПа

$$J_{E_2}(K_{\delta p_2}) = \log_2 \frac{P(E_2 K_{\delta p_2})}{P(E_2)P(K_{\delta p_2})} = \frac{1}{\lg 2} \lg \frac{0,06}{0,3 \cdot 0,26} = -0,38.$$

При амплитуде пульсаций давления более 2 МПа

$$J_{E_2}(K_{\delta p_3}) = \log_2 \frac{P(E_2 K_{\delta p_3})}{P(E_2)P(K_{\delta p_3})} = \frac{1}{\lg 2} \lg \frac{0,24}{0,3 \cdot 0,34} = 1,24.$$

Из расчётов видно, что амплитуда пульсаций давления менее 1 МПа не несёт информации о неисправном состоянии, т. е. при наличии пульсации менее 1 МПа невозможно судить о неисправности.

Амплитуда пульсаций давления в диапазоне от 1 до 2 МПа также неинформативна для принятия решения.

Наличие амплитуды пульсаций давления более 2 МПа позволяет предположить возникновение неисправности насоса.

Оценим количество информации, получаемой при измерении амплитуды пульсаций давления за насосом, относительно *исправного* состояния качающего узла насоса.

При амплитуде пульсаций давления менее 1 МПа:

$$J_{E_1}(K_{\delta p_1}) = \log_2 \frac{P(E_1 K_{\delta p_1})}{P(E_1)P(K_{\delta p_1})} = \frac{1}{\lg 2} \lg \frac{0,4}{0,7 \cdot 0,4} = 0,515.$$

При амплитуде пульсаций давления менее 1...2 МПа

$$J_{E_1}(K_{\delta p_2}) = \log_2 \frac{P(E_1 K_{\delta p_2})}{P(E_1)P(K_{\delta p_2})} = \frac{1}{\lg 2} \lg \frac{0,2}{0,7 \cdot 0,26} = 0,136.$$

При амплитуде пульсаций давления более 2 МПа

$$J_{E_1}(K_{\delta p_3}) = \log_2 \frac{P(E_1 K_{\delta p_3})}{P(E_1)P(K_{\delta p_3})} = \frac{1}{\lg 2} \lg \frac{0,1}{0,7 \cdot 0,34} = -1,25.$$

Из расчётов видно, что амплитуда пульсаций давления менее 1 МПа является наиболее информативным признаком об исправном состоянии, т. е. при наличии пульсаций менее 1 МПа можно говорить о том, что насос исправен.

При амплитуде пульсаций давления от 1 до 2 МПа можно говорить о том, что насос скорее исправен, чем неисправен.

При наличии пульсаций давления более 2 МПа судить об исправности насоса невозможно, т. е. вероятность исправного состояния крайне низка.

Из анализа полученных результатов следует, что наибольшую информацию о состоянии качающего узла насоса имеет в первом случае, когда амплитуда пульсаций давления за насосом менее 1 МПа, так как в этом случае можно с большой уверенностью утверждать, что качающий узел насоса может находиться в исправном состоянии. В то же время при повышенном давлении (более 2 МПа) велика вероятность того, что качающий узел находится в неисправном состоянии.

На основе примера 1 выполнить задание, исходных данные которого приведены в табл. 7.3.

Таблица 7.3

Исходные данные по вариантам

№ варианта	E_i	$K_{\delta p_j}$			$P(E_i)$
		$K_{\delta p_1}$	$P(E_2)$	$K_{\delta p_3}$	
1	$P(E_1)$	0.50	$P(k_{\delta p_j})$	0.05	0.70
	$P(E_2)$	0	0.05	0.25	0.30
	$P(k_{\delta p_j})$	0.50	0.20	0.30	–
2	$P(E_1)$	0.60	0.05	0.05	0.70
	$P(E_2)$	0	0.05	0.25	0.30
	$P(k_{\delta p_j})$	0.60	0.10	0.30	–

№ варианта	E_i	$K_{\delta p_j}$			$P(E_i)$
		$K_{\delta p_1}$	$K_{\delta p_2}$	$K_{\delta p_3}$	
3	$P(E_1)$	0.40	0.05	0.05	0.50
	$P(E_2)$	0	0.25	0.25	0.50
	$P(k_{\delta p_j})$	0.40	0.30	0.30	–
4	$P(E_1)$	0.30	0.10	0.10	0.50
	$P(E_2)$	0	0.10	0.40	0.50
	$P(k_{\delta p_j})$	0.30	0.20	0.50	–
5	$P(E_1)$	0.15	0.15	0.20	0.50
	$P(E_2)$	0	0.25	0.25	0.50
	$P(k_{\delta p_j})$	0.15	0.40	0.45	–
6	$P(E_1)$	0.20	0.20	0.10	0.50
	$P(E_2)$	0.20	0.20	0.10	0.50
	$P(k_{\delta p_j})$	0.40	0.40	0.20	–
7	$P(E_1)$	0.10	0.10	0.10	0.30
	$P(E_2)$	0.40	0.20	0.10	0.70
	$P(k_{\delta p_j})$	0.50	0.30	0.20	–
8	$P(E_1)$	0.10	0.10	0.10	0.30
	$P(E_2)$	0.10	0.20	0.40	0.70
	$P(k_{\delta p_j})$	0.20	0.30	0.50	–
9	$P(E_1)$	0.25	0.05	0.00	0.30
	$P(E_2)$	0.10	0.20	0.40	0.70
	$P(k_{\delta p_j})$	0.35	0.25	0.40	–
10	$P(E_1)$	0.20	0.05	0.05	0.30
	$P(E_2)$	0.30	0.40	0.00	0.70
	$P(k_{\delta p_j})$	0.50	0.45	0.05	–
11	$P(E_1)$	0.20	0.05	0.05	0.30
	$P(E_2)$	0.30	0.00	0.40	0.70
	$P(k_{\delta p_j})$	0.50	0.05	0.45	–

№ варианта	E_i	$K_{\delta p_j}$			$P(E_i)$
		$K_{\delta p_1}$	$K_{\delta p_2}$	$K_{\delta p_3}$	
12	$P(E_1)$	0.20	0.05	0.05	0.30
	$P(E_2)$	0.00	0.40	0.30	0.70
	$P(k_{\delta p_j})$	0.20	0.45	0.35	–
13	$P(E_1)$	0.10	0.10	0.00	0.20
	$P(E_2)$	0.40	0.20	0.20	0.80
	$P(k_{\delta p_j})$	0.50	0.30	0.20	–
14	$P(E_1)$	0.05	0.10	0.05	0.20
	$P(E_2)$	0.60	0.10	0.10	0.80
	$P(k_{\delta p_j})$	0.65	0.20	0.15	–
15	$P(E_1)$	0.05	0.05	0.10	0.20
	$P(E_2)$	0.60	0.10	0.10	0.80
	$P(k_{\delta p_j})$	0.65	0.15	0.20	–
16	$P(E_1)$	0.05	0.05	0.10	0.20
	$P(E_2)$	0.10	0.60	0.10	0.80
	$P(k_{\delta p_j})$	0.15	0.65	0.20	–
17	$P(E_1)$	0.05	0.05	0.10	0.20
	$P(E_2)$	0.10	0.10	0.60	0.80
	$P(k_{\delta p_j})$	0.15	0.15	0.70	–
18	$P(E_1)$	0.60	0.10	0.10	0.80
	$P(E_2)$	0.10	0.05	0.05	0.20
	$P(k_{\delta p_j})$	0.70	0.15	0.15	–
19	$P(E_1)$	0.10	0.60	0.10	0.80
	$P(E_2)$	0.10	0.05	0.05	0.20
	$P(k_{\delta p_j})$	0.20	0.65	0.15	–
20	$P(E_1)$	0.10	0.10	0.60	0.80
	$P(E_2)$	0.10	0.05	0.05	0.20
	$P(k_{\delta p_j})$	0.20	0.15	0.65	–

7.3. Диагностическая ценность

Рассмотрим подробнее основные свойства совокупности диагностических признаков K , к которым в первую очередь относят диагностическую ценность (вес) и чувствительность.

При диагностировании объекта область возможных значений измеряемого параметра (диагностического признака) в большинстве случаев разбивается на интервалы, и характерным является наличие значения параметра в данном интервале. В связи с этим результат количественного определения измеряемого параметра может рассматриваться как признак, принимающий несколько возможных состояний (имеющий несколько разрядов). Например, давление нагнетания в гидросистемах ряда отечественных воздушных судов при неработающих потребителях должно быть $p_n = 21,0^{+0,7}_{-1,0}$. В зависимости от технического состояния системы давление p_n в нагнетающей магистрали может быть в пределах, менее или более оговоренных в технических условиях (ТУ), т. е. в этом случае параметр p_n будет иметь интервалы, которые часто называют диагностическими.

В общем случае m -интервальный признак K_j имеет m возможных состояний: $k_{j_1}, k_{j_2}, \dots, k_{j_m}$. Если в результате диагностирования выявлено, что для данного состояния гидропривода признак K_j имеет значение k_{j_s} , то это значение называют *реализацией признака*.

Диагностическая ценность признака определяется информацией, которая вносится признаком в систему состояний объекта диагностирования. В качестве диагностического веса реализации признака K_j для состояния E_i объекта принимают

$$D_{E_i}(k_{j_s}) = \log_2 \frac{P(E_i/k_{j_s})}{P(E_i)} = \log_2 \frac{P(k_{j_s}/E_i)}{P(k_{j_s})}, \quad (7.19)$$

где $P(E_i/k_{j_s})$ – вероятность определения состояния E_i при условии, что признак K_j получил значение k_{j_s} ;

$P(E_i)$ – априорная вероятность диагноза;

$P(k_{j_s}/E_i)$ – вероятность попадания признака K_j в интервал s для объекта с состоянием E_i ;

$P(k_{j_s})$ – вероятность появления этого интервала у всех исследуемых объектов контроля с различным техническим состоянием.

Пример 2 [41]. В соответствии с регламентом технического обслуживания самолёта в процессе эксплуатации осуществляют проверку технического состояния насосной станции тормозной гидросистемы самолёта по времени зарядки гидроаккумулятора $\tau_{зар}$. На время зарядки гидроаккумулятора от насосной станции, кроме подачи насосной станции, оказывают влияние общий уровень внутренних утечек в тормозной системе самолёта и техническое состояние гидроаккумулятора. Согласно техническим условиям время зарядки гидроаккумулятора от насосной станции при неработающих потребителях не должно превышать 20 с.

На основании обработки статистических данных эксплуатации подконтрольной группы самолётов данного типа получены вероятностные характеристики о значениях контролируемого признака исправного E_1 и неисправного E_2 состояний насосных станций (табл. 7.4).

Время зарядки гидроаккумулятора тормозной системы самолёта от насосной станции $\tau_{зар}$ представляет собой признак K_j , имеющий три диагностических интервала. Значения $P(k_{j_s})$ определялись из соотношения

$$P(k_{j_s}) = P(E_1) \cdot P(k_{j_s} / E_1) + P(E_2) \cdot P(k_{j_s} / E_2).$$

Таблица 7.4

Исходные данные к расчету

E	$\tau_{зар}$			$P(E)$
	$\tau_{зар} < 16$ с	$16 \text{ с} \leq \tau_{зар} \leq 20$ с	$\tau_{зар} > 20$ с	
$P(E_1)$	0.60	0.30	0.10	0.80
$P(E_2)$	0	0.30	0.70	0.20
$P(k_{j_s})$	0.48	0.30	0.22	—

Диагностические ценности интервалов:

$$D_{E_1}(k_{j_1}) = \log_2 \frac{P(k_{j_1} / E_1)}{P(k_{j_1})} = \log_2 \frac{0,60}{0,48} = 0,32;$$

$$D_{E_1}(k_{j_2}) = \log_2 \frac{P(k_{j_2} / E_1)}{P(k_{j_2})} = \log_2 \frac{0,3}{0,3} = 0;$$

$$D_{E_1}(k_{j_3}) = \log_2 \frac{P(k_{j_3}/E_1)}{P(k_{j_3})} = \log_2 \frac{0,10}{0,22} = -1,14;$$

$$D_{E_2}(k_{j_1}) = \log_2 \frac{P(k_{j_1}/E_2)}{P(k_{j_1})} = \log_2 \frac{0}{0,48} = -\infty;$$

$$D_{E_2}(k_{j_2}) = \log_2 \frac{P(k_{j_2}/E_2)}{P(k_{j_2})} = \log_2 \frac{0,3}{0,3} = 0;$$

$$D_{E_2}(k_{j_3}) = \log_2 \frac{P(k_{j_3}/E_2)}{P(k_{j_3})} = \log_2 \frac{0,70}{0,22} = 1,67.$$

Анализ полученных данных показывает, что диагностический вес второго интервала равен 0, т. е. если время зарядки гидроаккумулятора тормозной гидросистемы самолёта от насосной станции составляет 16...20 с, то неэффективно оценивать техническое состояние насосной станции только по этому признаку. Диагностическая ценность первого интервала для неисправного состояния насосной станции стремится к минус ∞ , что отрицает по статистическим данным возможность неисправного состояния насосной станции. Наибольшую ценность для определения наличия исправного состояния представляет первый интервал, т. е. при зарядке за время менее 16 с можно с большой долей вероятности говорить об исправности насосной станции тормозной гидросистемы самолёта. Если время зарядки гидроаккумулятора превышает 20 с, то с большой долей вероятности насосная станция неисправна.

На основе примера 2 выполнить задание, исходных данные которого приведены в табл. 7.5.

Таблица 7.5

Исходные данные по вариантам

№ варианта	E	$\tau_{зар}$			P(E)
		$\tau_{зар} < 16$ с	$16 \text{ с} \leq \tau_{зар} \leq 20$ с	$\tau_{зар} > 20$ с	
Пример	$P(E_1)$	0.60	0.30	0.10	0.80
	$P(E_2)$	0	0.30	0.70	0.20
	$P(k_{js})$	$0.6 \times 0.8 + 0 \times 0.2 = 0.48$	$0.3 \times 0.8 + 0.3 \times 0.2 = 0.30$	$0.1 \times 0.8 + 0.7 \times 0.2 = 0.22$	—

№ варианта	E	$\tau_{зар}$			$P(E)$
		$\tau_{зар} < 16 \text{ с}$	$16 \text{ с} \leq \tau_{зар} \leq 20 \text{ с}$	$\tau_{зар} > 20 \text{ с}$	
1	$P(E_1)$	0.50	0.25	0.25	0.50
	$P(E_2)$	0.25	0.25	0.50	0.50
2	$P(E_1)$	0.80	0.20	0.00	0.50
	$P(E_2)$	0.00	0.20	0.80	0.50
3	$P(E_1)$	0.80	0.20	0.00	0.80
	$P(E_2)$	0.00	0.20	0.80	0.20
4	$P(E_1)$	0.50	0.25	0.25	0.80
	$P(E_2)$	0.25	0.25	0.50	0.20
5	$P(E_1)$	0.80	0.10	0.10	0.50
	$P(E_2)$	0.10	0.10	0.80	0.50
6	$P(E_1)$	0.80	0.10	0.10	0.20
	$P(E_2)$	0.10	0.10	0.80	0.80
7	$P(E_1)$	0.00	0.20	0.80	0.80
	$P(E_2)$	0.80	0.20	0.00	0.20
8	$P(E_1)$	0.80	0.20	0.00	0.20
	$P(E_2)$	0.00	0.20	0.80	0.80
9	$P(E_1)$	0.25	0.50	0.25	0.50
	$P(E_2)$	0.25	0.50	0.25	0.50
10	$P(E_1)$	0.25	0.50	0.25	0.80
	$P(E_2)$	0.25	0.50	0.25	0.20
11	$P(E_1)$	0.25	0.50	0.25	0.20
	$P(E_2)$	0.25	0.50	0.25	0.80
12	$P(E_1)$	0.25	0.25	0.50	0.80
	$P(E_2)$	0.25	0.25	0.50	0.20
13	$P(E_1)$	0.25	0.25	0.50	0.20
	$P(E_2)$	0.25	0.25	0.50	0.80
14	$P(E_1)$	0.50	0.25	0.25	0.80
	$P(E_2)$	0.50	0.25	0.25	0.20

№ варианта	E	$\tau_{зар}$			$P(E)$
		$\tau_{зар} < 16 \text{ с}$	$16 \text{ с} \leq \tau_{зар} \leq 20 \text{ с}$	$\tau_{зар} > 20 \text{ с}$	
15	$P(E_1)$	0.50	0.25	0.25	0.20
	$P(E_1)$	0.50	0.25	0.25	0.80
16	$P(E_1)$	0.25	0.25	0.50	0.50
	$P(E_1)$	0.25	0.25	0.50	0.50
17	$P(E_1)$	0.00	0.50	0.50	0.50
	$P(E_1)$	0.00	0.50	0.50	0.50
18	$P(E_1)$	0.50	0.25	0.25	0.50
	$P(E_1)$	0.50	0.25	0.25	0.50
19	$P(E_1)$	0.50	0.50	0.00	0.50
	$P(E_1)$	0.50	0.50	0.00	0.50
20	$P(E_1)$	0.75	0.25	0.00	0.50
	$P(E_1)$	0.00	0.25	0.75	0.50

7.4. Чувствительность

Чувствительность диагностического признака определяется степенью его значения при изменении структурных параметров системы.

Количественно чувствительность признака K_j оценивается коэффициентом чувствительности v_j , который в первом приближении может быть определен как

$$v_j = \frac{\Delta k_{js}}{\Delta y_j}, \quad (7.20)$$

где Δk_{js} – приращение реализации признака k_{js} ;

y_j – структурный параметр объекта диагностирования, связанный с диагностическим признаком зависимостью $K_j = \varphi(y_j)$;

Δy_j – изменение структурного параметра y_j .

Очевидно, чем больше чувствительность признака v_j , тем на более ранней стадии развития эта неисправность может быть обнаружена. Выходные параметры системы, чувствительность которых к изменению структурных параметров мала, нецелесообразно выбирать в качестве диагностических признаков.

7.5. Формирование диагностических признаков

Таблица функций неисправностей. Выбор и оптимизация совокупности диагностических параметров для контроля технического состояния объектов являются основными задачами при разработке систем их диагностирования. Для их решения широко используются диагностические модели объектов, описанные выше. Так, вводя в логическую или функциональную схему исследуемой системы объекта с расщепленными параметрами возможные при эксплуатации неисправности, получаем для каждого случая совокупность выходных параметров логических блоков системы $\{z_i\}$, принимающих значения «1» или «0» в зависимости от соответствия значения z_i требованиям технических условий. Далее по полученным значениям z_i составляется таблица функций неисправностей (ТФН), анализ которой с использованием условий минимизации булевых функций позволяет определить минимальную совокупность диагностических параметров для оценки технического состояния системы объекта и нахождения в ней отказавшего элемента.

Фактически ТФН содержит виды технических состояний, неисправностей или дефектов технического устройства (матрица (вектор-столбец) неисправностей) и соответствующие им параметры диагностического сигнала (матрица-столбец диагностических параметров).

Построенная ТФН позволяет выявить оптимальную совокупность диагностических параметров, позволяющую определить появление признаков возникновения в техническом устройстве отклонений от нормального состояния и установить причины этого отклонения, т. е. обнаружить вид технического состояния, неисправность или дефект. Такой набор диагностических параметров и называют диагностическим признаком (в единственном числе) неисправности.

Совокупность видов технических состояний, неисправностей или дефектов и соответствующих им диагностических параметров с установленными величи-

нами (эталоны) этих параметров образуют *систему определяющих критериев неисправностей* [57]. При этом величина диагностического параметра должна быть установлена как соответствующая состоянию «Допустимо», «Требуется принятия мер», «Недопустимо» с верхней границей (превышает порог) или нижней границей (не превышает порог).

Достоверность контроля. Под *достоверностью* технического диагностирования (контроля технического состояния) по ГОСТ 20911 понимают степень объективного соответствия результатов диагностирования (контроля) действительному техническому состоянию объекта [5].

Достоверность контроля системы объекта

$$D = 1 - (P_{II}P_{Л} + (1 - P_{II})P_{Н}), \quad (7.21)$$

где P_{II} – вероятность исправного состояния объекта;

$P_{Л}$ – вероятность ложной информации об отказе;

$P_{Н}$ – вероятность невыдачи информации об отказе.

Значения показателей $P_{Н}$ и $P_{Л}$ зависят от методической и инструментальной достоверности контроля и надёжности системы или средств контроля, применяемых для оценки технического состояния объекта. Вероятности $P_{Н}$ и $P_{Л}$ могут быть определены как

$$P_{Н} = P_{С.К}K_{П.К}P_{Н.О} + P_{С.К}(1 - P_{П.К}) + (1 - P_{С.К})P_{С.К.Г}; \quad (7.22)$$

$$P_{Л} = (1 - P_{С.К})P_{С.К.Н.Г} + P_{С.К}K_{П.К}P_{Л.О}, \quad (7.23)$$

где $P_{С.К}$ – вероятность исправного состояния системы контроля;

$K_{П.К}$ – полнота контроля;

$P_{Н.О}$ – вероятность необнаруженного отказа вследствие погрешностей измерений;

$P_{С.К.Г}$ – вероятность отказа системы контроля, при котором она постоянно выдает информацию «годен» вне зависимости от состояния объекта контроля («постоянно годен»);

$P_{С.К.Н.Г}$ – вероятность отказа системы контроля, при котором она постоянно выдает информацию «не годен» вне зависимости от состояния объекта контроля («постоянно не годен»);

$P_{Л.О}$ – вероятность ложного отказа вследствие погрешностей измерений.

Как следует из выражения (7.22), необнаружение отказа в охваченной контролем системе объекта (первое слагаемое) может быть связано с погрешностью измерений при исправной системе контроля. С другой стороны, необнаружение отказа может произойти также в результате недостаточного охвата системы объекта контролем (второе слагаемое) или вследствие отказа системы контроля типа «постоянно годен» (третье слагаемое).

Анализ выражения (7.23) показывает, что «ложный отказ» возможен вследствие отказа системы контроля типа «постоянно не годен» (первое слагаемое), а в охваченной контролем части системы объекта – в результате погрешности измерений (второе слагаемое).

При полном охвате системы объекта контролем и идеальной системе контроля

$$P_{\text{Л}} = P_{\text{Л.О}} \text{ и } P_{\text{Н}} = P_{\text{Н.О}}. \quad (7.24)$$

Полнота контроля. Под полнотой контроля понимают методическую достоверность контроля технического состояния объекта, определяющую возможность выявления отказов (неисправностей) в объекте при выбранном методе его диагностирования (контроля) [5]. Значение полноты контроля $K_{\text{П.К}}$ представляет собой условную вероятность обнаружения факта отказа в системе объекта, если отказ действительно произошёл:

$$K_{\text{П.К}} = \lambda_{\text{К.Ч}} / \lambda_{\text{О.К}}, \quad (7.25)$$

где $\lambda_{\text{О.К}}$, $\lambda_{\text{К.Ч}}$ – соответственно интенсивности отказов объекта контроля (системы объекта) и его контролируемой части.

Исходными данными для оценки полноты контроля объектов являются: функциональная схема и описание принципа работы объекта; перечень контролируемых параметров и стимулирующих воздействий (управляющих сигналов и внешних воздействий); перечень видов отказов элементов (агрегатов) объекта и данные об интенсивности их возникновения в эксплуатации.

Оценку полноты контроля сложной системы объекта рекомендуется производить в следующей последовательности. На первом этапе разрабатывается

функционально-логическая модель (ФЛМ) объекта контроля, на основании анализа которой для контролируемых параметров исследуемой системы объекта составляется уравнение связи между выходными и входными параметрами блоков, входящих в ФЛМ. Затем формируется таблица полноты контроля (ТПК), состоящая из матрицы и итоговой строки *таблицы полноты контроля* (ИСП). По результатам заполнения итоговой строки ТПК определяется количественная оценка $K_{ПК}$ полноты контроля исследуемой системы объекта.

Определение глубины поиска отказов. Приспособленность объекта и его системы контроля к поиску отказавших элементов (техническому диагностированию) характеризуется коэффициентом глубины поиска отказов K_G . Коэффициент глубины поиска отказов определяет разрешающую способность совокупности диагностических признаков, заложенных в систему контроля, и оценивается условной вероятностью обнаружения отказа с заданной подробностью (до одного, двух и более конструктивно-съёмных блоков или агрегатов) или с указанием составной части объекта с точностью, до которой определяется место отказа (неисправности) [5] при условии, что в системе объекта произошёл отказ.

Для вычисления вероятности выявления отказов с заданной глубиной их поиска необходимо определить, в какой степени множество проверок, осуществляемых системой контроля, обладает свойством различать виды отказов. Такой анализ может быть проведён с использованием таблиц функций неисправностей или специально построенных *таблиц глубины поиска* отказов (ТПП). В частном случае ТПК можно рассматривать как ТПП, если для поиска отказов используются те же контролируемые параметры, что и при оценке полноты контроля. По сравнению с ТПК в ТПП указываются ФЛБ, входящие в конструктивно-съёмный блок. Вероятность выявления отказа с заданной глубиной характеризует, какая доля отказов выявляется с точностью до одного, двух, трёх и так далее конструктивно-съёмных блоков.

В **итоговой строке** *таблицы глубины* поиска отказов (ИСГ) столбцы матрицы рекомендуется отмечать цифровыми метками (одинаковые столбцы отмечаются одной и той же меткой – одной и той же цифрой). На основании сформированной итоговой строки ТПП определяется коэффициент глубины поиска отказов K_2 .

Коэффициент глубины поиска отказов с точностью до одного конструктивно-съёмного блока (объекта, узла):

$$K_{\Gamma_1} = \sum_{k=1}^m \lambda_{k_1} / \sum_{k=1}^m \lambda_k, \quad (7.26)$$

где m – число конструктивно-съёмных блоков (КСБ), входящих в систему объекта;

λ_{k_1} – интенсивность отказов k -го КСБ, определяемых с точностью до одного конструктивно-съёмного блока;

λ_k – интенсивность отказов k -го КСБ;

$\sum_{k=1}^m \lambda_k = \lambda_{OK}$ – интенсивность отказов системы объекта.

Коэффициент глубины поиска отказов в общем виде:

$$K_{\Gamma_a} = \sum_{j \in m_a} \lambda_j / \sum_{i=1}^m \lambda_i, \quad (7.27)$$

где m_a – множество КСБ, отмеченных в ИСГ, соответствующих определенным степеням подробности a ($a = 1, 2, 3, \dots, m$).

Рассмотрим пример формирования диагностических признаков по параметрам диагностического сигнала (табл. 7.6).

Для диагностирования асинхронного электродвигателя проводим измерение вибрации на его подшипниковых узлах. Анализируются параметры характеристик сигналов виброускорения (A), виброскорости (V), виброперемещения (S). В качестве диагностических параметров используются гармоники ($1f_0, 1,5 f_0, 2 f_0, 2,5 f_0, 3 f_0,$) и субгармоники частоты вращения вала f_0 , частота сети f_C и её вторая гармоника $2f_C$, пазовая частота (произведение количество пазов статора или стержней (пазов) ротора на частоту вращения вала), которая модулирована удвоенной частотой сети ($f_{\Pi} \pm 2f_C$), частота скольжения $f_{СК}$, определяемая как разность между частотой вращения вала и частотой сети. Все спектральные составляющие получаем по спектрам виброускорения, виброскорости и виброперемещения.

Таблица полноты контроля глубины поиска отказов

Частота	Параметр	1	2			3	4		
		Фундамент	Ротор			Статор	Муфта		
		Ослабление крепления	Дисбаланс	Электромагнитный дефект	Подшипник	Электромагнитный дефект	Дисбаланс	Расцентровка	Ослабление крепления
$0.5f_{об} <$	A ₁	0	0	0	0	0	0	0	0
	V ₁	0	0	0	0	0	0	0	1
	S ₁	1	0	0	0	0	0	0	1
$0.5f_{об} =$	A ₂	0	0	0	0	0	0	0	0
	V ₂	0	0	0	0	0	0	0	1
	S ₂	1	0	0	0	0	0	0	1
$f_{об} =$	A ₃	0	0	0	0	0	0	0	0
	V ₃	0	1	0	0	0	1	1	1
	S ₃	1	0	0	0	0	0	0	0
$1.5f_{об} =$	A ₄	0	0	0	0	0	0	0	0
	V ₄	0	0	0	0	0	0	0	1
	S ₄	1	0	0	0	0	0	0	0
$2f_{об} =$	A ₅	0	0	0	0	0	0	0	0
	V ₅	0	0	0	0	0	0	1	1
	S ₅	1	0	0	0	0	0	0	0
$2.5f_{об} =$	A ₆	0	0	0	0	0	0	0	0
	V ₆	0	0	0	0	0	0	0	1
	S ₆	0	0	0	0	0	0	0	0
$3f_{об} =$	A ₇	0	0	0	0	0	0	0	0
	V ₇	0	0	0	0	0	0	1	1
	S ₇	0	0	0	0	0	0	0	0
$f_c =$	A ₈	0	0	0	0	0	0	0	0
	V ₈	0	0	1	0	1	0	0	0
	S ₈	0	0	0	0	0	0	0	0
$2f_c =$	A ₉	0	0	0	0	0	0	0	0
	V ₉	0	0	1	0	1	0	0	0
	S ₉	0	0	0	0	0	0	0	0
$f_n(\pm 2f_c) =$	A ₁₀	0	0	0	0	1	0	0	0
	V ₁₀	0	0	0	0	0	0	0	0
	S ₁₀	0	0	0	0	0	0	0	0

Частота	Параметр	1	2			3	4		
		Фундамент	Ротор			Статор	Муфта		
		Ослабление крепления	Дисбаланс	Электромагнитный дефект	Подшипник	Электромагнитный дефект	Дисбаланс	Расцентровка	Ослабление крепления
$f_{скольж} =$	A ₁₁	0	0	0	0	0	0	0	0
	V ₁₁	0	0	1	0	0	0	0	0
	S ₁₁	0	0	0	0	0	0	0	0
ИСП (итоговая строка полноты контроля)		1	1	1	0	1	1	1	1
ИСГ (итоговая строка таблицы глубины поиска отказа)		A	B	C	D	E	B	F	G
ИСГ ₁		1	–			1	–		
ИСГ ₂		–	1			–	1		

В качестве узлов диагностирования определяем:

1 – фундамент и его дефект «ослабление жёсткости»;

2 – ротор двигателя, который может иметь такие неисправности, как дисбаланс (неуравновешенность), нарушение симметрии электромагнитного поля, неисправность подшипников качения;

3 – статор, который может иметь такие неисправности, как нарушение симметрии электромагнитного поля;

4 – муфту между электродвигателем и потребителем, которая может иметь такие неисправности, как дисбаланс (неуравновешенность), нарушение соосности валов (расцентровка), ослабление взаимного крепления деталей.

В соответствующие поля таблицы 7.6 вносим «0», если данный диагностический параметр не проявляется при возникновении данного дефекта, и «1», если параметр превышает заданную величину при возникновении данного дефекта [40, 44, 47, 55, 57].

При анализе введённых данных в ИСП значение вводится по «ИЛИ». В поля ИСГ вводим буквенное обозначение диагностического признака по уникальности сочетаний параметров сигнала. В результате анализа получаем, что

имеем избыточность диагностических параметров A_n , V_n , S_n (используется 17 шт. из 33).

В ИСГ₁ вносим «1», если узел контролируется полностью с заданной глубиной. В ИСГ₂ вносим «1», если узел контролируется, но обнаруживаются не все неисправности.

Признаки «А», «В», «С», «Е», «F», «G» – свидетельствуют о наличии неисправности.

Признак «D» неинформативен, т. е. эту неисправность (дефект подшипника ротора) невозможно определить по предложенной совокупности параметров диагностического сигнала.

Признаки «А» и «Е» уникальны и позволяют однозначно идентифицировать наличие неисправностей узла 1 (ослабление фундамента) и узла 3 (дефект статора, связанный с нарушением симметрии электромагнитного поля).

Узел 2 контролируется с точностью до двух подузлов – признаки «В» и «С» позволяют идентифицировать неисправность.

Узел 4 также контролируется полностью (признаки «В», «F», «G», причём, два последних – уникальные), однако признак «В» имеет неоднозначность: по признаку «В» можно определить наличие дисбаланса, однако невозможно определить дисбаланс какого узла присутствует.

Контрольные вопросы

1. Понятие энтропии.
2. Энтропия системы.
3. Энтропия системы для n равновероятностных состояний.
4. Энтропия сложной системы.
5. Условная энтропия.
6. Средняя информация или информативность системы.
7. Информация относительно состояний системы.
8. Информация признака относительно состояния объекта.
9. Информативность диагностических признаков.
10. Диагностическая ценность диагностических признаков.
11. Чувствительность диагностических признаков.
12. Достоверность контроля.
13. Определение полноты контроля.
14. Определение глубины поиска отказов.

8. МЕТОДЫ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ

Выбор методов диагностирования существенно зависит от типа, назначения и условий эксплуатации объектов, а также от оснащённости эксплуатационных подразделений средствами диагностики.

Методы диагностирования делятся на *организационные и технологические*.

Организационные методы определяют характер основных задач диагностирования, применения диагностических средств, периодичность их использования и т. д.

Технологические методы контроля состояния и диагностирования непосредственно определяют приёмы и способы измерения параметров и выявления качественных признаков технического состояния. На рис. 8.1 представлена классификация методов диагностирования технических устройств, в частности, машин и механизмов [64].

При проверке **работоспособности** машин применяются методы диагностирования, выявляющие (без указания места и причины) определенную совокупность отказов и повреждений (например, снижение мощности, экономичности) [63, 64].

При проверке **правильности функционирования** диагностирование направлено на определение совокупности дефектов технологических регулировок и настроек, вызывающих недопустимое снижение производительности и качества работы технических устройств, машин и механизмов [63, 64].

При **поиске дефектов** методы диагностирования позволяют выявить место, вид и причину дефекта (разрегулировка конкретного механизма, неправильный момент нагнетания топлива, износ, поломка поршневых колец и т. п.).

По применению диагностических средств методы диагностирования подразделяют на две группы: органолептические (или субъективные) и инструментальные (объективные).

Органолептические методы – визуальные, наиболее старые методы диагностирования, но остающиеся ещё актуальными в настоящее время. Любое диагностирование объекта при эксплуатации начинается с внешнего осмотра. Проверяется внешняя герметичность системы объекта (наличие подтеканий рабочей жидкости), обнаруживаются механические повреждения элементов объекта (забоины, трещины, потёртости шлангов и трубопроводов), а также кон-

тролируется выработка люфтов шарнирных соединений, наличие пломб, контролок и т. п.

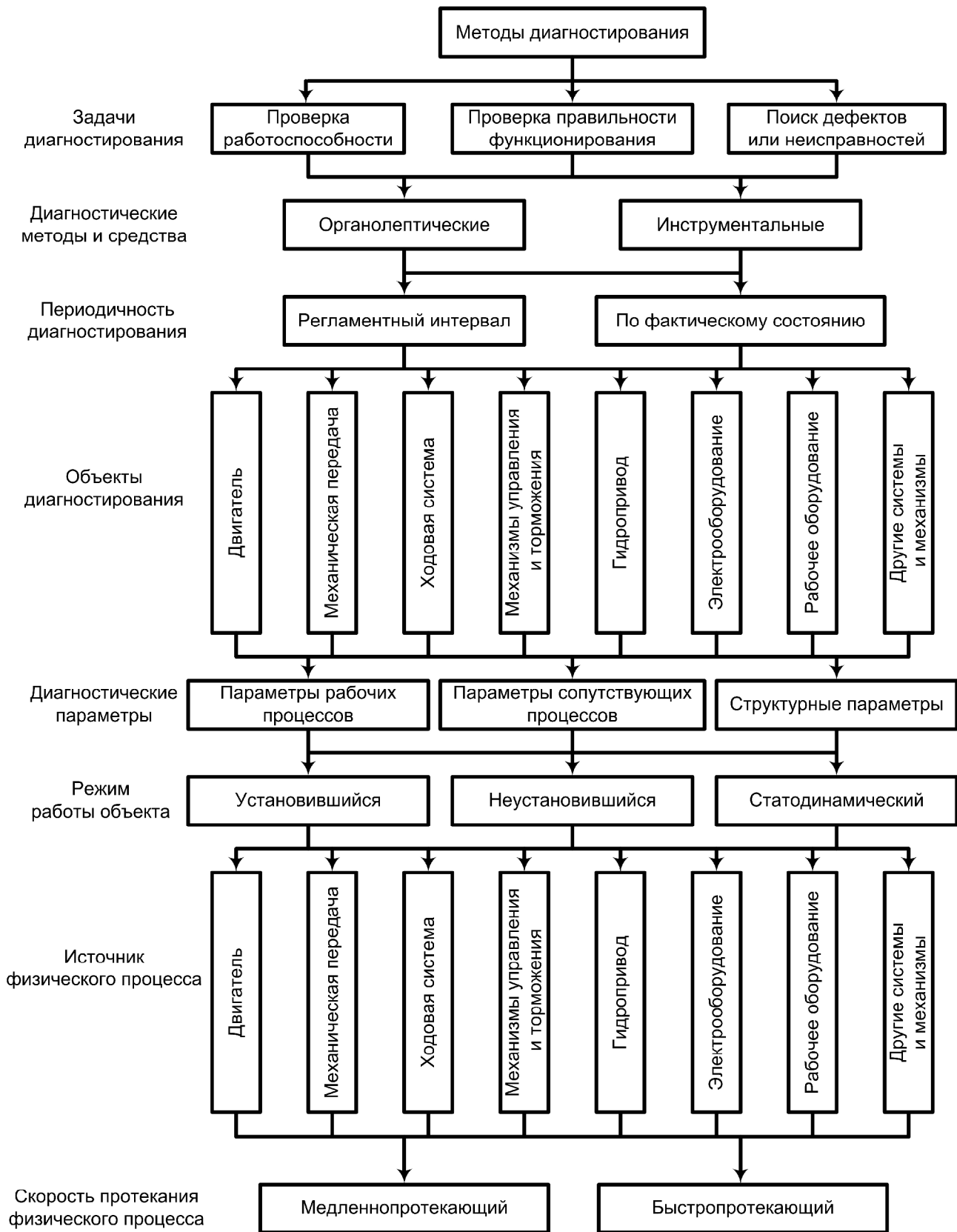


Рис. 8.1. Классификация методов диагностирования

Органолептические методы включают в себя ослушивание, осмотр, проверку осязанием и обонянием – *визуальный и измерительный контроль*.

Ослушиванием выявляют места и характер ненормальных стуков, шумов, перебоев в работе двигателя, отказов в силовой передаче и ходовой системе (по скрежету и шуму), неплотности (по шуму прорывающегося воздуха) и т. п.

Осмотром устанавливают места подтекания воды, масла, топлива, цвет выпускных газов, дымление из сапуна, биение вращающихся частей, натяжение цепных передач и т. п.

Осязанием определяют места и степень ненормального нагрева, биения, вибрации деталей, вязкость, липкость жидкости и т. п.

Обонянием выявляют по характерному запаху отказ муфт сцепления, поворота, течь бензина, электролита, отказ электропроводки и т. п.

Как уже отмечалось, все качественные признаки технического состояния устанавливают органолептическими методами диагностирования (рис. 8.2) [64].

В зависимости от оснащённости эксплуатационного подразделения средствами диагностики визуальные методы заменяются приборными. Этот же процесс имеет место и при совершенствовании систем встроенного контроля объектов различного назначения.

Инструментальные методы применяют для измерения и контроля требуемых параметров технического состояния, используя при этом средства технического контроля или диагностическую аппаратуру.

По периодичности методы диагностирования можно рассматривать как применяемые в плановом (регламентированном), так и во внеплановом (заявочном) порядке.

Диагностирование, проводимое в плановом порядке, в основном решает задачи проверки работоспособности, а также определения остаточного ресурса агрегатов и машины в целом. Для этого из всей совокупности диагностических параметров выделяют обобщённые, которые обязательно измеряют при технических обслуживании и осмотре.

Обобщённые параметры характеризуют техническое состояние нескольких составных частей.

Диагностирование, проводимое внепланово, в заявочном порядке, решает задачу поиска дефектов в том случае, если по результатам измерения обобщённого параметра состояния обнаружено нарушение работоспособности составной части среди определенной совокупности других. Параметрами углублённого диагностирования в целях поиска дефектов служат значения функциональных и структурных характеристик объекта контроля, определяющие его работоспособность и исправность.

Методы диагностирования предназначены для отдельных классов технических устройств, машин, механизмов, приборов, аппаратуры и т. п. (механические технические устройства: насосы, компрессоры, электродвигатели, тракторы, автомобили и т. п.; электрические и электронные: трансформаторы, измерительная или исполнительная аппаратура, вычислительная техника и т. п.) или для составляющих и систем этих технических устройств, как представлено на рис. 8.2, или для составных частей агрегатов (для двигателя внутреннего сгорания: цилиндропоршневая группа, механизм газораспределения, топливная аппаратура двигателя и т. д.). Методы диагностирования определённого объекта различаются между собой измеряемыми параметрами, приёмами измерения и обработки результатов (рис. 8.2).

По диагностическим параметрам все методы делят на *три группы* в зависимости от того, характеризует ли изменяемый параметр *рабочий процесс* технического устройства или его составной части, *сопутствующий процесс* работы или непосредственно *структурный параметр* детали или сопряжения деталей.

Методы диагностирования по **параметрам рабочих процессов** позволяют проверять выходные показатели технического устройства (мощность, экономичность, производительность, качество работы) и многочисленные технические характеристики его составных частей (фазовые параметры топливоподачи и газораспределения, давление, скорость перемещения, расход и др.). Обычно точность измерения этих параметров достаточно высока, так как в большинстве случаев осуществляют прямое измерение контролируемой физической величины.

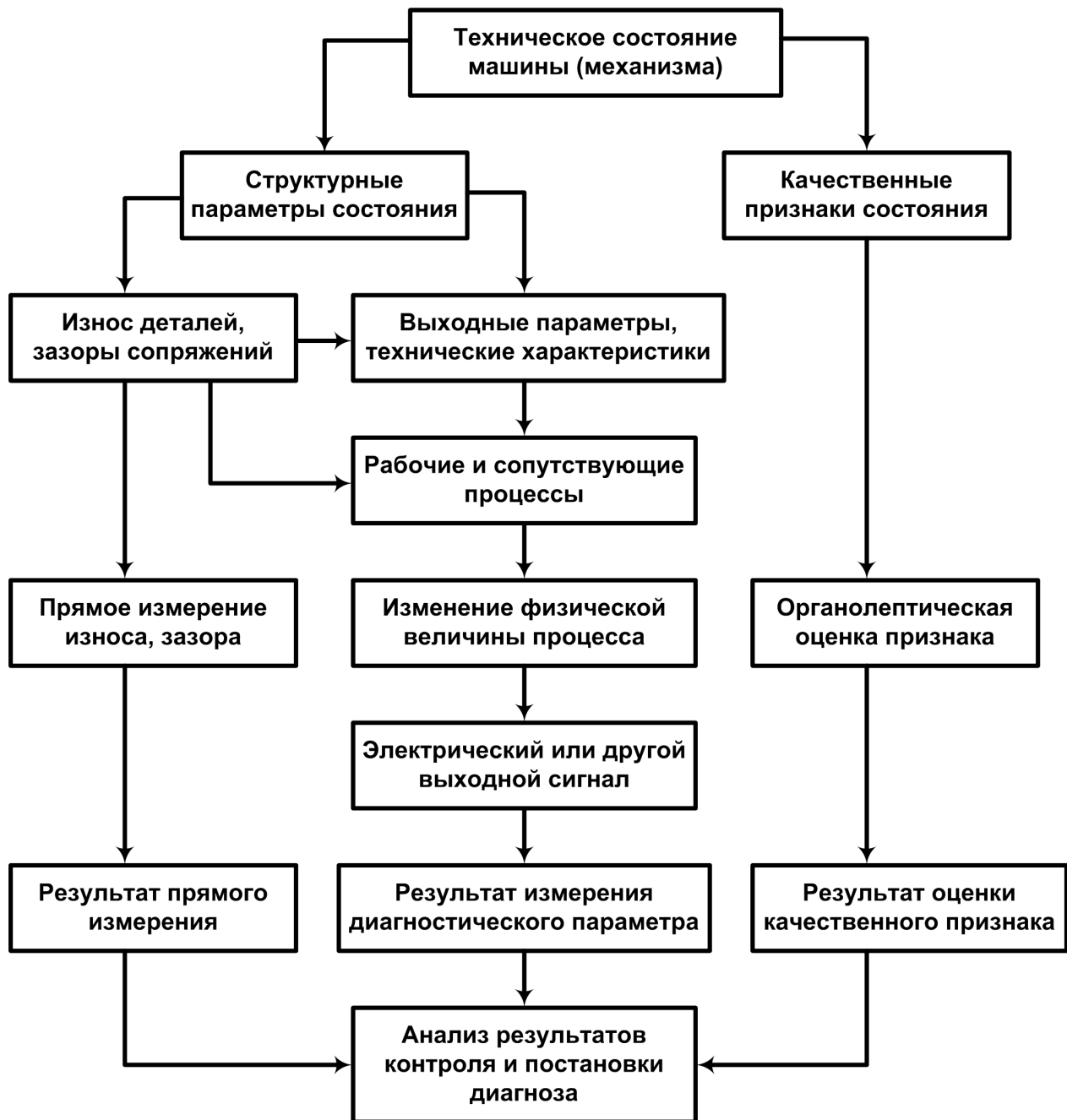


Рис. 8.2. Определение технического состояния машины

Методы диагностирования по параметрам **сопутствующих** процессов дают возможность косвенно определять те же параметры рабочих процессов, а также структурные параметры деталей и сопряжений, если их нельзя или нецелесообразно измерять непосредственно. В этом случае измеряют показатели рабочих процессов. К сопутствующим относят такие процессы, как вибрация и шум, нагрев или охлаждение, разгон и выбег вращающихся частей, нарастание или спад давления масла и воздуха в момент пуска и остановки составных

частей, образование загрязняющих масло или другую рабочую жидкость различных примесей и т. п.

Методы диагностирования по **структурным** параметрам *позволяют путём прямых измерений определять износы деталей, зазоры в их сопряжениях, значения регулировочных параметров* [57, 63, 64]. Это методы, применяемые для измерения износа шестерён, опорных катков, направляющих колёс, шкивов, зазора в сопряжении втулка – ось, подшипников качения, удлинения ремней и цепных передач, прогиба режущего аппарата, длины появившейся трещины, тепловых зазоров, а также зазоров между отжимными рычагами и подшипником отводки сцепления, хода рычагов и педалей механизма управления поворотом, износа муфт сцепления и тормозов, гусеничных цепей и шины.

В основе этих методов лежит измерение геометрических размеров, взаимного перемещения деталей или геометрических размеров детали (сопряжения) на неработающей машине [57, 63, 64].

По режиму работы объекта диагностирования, например машин, механизмов, двигателей внутреннего сгорания, центробежных и поршневых компрессоров и насосов, гидроприводов и подъёмных устройств, можно выделить методы диагностирования на **установившемся, неустановившемся и статодинамическом** режимах работы.

Диагностирование при **установившемся** режиме проводят для объекта, работающего в стационарном режиме при постоянных скоростной, температурной и силовой нагрузках.

Диагностирование при **неустановившемся** режиме работы применяют для измерения параметра в нестационарных условиях (разгон, выбег, резкое торможение или снятие нагрузки, прогрев или охлаждение диагностируемого объекта и т. п.). Собственно говоря, в этом случае используется метод, основанный на переходных режимах.

Статодинамический метод в процессе диагностирования используется при чередовании установившегося и неустановившегося режимов работы диагностируемого объекта.

В настоящее время при диагностировании машин в подавляющем большинстве применяются методы диагностирования на установившемся режиме, гораздо реже – на неустановившемся и очень редко – статодинамические. С использованием электронных и автоматизированных средств диагностирования область применения последних двух методов расширяется. С их помощью

определяют техническое состояние машин и их составных частей по параметрам углового ускорения коленчатого вала двигателя (измерение мощности), скорости увеличения и уменьшения давления в масляной магистрали (проверка работоспособности гидропривода), время выбега (оценка работоспособности силовой передачи) и др.

Статодинамический метод может быть реализован только в автоматизированном средстве диагностирования, так как измеряют параметр в строго заданных чередующихся установившемся и неустойчивом режимах. Такой режим может быть использован, например, при измерении расхода топлива, мощности и некоторых других параметров под нагрузкой, создаваемой периодическим автоматическим отключением одного или нескольких цилиндров карбюраторного двигателя или дизеля.

Временной метод, или метод **временных интервалов**, основан на определении времени выполнения рабочих операций исполнительными органами диагностируемого объекта [63, 64]. Метод используется для оценки общего технического состояния систем объекта диагностирования.

Кроме встроенных средств (реле, переключателей, конечных выключателей, кнопок системы управления), применяют специальные средства, например электронные таймеры и секундомеры, а также временно устанавливаемые датчики перемещений, скоростей, ускорений, давления, усилий. Данные регистрируются и сохраняются в памяти измерительных систем. При использовании нескольких датчиков получают информацию не только о временных интервалах, но и о других параметрах рабочего процесса объекта, необходимых при других методах его диагностирования. В автоматизированных системах контроля обработка полученной информации производится с помощью средств компьютерной техники.

Метод нормированных параметров («эталонных модулей») основан на сравнении экспериментально определённых значений параметров объекта и его отдельных агрегатов (мощности, КПД, усилий, крутящих моментов, давления, подачи, перемещений и др.) с их паспортными значениями или с нормами технических условий [63, 64].

Метод широко используется для диагностирования любых типов объектов. Его преимуществом является возможность использования полученной информации для уточнения расчётов объекта и его элементов, прогнозирования ре-

сурса, определения энергетических показателей и т. п. Во многих случаях для реализации метода не требуется сложной диагностической аппаратуры, а при диагностировании с использованием вычислительной техники необходимо лишь простейшее программное обеспечение, например для статистической обработки результатов эксперимента.

Статопараметрический метод *основан на измерении параметров* (давления, расхода и др.) *в установившемся режиме работы объекта*, например задресселированного потока рабочей жидкости. Этот метод получил широкое распространение для диагностирования объектов строительно-дорожных машин, сельскохозяйственных машин, а также другого гидравлического оборудования [63, 64]. Метод может быть использован для оценки технического состояния и прогнозирования остаточного ресурса большинства агрегатов объекта.

К недостаткам метода относятся трудоёмкость, обусловленная необходимостью разъединения трубопроводов и рукавов в системе объекта для установки датчиков непосредственно для каждого диагностируемого элемента (агрегата) объекта, а также сравнительно низкая точность и необходимость применения датчиков разных типоразмеров для различных элементов привода.

Силовой метод *основан на определении усилия, развиваемого рабочим (исполнительным) органом объекта*, и может быть использован в основном для оценки его общего технического состояния [63, 64]. Недостатки метода – ограниченное применение на стационарных постах диагностики и в полевых условиях вследствие необходимости использования громоздких нагружающих устройств.

Метод эталонных зависимостей *основан на сравнении экспериментально полученных функциональных зависимостей параметров диагностируемого объекта (его отдельных агрегатов) с эталонными зависимостями, найденными расчётным или экспериментальным путём* [63, 64].

Характерными примерами этого метода являются применение амплитудно-фазовых частотных характеристик для определения запаса устойчивости следящих объектов систем автоматического управления, использование характеристик динамической жёсткости приводов систем управления воздушным судном для оценки их противофлаттерных свойств и т. д.

Метод эталонных осциллограмм (временных реализаций процессов, представляемых в дискретном виде) *представляет собой частный случай ме-*

тогда эталонных зависимостей, с помощью которого исследуют зависимость диагностического параметра от времени [63, 64]. Он является одним из наиболее простых и эффективных методов диагностирования и широко применяется для выявления дефектов и отказов объектов, для которых характерны низкочастотные динамические процессы, например система выпуска (уборки) шасси воздушного судна. При анализе осциллограмм синтезируются приёмы методов временных интервалов и эталонных модулей.

Метод сопоставления и наложения осциллограмм или временных реализаций процессов основан на анализе одновременно записанных осциллограмм различных параметров или одного и того же параметра, но при разных режимах (условиях) работы объекта [63, 64]. Этот метод представляет собой усложнённый метод эталонных осциллограмм, с помощью которого анализируется динамика изменения параметра или устанавливается место возникновения дефекта. Метод универсален и особенно эффективен для диагностирования новых конструкций объекта или при сложном проявлении отказа для уточнения диагноза. Автоматизация метода затруднена.

По физической сущности методы диагностирования делятся на **энергетический, пневмогидравлический, кинематический, тепловой, виброакустический, электромагнитный, оптический, радиоактивный** и некоторые другие [64].

Каждый метод предназначен для контроля определённого физического процесса и основан на применении определённого физического явления. Классификация по использованному физическому процессу позволяет наиболее полно выявить возможности и техническую характеристику конкретного метода диагностирования.

Физический процесс характеризуется изменением физической величины во времени. В основе энергетического процесса лежит физическая величина – сила, мощность; пневмогидравлического – давление; кинематического – перемещение; теплового – температура; виброакустического – амплитуды колебаний на определённых частотах и т. д.

Процесс графически можно представить кривой изменения физической величины во времени (или в зависимости от пути), т. е. двумя координатами: значением величины и значением времени. В зависимости от характера связи фи-

зической величины с техническим состоянием объекта, удобства измерения и других факторов в качестве диагностического параметра могут быть использованы различные характеристики процесса в заданном интервале или моменте времени: минимальное, максимальное, мгновенное, среднее, среднее квадратическое значения физической величины, её скорости, ускорения или другой производной (интеграла). Естественно, что наряду с этими характеристиками в качестве диагностического параметра может выступать и время (вторая координата) достижения физической величиной заданного значения. При этом сам физический процесс остаётся без изменений. Меняется лишь его измеряемая характеристика – диагностический параметр.

Для измерения выбранного диагностического параметра применяют различные первичные измерительные преобразователи, на которые воздействует физическая величина. Эта величина преобразуется в другую физическую величину, удобную для измерения или наблюдения, т. е. входной сигнал преобразуется в выходной, обычно электрический сигнал.

Выходной сигнал, являясь отображением входного, т. е. первичной физической величины, содержит измеряемые характеристики. В результате обработки выходного сигнала измеряют, а затем регистрируют диагностические параметры. Таким образом, входные и выходные сигналы представляют собой реализацию изменения физической величины, характеристиками которой служат диагностические параметры.

Наименование метода обычно устанавливают как раз по тому физическому процессу, который оказывает непосредственное воздействие на чувствительный элемент измерительного средства – часть первого в измерительной цепи преобразовательного элемента (давление жидкости – на мембрану, увеличение силы – на рычаг весового механизма, повышение температуры – на термопару, увеличение расстояния – на шток индикатора, колебания блока двигателя – на пьезоэлектрический элемент вибропреобразователя и т. п.).

Физический процесс представляет или отражает рабочий процесс диагностируемого объекта, поэтому он может иметь несколько диагностических параметров, отражающих работу и состояние отдельных составных частей объекта. В качестве примера рассмотрим физическую величину – давление в трубопроводе высокого давления (рис. 8.3) [64].

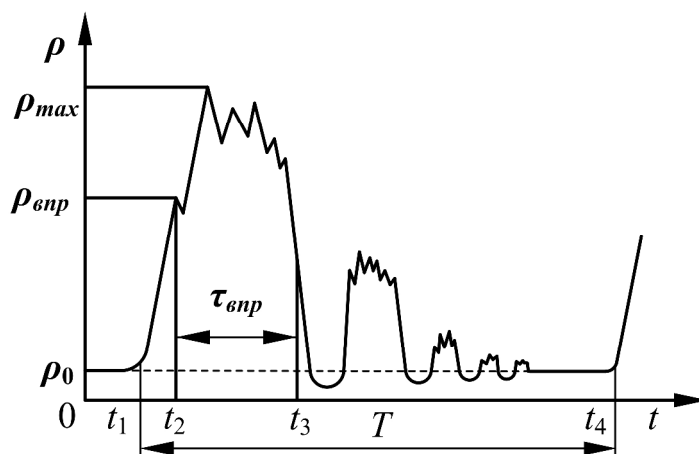


Рис. 8.3. Процесс изменения давления в топливопроводе высокого давления

При работе топливной аппаратуры это давление изменяется [63]. Физический процесс его изменения за период T может иметь восемь диагностических параметров, характеризующих работу и состояние основных деталей топливной аппаратуры (табл. 8.1).

Таблица 8.1

Диагностические параметры, характеризующие работу и состояние основных деталей топливной аппаратуры

Наименование параметра	Что характеризует
Остаточное давление перед началом подачи топлива ρ_0	Состояние нагнетательного клапана и форсунки
Момент начала повышения давления t_1	Состояние кулачка вала топливного насоса, плунжера и распределительных шестерён
Давление начала впрыскивания $\rho_{впр}$	Упругость пружины форсунки и износ торцевых поверхностей, на которые упирается пружина
Момент начала впрыскивания t_2	Состояние привода топливного насоса, топливопровода высокого давления, частоту вращения кулачкового вала
Интервал времени увеличения давления $[t_2; t_2]$	Износ плунжерной пары насоса
Максимальное давление ρ_{max}	Величину затяжки пружины форсунки
Момент времени t_3 закрытия форсунки	Время посадки иглы распылителя, прекращение впрыскивания топлива
Время $T_{впр} = t_4 - t_1$	Продолжительность впрыскивания

Состояние этих деталей можно определить пневмогидравлическим методом диагностирования с использованием электронной аппаратуры и встроенного в топливопровод миниатюрного первичного измерительного преобразователя давления.

По скорости изменения физической величины в процессе измерения все методы делятся на методы диагностирования при *медленно- и быстропротекающем* физических процессах.

При *медленнопротекающем* процессе измеряют постоянную или медленно изменяющуюся физическую величину. К таким величинам относятся все структурные параметры, а также большинство характеристик рабочих и вспомогательных процессов, когда определяются средние значения параметров технического состояния: производительности, тягового усилия, мощности при торможении на установившемся режиме, расхода топлива, газов, прорывающихся в картер, температуры, статического давления, перемещения штока поршня гидроцилиндра за определённый период, силы тока, напряжения, сопротивления в электрических цепях переменного и постоянного тока и т. п.

В большинстве существующих в настоящее время неавтоматизированных средств диагностирования реализованы методы измерения параметров при *медленнопротекающем* физическом процессе с периодом от нескольких секунд до десятков минут.

При *быстропротекающем* физическом процессе скорость изменения измеряемой величины очень высока. Процесс может проходить за период от долей миллисекунды до нескольких секунд. К таким физическим процессам можно отнести виброакустические и процессы изменения углового ускорения коленчатого вала или вала силовой передачи при разгоне или выбеге, давления топлива при топливоподаче, давления в масляной магистрали двигателя или в гидроприводе при резком изменении скоростного или нагрузочного режима, тормозной силы и давления в тормозном приводе при торможении машины и т. п. Методы диагностирования при *быстропротекающем* физическом процессе, используемом для оценки технического состояния машин, обычно реализуют с помощью электронных средств диагностирования.

Каждый метод имеет свои характерные задачи, объекты диагностирования, диагностические параметры, скорости изменения измеряемых величин, режимы работы объекта диагностирования, используемые физические процессы и др. При этом, как уже отмечалось, техническая принципиальная сторона метода

выявляется при изучении реализуемого физического процесса, измеряемыми характеристиками которого служат диагностические параметры, тесно связанные с техническим состоянием объекта диагностирования.

Для измерения определённого диагностического параметра необходим свой способ обработки электрического сигнала при заданном режиме работы объекта. В одном случае требуется измерить среднее, в другом – максимальное значение физической величины, а в третьем – момент её достижения заданного значения. В связи с этим при каждом методе используется несколько способов диагностирования в зависимости от измеряемого конкретного диагностического параметра.

При диагностировании объекта **на установившемся режиме** работы измеряют диагностические параметры при постоянных: скорости вращения коленчатого вала, или вала силовой передачи, или движения колёс машины; температуре рабочей жидкости в охлаждающей системе, масла в двигателе, трансмиссии, гидроприводе; тормозном моменте, сопротивлении вращательного и прямолинейно поступательного движения. При этом используемый для диагностирования физический процесс также является стационарным или периодически повторяющимся.

Энергетический метод при использовании на установившемся режиме работы служит для оценки механизмов и систем, вырабатывающих, передающих и потребляющих энергию [63, 64]. Существует несколько способов такого диагностирования: тормозной, парциальный, дифференциальный, бестормозной [64]. Энергетический метод применяют в первую очередь для определения технического состояния двигателей внутреннего сгорания по параметрам мощности.

Тормозной способ позволяет определять эффективную мощность, являющуюся работой в единицу времени или мерой механической энергии, получаемой в результате сгорания топлива в цилиндрах, по реактивной силе или тормозному моменту при торможении на стенде. Физическая величина, т. е. работа, а также диагностический параметр (сила) в процессе диагностирования являются практически постоянными [63, 64]. Режим работы двигателя – установившийся. При меньшей или большей мощности уровень электрического сигнала, характеризующий реактивную силу или крутящий момент, будет изменяться, оставаясь почти постоянным в процессе измерения (рис. 8.4, а, кривая 1).

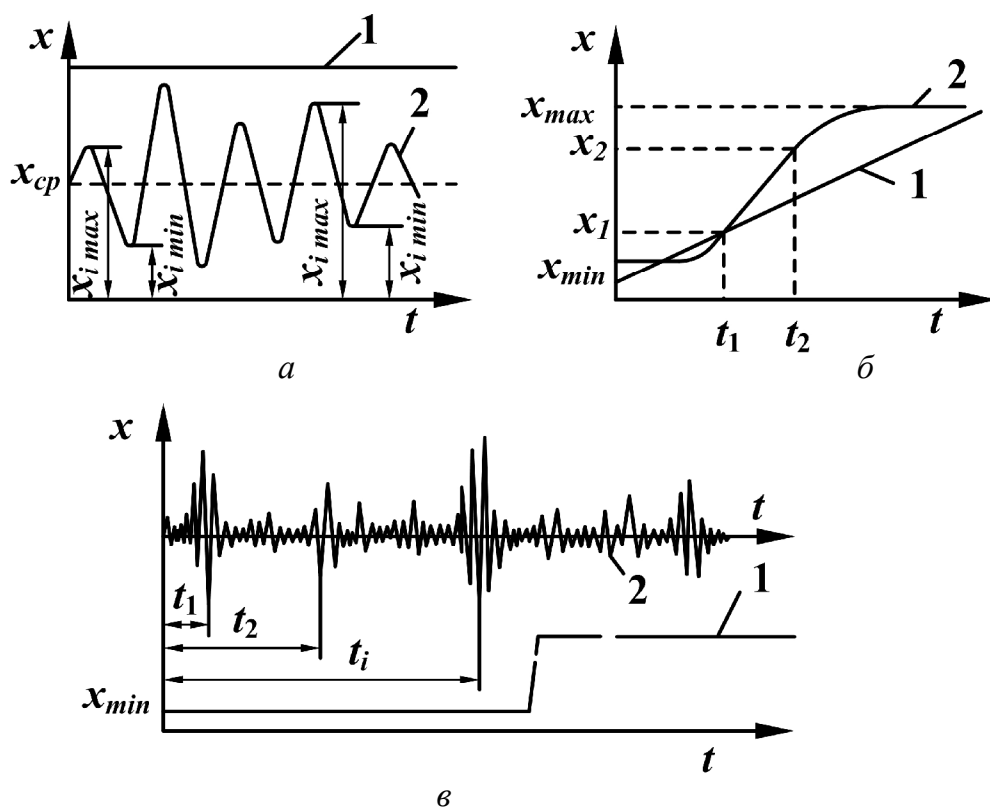


Рис. 8.4. Характер изменения физических величин:
 а – стационарная (кривая 1) и пульсирующая относительно среднего значения (кривая 2) величины; б – медленно (кривая 1) и быстро изменяющаяся (кривая 2) величины; в – скачкообразно изменяющаяся величина (кривая 1) и виброакустический сигнал (кривая 2)

Парциальный способ, при котором двигатель работает с частью выключенных цилиндров, даёт возможность испытывать двигатели на стендах малой мощности. Он также характеризуется стационарным режимом и постоянным уровнем диагностического параметра.

Дифференциальный способ диагностирования по эффективной мощности, при котором измеряется отклонение мощности от номинального значения по отдельным цилиндрам, аналогичен парциальному.

Бестормозной способ (без стенда). Нагрузка на работающие цилиндры двигателя создаётся за счёт выключенных цилиндров. При необходимости создают дополнительную нагрузку, например дросселирование отработавших газов на выпуске, поступающего воздуха на впуске. При этом в качестве диагностического параметра уже служит не реактивная сила или тормозной момент, а частота вращения коленчатого вала, т. е. вторая координата наблюдаемого

процесса работы (частота – обратная величина периода). Значение частоты вращения характеризует мощность, развиваемую работающими цилиндрами, а отклонение частоты вращения – мощность отключённых цилиндров.

Пневмогидравлический метод диагностирования на установившемся режиме работы характеризуется физическими процессами течения, подачи. В качестве физических величин и одновременно диагностических параметров чаще всего выступает расход и давление, функционально связанное с расходом, например среднее давление масла в главной масляной магистрали непрогретого и прогретого двигателя, топлива перед и после фильтра тонкой очистки, масла в гидроприводе, давление открытия предохранительного клапана, давление воздуха в пневмосистеме и шинах колёс.

Расход жидкости определяют непосредственно с помощью весового механизма (массовый расход), мерной ёмкости или вращающейся при движении жидкости крыльчатки (объёмный) и путём измерения давления жидкости перед откалиброванным отверстием диафрагмы.

Упомянутые физические величины – давление и расход дают постоянный уровень сигнала (рис. 8.4, а, кривая 1), отражающий их среднее значение. В действительности в ряде случаев давление колеблется относительно среднего уровня в связи с пульсирующим движением топлива от подкачивающего насоса или масла от шестерённого насоса, или отработавших газов и газов, прорывающихся в картер вследствие работы каждого цилиндра. Характер быстропротекающего процесса при переходе от измерения среднего давления (расхода) к измерению пульсирующего представлен на рис. 8.4, б, кривая 2. Частота пульсаций при таком процессе может быть 1 кГц и более, а высота амплитуды соизмерима со средним значением давления.

Более сложный характер изменения давления наблюдается при подаче топлива плунжерной парой. Здесь проходит импульсный периодический быстропротекающий процесс изменения давления топлива. Период протекания процесса T колеблется в пределах 50...200 мс, а непосредственного впрыскивания – 0,5...5 мс.

Кинематический метод диагностирования характеризуется изменением положения, движением деталей и их сопряжений с геометрической точки зрения. Этот метод включает в себя все непосредственные измерения размеров, износов деталей, зазоров их сопряжений, что обычно осуществляется при нера-

ботающем объекте диагностирования. Сюда следует отнести измерение некруглости, нецилиндричности, непрямолинейности, радиальное и торцевое перемещение, несоосность, непараллельность осей, шероховатость и т. п. Обычно диагностические параметры при этом, как уже отмечалось, являются и структурными геометрическими параметрами.

К этому методу также относится непосредственное измерение регулировочных параметров: стрелы прогиба ремней, цепей, тепловых зазоров, хода рычагов и педалей механизма управления поворотом и т. п.

На установившемся режиме работы объекта наблюдают физические процессы поступательного перемещения и вращения деталей машины. Их износ, разрегулировки оказывают влияние на показатели этого движения. В качестве физических величин здесь выступают путь, скорость, ускорение, а диагностических параметров – максимальные значения пути (хода, биения), суммарные зазоры, в том числе угловые, а также время, в течение которого рассматриваемая физическая величина достигла заданного значения.

Физическая величина при установившемся режиме работы машины может изменяться медленно (рис. 8.4, б, кривая 1, усадка штока при оценке состояния гидроцилиндра), быстро и плавно (рис. 8.4, б, кривая 2, скорость вращения), скачкообразно (рис. 8.4, в, кривая 1, перемещение поршня при определении суммарного зазора в верхней и нижней головках шатуна) или иметь колеблющийся характер (рис. 8.4, а, кривая 2, торцевое биение шкива, звёздочки, радиальное биение вала при определении его изгиба).

Контрольные вопросы

1. Что определяют организационные методы?
2. Что определяют технологические методы?
3. Какие действия выполняют при проверке правильности функционирования?
4. Что позволяют выявить методы диагностирования при поиске дефектов?
5. В чём заключается суть органолептических методов?
6. Для чего применяют инструментальные методы?
7. В чём суть методов диагностирования по параметрам рабочих процессов?

8. Что позволяют определять методы диагностирования по параметрам сопутствующих процессов?
9. Что позволяют определять методы диагностирования по структурным параметрам?
10. С какой целью проводят диагностирование при установившемся режиме работы?
11. С какой целью проводят диагностирование при неустойчивом режиме работы?
12. Для чего используется статодинамический метод в процессе диагностирования?
13. На чем основан временной метод, или метод временных интервалов?
14. На чем основан метод нормированных параметров?
15. На чем основан статопараметрический метод?
16. На чем основан метод эталонных зависимостей?
17. В чём заключается сущность энергетического метода?
18. Что позволяет определять тормозной способ?
19. В чём заключается сущность парциального способа?
20. В чём заключается сущность дифференциального способа?

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведённые в учебном пособии сведения являются основой для дальнейшего изучения различных направлений технической диагностики, технического и неразрушающего контроля. Рассмотренные основные термины, понятия и теоретические основы технического и неразрушающего контроля, технической диагностики и мониторинга состояния объектов техногенной среды являются фундаментальной основой знаний и позволят вполне однозначно воспринимать информацию из различных научно-технических и иных источников данных.

Особое внимание при изучении технической диагностики следует уделить адекватной, в соответствии с приведёнными терминами и понятиями, оценке получаемой информации, поскольку сегодня не только в рекламных изданиях, но и часто в научно-технических публикациях присутствуют факты как некорректного использования терминов, так и преднамеренной подмены понятий, терминов, искажений характеристик технических устройств, включая средства технического контроля.

Направлениями дальнейшего изучения данной отрасли знаний следует считать:

- виды и методы технического и неразрушающего контроля;
- методы технической диагностики;
- теория и методы мониторинга состояния объектов техногенной среды.

В процессе изучения этой отрасли целесообразно обращать внимание, прежде всего, на отечественные научно-технические источники знаний [см., например, 15, 16, 13, 32, 33, 38, 39, 40, 45, 57, 65], поскольку во многих отраслях технической диагностики и мониторинга состояния объектов техногенной среды достижения отечественной науки и техники опережают известные зарубежные достижения, как минимум, на 10–20 лет.

В заключение хочется пожелать будущим специалистам успехов в освоении технической диагностики и, изучая научно-техническую информацию, всегда помнить слова таких великих людей, как Иммануил Кант, Георг Вильгельм Фридрих Гегель, Владимир Иванович Вернадский, Карл Маркс о том, что «в каждом явлении ровно столько науки, сколько в нём математики».

condition monitoring, 24
machinery health monitoring, 24
off line, 24
 акустический неразрушающий контроль, 34, 52
 виброакустический неразрушающий контроль, 34, 52
 Вид НК, 10
 Вихретоковый вид НК, 43
 вихретоковый неразрушающий контроль, 34, 52
восстанавливаемые, 20
 Дефект (*defect*), 8
 Дефектоскопический контроль, 8
 Дефектоскопия, 8
 диагностирование, 14
 Достоверность НК, 10
 Ёмкостной, 43
 Заключение по результатам НК, 10
 Измерение, 8
 Индукционный, 41
 Интроскопия, 8
 Исправное состояние, 15
 Испытание, 9
 Контролепригодность, 10
 контроль (технического) состояния, 24
 Контроль ТСО, 14
 Критерий предельного состояния (*limiting state criterion*), 19
 Критерий предотказного состояния (*prefault state criteria*), 20
 критическое состояние, 20
 Магнитный вид, 3, 40
 магнитный неразрушающий контроль, 34, 53
 Магнитографический, 41
 Магнитопорошковый, 41
 Метод контроля, 10
 Метод магнитной памяти, 41
 Метод НК, 10
 мониторинг, 14
 мониторинг параметров, 26
 мониторинг технического состояния, 25
невосстанавливаемые, 20
 Неисправное состояние, 16
 Неисправность (*fault*), 16
 непрерывный контроль, 25
 Неработоспособное состояние (*down state*), 17
 Нерабочее состояние (*non-operating state*), 18
 Неразрушающий контроль, 7
 неразрушающий контроль проникающими веществами, 34, 53
on line, 25
 Опасное состояние (*hazardous state*), 19
 оптический неразрушающий контроль, 34, 53
 Основной предмет ТД, 22
 Первичный информативный параметр, 36, 47
 периодический контроль, 24
 Повреждение (*degraded state*), 8
 Предельное состояние (*limiting state*), 18
 Прогнозирование ТСО, 14
 Работоспособное состояние (*up state*), 16
 Рабочее состояние (*operating state*), 18
 радиационный неразрушающий контроль, 35, 53
 радиоволновой неразрушающий контроль, 35, 53
 Способ получения первичной информации, 37
 тепловой неразрушающий контроль, 35, 53
 Термоэлектрический, 43
 техническая диагностика, 22
 Техническая диагностика, 7, 9, 15, 22, 145, 146, 148
 Технический диагноз, 22
 Технический контроль, 3, 7, 9, 11
 Техническое диагностирование, 23
 техническое состояние, 14
 техническое состояние (*technical condition*), 14
 техническое состояние объекта, 14
 Технологическая инструкция по НК, 10
 Технологическая карта НК, 10
 Феррозондовый, 41
 Экзоэлектронной эмиссии, 43
 Электрический вид НК, 42
 электрический неразрушающий контроль, 35, 53
 Электрического потенциала, 43
 Электроискровой, 43
 Электростатического порошка, 43

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Российская Федерация. Законы. О промышленной безопасности опасных производственных объектов [Электронный ресурс] : федер. закон от 21.07.1997 № 116-ФЗ (ред. от 29.07.2018). – Доступ из справочно-правовой системы «Гарант».
2. ГОСТ 15467–79. Управление качеством продукции. Основные понятия. Термины и определения. – Введ. 1979-07-01. – М. : Стандартиформ, 2009. – 22 с.
3. ГОСТ 16504–81. Система государственных испытаний продукции. Испытания и контроль качества продукции. Основные термины и определения. – Введ. 1982-01-01. – М. : Стандартиформ, 2011. – 24 с.
4. ГОСТ 20415–82. Контроль неразрушающий. Методы акустические. Общие положения. – Введ. 1983-07-01. – М. : Стандартиформ, 2010. – 4 с.
5. ГОСТ 20911–89. Техническая диагностика. Термины и определения. Введ. 1991-01-01. – М. : Стандартиформ, 2010. – 11 с.
6. ГОСТ 23479–79. Контроль неразрушающий. Методы оптического вида. Общие требования. – Введ. 1980-01-01. – М. : Стандартиформ, 2010. – 10 с.
7. ГОСТ 23480-79. Контроль неразрушающий. Методы радиоволнового вида. Общие требования. – Введ. 1980-01-01. – М. : Издательство стандартов, 1985. – 17 с.
8. ГОСТ 23829–85. Контроль неразрушающий акустический. Термины и определения. – Введ. 1987-01-01. – М. : Издательство стандартов, 1986. – 18 с.
9. ГОСТ 24522–80. Контроль неразрушающий капиллярный. Термины и определения. – Введ. 1982-01-01. – М. : Издательство стандартов, 2005. – 12 с.
10. ГОСТ 25313-82. Контроль неразрушающий радиоволновой. Термины и определения. – Введ. 1983-07-01. – М. : Издательство стандартов, 2005. – 7 с.
11. ГОСТ 25315–82. Контроль неразрушающий электрический. Термины и определения. – Введ. 1983-07-01. – М. : Издательство стандартов, 2005. – 8 с.
12. ГОСТ 27.002–2015. Надёжность техники. Основные понятия. Термины и определения. – Введ. 2017-03-01. – М. : Стандартиформ, 2016. – 28 с.
13. ГОСТ 32106–2013. Контроль состояния и диагностика машин. Мониторинг состояния оборудования опасных производств. Вибрация центробежных насосных и компрессорных агрегатов. – Введ. 2014-11-01. – М. : Стандартиформ, 2014. – 8 с.

14. ГОСТ Р 51901.1–2002. Менеджмент риска. Анализ риска технологических систем. – Введ. 2003-09-01. – М. : Издательство стандартов, 2002. – 28 с.
15. ГОСТ Р 53563–2009. Контроль состояния и диагностика машин. Мониторинг состояния оборудования опасных производств. Порядок организации. – Введ. 2011-01-01. – М. : Стандартиформ, 2010. – 8 с.
16. ГОСТ Р 53564–2009. Контроль состояния и диагностика машин. Мониторинг состояния оборудования опасных производств. Требования к системам мониторинга. – Введ. 2011-01-01. – М. : Стандартиформ, 2010. – 20 с.
17. ГОСТ Р 53696–2009. Контроль неразрушающий. Методы оптические. Термины и определения. – Введ. 2011-01-01. – М. : Стандартиформ, 2010. – 12 с.
18. ГОСТ Р 53698–2009. Контроль неразрушающий. Методы тепловые. Термины и определения. – Введ. 2011-01-01. – М. : Стандартиформ, 2010. – 12 с.
19. ГОСТ Р 55045–2012. Техническая диагностика. Акустико-эмиссионная диагностика. Термины, определения и обозначения. – Введ. 2014-01-01. – М. : Стандартиформ, 2013. – 16 с.
20. ГОСТ Р 55611–2013. Контроль неразрушающий вихретоковый. Термины и определения. – Введ. 2015-01-01. – М. : Стандартиформ, 2014. – 16 с.
21. ГОСТ Р 55612–2013. Контроль неразрушающий магнитный. Термины и определения. – Введ. 2015-01-01. – М. : Стандартиформ, 2018. – 11 с.
22. ГОСТ Р 55680–2013. Контроль неразрушающий. Феррозондовый метод. – Введ. 2015-07-01. – М. : Стандартиформ, 2015. – 10 с.
23. ГОСТ Р 55776–2013. Контроль неразрушающий радиационный. Термины и определения. – Введ. 2015-07-01. – М. : Стандартиформ, 2015. – 15 с.
24. ГОСТ Р 56511–2015. Контроль неразрушающий. Методы теплового вида. Общие требования. – Введ. 2016-06-01. – М. : Стандартиформ, 2016. – 11 с.
25. ГОСТ Р 56542–2015. Контроль неразрушающий. Классификация видов и методов. – Введ. 2016-06-01. – М. : Стандартиформ, 2016. – 12 с.
26. ГОСТ Р ИСО 12718–2009. Контроль неразрушающий. Контроль вихретоковый. Термины и определения. – Введ. 2010-12-01. – М. : Стандартиформ, 2011. – 40 с.

27. ГОСТ Р ИСО 13372–2013. Контроль состояния и диагностика машин. Термины и определения. – Введ. 2010-12-01. – М. : Стандартинформ, 2010. – 8 с.

28. ГОСТ Р ИСО 24497–1–2009. Контроль неразрушающий. Метод магнитной памяти металла. Часть 1. Термины и определения. – Введ. 2010-12-01. – М. : Стандартинформ, 2010. – 7 с.

29. ГОСТ Р ИСО 24497–2–2009. Контроль неразрушающий. Метод магнитной памяти металла. Часть 2. Общие требования. – Введ. 2010-12-01. – М. : Стандартинформ, 2010. – 8 с.

30. ГОСТ Р ИСО 24497–3–2009. Контроль неразрушающий. Метод магнитной памяти металла. Часть 3. Контроль сварных соединений. – Введ. 2010-12-01. – М. : Стандартинформ, 2010. – 12 с.

31. ГОСТ Р ИСО 9000–2011. Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь. – Введ. 2013-01-01. – М. : Стандартинформ, 2012. – 32 с.

32. СА 03–002–05. Системы мониторинга агрегатов опасных производственных объектов. Общие технические требования: стандарт ассоциации «Ростехэкспертиза», ассоциации нефтехимиков и нефтепереработчиков и НПС РИСКОМ. – М. : Химическая техника, 2005. – 42 с.

33. СА 03–001–05. Центробежные насосные и компрессорные агрегаты опасных производств. Эксплуатационные нормы вибрации: стандарт ассоциации «Ростехэкспертиза», ассоциации нефтехимиков и нефтепереработчиков и НПС РИСКОМ. – М. : Химическая техника, 2005. – 24 с.

34. СТО 03–002–08. Мониторинг оборудования опасных производств. Порядок организации // Мониторинг оборудования опасных производств. Стандарт организации : сб. стандартов НПС РИСКОМ. – М., 2008. – С. 25–63.

35. СТО 03–003–08. Мониторинг опасных производств. Термины и определения // Мониторинг оборудования опасных производств. Стандарт организации : сб. стандартов НПС РИСКОМ. – М., 2008. – С. 5–24.

36. СТО 03–004–08. Мониторинг оборудования опасных производств. Процедуры применения // Мониторинг оборудования опасных производств. Стандарт организации : сб. стандартов НПС РИСКОМ. – М., 2008. – С. 65–77.

37. Ключев, В. В. Глобализация технической диагностики и неразрушающего контроля / В. В. Ключев // Контроль. Диагностика. – 2004. – № 8. – С. 3–6.

38. Костюков, В. Н. Мониторинг безопасности производства / В. Н. Костюков. – М. : Машиностроение, 2002. – 224 с.

39. Костюков, В. Н. Автоматизированные системы управления безопасной ресурсосберегающей эксплуатацией оборудования нефтеперерабатывающих и нефтехимических производств (АСУ БЭР – КОМПАКС®) / В. Н. Костюков, С. Н. Бойченко, А. В. Костюков ; под ред. В. Н. Костюкова. – М. : Машиностроение, 1999. – 163 с.
40. Костюков, В. Н. Практические основы виброакустической диагностики машинного оборудования : учеб. пособие / В. Н. Костюков, А. П. Науменко ; под ред. В. Н. Костюкова. – Омск : Изд-во ОмГТУ, 2002. – 108 с.
41. Техническая диагностика гидравлических приводов / Т. В. Алексеева [и др.] ; под общ. ред. Т. М. Башты. – М. : Машиностроение, 1989. – 263 с.
42. Пархоменко, П. П. Основы технической диагностики / П. П. Пархоменко, Е. С. Сагомоян. – М. : Энергоиздат, 1981. – 308 с.
43. Павлов, Б. В. Акустическая диагностика механизмов / Б. В. Павлов. – М. : Машиностроение, 1971. – 224 с.
44. Вибрации в технике : справочник : в 6 т. – М. : Машиностроение. – 1978. – Т. 1. – 352 с. ; 1979. – Т. 2. – 351 с. ; 1980. – Т. 3. – 544 с. ; 1981. – Т. 4. – 509 с. ; 1981. – Т. 5. – 496 с. ; 1981. – Т. 6. – 456 с.
45. Биргер, И. А. Техническая диагностика / И. А. Биргер. – М. : URSS, 2019. – 240 с.
46. Решетов, Д. Н. Надёжность машин : учеб. пособие для машиностр. спец. вузов / Д. Н. Решетов, А. С. Иванов, В. З. Фадеев ; под ред. Д. Н. Решетова. – М. : Высш. шк., 1988. – 238 с.
47. Костюков, В. Н. Основы виброакустической диагностики и мониторинга машин : учеб. пособие / В. Н. Костюков, А. П. Науменко. – Омск : Изд-во ОмГТУ, 2011. – 360 с.
48. Богдан, Н. В. Техническая диагностика гидросистем / Н. В. Богдан, М. И. Жилевич, Л. Г. Красневский. – Минск : Белавтотракторостроение, 2000. – 120 с.
49. Неразрушающий контроль : справочник : в 8 т. Т. 1 : в 2 кн. Кн. 1 : Визуальный и измерительный контроль ; кн. 2 : Радиационный контроль. – 2-е изд., перераб. и испр. – М. : Машиностроение, 2008. – 559 с.
50. Неразрушающий контроль : справочник : в 7 т. Т. 2 : в 2 кн. Кн. 1 : Контроль герметичности ; кн. 2 : Вихретоковый контроль. – М. : Машиностроение, 2006. – 687 с.

51. Неразрушающий контроль : справочник : в 8 т. Т. 3 : Ультразвуковой контроль. – 2-е изд., перераб. и испр. – М. : Машиностроение, 2008. – 864 с.

52. Неразрушающий контроль : справочник : в 8 т. Т. 4 : в 3 кн. Кн. 1 : Акустическая тензометрия ; кн. 2 : Магнитопорошковый метод контроля ; кн. 3 : Капиллярный контроль. – 2-е изд., перераб. и испр. – М. : Машиностроение, 2006. – 736 с.

53. Неразрушающий контроль : справочник : в 8 т. Т. 5 : в 2 кн. Кн. 1 : Тепловой контроль ; кн. 2 : Электрический контроль. – 2-е изд., перераб. и испр. – М. : Машиностроение, 2006. – 687 с.

54. Неразрушающий контроль : справочник : в 7 т. Т. 6 : в 3 кн. Кн. 1 : Магнитные методы контроля ; кн. 2 : Оптический контроль ; кн. 3 : Радиоволновой контроль. – М. : Машиностроение, 2004. – 826 с.

55. Неразрушающий контроль : справочник : в 8 т. Т. 7 : в 2 кн. Кн. 1 : Метод акустической эмиссии ; кн. 2 : Вибродиагностика. – 2-е изд., перераб. и испр. – М. : Машиностроение, 2006. – 828 с.

56. Неразрушающий контроль : справочник : в 8 т. Т. 8 : в 2 кн. Кн. 1 : Экологическая диагностика ; кн. 2 : Антитеррористическая и криминалистическая диагностика. – М. : Машиностроение, 2005. – 788 с.

57. Костюков, В. Н. Основы виброакустической диагностики и мониторинга машин : учеб. пособие / В. Н. Костюков, А. П. Науменко ; М-во образования и науки РФ, Омский гос. тех. ун-т, НПЦ «Динамика». – 2-е изд., с уточн. – Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2014. – 378 с.

58. Харкевич, А. А. Спектры и анализ / А. А. Харкевич. – 6-е изд. – М. : URSS, 2018. – 276 с.

59. Сафарбаков, А. М. Основы технической диагностики : учеб. пособие / А. М. Сафарбаков, А. В. Лукьянов, С. В. Пахомов. – Иркутск : ИрГУПС, 2006. – 216 с.

60. Лисьев, В. П. Теория вероятностей и математическая статистика : учеб. пособие / Московский государственный университет экономики, статистики и информатики. – М., 2006. – 199 с.

61. Стецюк, А. Е. Основы технической диагностики. Теория распознавания : учеб. пособие / А. Е. Стецюк, Я. Ю. Бобровников. – Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2012. – 69 с.

62. Хадыкин, А. М. Показатели надёжности радиоэлектронных средств : учеб. пособие / А. М. Хадыкин, Н. В. Рубан. – Омск : Изд-во ОмГТУ, 2015. – 77 с.
63. Диагностирование дизелей / Е. А. Никитин [и др.]. – М. : Машиностроение, 1987. – 224 с.
64. Михлин, В. М. Управление надёжностью сельскохозяйственной техники / В. М. Михлин. – М. : Колос, 1984. – 335 с.
65. Науменко, А. П. Вероятностно-статистические методы принятия решений: теория, примеры, задачи : учеб. пособие / А. П. Науменко, И. С. Кудрявцева, А. И. Одинец ; Минобрнауки России, ОмГТУ. – Омск : ОмГТУ, 2018. – 108 с.

Учебное издание

Науменко Александр Петрович

**ВВЕДЕНИЕ
В ТЕХНИЧЕСКУЮ ДИАГНОСТИКУ
И НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ**

Учебное пособие

Редактор *К. В. Муковоз*

Компьютерная верстка *Е. В. Беспаловой*

Для дизайна обложки использованы материалы
из открытых интернет-источников

Сводный темплан 2019 г.

Подписано в печать 08.05.19. Формат 60×84¹/₁₆. Бумага офсетная.

Отпечатано на дупликаторе. Усл. печ. л. 9,5. Уч.-изд. л. 9,5.

Тираж 50 экз. Заказ 248.

Издательство ОмГТУ. 644050, г. Омск, пр. Мира, 11; т. 23-02-12.
Типография ОмГТУ.

