

Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования
«Полоцкий государственный университет»

А.Г. Кульбей

ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА ОБЪЕКТОВ ТРУБОПРОВОДНОГО ТРАНСПОРТА

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС

для студентов специальности 1-70 05 01
«Проектирование, сооружение и эксплуатация
газонефтепроводов и газонефтехранилищ»

Новополоцк
ПГУ
2008

УДК 622.692.4.076:620.197.6
ББК 22.253 я73
К

Рекомендовано к изданию методической комиссией
технологического факультета в качестве
учебно-методического комплекса (протокол № 1 от 08.10.2007)

РЕЦЕНЗЕНТЫ:

С. В. ЛЕСНИКОВИЧ, инженер по диагностике трубопроводов,
и.о. начальника полевой испытательной лаборатории
Новополоцкого республиканского унитарного предприятия
по транспорту нефти «Дружба»;
Л. М. СПИРИДЕНОК, канд. техн. наук, доцент
В. В. КОЛЕНО, канд. техн. наук, доцент

Кульбей, А.Г.

К Техническая диагностика объектов трубопроводного транспорта : учеб.-
метод. комплекс / А.Г. Кульбей. – Новополоцк: ПГУ, 2008. – 300 с.

ISBN 978-985-418-657-3.

Приведены темы изучаемого курса, изложены теоретические и практические основы дисциплины. Представлены задания для самостоятельного контроля, вопросы к экзамену.

Предназначен для преподавателей и студентов технических вузов и специалистов.

УДК 622.692.4.076:620.197.6
ББК 22.253 я73

ISBN 978-985-418-657-3

© А.Г. Кульбей, 2008
© УО «Полоцкий
государственный университет», 2008

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	8
Раздел 1. Теоретические основы технической диагностики	13
1. Основные задачи и принципы технической диагностики машин и оборудования	13
1.1. Основные понятия и определения	14
2. Дефекты. Классификация	17
2.1. Вязкий и хрупкий виды разрушения	21
3. Изменение характеристик металла при эксплуатации	23
3.1. Долговечность трубопроводных конструкций	23
4. Организация системы ТО предприятия	30
4.1. Формы ТО оборудования	30
4.2. Контроль и прогнозирование технического состояния компрессорного и насосного оборудования	37
Раздел 2. Прикладная техническая диагностика	41
2.1. Визуальный осмотр	42
2.2. Метод акустико-эмиссионного контроля	50
2.3. Акустические методы	52
2.3.1. Ультразвуковой метод	54
2.3.2. Оценка целостности границ с помощью анализа отраженной звуковой волны	56
2.4. Вихретоковые методы	60
2.4.1. Классификация и применение вихретоковых преобразователей (ВТП)	61
2.5. Капиллярные методы	64
2.6. Магнитные методы	69
2.6.1. Магнитопорошковый метод	69
2.6.2. Магнитографический метод	74
2.6.3. Индукционный метод	74
2.6.4. Метод эффекта Холла	74
2.6.5. Применение матричных преобразователей для магнитной дефектоскопии стальных труб	75
2.7. Оптические методы	77
2.8. Радиационные методы	78
2.9. Радиоволновые методы	80
2.10. Тепловые методы	81
2.10.1. Физическая сущность теплового контроля	81
2.11. Течеискание	88
2.11.1. Манометрический метод	89
2.11.2. Масс-спектрометрический метод	89
2.12. Электрические методы	98
2.13. Диагностика магистральных трубопроводов	99
2.13.1. Анализ методов внутритрубного диагностического контроля линейной части магистральных нефтепроводов	99
2.13.2. Четырехуровневая система диагностирования	101
Раздел 3. Математические основы технической диагностики	107
3.1. Постановка задач ТД	107
3.2. Статические методы распознавания	108
3.2.1. Метод Байесса	108
3.2.2. Метод последовательного анализа (метод Вальда)	111
3.3. Метрические методы распознавания	114
3.4. Логические методы распознавания	120
3.4.1. Использование булевских функций для задач распознавания	122
3.5. Обнаружение неслучайных отклонений средних	125
3.6. Метод признаков	127
3.7. Диагностическая ценность признаков	131

3.7.1. Общая диагностическая ценность обследования.....	133
3.8. Диагностическая ценность (ДЦ) одновременного обследования по комплексу признаков.....	135
3.8.1. Общая диагностическая ценность.....	135
3.9. Основные понятия надежности. Классификация отказов. Составляющие надежности.....	138
3.9.1. Основные понятия.....	138
3.9.2. Классификация и характеристики отказов.....	139
3.9.3. Составляющие надежности.....	140
3.10. Количественные показатели безотказности: основные понятия. Основные сведения из теории вероятности.....	143
3.10.1. Общие понятия.....	143
3.10.2. Основные сведения о математических моделях расчета в теории вероятностей.....	144
3.11. Показатели безотказности: вероятность безотказной работы, плотность распределения отказов, интенсивность отказов.....	148
3.11.1. Вероятность безотказной работы (ВБР).....	148
3.11.2. Плотность распределения отказов (ПРО).....	149
3.11.3. Интенсивность отказов (ИО).....	152
3.11.3. Интенсивность отказов (ИО).....	152
3.12. Уравнение связи показателей надежности. Числовые характеристики безотказности.....	154
3.12.1 Уравнение связи показателей надежности.....	154
3.12.2. Числовые характеристики безотказности невозстанавливаемых объектов.....	154
3.13. Математические модели теории надежности. Статистическая обработка результатов испытаний.....	158
3.13.1. Общие понятия о моделях надежности.....	158
3.13.2. Статистическая обработка результатов испытаний и определение показателей надежности.....	159
3.14. Нормальный закон распределения.....	166
3.14.1. Классическое нормальное распределение.....	166
3.14.2. Усеченное нормальное распределение.....	170
3.15. Законы распределения наработки до отказа: экспоненциальный, логнормальный и гамма-распределение.....	174
3.15.1. Экспоненциальное распределение.....	174
3.15.2. Логарифмически нормальное (логнормальное) распределение.....	175
3.15.3 Гамма–распределение.....	176
3.16. Надежность систем. Общие понятия и определения.....	179
3.16.1. Основы расчета надежности систем. Общие понятия.....	179
3.17. Надежность основной системы.....	184
3.18. Надежность систем с нагруженным резервированием.....	188
3.19. Надежность системы с ненагруженным резервированием.....	193
Раздел 4. Практические работы.....	199
Практическая работа № 1.....	199
Практическая работа № 2.....	202
Практическая работа № 3.....	204
Практическая работа № 4.....	206
Практическая работа № 5.....	208
Практическая работа № 6.....	210
Практическая работа № 7.....	215
Практическая работа № 8.....	217
Приложения.....	223
Литература.....	231

ПЕРЕЧЕНЬ ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

- A_t – температурный коэффициент прочности;
- a – параметр закона износа стенки (случайная величина);
- a_{cp} – среднее значение параметра износа стенки;
- b – параметр распределения Вейбулла;
- $C = C_1 + C_2$ — суммарная прибавка к толщине стенки на технологический допуск (C_1) и коррозионный износ (C_2);
- D – наружный диаметр элемента;
- k – коэффициент несущей способности элемента;
- L – погонная длина трубопровода;
- m – показатель степени в формуле определения износа стенки;
- n – общее число проведенных диагностирований трубопровода;
- N – полное число измерений толщины стенки за n диагностирований;
- p_{max} – допустимое давление элемента трубопровода;
- r – число разрушившихся на момент диагностирования элементов трубопровода;
- S_a – среднее квадратическое отклонение параметра a ;
- S_o – среднее квадратическое отклонение технологического допуска на толщину стенки;
- S_d – среднее квадратическое отклонение относительного износа в момент времени τ_d ;
- S_{d^*} – верхняя интервальная оценка S_d ;
- S_δ – среднее квадратическое отклонение толщины стенки в момент времени τ_d ;
- $S_{[\delta]}$ – среднее квадратическое отклонение допустимой толщины стенки;
- t_k – толщина стенки при k -том измерении;
- t_{nk} – номинальная толщина стенки в месте k -того измерения;
- t_n – номинальная толщина стенки;
- t_R – расчетная толщина стенки;
- U_q – q -квантиль нормального распределения вероятности;
- U_γ – $\gamma/100$ -квантиль нормального распределения вероятности;
- U_Γ – квантиль нормального распределения, соответствующий вероятности Γ ;
- V_{cp} – средняя скорость износа стенки;
- z – число элементов трубопровода;
- $\alpha = r/z$ – относительное число разрушившихся элементов;
- δ – относительный износ стенки;
- δ_0 – начальное относительное изменение толщины стенки;
- δ_{cp} – средний относительный износ стенки в момент времени τ_d ;
- δ_{cp^*} – верхняя интервальная оценка δ_{cp} ;
- $[\delta]$ – допустимый относительный износ стенки;
- Δ_{cp} – среднее утонение стенки за время τ_d ;
- Φ – табулированная функция Лапласа;

$v_a = \frac{S_a}{a_{cp}}$ – коэффициент вариации параметра a ;

$[\sigma]$ – допускаемое напряжение при рабочей температуре;

τ_d – наработка на момент последнего диагностирования;

τ_i – наработка на момент i -того диагностирования;

φ – коэффициент прочности сварного шва;

$t_{омб}$ – толщина стенки трубы или детали трубопровода, м, при которой они должны быть изъяты из эксплуатации;

P – рабочее давление в трубопроводе, Па;

P_0 – допустимое давление в трубопроводе, Па;

P_{0n} – допустимое давление в начале эксплуатации трубопровода, Па;

D_n – наружный диаметр трубы или детали трубопровода, м;

n – коэффициент перегрузки рабочего давления в трубопроводе, равный 1,2;

N_{cp} – продольное критическое усилие, при котором наступает потеря продольной устойчивости трубопровода, с учетом принятого конструктивного решения трубопровода;

R_1 – расчетное сопротивление материала труб и деталей трубопроводов, Па, определяемое по формуле $R_1 = R_1^H \cdot m_1 \cdot m_2 \cdot k_1$;

S – эквивалентное продольное осевое усилие в трубопроводе, возникающее от действия расчетных нагрузок и воздействий с учетом продольных и поперечных перемещений трубопровода;

α – коэффициент несущей способности;

R_1^H – нормативное сопротивление, равное наименьшему значению временного сопротивления разрыву материала труб, принимаемое по ГОСТ или ТУ на соответствующие виды труб, Па;

R_2^H – нормативное сопротивление, равное наименьшему значению предела текучести при растяжении, сжатии и изгибе материала труб, принимаемое по ГОСТ или ТУ на соответствующие трубы, Па;

m_1 – коэффициент условий работы материала труб при разрыве;

m_2 – коэффициент условий работы трубопровода;

m_3 – коэффициент условий работы материала труб при повышенных температурах, для условий работы промышленных трубопроводов принимается равным 1;

k_1 – коэффициент однородности материала труб;

γ_n – коэффициент надежности по назначению трубопроводов;

γ_m – коэффициент надежности по материалу;

γ_f – коэффициент надежности по нагрузке;

γ_s – коэффициент условий работы трубопроводов, транспортирующих сероводородсодержащие продукты.

ВВЕДЕНИЕ

Невозможность быстро обнаружить аварийное состояние и причины отказов, а затем быстро восстановить работоспособность отказавшего или подошедшего к границам допуска элемента в системе трубопроводного транспорта может привести к возникновению аварии, сопровождающейся ущербом в социальной, экологической и экономической сферах. Надежность работы трубопроводов зависит не только от числа отказов, но и от того, как конструктивно и организационно обеспечиваются быстрое отыскание и локализация неисправностей, определение причин их появления и прогнозирование фактического состояния агрегатов и устройств как в период нормальной эксплуатации, так и в аварийных ситуациях.

Для успешного решения комплекса задач, связанных с повышением надежности работы газопроводов, необходимо разрабатывать и внедрять в практику новые средства технической диагностики, позволяющие определять состояние элементов газопроводов (без их разборки) путем измерения ряда объективных характеристик (давления, температуры, вибрации, частоты вращения, пропускной способности и т. д.) и существенно сокращающие объем работ по техническому обслуживанию и ремонту оборудования.

Применение методов регулярной диагностики оборудования позволяет снизить расход запасных частей примерно в 5 раз, стоимость текущего ремонта в 2 раза благодаря более точному знанию объекта и увеличению межремонтного периода, расход топлива на 10 %, расход фонда заработной платы до 10 %; уменьшить количество оборудования за счет улучшения эксплуатационных качеств примерно на 10 %.

Диагностирование включает в себя три этапа: измерение, анализ и принятие решения. При этом необходимо выбрать адекватные модели исправного состояния элементов газоснабжения, аварийных состояний контролируемых параметров, распознавания аварийных ситуаций, прогнозирования текущих и аварийных состояний, а также структуру трубопроводных систем; технически реализовать системы автоматического контроля, защиты и регулирования элементов газопроводов.

Диагностика трубопроводных систем в настоящее время приобретает принципиально важное значение в связи с тем, что она становится главным источником информации о состоянии технологической подсистемы и происходящих в ней технологических процессах. Такая информация позволяет оперативно и правильно принимать решения об управляющих воздействиях, обеспечивающих эффективное функционирование технологических подсистем трубопроводного транспорта. Роль диагностики непрерывно

возрастает по мере разработки и внедрения автоматизированных систем управления (АСУ) трубопроводным транспортом.

При анализе состояния трубопроводной системы оценивают изменение выходных характеристик, чтобы выделить из возможных состояний наиболее вероятные. Следует учесть, что в некоторых случаях различные воздействия приводят к одинаковым конечным результатам. Таким образом, характерной чертой диагностического процесса является анализ состояний системы, позволяющий уточнить и локализовать место аварии и элементы системы, находящиеся в аварийном состоянии.

Важнейшее значение имеет знание «предыстории» системы. Оценка текущего состояния ее в разные моменты времени позволяет установить, какие параметры, характеризующие работоспособность системы, приближаются к границе допуска, определить их тренд, вызванный в большинстве случаев износом или старением, и обратить внимание на элементы, наиболее подверженные таким изменениям.

Как и в других отраслях знаний, в технической диагностике развиваются интегральные (обобщенные, комплексные) и дифференциальные (локальные) методы. Мощным инструментом для решения диагностических задач становятся методы имитации состояния элементов и систем, дающие возможность сопоставлять свойства объекта диагностики с планируемыми или заложенными при проектировании. Дифференциальные (локальные) методы необходимы при обработке элементов подсистем, детальном обследовании объекта, эксплуатации малосерийных и уникальных изделий, для снабжения систем интегральной диагностики информацией и повышения достоверности этой информации и др. Для локальных методов диагностики характерно стремление к использованию новых эффектов, помогающих локализовать контролируемые неоднородности по пространству геометрических или физических параметров. Для решения задач диагностики интегральными методами важное значение имеют не только контроль самих параметров и их комплексов, но и измерения дифференциальных по времени и аргументу величин. Дифференцирование по времени позволяет обнаружить кратковременные нарушения (например, при аварийной ситуации, утечке на трубопроводе), контроль дифференциальных величин с последующей записью на самописце дает возможность оценить место, размер и время аварии. Дифференцирование по аргументу помогает выявить отклонения от заданных закономерностей технологических характеристик.

Широко известны методы неразрушающих испытаний, использующие акустическую эмиссию, радиоспектральные, ультразвуковые колебания и т. д. Для диагностики состояния трущихся частей оборудования тру-

бопроводных систем начинают применять методы диагностики по составу отработанного масла.

Иногда для принятия определенного решения текущей информации оказывается недостаточно, тогда прибегают к различным испытаниям. Они могут быть жесткими (заранее регламентированными) и гибкими, устанавливаемыми в ходе диагностического процесса. Разработка рациональных методов проверки оборудования также является задачей диагностической системы. Диагностические процессы характеризуются различной эффективностью по продолжительности диагностической процедуры, общим числом проверок, стоимостью диагностического процесса и т. д. Для оптимальных по какому-либо критерию диагностических процедур используют закономерности получения и обработки информации. Анализ последовательности состояний объектов диагностики позволяет установить характер изменения их работоспособности, в большинстве случаев прогнозировать момент перехода их в аварийное состояние. Внедрение системы технической диагностики дает возможность перейти к планированию профилактических работ и всех видов ремонта на основе текущего состояния объекта, при этом учет ограничений по обобщенным показателям работы системы (например, по обязательной поставке газа зимой и уменьшению поставок летом) не вызывает затруднений.

Как уже указывалось, основные задачи технической диагностики сводятся к оценке текущего состояния, прогнозированию состояния и поиску первичных неисправностей. Решать их необходимо для определения долговечности работы трубопроводных систем, для расчетов оптимальных сроков их технического обслуживания и ремонтов и т. д. Принятие решения о виде и объемах ремонтных работ, расследование причин аварий и составляет *суть задачи поиска первичных неисправностей*.

При разработке системы технической диагностики выбирают и обосновывают функционалы качества систем, строят математические модели нормального и аварийного режимов функционирования трубопроводных систем, выбирают критерии для принятия решения в той или иной ситуации. Функционалы качества носят комплексный характер, вследствие чего возникает трудность согласования общего функционала качества с частными критериями определения их весовых значений и масштаба.

При математическом моделировании исследуемых трубопроводных систем часто используют функциональные уравнения (алгебраические, интегральные, дифференциальные, интегро-дифференциальные и др.), методы статистического моделирования, методы конечных элементов, логические функции и т. д. Способы анализа диагностических процедур сводятся к методам линейных, нелинейных, дискретных, непрерывных и других преобразо-

ваний случайных событий, величин, функций и полей. При оптимизации диагностических процедур применяют классические методы поиска экстремумов и функционалов, вариационное исчисление, линейное и нелинейное программирование, методы оптимальной фильтрации Винера, Калмана – Бьюси и т. д., численные методы оптимизации и др.

Различают диагностические процедуры с использованием *стационарных* и *динамических* методик. В первом случае в каждый момент времени пренебрегают инертностью и изменением параметров системы во времени и считают функциональные связи в системе также независимыми от временных изменений. Стационарные методики более просты, однако они целесообразны лишь при сравнительно медленном изменении входных переменных и относительно малой инерционности исследуемой технологической системы.

Трубопроводные системы представляют в виде множества входных величин, параметров технологических процессов и выходных величин, которые могут быть наблюдаемыми и управляемыми, наблюдаемыми и неуправляемыми, ненаблюдаемыми и управляемыми. Таким образом, трубопроводная система чаще всего является частично наблюдаемой и частично управляемой. Степень наблюдаемости и управляемости системы обуславливает гибкость диагностической системы. Во многих случаях отклонение даже одной переменной от нормы приводит к нарушению нормальной эксплуатации системы.

При обнаружении неисправностей строят схему причинно-следственных связей контролируемых величин, разрабатывают диагностические тесты отыскания неисправностей, выбирают последовательность использования тестовых программ. Методы поиска неисправностей обычно подразделяют на *условные* и *безусловные*. Последние определяют жесткую последовательность реализации отдельных контрольных тестов. Для условных проверок характерна зависимость последовательности проверки от результатов предыдущих проверок. Программы проверки основываются на использовании таблиц функций неисправностей и методов существенных путей.

В настоящее время исследователи используют все доступные средства, применяемые в том или другом конкретном случае. Вопрос о том, какой из известных теоретических подходов при анализе технических систем является важнейшим, часто не имеет смысла, тем более что в большинстве практических приложений лишь последовательное применение различных методов, начиная от детерминированных и кончая статистическими, приводит к определенному результату.

Даже наличие экспериментальных данных не решает полностью вопрос о возможностях использования тех или иных методов. Часто тот или иной метод оказывается недостаточно апробированным из-за низкой техники снятия экспериментальных или эксплуатационных данных. По мере совершенствования последней и техники эксперимента обнаруживаются новые стороны, имеющие важное практическое значение. Постановка исследования в новых условиях вызывается как актуальностью проблемы, так и стоимостью затрат.

При решении задач технической диагностики можно наметить множество технологических решений. Обычно при выборе того или иного метода исходят из наименьших затрат для получения наилучших результатов. При отсутствии предварительных данных для выбора метода намечают такой путь, когда возможны переход от одних опытных данных к другим с использованием методов адаптации и уменьшение, таким образом, неопределенности знаний о технологическом объекте.

Система диагностирования внедряется поэтапно в соответствии с выделенными материальными ресурсами и временем. При ее проектировании следует избегать некоторых крайностей, например:

- система может быть излишне сложной, избыточной по информации, трудно понимаемой технологическим персоналом, что может привести к снижению эффективности ее работы и газопровода в целом;
- система может быть недостаточной, не справляющейся с поставленными задачами;
- система может обслуживать только существующие технологические процессы, всякое изменение их потребует ее перестройки;
- система может быть излишне активной, тогда ее частные системы будут «лихорадить» технологические процессы транспорта газа.

Сложности моделирования процессов диагностирования магистральных трубопроводов объясняются рядом особенностей:

- большой размерностью пространства переменных, влияющих на работоспособность;
- значительным числом методов диагностирования, используемых в системе;
- нестационарностью процессов и дрейфом параметров во времени;
- стохастической природой параметров;
- значительным уровнем шума;
- большим числом контролируемых и регулируемых параметров;
- многоконтурностью процессов контроля и регулирования;
- использованием во многих случаях эвристических методов подготовки и принятия решений, не поддающихся формализации;
- влиянием субъективных факторов, обусловленных воздействием человека.

РАЗДЕЛ 1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ

Основной целью преподавания дисциплины является подготовка специалиста, способного использовать методы и технические средства, определяющие действительное состояние объектов трубопроводного транспорта, и разрабатывать предупреждения, поиск и локализацию аварийных состояний объекта и его элементов.

Техническая диагностика включает следующие узловые моменты:

- диагноз – оценку технического состояния объекта по совокупности контролируемых параметров;
- генезис – поиск причин отказов и локализацию неисправностей;
- прогноз – предсказывание технического состояния объекта и принятие необходимых мер по поддержанию работоспособности объекта.

В результате изучения дисциплины студент узнает:

- основные методы и средства технической диагностики (ТД) внутренней и внешней линейной части магистральных газо-, нефте- и нефтепродуктопроводов;
- основные методы и средства ТД оборудования нефтеперекачивающих насосных станций (НПС).
- основные методы и средства ТД газоперекачивающих агрегатов (ГПА) компрессорных станций (КС) по термогазодинамическим и вибрационным показателям с оценкой выходных характеристик и последующим уточнением и локализацией узлов и деталей силового оборудования, находящихся в аварийном состоянии;
- основные методы и средства ТД оборудования автомобильных газонаполнительных компрессорных станций (АГНКС);
- классификацию способов технической диагностики линейной части газопроводов и построение диагностических моделей, расчет остаточного ресурса оборудования по результатам диагностических измерений, прогнозирование состояния оборудования.

В результате обучения студент должен уметь выполнять систематизацию измеряемых и контролируемых параметров и показателей состояния перекачиваемой среды, по которым он сможет оценивать эффективность и надежность работы энергетических установок и технологического оборудования.

Изучение дисциплины предполагает проведение 32 лекционных и 16 практических аудиторных занятий.

ЛЕКЦИОННЫЙ КУРС

Наименование тем	Кол-во ауд. часов
1. Основные задачи и принципы ТД машин и оборудования	2
2. Дефекты. Классификация	2
3. Организация системы технического обслуживания (ТО). Виды ТО	2
4. Методы распознавания состояния оборудования	8
5. Методы неразрушающего контроля	8
6. Вибродиагностика	2
7. Внутритрубная диагностика	2
8. Напряженно-деформированное состояние конструкций	2
9. Теория надежности и теория вероятности в технической диагностике	4
Всего:	32

ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАНЯТИЯ

Тема практического (семинарского) занятия	Кол-во ауд. часов
1. Составление функций распределения	2
2. Определение расчетной и отбраковочной толщины стенок труб	2
3. Расчет остаточного ресурса трубопровода по минимальной вероятной толщине стенок труб	2
4. Расчет остаточного ресурса трубопровода с учетом общего коррозионно-эрозионного износа стенок	2
5. Оценка технического состояния газопроводов	2
6. Расчет остаточного ресурса трубопровода по характеристикам трещиностойкости	2
7. Расчет прогнозирования остаточного ресурса трубопровода по отказам его элементов	2
8. Оценка малоцикловой долговечности по критерию зарождения трещин	2
Всего:	16

1. ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ И ПРИНЦИПЫ ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ МАШИН И ОБОРУДОВАНИЯ

Техническая диагностика (ТД) – это наука о распознавании состояния объекта или системы. Она изучает методы получения и оценки диагностической информации, диагностической модели и алгоритмы принятия решений. Целью ТД является повышение надежности и ресурса технической системы (ТС). Как известно, наиболее важным показателем надежности является отсутствие отказов во время функционирования ТС. Техническая диагностика благодаря раннему обнаружению дефектов и неисправностей позволяет устранить подобные отказы в процессе технического обслуживания, что повышает надежность и эффективность эксплуатации, а также дает возможность эксплуатации ТС ответственного назначения по состоянию.

Техническая диагностика решает обширный круг задач, многие из которых являются смежными с вопросами других научных дисциплин. Основной задачей ТД является распознавание состояния ТС в условиях ограниченной информации.

Теоретическим фундаментом для решения основной задачи ТД следует считать общую теорию распознавания образов. Эта теория занимается распознаванием образов, машинным образованием речи и т.д. Техническая диагностика изучает алгоритмы распознавания применительно к задачам диагностики. Алгоритмы распознавания в ТД частично основываются на диагностических моделях, устанавливающих связь между состояниями ТС и их отображениями в производстве диагностических сигналов. Важной частью проблемы распознавания являются правила принятия решений.

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

Вторым значимым направлением ТД является теория контролеспособности. Контролеспособность – свойство изделия обеспечивать достоверную оценку его ТС и раннее обнаружение неисправностей и отказов. Существенной задачей теории контролеспособности является изучение средств и методов получения диагностической информации. Структура ТД приведена в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Структура технической диагностики

Техническая диагностика					
Теория распознавания			Теория контролеспособности		
Алгоритмы распознавания	Правила решений	Диагностические модели	Диагностическая информация	Контроль состояния	Поиск неисправностей

Состояние системы описывается совокупностью (множеством) определяющих ее параметров (признаков). Разумеется, множество определяющих параметров может быть различным, в первую очередь, в связи с самой задачей распознавания.

Распознавание состояния системы – отнесение её к одному из возможных классов (диагнозов). Число диагнозов зависит от особенностей задачи и целей исследования.

В большинстве задач ТД диагнозы устанавливаются заранее, и в этих условиях задачу распознавания часто называют задачей классификации.

Совокупность последовательных действий в процессе распознавания называется алгоритмом распознавания. Существенной частью процесса распознавания является выбор параметров, описывающих состояние системы. Они должны быть достаточно информативны, чтобы при выбранном числе диагнозов процесс разделения (распознавания) мог быть осуществлен.

1.1. Основные понятия и определения

Согласно определению, данному в ГОСТ 20911-80, под *технической диагностикой* понимается «отрасль знаний, исследующая технические состояния объектов диагностирования и проявления технических состояний, разрабатывающая методы их определения, а также принципы построения и организацию использования систем диагностирования».

Термин «*диагностика*» происходит от греческого «диагнозис», что означает распознавание, определение. В процессе диагностики устанавливается диагноз, т. е. определяется состояние.

Таким образом, *технической диагностикой* называется наука об определении состояния технической системы.

Цели технической диагностики

Техническая диагностика изучает методы получения и оценки диагностической информации, диагностические модели и алгоритмы принятия решений. *Целью* технической диагностики является повышение надежности и ресурса технических систем.

Как известно, наиболее важным показателем надежности является отсутствие отказов во время функционирования (работы) технической системы.

Техническая диагностика благодаря раннему обнаружению дефектов и неисправностей позволяет устранить подобные отказы в процессе технического обслуживания, что повышает надежность и эффективность эксплуатации, а также дает возможность эксплуатации технических систем ответственного назначения по состоянию.

Основные задачи технической диагностики

Главными задачами технической диагностики являются предупреждение, поиск и локализация аварийных состояний элементов трубопроводных систем.

Техническая диагностика решает обширный круг задач. Многие из них являются смежными с задачами других научных дисциплин.

Техническую диагностику иногда называют «безразборной» диагностикой, т. е. осуществляемой без разборки изделия. Анализ состояния проводится в условиях эксплуатации, при которых получение информации крайне затруднено. Часто не представляется возможным по имеющейся информации сделать однозначное заключение и приходится использовать статистические методы.

Алгоритмы распознавания в технической диагностике частично основываются на *диагностических моделях*, устанавливающих связь между состояниями технической системы и их отображениями в пространстве диагностических сигналов. Решение диагностической задачи (отнесение изделия к исправным или неисправным) всегда связано с риском ложной тревоги или пропуска цели. Для принятия обоснованного решения привлекаются методы *теории статистических решений*, впервые разработанные в радиолокации.

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

Важным направлением технической диагностики является теория контролеспособности. *Контролеспособностью* называется свойство изделия обеспечивать достоверную оценку его технического состояния и раннее обнаружение неисправностей и отказов. Контролеспособность создается конструкцией изделия и принятой системой технической диагностики.

Существенной задачей теории контролеспособности является изучение средств и методов получения диагностической информации. В сложных технических системах используется автоматизированный контроль. Важные вопросы теории контролеспособности связаны с разработкой алгоритмов поиска неисправностей, разработкой диагностических тестов, минимизацией процесса установления диагноза.

В связи с тем, что техническая диагностика развивалась первоначально только для радиоэлектронных систем, многие авторы отождествляют теорию технической диагностики с теорией контролеспособности

(поиском и контролем неисправностей), что, конечно, ограничивает область приложения технической диагностики.

Структура технической диагностики

Структура технической диагностики (рис. 1.1) характеризуется двумя взаимопроникающими и взаимосвязанными направлениями: теорией распознавания и теорией контролеспособности. Теория распознавания содержит разделы, связанные с построением алгоритмов распознавания, решающих правил и диагностических моделей. Теория контролеспособности включает разработку средств и методов получения диагностической информации, автоматизированный контроль и поиск неисправностей.

Техническую диагностику следует рассматривать как раздел общей теории надежности.



Рис. 1.1. Структура технической диагностики

В механических системах (двигатели, насосы и т. п.) основное назначение технической диагностики – повышение надежности и ресурса изделий с помощью раннего обнаружения дефектов и оптимизации процессов технического обслуживания. Техническая диагностика сложных систем представляет собой науку, которая должна иметь информационное, техническое и математическое обеспечение.

Информационное обеспечение включает способы получения диагностической информации, ее хранение и систематизацию. Информационное обеспечение содержит необходимый массив восполняемых технических сведений.

Техническое обеспечение представляет собой совокупность устройств получения и обработки информации (диагностические приборы, датчики, сигнализаторы и т. п.).

Математическое обеспечение содержит алгоритмы и программы распознавания.

Техническая диагностика как система включает также и *коллектив специалистов*, ответственных за принятие решений.

Основные виды диагностической информации

Большая часть информации о поведении системы имеет диагностическую ценность, так как она отражает состояние системы. Состав и состояние сред, взаимодействующих с изделием (воздух, вода, масло, топливо, продукты сгорания и др.), рабочие параметры процесса (частота вращения, температура, давление и т. п.), вибрация, акустическое и тепловое излучения и т. д. содержат диагностическую информацию. Во многих случаях весьма полезным оказывается непосредственное визуальное наблюдение состояния элементов с помощью оптических трубок (бороскопов), позволяющее обнаружить наличие трещин, перегрева, коробления и т. п.

К основным видам *диагностической информации* относятся спектр вибрации элементов конструкции; спектр акустических колебаний; значение параметров, характеризующих функционирование системы; состояние соприкасающихся сред; визуальные наблюдения; данные дефектоскопии.

Контрольные вопросы:

1. Перечислите основные задачи технической диагностики.
2. Приведите структуру технической диагностики.
3. Какае цели ставит перед собой техническая диагностика?

2. ДЕФЕКТЫ. КЛАССИФИКАЦИЯ

Дефектом называется каждое отдельное несоответствие продукции требованиям, установленным нормативной документацией (ГОСТ 15467-79. Управление качеством продукции. Основные понятия. Термины и определения).

Необходимо отметить, что в практике применения средств неразрушающего контроля нет полного соответствия понятия «дефект» определению из ГОСТа. Обычно под дефектом понимают нарушения сплошности материала, выявленные средствами неразрушающего контроля. Связь такого понятия с определением по ГОСТу устанавливается путем разделения дефектов на *допустимые* требованиями нормативно технической документации и *недопустимые*. Допустимые в свою очередь делятся на *фиксируемые* или регистрируемые в соответствии с требованиями нормативно технической документации и *нефиксируемые*.

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

- *явные* поверхностные дефекты выявляют невооруженным глазом, а внутренние *скрытые* и поверхностные неразличимые – специальными средствами;

- *критический* – дефект, при наличии которого использование детали по назначению невозможно или исключается из-за несоответствия требованиям безопасности или надежности;

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

- *малозначительный* – дефект, который не оказывает влияния на использование продукции по назначению и (или) на ее долговечность.

По происхождению дефекты изделий бывают:

- *производственно-технические*, металлургические, возникающие при отливке и прокатке;

- *технологические*, возникающие при изготовлении и ремонте деталей (сварке, наплавке, механической и термической обработке, калибровке и др.);

- *эксплуатационные*, возникающие после некоторой наработки изделия в результате усталости металла деталей, коррозии, охрупчивания

под действием радиации, изнашивания и т. д., а также неправильного технологического обслуживания в эксплуатации.

Дефекты зависят от типа изготовления и вида обработки детали. Характеристики дефектов, возникающих при различных видах обработки (производственно-технические, металлургические и технологические) приведены ниже.

Закалочные трещины – разрывы металла, возникающие при охлаждении деталей преимущественно сложной формы в процессе закалки из-за высоких внутренних напряжений. Они могут появиться и после закалки на деталях, длительное время не подвергавшихся отпуску, уменьшающему внутренние напряжения.

Внутренние напряжения в закаленной детали складываются из термических напряжений, появляющихся вследствие термических объемных изменений при быстром и неравномерном охлаждении детали, и напряжений, возникающих вследствие объемных изменений при структурных превращениях. Внутренние напряжения в значительной мере зависят от исходной структуры детали, в частности, от наличия карбидов в стали; от степени неоднородности состава (наличия зональной и дендритной ликвации) и неодинаковой величины зерна стали в различных местах детали.

Высокие и неравномерные внутренние напряжения при недостаточной жесткости детали вызывают ее коробление. Если же детали имеют ослабленные сечения, то могут возникнуть и трещины. Наиболее вероятные места зарождения закалочных трещин – места с резким изменением сечения, острые углы и подрезы.

Однако трещины при закалке нередко могут появляться и на деталях простой формы. В этом случае причиной образования трещин могут быть дефекты материала (шлаковые включения, флокены, ковочные трещины) или несоблюдение режимов термической обработки деталей.

Отличительным признаком закалочных трещин являются неопределенность их направления и извилистая форма. Закалочные трещины встречаются группами, но большей частью число их на детали невелико.

Шлифовочные трещины – группа мелких и тонких разрывов, как правило, в виде сетки на шлифованной поверхности металла. Возникают при шлифовании сталей некоторых марок, склонных к образованию трещин, закаленных высокоуглеродистых и легированных.

При шлифовке трещины возникают по двум причинам:

– из-за неправильного режима термообработки деталей, например, очень резкого охлаждения, приводящего к значительным внутренним

напряжениям; в этом случае достаточно даже небольших дополнительных напряжений термического и механического происхождения, получающихся в поверхностном слое при шлифовании абразивными кругами, чтобы появились поверхностные шлифовочные трещины;

– вследствие местного перегрева металла при нарушении режимов шлифования – применении неподходящего для данного материала или «засаленного» круга, чрезмерном повышении подачи (давления), скорости шлифования (продолжительной задержке камня на одном месте) или недостаточном охлаждении. Чрезмерные местные перегревы поверхностного слоя закаленных сталей, обладающих пониженным коэффициентом теплопроводности, вызывают в нем высокие внутренние напряжения вследствие неравномерных объемных изменений при чередующемся нагреве и охлаждении. Эти напряжения приводят к образованию сетки шлифовочных трещин.

У малоуглеродистых сталей, обладающих более высоким коэффициентом теплопроводности и повышенными пластическими свойствами, образование трещин при шлифовке маловероятно.

Надрывы – неглубокие трещины, возникающие в деталях в результате холодной деформации металла, например, при сверлении или развертке отверстий тупым сверлом или разверткой, холодной штамповке, особенно когда металл имеет недостаточно высокие пластические свойства из-за дефектов структуры. Кроме того, надрывы могут образоваться при горячей деформации (ковке, штамповке, протяжке с большой степенью деформации).

Эксплуатационные дефекты

Трещины – надрывы в поверхностном слое металла образуются в результате высоких одноразово приложенных напряжений (растяжение, изгиб, кручение), когда нагрузка превышает прочность детали, например, при нарушении технологии правки детали, демонтаже или монтаже детали с хрупким поверхностным слоем или при перегрузке детали в эксплуатации (работа в нерасчетном режиме).

Трещины усталости являются наиболее распространенными эксплуатационными дефектами. Основная причина усталостных разрушений деталей – действие высоких переменных напряжений. Трещины усталости возникают в местах концентрации напряжений: по галтелям, в местах с резкими переходами сечений и наличием подрезов, у основания резьбы и зубьев шестерен, в углах шпоночных канавок, у отверстий для смазки или в местах других конструктивных или технологических концентраторов напряжений. Трещины усталости появляются также в местах дефектов металлургическо-

го и технологического происхождения или следов грубой механической обработки поверхности (глубоких рисок, следов резца и т.п.).

Трещины усталости различают по внешнему виду. Чаще всего они бывают двух типов:

- поперечные или кольцевые трещины, развивающиеся на цилиндрических деталях по окружности в сечении, перпендикулярном оси детали;
- трещины, расположенные под углом к оси детали.

В зоне усталостного разрушения отсутствуют какие-либо признаки пластической деформации даже у самых пластичных материалов. Ширина раскрытия усталостной трещины у выхода ее на поверхность в начальной стадии разрушения не превышает нескольких микрон.

Трещины термической усталости. Разрушение деталей после многократного воздействия периодически изменяющегося во времени уровня термических напряжений представляет собой явление термической усталости. Для разрушения при термической усталости характерно множественное возникновение трещин, что объясняется локальностью действия термических напряжений и относительно быстрой их релаксацией. Характерными для термоусталости являются трещины с широкими полостями и тупыми окончаниями – трещины «разгара».

Стенки большинства трещин интенсивно окислены. Трещины термоусталости могут иметь местные уширения, когда они пересекают границы зерен, неблагоприятно ориентированные для развития по ним трещин.

Трещины химической усталости. Разрушение материала в результате действия повторно приложенных нагрузок и коррозионной среды называют коррозионно-усталостным разрушением. Коррозионно-усталостные трещины – это в большинстве случаев многочисленные трещины, разветвляющиеся по мере роста и заканчивающиеся пучками, напоминающими корневую систему растений.

Трещины контактной усталости – особый вид разрушения, представляющий собой контактные усталостные выкрашивания. Поверхностные контактные разрушения – фреттинг-коррозия или контактная усталость являются не полными разрушениями деталей, а сочетаниями многочисленных, часто очень мелких сколов.

Контактное усталостное выкрашивание (образование питтингов) с последующим развитием усталостного разрушения по сечению деталей наблюдается в таких деталях, как подшипники качения и скольжения, на зубьях шестерен замковых соединениях и пр.

Кавитационное растрескивание. Кавитация означает образование полости на поверхности твердого тела при разрушении газообразных пузырьков. Лопающиеся пузырьки производят разрушения в слое металла на границе с жидкостью. Усталостная кавитация наблюдается, когда колеблющаяся стенка граничит с жидкостью (например, в циклически нагружаемых подшипниках скольжения).

Разрушение под влиянием водорода (водородная хрупкость). Под влиянием растворенного водорода металлы могут настолько охрупчиваться, что уже при приложении малого растягивающего напряжения образуются трещины. Источниками поступления водорода могут быть термическая диссоциация воды при металлургических процессах (литье, сварка), диссоциация газов, коррозия, гальванические процессы и т. п.

Трещины ползучести. Разрушение деталей после пластического течения их материала под воздействием постоянного напряжения при относительно высоких температурах называется разрушением от ползучести. Для ползучести является характерным множественное трещинообразование. Большое влияние на характер разрушения оказывают размер зерен и их разновидность. Для материала с разнородным зерном характерно межзеренное разрушение в области малых зерен и внутризеренное – по более крупным.

Растрескивание под действием термических напряжений. Разрушение под действием термических напряжений происходит только вследствие теплового градиента, без приложения внешней механической нагрузки. Причиной возникновения трещин при этом является образование локальных полей напряжений.

Коррозионные повреждения (очаговые, межкристаллитные и др.) встречаются на разных деталях. Степень коррозионного повреждения зависит от наличия агрессивных сред, качества защитных покрытий, неблагоприятного сочетания материалов деталей в узле и др. В эксплуатации коррозией часто поражены закрытые внутренние полости, труднодоступные для осмотра.

Коррозионное растрескивание. Особенно опасный вид коррозионного разрушения – коррозионное растрескивание, происходящее при одновременном воздействии статических растягивающих напряжений (внешних или внутренних) и коррозионной среды. При этом наблюдается хрупкое разрушение, и оно направлено перпендикулярно действию растягивающих напряжений. Процесс развития коррозионного разрушения состоит из трех стадий:

- медленное развитие трещин, когда процесс в основном определяется коррозионным фактором;
- скачкообразное, относительно быстрое развитие трещин при увеличивающемся влиянии механического фактора;
- лавинообразное разрушение (долом).

Особенностью трещин при коррозионном растрескивании является их сильная разветвленность.

Механические повреждения поверхности – забоины, вмятины, надирсы, риски, местный наклеп. Их причины могут быть разнообразными.

2.1. Вязкий и хрупкий виды разрушения

Локальный характер разрыва твердых тел показывает, что кинетика разрушения (и долговечность материала) определяется, прежде всего, развитием трещин разрушения. Механизм процесса разрушения при длительном действии нагрузки заключается в постепенном росте микротрещин до критического размера в результате разрыва атомных связей в вершине трещины. Таким образом, развитие микротрещин в напряженном теле представляет собой сущность процесса разрушения.

Исследования показывают, что трещины образуются вскоре после приложения нагрузки и обычно на различного рода дефектах: включениях, неоднородностях, царапинах и др., их развитие занимает основную часть времени до разрыва (более 90 %). Обычно различают две стадии роста трещины: стадию медленного роста с увеличивающейся скоростью (ускоренный рост), преобладающую по времени, и стадию быстрого роста с постоянной предельной скоростью, близкой к скорости звука в материале. Длительность этой стадии составляет незначительную долю по сравнению с длительностью ускоренной стадии и временем разрыва образца.

Исследования показывают, что общей особенностью кинетики развития разрывной трещины под действием постоянной (растягивающей) нагрузки является ускоренный рост трещины.

Существует вероятность того, что некоторые частицы у вершины трещины получают вследствие тепловых колебаний избыток кинетической энергии, достаточный для разрыва связей между ними; эта вероятность тем больше, чем выше температура и больше упругие напряжения у вершины трещины. Рост трещины на второй, конечной стадии разрушения, в отличие от первой не зависит от температуры, т. е. представляет собой безактивационный атермический процесс разрушения тела локальными напряже-

ниями, близкими к пределу молекулярной прочности, и связан со скоростью перераспределения упругой энергии.

Различают два основных типа микроскопического разрушения: разрушение путем отрыва, которое происходит от нормальных растягивающих напряжений, и разрушение путем среза, происходящее от касательных напряжений независимо от вида прилагаемых нагрузок.

Схематически виды начальной стадии разрушения в зависимости от способа нагружения (по Фридману) указаны в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Виды начальной стадии разрушения в зависимости от способа нагружения

Способ нагружения		Направление		Вид разрушения	
		$+\sigma_{\max}$	τ_{\max}	Отрыв	Срез
Растяжение					
Сжатие					
Срез					
Кручение					
Чистый изгиб					
Изгиб с перерезывающей силой					
Вдавливание					

В таблице 2.1 сопоставлены направления наибольших упругих удлинений e_{\max} и касательных напряжений t_{\max} с направлением начала излома от отрыва и среза при различных способах нагружения. На основании анализа причин поломок деталей машин составлена классификация видов изломов по внешним признакам и возможным причинам их возникновения. По виду изломы можно разделить на вязкие и хрупкие. Вязкий излом может возникнуть в результате недостаточной конструктивной прочности, плохого качества изготовления или ремонта детали и перегрузки в процессе эксплуатации. Хрупкий излом, в свою очередь, можно подразделить на усталостный излом, излом от действия повторных статических нагрузок, от действия однократных нагрузок и замедленное разрушение. Причины разрушения могут быть такие же, как и у вязкого излома. Часто концентраторами напряжений, снижающими предел выносливости детали, являются места соединения деталей сваркой.

Контрольные вопросы:

1. Что понимается под термином «дефект»?
2. Какие бывают типы дефектов?
3. Какие бывают виды разрушения? Каковы их особенности?

3. ИЗМЕНЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК МЕТАЛЛА ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ

3.1. Долговечность трубопроводных конструкций

Проблема долговечности различных объектов ученых интересовала с давних времен, поэтому естественной была попытка увязать показатели долговечности объектов с универсальными физическими характеристиками. Такой характеристикой, непосредственно связанной с долговечностью, является прочность. При этом прочность выступает в двух качествах: прочность металла и устойчивость конструкции (изделия, изготовленного из этого металла).

Под *прочностью* понимают свойства твердых тел сопротивляться разрушению, а также необратимому изменению формы под действием внешних сил. Приведенное выше определение прочности соответствует физической долговечности, определяемой продолжительностью перехода из работоспособного в неработоспособное состояние (разрушение) основных несущих конструкций и элементов под действием физико-химических факторов. Критерием предельного состояния при этом является неэффективность дальнейшей эксплуатации из-за старения и частых отказов или увеличения затрат на ремонт.

Наряду с физической иногда рассматривают моральную долговечность. При этом критерием предельного состояния является нарушение техники безопасности или моральное устаревание. Моральная долговечность присуща сложным объектам (техническим системам) и характеризуется сроком службы объекта до того момента, когда он перестает отвечать изменяющимся условиям эксплуатации или режимам технологических процессов. При этом становится актуальной проблема оптимальной долговечности.

Под *устойчивостью* понимают способность сооружения противостоять действию сил, стремящихся вывести его из состояния равновесия. Необходимость обеспечения устойчивости наряду с прочностью – одно из основных требований, предъявляемых к сооружениям.

Наука о прочности и устойчивости развивается уже несколько веков. Наиболее современный подход к этим проблемам связан с именами Гриффитса, Ирвина, А.В. Степанова, Дж. Тейлора, Н.А. Мазутова, В.С. Ивановой, С.Н. Журкова и др.

Гриффитс нашел энергетический закон, которому подчиняется разрушение в твердых телах, и вывел константу – удельную энергию трещинообразования. Снижение прочности, по Гриффитсу, вызывает поверхностные трещины.

Модель Ирвина применима для упругопластичных материалов: трещина, развиваясь в упругом теле, как бы несет перед собой некую пластическую частицу материала в «кончике». Энергия, которая освобождается трещиной, тратится не только на упругие деформации, но и на пластическую деформацию материала вблизи «кончика». Константа Ирвина представляет собой коэффициент сопротивления развитию трещины. Этот коэффициент, наряду с коэффициентом концентрации напряжений, удельной поверхностной энергией, позволил с достаточной точностью рассчитать прочность деталей с трещинами (теория Гриффитса – Ирвина).

А.В. Степанов предложил модель, объясняющую природу трещин: начальные зародышевые трещины являются результатом пластической деформации. Локальные напряжения на маленьких площадках служат источником зародышевых трещин при совпадении повреждений с определенными плоскостями атомных слоев кристалла, «зародышевый сдвиг» – начало пластической деформации.

Дж. Тейлор допустил наличие дислокаций в кристаллической решетке, т.е. местных областей, где правильный порядок атомов нарушен. По Тейлору, «зародыши» трещин Степанова являются дислокациями. «Зародыши» трещин Степанова возникают при внешнем воздействии на твердое тело – на царапинах и уколах, внешнем влиянии среды и в процессе изготовления материала. Если на твердое тело воздействуют силой, вызывающей сдвиг его частей по плоскостям, в которых лежат краевые дислокации, то они сдвигаются, не сливаясь до препятствия. Накопление дислокаций одного знака у препятствия в конечном счете приводит к образованию трещины – модель Зинера – Стро.

Известно, что уровень прочности данного металла тем выше, чем больше дислокаций, порожденных при деформировании, задерживается в материале и чем прочнее их блокировка. Существуют следующие способы задержки дислокаций: создание внутренних дислокационных барьеров (границы зерен и субзерен, двойники, границы раздела фаз, лес дислокаций, мелкодисперсные выделения) и блокировка дислокаций; создание внешних дислокационных барьеров (упрочненные поверхности и слои, покрытия и т.п.); повышение сил трения решетки (легирование).

Трещины субмикроскопических размеров не оказывают существенного влияния на предел прочности, в то же время наличие локальных объемов металла с докритической плотностью дислокаций облегчает развитие хрупких трещин. Энергия, запасенная дислокациями при взаимодействии трещин с ними, переходит в работу разрушения. Если трещина встречается с плотностью дислокаций меньше критической, то упругая энергия дислокаций переходит в работу пластической деформации, при этом происходит релаксация напряжений у вершины трещины и ее распространение затрудняется.

Исследование долговечности объектов магистральных нефтепроводов (МН) тесно связано с изучением процесса их разрушения. Изучение самого разрушения следует выполнять на микроскопическом уровне, однако процессы, предшествующие и сопутствующие возникновению разрушения, часто зависят от таких факторов, как напряженное состояние, деформация, скорость деформации, старение, температура, условия окружающей среды и истории изменения этих факторов.

Исследование долговечности объектов МН на макроуровне дает наименее полные результаты и вместе с тем этот подход позволяет построить наиболее эффективную программу управления долговечностью МН, ориентированную на все стадии существования МН от эскизного проектирования до окончания эксплуатации вследствие исчерпания ресурса.

При исследовании проблемы долговечности эксплуатируемого МН предлагается сочетать оба подхода.

Следует отметить, что необходимость комбинированного использования макро- и микроскопического подхода в механике разрушения обосновал Т. Екобори при рассмотрении ряда узловых проблем физико-механо-структурных аспектов разрушения.

Влияние цикловой нагрузки

Метод расчета МН на прочность согласно СНиП 2-05-06-85 [11] разработан лишь с учетом статического нагружения, созданного внутренним давлением. Однако в реальных условиях линейная часть нефтепроводов и их сварные узлы испытывают действие как статических, так и малоцикловых (повторно-статических) нагрузок. Отдельные участки МН могут испытывать в среднем 300 – 350 и более циклов повторных нагружений в год, вызванных различными технологическими и эксплуатационными факторами (отключение НПС из-за отказов механического электрооборудования и автоматики, изменение режимов перекачки и т.д.).

За амортизационный срок (30 – 33 года) суммарное число циклов нагружения внутренним давлением может составлять в среднем более 10^4 циклов. Нагружение конструкции с числом циклов от 10^2 до 10^4 относится к малоцикловому нагружению, и приравнивать его в общем случае к статическому нельзя, особенно в том случае, когда номинальные напряжения близки к пределу пропорциональности, как это наблюдается в металле труб, уложенных в грунт. В этих условиях в процессе эксплуатации в результате повторных воздействий нагрузки возможно малоцикловое разрушение металла труб применяемого диаметра.

Малоцикловое разрушение, в отличие от разрушения при статическом нагружении, весьма чувствительно к концентраторам напряжений, создаваемых различными дефектами в металле труб. Однако стендовые испытания, проведенные на неэксплуатируемых трубах (сталь марки 17ГС) с заваренными коррозионными язвами во ВНИИСПТнефть и на спиральношовных трубах (сталь марки 17Г1С) в НИЛ ИМ Горьковского института инженеров водного транспорта [3], показали, что эти трубы при циклических нагружениях (максимальное давление $p_{\max} = 7$ МПа) выдерживали более 10 000 циклов, что соответствует их амортизационным срокам службы. В условиях же эксплуатации, как показывает статистический анализ причин аварий, трубы разрушаются значительно раньше амортизационного срока и зачастую при средних рабочих давлениях нефти в нефтепроводах. Как пример, можно отметить многократные разрушения трубопровода Куйбышев – Брянск после восьмилетней эксплуатации и Тихорецк – Лисичанск после семилетней эксплуатации. Следовательно, на долговечность металла труб нефтепроводов оказывает влияние совокупность факторов малоцикловой усталости и изменения физико-механических свойств, структуры и флуктуации химического состава (старение) в условиях эксплуатации.

Процесс деформированного старения малоуглеродистых сталей, который протекает в условиях эксплуатации, включает в себя накопление необратимых микропластических деформаций, перераспределение атомов углерода и азота, взаимодействие примесных атомов с дислокациями, распад цементита и образование новых частиц карбидов. Этот процесс протекает более интенсивно в напряженных областях, т.е. в дефектных участках металла труб и в сварных соединениях.

Известно, что малоцикловое разрушение труб, в отличие от статического, является весьма чувствительным к концентраторам напряжений, т.е. к дефектам металла. К часто встречающимся дефектам, которые являются

опасными концентраторами напряжений, следует отнести царапины, риски, вмятины, задиры, забоины, трещины, плены, расслоения, закаты, непровары, прожоги, неметаллические включения, коррозионные язвы, питтинговую и межкристаллитную коррозию, несоосность кромок, угловатость, овальность трубы и др. В области концентраторов в металле труб при обычном режиме работы нефтепроводов напряжение значительно выше, чем в бездефектных участках, и доходит до предела текучести и выше. В локальных областях металла возникают напряжения, т.е. происходят упругие искажения кристаллической решетки в отдельных зернах. Остаточные напряжения с увеличением степени деформации растут. В этих напряженных областях протекают при повторно-статических нагружениях необратимые микропластические процессы: генерация свежих дислокаций и вакансии, коагуляция вакансий и образование микропор, образование линий и полос скольжений, возникновение микротрещин и т.д. При дальнейших нагружениях происходит слияние микротрещин и образование макротрещин, которые затем превращаются в магистральную трещину и приводят металл трубы к разрушению. Установлено, что чем медленнее происходит повторно-статическое нагружение, тем эффект накопления необратимых микропластических деформаций больше. В условиях же эксплуатации, как показывает анализ причин аварий, трубы разрушаются значительно раньше амортизационного срока и зачастую при средних рабочих давлениях перекачки в нефтепроводах. Следовательно, на долговечность нефтепровода оказывает влияние совокупность факторов малоциклового усталости, изменение физико-механических свойств, а также изменения структуры и флуктуации химического состава (старения) металла в условиях эксплуатации.

Старение металла объектов трубопроводного транспорта

Проблема прочности и долговечности является одной из основных задач современной науки о материалах и металлах. Одним из внутренних резервов повышения прочности металлов является изучение физической природы их прочности и долговечности. Под влиянием внешних воздействий в сталях развиваются многие физические процессы, в том числе и старение.

Отрицательным аспектом старения является снижение пластичности и вязкости стали, нестабильность ее свойств во времени. Особенно это важно для низкоуглеродистых сталей.

Задача исследования ставится в следующем виде: на базе физики отказов изучить влияние физических, химических, механических процессов на старение, найти зависимость между параметрами, характеризующими

скорость изменения пластичности и вязкости сталей, и параметрами, определяющими долговечность объектов МН, например, линейной части. Результаты исследования должны использоваться для принятия обоснованных и конкретных мер, направленных на повышение долговечности конструкции – системы МН при заданных условиях эксплуатации.

Для наиболее полного отражения путей управления долговечностью объектов МН необходимы анализ и систематизация физической природы долговечности составляющих его элементов. Исследование старения объектов МН позволит определить (прогнозировать) время, в течение которого объект, выполненный из известного (заданного) металла, сохранит свои характеристики – пластичность и вязкость – в определенных условиях эксплуатации в заданных пределах. На базе этого исследования могут быть даны рекомендации по сооружению объектов МН для заданных условий эксплуатации из определенных (наименее стареющих) металлов.

Особенности экспериментальных методов оценки уровня старения заключаются в отсутствии внешних признаков изменения микроструктуры сталей, что ограничивает применение развитых методов фрактографии, и акцентировании внимания на методах определения твердости сталей и методах определения внутреннего трения в металлах.

Подход к определению долговечности объектов МН, базирующийся на исследовании старения металлов, из которых они изготовлены, подразделяется на два этапа. На одном из них необходимо уяснить физическую природу причин, лежащих в основе старения и приводящих к отказу объектов МН, получить математическую модель процессов, определяющих старение, и обобщенную физико-математическую модель долговечности объекта. На другом этапе с использованием данных эксперимента (статистики) можно получить оценку долговечности объекта МН.

Исследование старения объектов МН на базе физики отказов позволяет оценивать долговечность линейной части МН на основе данных о долговечности труб и долговечности МН на этапе проектирования; управлять долговечностью МН в эксплуатационный период (например, путем профилактической замены труб и других элементов); оперативно повышать качество профилактического обслуживания объектов МН.

Наиболее явно старение определяет долговечность труб, задвижек, тройников, клапанов и др. Вместе с тем именно объекты линейной части определяют уровень надежности МН в целом (например, число труб достигает в среднем 80 000). При последовательном их соединении даже высокий уровень надежности отдельных труб, обеспечивающий вероятность

их безотказной работы 0,9999, не гарантирует высокой надежности функционирования системы трубопровода в целом: вероятность безотказной работы МН определяется как $0,9999^{80000} = 3,3 \cdot 10^{-4}$. При этом капитальные вложения в линейную часть МН составляют 80 % от капитальных вложений в МН.

Анализ существующих работ по долговечности показал, что существуют два подхода к решению этой проблемы: изучение долговечности на микроуровне, например, в кинетической теории прочности или кинетике разрушения; изучение долговечности на макроуровне, например, в упругой механике разрушения.

Под *старением* понимают процесс изменения физических и механических свойств металлов во времени. Известны три вида старения: естественное, термическое и деформационное. При старении закономерно возникающие в процессе эксплуатации изменения приводят к постепенно нарастающему уменьшению устойчивости функционирования объекта, при этом небольшие отклонения нагрузки от номинальной могут вызвать необратимые структурные изменения и последующее разрушение объекта, которое зачастую носит тяжелые экологические последствия. Интенсивность отказов определяет долговечность и соотношение структурных и функциональных проявлений в системе. Общепринятого объяснения механизмов старения нет.

В трубных сталях в процессе эксплуатации магистральных нефтепроводов происходит преимущественно деформационное старение.

Выдвинута суммарная гипотеза – старение определяется дефектами структуры объектов, создающими слабые места, на которые повреждающе действуют факторы эксплуатации.

Теория старения решает две задачи: выяснение атомных механизмов и кинетических параметров элементарных актов разрушения; построение кинетической модели макропроцесса разрушения и вычисление характеристики долговечности исследуемого объекта.

Для объектов МН вторая задача наименее исследована. При ее постановке следует принимать следующие основополагающие допущения:

- разрушение является термоактивированным процессом;
- тело задолго до разрыва содержит множество микротрещин (находясь под нагрузкой);
- разрушение описывается как процесс разрыва атомных связей, активированный приложенной нагрузкой;
- разрушение – необратимый процесс возникновения и рост ядер деформации, которые отождествляют с дефектами, развивающимися в материале под действием напряжений;

– в сечении материала имеются дефекты – дислокации, под действием внешнего напряжения в области дислокации образуется ядро деструкции (субмикротрещина).

Отдельные участки нефтепроводов испытывают в среднем 300 и более циклов повторно-статического нагружения в год, вызванных различными технологическими и эксплуатационными факторами. Проведенный статистический анализ аварий нефтепроводов также показывает, что в большинстве случаев разрушение металла труб носит хрупкий характер, который присущ усталостным явлениям и состаренным металлам.

Процесс охрупчивания малоуглеродистых и низколегированных сталей (трубные стали), который протекает в условиях эксплуатации, обусловлен, как правило, деформационным старением. Этот процесс, несомненно, протекает более интенсивно в напряженных областях, т.е. в дефектных участках металла труб и в сварных соединениях.

Одним из наиболее практических вопросов надежности и долговечности МН является выяснение природы хрупкого разрушения металла труб, а также установление тех условий деформации, при которых происходит переход металла в области концентраторов из пластического в хрупкое состояние.

Старение малоуглеродистых сталей, в отличие от высокоуглеродистых, происходит не после специальной их закалки, а в прокатанном состоянии. Процесс старения в них происходит не в мартенсите, а в феррите. Феррит низкоуглеродистой стали содержит, как известно, небольшое количество азота (10^{-5} %) и углерода (10^{-7} %). При повторно-статических нагружениях в пластически деформируемых областях (в окрестности дефектов) металла происходит выделение атомов азота и углерода, а затем образование частиц нитридов и карбидов (Fe_3C). Следует отметить, что растворимость и скорость перемещения атомов азота в решетке феррита при комнатной температуре примерно в 20 раз больше, чем у атомов углерода. При дальнейшей деформации металла происходят дробление «сетки» нитридов и карбидов на границе зерен и блоков и генерация новых дислокаций. По мере протекания деформационного старения все большее число атомов азота и углерода перемещается к дислокациям, что способствует охрупчиванию стали. Таковыми были основные представления о деформационном старении малоуглеродистых сталей.

Охрупчивание металла труб в условиях эксплуатации также происходит и за счет наводороживания. В нефтепроводах возможно образование конденсата с высоким содержанием сероводорода, наличие которого приводит к развитию коррозии и насыщению стали водородом. Атомарный водород получается и от катодных реакций защиты на поверхности труб.

Атомы водорода также проникают из окружающей среды (нефть, щелочи, кислоты). В металле трубы они накапливаются в коллекторах (микропустотах, порах, границах зерен и т.п.), что в конечном итоге приводит к расслоению металла труб, образованию пузырьков, микротрещин и т.д. Если насыщенный водородом металл напряжен, но не деформируется, наводораживание не приводит к значительному изменению напряжений; если же процесс насыщения происходит одновременно с деформированием, остаточные напряжения возрастают весьма существенно, т.е. охрупченность стали увеличивается.

Старение металлов, из которых изготовлены объекты МН, является объективным, закономерным процессом. Оно выражается в изменении их механических и физических свойств, обусловленном термодинамической неравновесностью исходного состояния и постепенным приближением структуры к равновесному состоянию в условиях достаточной диффузионной подвижности атомов.

В процессе эксплуатации в трубных сталях происходят накопление необратимых микропластических деформаций, деформационное старение и наводораживание, интенсифицирующееся циклическим характером нагружения нефтепроводов, проявляющимся в снижении свойств сопротивляемости металла труб хрупкому разрушению, особенно в локальных, структурно-неоднородных областях. Следовательно, надежность работы нефтепроводов определяется не только прочностью металла труб, как это принято, например, в СНиП 2.05.06-85, а прежде всего свойствами трубных сталей сопротивляться охрупчиванию (старению) и хрупкому разрушению.

В трубных сталях в процессе длительной эксплуатации (10 лет и более) происходит распад цементита, обусловленный фрагментацией цементитных пластин в результате перерезания их дислокациями и обезуглероживанием перлитной фазы. За 30 лет эксплуатации нефтепроводов количество распавшегося цементита составляет у сталей марок 17ГС, 19Г и Х52 около 30 – 35 %, а у сталей марок 14ХГС, 10Г2С и 14ГН около 20 – 25 %. Атомы углерода распавшегося цементита скапливаются на дислокациях, часть из них уходит в решетку феррита на образование зародышей новых карбидных частиц, а также они, вероятно, выносятся из металла труб с атомами водорода.

В условиях эксплуатации нефтепроводов прочностные свойства (интегральные) трубных сталей изменяются незначительно: в пределах 10 %, пластические в пределах 15 – 20 %, а параметры, характеризующие свойства локально охрупченных областей, изменяются в зависимости от длительности эксплуатации в значительных пределах.

Контрольные вопросы:

1. Что понимается под термином «долговечность» конструкции?
2. Какие бывают виды долговечности конструкций?
3. Расскажите о достижениях ученых в области теории прочности.
4. Чем отличается малоцикловое нагружение оборудования от многоциклового?
5. Что такое старение металла?

4. ОРГАНИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ ПРЕДПРИЯТИЯ

4.1. Формы технического обслуживания оборудования

В различных отраслях промышленности эксплуатационные затраты составляют от 6 до 18 % стоимости конечной продукции (рис. 4.1). Их величина бывает сравнима с прибылью предприятия, особенно в области транспорта, в том числе трубопроводного транспорта нефти и газа.

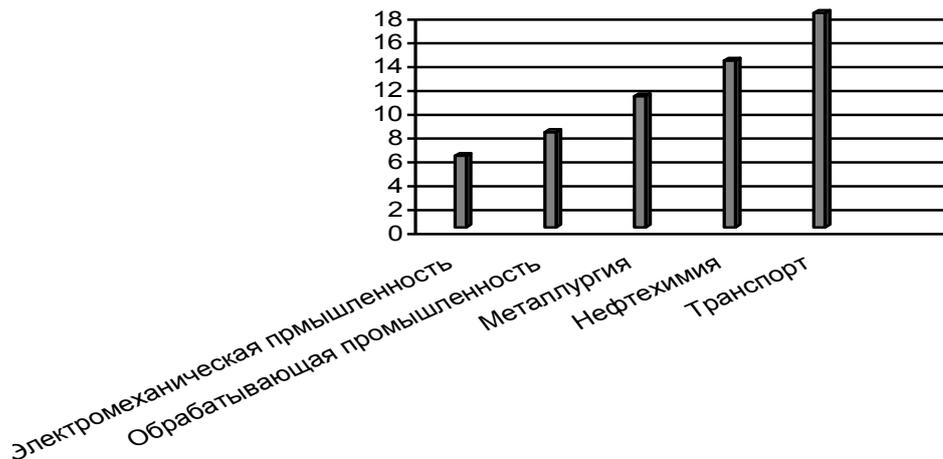


Рис. 4.1. Эксплуатационные затраты в различных отраслях промышленности

Опыт показывает, что эксплуатационные затраты являются одной из наиболее регулируемых статей затрат предприятия, и снижение эксплуатационных затрат в итоге повышает производительность. Важнейшим резервом снижения эксплуатационных затрат, обеспечения безопасности персонала и сохранности оборудования является совершенствование структуры технического обслуживания (ТО) оборудования предприятий.

Реактивное ТО – такой метод обслуживания, при котором ремонт или замена оборудования производится только в том случае, когда оно выходит из строя или вырабатывает свой ресурс.

Реактивное ТО имеет следующие недостатки: возможность внеплановых простоев из-за внезапных отказов оборудования и дорогостоящий и продолжительный ремонт из-за серьезности и обширности дефектов. Кроме того, имеется вероятность внезапного отказа нескольких различных агрегатов одновременно.

Планово-профилактическое ТО (ППТО) – метод обслуживания, основой которого является плановое периодическое проведение профилактических работ различного объема на оборудовании, т.е. составление и проведение календарного графика выполнения через строго определенные

интервалы времени работ по профилактическому ремонту (текущему, среднему и капитальному). Его также называют методом планово-предупредительных ремонтов (ППР).

Достоинством метода ППТО по сравнению с реактивным является резкое снижение вероятности внезапного отказа оборудования. Недостатком ППТО является проведение излишних ремонтов, т.е. ремонтов фактически исправного оборудования, и, как следствие, излишний рост эксплуатационных затрат.

Цель периодического ППТО состоит в исключении отказов оборудования и непредвиденных расходов путем планирования и проведения ТО ранее момента вероятного среднестатистического отказа. Особенностью ППТО является то, что организуется более высокий уровень управления обслуживанием, выходящий за рамки реактивного обслуживания. Исследование и опыт работы в промышленности показали, что успешная программа ППР может обеспечить более чем 30 %-ное снижение эксплуатационных расходов относительно расходов при реактивном обслуживании.

Базисом деятельности служит 52-недельный план-график ТО, составляемый службой главного механика (ремонтной службой), которая определяет и отслеживает бюджет и основу повседневной деятельности службы ремонта.

В процессе эксплуатации детали агрегата деградируют, приводя к постепенному отказу. Техническое и промышленное обеспечение ППТО базируется на том, что, имея статистические данные истории отказов оборудования и зная характеристики процесса изнашивания узлов механизма в зависимости от наработки, можно определить и установить срок эксплуатации оборудования (межремонтный интервал), при котором вероятность интенсивного износа и отказов мала (рис. 4.2). Ревизия и замена компонента оборудования по прошествии очередного фиксированного межремонтного интервала значительно уменьшает вероятность внезапного отказа.

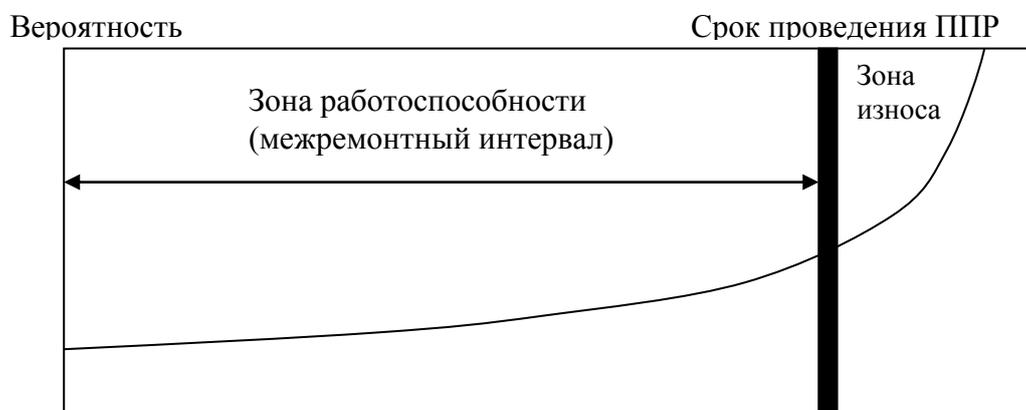


Рис. 4.2. Классическая схема, лежащая в основе планово-профилактического обслуживания

Однако в реальных условиях не существует сильной (см. рис. 4.2) взаимосвязи между сроком и техническим состоянием агрегата. Следовательно, если ППТО широко применяется для всего парка оборудования предприятия, то существует высокая вероятность того, что выполняется большой объем работ по обслуживанию бездефектного оборудования, состояние которого на момент проведения ППТО не требует проведения ремонта, но проводится, чтобы гарантировать безотказную работу в межремонтный интервал.

Обслуживание по фактическому состоянию (ОФС)

Достижения в разработке контрольно-измерительной аппаратуры обеспечили возможность не только выявлять состояние агрегата путем измерения ряда его технических параметров, но и на основе анализа измеренных параметров предсказывать необходимость и планировать сроки проведения ремонта, т.е. проводить ремонт агрегатов там, где он необходим. Такой вид ТО называется «предупредительным», или **обслуживанием по фактическому состоянию (ОФС)**. Достоинством такого метода обслуживания является минимизация ремонтных работ и увеличение на 25 – 40 % межремонтного ресурса по сравнению с ППР. Серьезным недостатком такого вида обслуживания может быть ситуация, когда необходимость в проведении ремонтных работ на нескольких агрегатах одновременно превысит возможности ремонтной службы.

Основная идея ОФС состоит в устранении отказов оборудования путем применения методов распознавания технического состояния оборудования по совокупности его виброакустических характеристик, выявления имеющихся или развивающихся дефектов и определения оптимальных сроков проведения ремонтных работ.

В настоящее время на многих предприятиях применяется модифицированная система ППР, точнее симбиоз ППР и ОФС. В частности, за 4 – 12 недель до запланированного срока проведения ремонта агрегата по 52-недельному плану-графику службой ремонта формируется и направляется запрос о его состоянии в группу технической диагностики. Если результаты проведенного службой технической диагностики обследования показывают, что агрегат находится в исправном работоспособном состоянии и его компоненты функционируют нормально, ТО может быть задержано. Когда подходят сроки очередного обслуживания агрегата, процедура повторяется до тех пор, пока не будут обнаружены признаки приближения состояния к предельному.

Техническая база ОФС основана на том, что существует взаимосвязь между возможными техническими неисправностями агрегата и диагности-

ческими параметрами, которые можно контролировать. Другими словами, большинство распознаваемых дефектов, которые могут возникать в агрегате, имеют определенные диагностические признаки и параметры, предупреждающие о том, что дефекты присутствуют, развиваются и могут привести к отказу. Диагностические признаки дефектов могут включать параметры вибрации, технологические и режимные параметры (температуру, нагрузку, давление, влажность и др.), частицы износа в смазке и т.д. В частности, при износе деталей наблюдается изменение уровня вибрации.

Следовательно, проводя мониторинг различных параметров, характеризующих работу оборудования, можно вовремя обнаружить изменение технического состояния оборудования только тогда, когда возникает реальная возможность ухода его параметров за недопустимые пределы, т.е. когда дальнейшая эксплуатация невозможна.

Обслуживание по фактическому состоянию по сравнению с ППТО имеет ряд преимуществ:

1. Наличие постоянной информации о состоянии агрегатов, охваченных мониторингом, позволяет планировать и выполнять ТО и ремонт без остановки производства и практически исключить отказы оборудования.

2. Прогнозирование и планирование объемов ТО и ремонта проблемного оборудования; снижение расходов по ТО за счет минимизации ненужного ремонта (увеличение межремонтного интервала) нормального оборудования.

3. Обеспечение эффективности ремонта за счет послеремонтного вибрационного обследования.

4. Повышение качества продукции.

5. Эффективность переговоров с поставщиками оборудования относительно его гарантийного ремонта, восстановления, замены или изменения конструкции.

6. Улучшение охраны труда и устранение нарушений экологических требований.

Основой ОФС является вибромониторинг оборудования. Анализ эксплуатационных расходов показывает, что переход от «реактивного» обслуживания одного и того же парка оборудования к ППТО приводит к снижению затрат в 1,5 раза, а к ОФС – почти в 2 раза. Метод ОФС базируется на применении ряда методов ТД и распознавания ТС, которые в сочетании позволяют определять бóльшую часть различных дефектов, возникающих в технологическом оборудовании предприятия (табл. 4.1).

Методы ОФС, выявляющие дефекты в технологическом оборудовании

Метод	Оборудование
Вибродиагностика и вибромониторинг	Энергомеханическое оборудование с движущимися деталями
Акустико-эмиссионная диагностика	Сосуды давления, резервуары, трубопроводы, несущие конструкции
Трибодиагностика (анализ качества смазки (масла) и выявление частиц износа)	Ответственное энергомеханическое оборудование, в т.ч. трансформаторы
Тепловидение и термография	Электроэнергетическое оборудование, теплообменное оборудование, теплоизоляция, печи и др.
Анализ токов и электроимпульсное тестирование	Токопроводящая часть и изоляция ЭД, эксцентриситет
Аэроультразвуковой контроль утечек (вакуумные утечки)	Компрессионное оборудование
Ультразвуковая дефектоскопия	Состояние и толщина стенок трубопроводов, сосудов и резервуаров
Параметрическая диагностика технологического процесса	Технологическая или механическая деградация, коррозия стенок

Проактивное ТО (ПАО) – подход, направленный на снижение общего объема требуемого ТО и максимизацию срока службы оборудования путем систематического устранения источников дефектов, приводящих к преждевременному выходу оборудования из строя. Другими словами, по результатам обобщения наиболее часто встречающихся дефектов, выявляемых в процессе работы оборудования, проводятся анализ и определение причин их возникновения и влияния на межремонтный интервал, а затем принимаются меры по недопущению возникновения этих дефектов.

Идея ПАО заключается в обеспечении максимально возможного межремонтного срока эксплуатации оборудования за счет применения современных технологий обнаружения и подавления источников отказов.

Основой ПАО являются:

1. Идентификация и устранение источников повторяющихся проблем, приводящих к сокращению межремонтного интервала оборудования.

2. Устранение или значительное снижение факторов, влияющих отрицательно на межремонтный интервал или срок эксплуатации оборудования.

3. Распознавание состояния нового и восстановленного оборудования с целью проверки отсутствия признаков дефектов, уменьшающих межремонтный интервал.

4. Увеличение межремонтного интервала и срока эксплуатации оборудования за счет проведения монтажных, наладочных и ремонтных работ в точном соответствии с техническими условиями и регламентом.

Проактивное техническое обслуживание базируется на применении нескольких приведенных ниже компонентов, сочетание которых дает максимальный эффект:

1. Анализ причин внеплановых остановок, аварий, укороченных межремонтных интервалов, включающих выявление повторяющихся проблем возникающих при эксплуатации оборудования.

2. Оценка технического состояния агрегата после ремонта.

3. Входной и выходной контроль.

4. Кадровое обеспечение.

Характерные особенности влияния различных подходов к ТО на производственный процесс и межремонтные интервалы представлены в табл. 4.2.

Таблица 4.2

Влияние вида ТО на производственный процесс и межремонтный интервал

Вид ТО	Характерные особенности
Реактивное (реагирующее) обслуживание	Повышенная вероятность значительных внеплановых остановок оборудования и перебоев в работе
Планово-профилактическое техническое обслуживание (ПШТО)	Всеобъемлющее обслуживание оборудования для профилактики внеплановых остановок и сбоев в работе
Обслуживание по фактическому состоянию (ОФС)	Обслуживание только дефектного оборудования в сочетании с профилактикой внеплановых остановок
Проактивное обслуживание (ПАО)	Продление межремонтного интервала и интервала между обследованиями

Программа обеспечения надежности механического оборудования (ОНМО)

В целях обеспечения стабильной работы оборудования наиболее прогрессивные предприятия перестраивают тактику ТО: от ремонта вышедшего из строя оборудования к недопущению выхода его из строя. При этом уменьшаются эксплуатационные затраты и внеплановые остановки производства. Такой прогрессивный подход называется **обеспечением надежности механического оборудования (ОНМО)**. Стратегия ОНМО

направлена на обеспечение надежной работы агрегата или его узлов в течение предполагаемого срока службы; ОНМО представляет собой комбинированную стратегию, объединяющую ПАО, ОФС, ППР и реактивное обслуживание.

Реализация программы ОНМО заключается в определении необходимого баланса объемов выполнения стратегий ППР, ОФС и ПАО. Их рациональное совместное выполнение усиливает результат, компенсируя недостатки каждой из них, и приводит к достижению максимальной и стабильной производительности оборудования. Основой ОНМО является ОФС.

Программа ОНМО должна при реализации обеспечить:

- исключение внеплановых остановов оборудования при достижении максимально полезного срока службы дорогостоящего оборудования;
- постоянное наличие информации о состоянии оборудования, позволяющее судить о состоянии общей производительности, а также прогнозирование и планирование потребности в обслуживании;
- обеспечение равномерной прогнозируемой и обоснованной загрузки ремонтного персонала, совместное планирование графиков и объемов обслуживания ремонтными и технологическими службами;
- снижение эксплуатационных затрат предприятия, увеличение прибыли, повышение безопасности труда, качества продукции, обеспечение охраны окружающей среды, сокращение отходов.

Эффективное приложение практики ОНМО может значительно уменьшить вероятность внезапного отказа, особенно в начальной и заключительный период эксплуатации.

Как правило, в начале реализации программы мониторинга и ОФС внедряются в небольших объемах и нередко испытывают недостаток выделенных ресурсов. Однако, если появляются положительные результаты, они получают поддержку и возможности для расширения на все оборудование предприятия. Развитие программ на предприятиях можно условно разбить на три стадии: начальный период – внедрение, период проактивного расширения и период зрелой ОНМО-программы.

Начальный период

Обычно в течение первого года программа ОНМО рассматривается в качестве пробной концепции. Как правило, она реализуется на предприятии, практикующем ППТО, считающееся достаточным для удовлетворительной работы оборудования. Опыт ряда специализированных и эксплуатационных предприятий, занимающихся периодическим вибромониторингом, свидетельствует, что первым шагом в развертывании программы

ОНМО на предприятии является создание двух основных структур подразделений, предназначенных для выполнения основополагающих функций: группа планирования ремонта (ТО) и группа обеспечения надежности (технической диагностики и мониторинга). Основные функции и структура службы по обеспечению надежности приведены на рис. 4.3.



Рис. 4.3. Основные функции и структура службы по обеспечению надежности

Группой планирования ремонта осуществляются следующие функции:

- координация повседневной планово-профилактической работы ремонта предприятия, необходимого планового периодического ТО с распознаванием состояния оборудования, сроков и обстоятельств проведения ТО с руководством производства;

- планирование объемов работ по ТО, включая процедуры, инструмент, запасные части, трудозатраты, осмотры и обследования и т.д.;

- контроль за выполнением работ и отслеживание затрат, включая функционально-стоимостной анализ;

- оценка тенденций изменения межремонтных интервалов и ресурса оборудования для нужд возможной модернизации или замены оборудования и ведения и хранения паспортов (истории) агрегатов.

Группа обеспечения надежности (технической диагностики и мониторинга) все усилия сначала направляет на правильную организацию мониторинга технического состояния оборудования и только спустя некоторое время, по мере развития группы, делает шаги в направлении проактивного обслуживания. Типичная группа обеспечения надежности вначале обычно состоит из одного или двух инженеров-механиков и одного или двух техников. Ее костяк следует составлять из инициативных, добросовестных и высококвалифицированных инженеров-механиков, способных учиться новым, передовым технологиям обслуживания, основанным на применении микропроцессорной техники и ЭВМ.

Предпочтительнее, если группа будет набрана из имеющегося персонала предприятия, хорошо знающего и имеющего опыт работы с оборудованием, мониторинг которого будет проводиться, и затем тщательно обучена до уровня экспертов в области вибродиагностики.

Группа обеспечения надежности должна осуществлять следующие основные функции:

- а) проведение мониторинга и виброобследований оборудования предприятия, управляемого регламентом предприятия и запросами группы планирования ремонта (ТО) и руководителя объекта;

- б) обеспечение своевременных сведений о состоянии оборудования для группы планирования ремонта (ТО) с целью планирования ремонта и исключения любых внеплановых остановов производства;

- в) ведение архива оборудования (сведения о простоях оборудования, состоянии оборудования, проведенном ремонте и его результатах, результатах функционально-стоимостного анализа и др.);

г) внедрение технологий проактивного обслуживания и других технологий мониторинга.

Расширение обслуживания по фактическому техническому состоянию и введение проактивного обслуживания

Для предприятий, практикующих ППР и ОФС, типично в течение 2 – 4 лет действия программы ОНМО, помимо вибромониторинга, добавление новых технологий распознавания состояния оборудования. На этой стадии информация о состоянии оборудования уже вполне интегрирована с периодическим обслуживанием и проактивными технологиями, включая точную центровку с использованием лазеров, балансировку в собственных подшипниках, анализ коренных причин отказов и др. Для совершенствования обслуживания на большинстве предприятий штат группы обеспечения надежности увеличивают на несколько специалистов, проводящих завершающие технологические операции по обслуживанию оборудования – балансировку, центровку (иногда совместно с ремонтными бригадами предприятия) и виброобследование. Выполнение основной части измерений группой обеспечения надежности начинает сдвигаться от однособытийного обследования агрегата, намеченного к ремонту, к полномасштабному мониторингу всего парка оборудования предприятия.

Развитая ОНМО-программа

Для передовых предприятий стадия развитой программы ОНМО примечательна двумя признаками: применением большинства существующих технологий ОФС и происходящим изменением отношения к ним. Передовые предприятия выгодно отличаются от рядовых с точки зрения акцента администрации и персонала на ОНМО: внимание полностью фокусируется на ликвидации внеплановых остановов, теперь же воспринимаемых как ЧП, на постоянном устранении проблем с оборудованием и на достижении или даже превышении установленной изготовителем максимальной производительности оборудования. На предприятии проводится независимый от администрации полномасштабный мониторинг технического состояния всего парка энергомеханического оборудования при небольшом количестве зависимого однособытийного анализа состояния оборудования, запрашиваемого администрацией.

4.2. Контроль и прогнозирование технического состояния компрессорного и насосного оборудования

Предприятие, приобретая насосное или (и) компрессорное оборудование (НКО), должно убедиться в том, что основные показатели назначения, показатели надежности и безопасности соответствуют значениям, которые декларирует изготовитель, провести анализ безопасности работающих и мероприятий по их защите от вредных воздействий, а также загрязнения окружающей среды. Техническая документация, поставляемая потребителю заводом-изготовителем с НКО, должна содержать эксплуатационные документы и руководство по ремонту или технические условия на ремонт и другую документацию. Изменения в технологический регламент, паспорт оборудования, проектную документацию вносятся в соответствии с требованиями нормативных документов.

Руководители предприятия обязаны ежегодно разрабатывать и реализовывать организационно-технические мероприятия для создания безопасных и безвредных условий труда при эксплуатации оборудования, которые должны соответствовать требованиям действующих законодательных и нормативных актов об охране труда и нормативно-технической документации. Они должны обеспечивать постоянный контроль за техническим состоянием оборудования, за проведением своевременного технического обслуживания и ремонта по восстановлению требуемых показателей надежности и безопасности его составных частей, за соблюдением работниками требований норм и правил по охране труда и использованием ими индивидуальных средств защиты.

Обязательное диагностирование технологического оборудования проводится при условии, если:

- отсутствуют паспорта на оборудование;
- выработан установленный автором проекта расчетный срок службы;
- не указан срок службы в технической документации и фактический срок службы оборудования превысил 20 лет;
- при эксплуатации оборудования имели место нарушения регламентированного режима или воздействия факторов (температуры, давления, вибрации, внешних силовых нагрузок и др.), превышающих расчетные параметры (например, воздействие огня при пожаре, значительные стук в механизме движения, помпаж, гидроудар);
- при эксплуатации оборудования проводились ремонтно-сварочные работы или работы, связанные с изменением конструкции, с изменением расположения опор или изменением исходной конфигурации трубопроводов (установка дополнительных или демонтаж имеющихся участков и отводов, применение труб другого сортамента и др.).

В случаях, предусмотренных выше, дальнейшая эксплуатация оборудования возможна только после проведения его диагностирования и определения остаточного ресурса безопасной эксплуатации. Диагностирование организует предприятие – владелец оборудования силами специализированных организаций, имеющих разрешение на проведение работ по диагностированию и прогнозированию ресурса. Диагностирование технологического оборудования проводится по программе, составленной в соответствии с действующими нормативными документами.

Оценку пригодности НКО для безопасной дальнейшей его эксплуатации необходимо проводить на основе результатов комплекса научно-технических работ. Для этого проводятся вибрационные и прочностные исследования, аттестация рабочих мест по условиям труда, анализируются показатели безопасности и надежности оборудования, проверяется работоспособность систем управления и защиты, а также систем технического обслуживания и ремонта, обеспечения надежности и безопасности, обучения обслуживающего персонала. По полученным результатам определяется соответствие (или несоответствие) оборудования требованиям действующей нормативной документации и рассчитывается остаточный ресурс его безопасной дальнейшей эксплуатации. Остаточный ресурс оборудования определяется на основании анализа условий эксплуатации, результатов технического диагностирования и критериев предельного состояния. Когда остаточный ресурс определяется на основании рассмотрения нескольких критериев предельного состояния, то он назначается по тому критерию, который определяет минимальный срок остаточного ресурса.

Для решения вопросов по оценке и прогнозированию технического состояния НКО рекомендуется внедрение прогрессивных систем контроля и обслуживания, позволяющих организовывать ремонт его составных частей по техническому состоянию.

Контроль степени износа ответственных узлов и деталей проводится путем их микрометрирования и сопоставления результатов со значениями допустимых предельных отклонений размеров, приведенных в документации завода-изготовителя и в технических условиях на ремонт. К ответственным узлам и деталям НКО относятся те, которые не входят по паспорту изготовителя в перечень быстроизнашивающихся деталей и узлов, которые заменяются при их отказах и планово-предупредительных ремонтах. Результаты измерений оформляются в виде протоколов и фиксируются в формуляре. Если узлы и детали по результатам ревизии соответствуют

предъявляемым к ним требованиям, то срок их эксплуатации может быть продлен.

Своевременное выявление дефектных узлов и деталей НКО обеспечивается при применении методов и средств виброакустической и параметрической диагностики. Вибрационное обследование НКО и анализ изменений основных показателей режима его работы позволяют с достаточной степенью достоверности оценить фактическое техническое состояние составных частей, не прибегая к разборке, и определить возможные неисправности и дефекты, вызванные износом основных деталей, перекосами вращающихся элементов машин на работающем оборудовании.

Своевременное проведение контроля прочности ответственных деталей оборудования методами неразрушающего контроля, которые указаны в эксплуатационной документации изготовителя или в общих технических условиях на ремонт оборудования, с учетом контроля химического изменения материала, повышает вероятность безопасной эксплуатации объекта контроля. Аттестация рабочих мест позволяет обеспечить безопасность обслуживающего персонала и оценить загрязнение окружающей среды. Контроль и периодический анализ основных показателей надежности (наработка на отказ ответственных деталей и среднего ресурса до капитального ремонта) позволяют своевременно разрабатывать мероприятия по их улучшению.

Назначенный ресурс для ремонтпригодных составных частей НКО последовательно (по этапам) увеличивается по мере выработки начального или очередного назначенного ресурса на основании:

- уточнения характера и условий эксплуатации парка однотипного оборудования;
- накопления статистики и анализа характера отказов оборудования;
- результатов периодического контроля технического состояния составных частей оборудования по вибрационным характеристикам и основным показателям режима их работы;
- результатов контроля прочности основных деталей;
- своевременной замены изношенных деталей, имеющих предельное состояние;
- устранения причин отказов;
- обработки составных частей оборудования по катастрофическим отказам.

Безопасность эксплуатации в пределах назначенного ресурса контролируется опытом эксплуатации всего парка оборудования. Особое внимание уделяется оборудованию, которое максимально опережает по наработке остальной парк и работает при больших динамических и статических нагрузках.

Контрольные вопросы:

1. Перечислите формы технического обслуживания оборудования.
2. В чем сущность и отличия реактивного технического обслуживания оборудования?
3. В чем сущность и отличия планово-профилактического технического обслуживания оборудования?
4. В чем сущность и отличия обслуживания оборудования по фактическому состоянию?
5. В чем сущность и отличия проактивного технического обслуживания оборудования?
6. В чем сущность и отличия технического обслуживания оборудования по программе ОНМО ?

РАЗДЕЛ 2. ПРИКЛАДНАЯ ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА

Для определения технического состояния оборудования без его демонтажа и вывода из эксплуатации используют **неразрушающие методы контроля (НК)**:

- визуальный осмотр;
- акустическая эмиссия;
- акустические методы;
- вихретоковые методы;
- капиллярные методы;
- магнитные методы;
- оптические методы;
- радиационные методы;
- радиоволновые методы;
- тепловые методы;
- течеискание;
- электрические методы.

Более подробно с неразрушающими методами контроля познакомимся далее.

. ВИЗУАЛЬНЫЙ ОСМОТР

Визуальный осмотр является древнейшим и наиболее простым способом осуществления контроля. Он заключается в определении дефектов конструкции (изделия) путем внешнего осмотра. Способ визуального осмотра является наиболее универсальным из прочих методов, т.к. может использоваться для диагностирования любых объектов, но вместе с тем он не относится к наиболее точным методом определения технического состояния.

Ниже рассмотрим использование визуального осмотра для диагностики *сварных соединений*. Приведены видимые дефекты и их причины.

Трещины в наплавленном металле – продольные и поперечные, в изломе имеют темный цвет, сильно окисленные или светлые, с цветами побежалости. Причины образования:

- неправильно выбранная марка присадочного материала;
- неудовлетворительное качество присадочной проволоки, обмазки или флюса;
- неправильные режимы и техника сварки;
- высокие внутренние напряжения в швах;
- наличие в швах пористости или шлаковых включений.

Холодные трещины в шве и переходной зоне, расположенные под любым углом ко шву, – в изломе светлые или со слабыми цветами побежалости. Возникают при остывании детали в зоне пониженных температур, преимущественно при дуговой сварке низколегированной стали большой толщины. Чаще всего трещины возникают в переходной зоне вследствие неправильной техники сварки или неправильно выбранного присадочного материала.

Горячие трещины в переходной зоне от шва к основному материалу извилисты, в изломе имеют темный цвет, сильно окислены, распространяются по границам зерен.

Мелкие трещины (микротрещины) в шве или надрывы по переходной зоне (на нетравленных шлифах под микроскопом видны в виде тонких линий) возникают вследствие неудовлетворительного качества присадочной проволоки, обмазки или флюса.

Трещины, образующиеся в сварных соединениях **при термообработке** (закалке) узлов, деталей могут иметь любое направление. Возникают из-за несоблюдения режимов и условий термической обработки сварных узлов или вследствие неудовлетворительной (нетехнологичной) конструкции детали или узла.

Трещины рихтовочные могут иметь любое направление, в изломе светлые. Причина образования – неправильная технология правки изделий, получивших коробление.

Непровар – отсутствие сплавления между основным и наплавленным металлом в корне шва или по кромке, а также между отдельными слоями, проходами при многопроходной сварке.

Подрез – дефект, который характеризуется наличием углубления между основным и наплавленным металлом на участке или по всему периметру сварного шва.

Прожог – дефект в виде сквозного отверстия в сварном шве, образовавшийся в результате вытекания сварочной ванны.

Поры, раковины и пузыри (обычно сферической формы) различной величины, заполненные газами (водород, окись углерода) образуются из-за присутствия газов, поглощаемых жидким металлом в процессе сварки.

Шлаковые включения в металле шва – небольшие объемы, заполненные неметаллическими веществами (шлаками окислами). Величина их колеблется от микроскопических размеров до нескольких миллиметров в поперечнике. Форма может быть самой различной – от сферической до плоской, вытянутой в виде пленки, которая разделяет прилегающие объемы наплавленного металла.

Отклонения в геометрии сварного шва и сварного соединения в виде подрезов, канавок, ряби, неполноты заполнения кратера, излишка металла, угловых и линейных смещений вызваны неправильной техникой сварки или нетехнологичной конструкцией узла.

Примеры дефектов, обнаруживаемых при визуальном осмотре в деталях, выполненных *литьем*:

Усадочные раковины – открытые или закрытые сравнительно большие полости произвольной формы с грубой шероховатой иногда окисленной поверхностью, находящиеся в теле отливки. Образуются вследствие неравномерной усадки металла при затвердевании в верхней части слитка или в утолщенных частях отливки, где металл затвердевает в последнюю очередь. Усадочные раковины находятся между сердцевинной и коркой отливки.

Рыхлота – местное скопление мелких усадочных раковин при крупнозернистой структуре металла. Часто встречается рыхлота, расположенная над усадочной раковиной.

Пористость – местное скопление мелких газовых или усадочных раковин. Газовая пористость обычно наблюдается в большом объеме от-

ливки или отдельных ее участках. Усадочная пористость часто располагается под концентрированной усадочной раковиной, являясь ее продолжением или продолжением подусадочной рыхлоты.

Ликвационные зоны – неравномерность химического состава металла в теле отливки. Причиной ликвации является различная температура затвердевания чистого металла и содержащихся в расплаве примесей. Различают дендритную и зональную ликвации. *Дендритная ликвация* образуется по границам дендритов обычно в корковой зоне слитка. *Зональная ликвация* образуется в тех областях слитка, которые затвердевают в последнюю очередь. Разновидностью зональной является *подусадочная ликвация* – расположенная под усадочной раковиной область отливки, обогащенная углеродом и ликвирующими примесями (серой, кислородом, фосфором и др.). При травлении макрошлифов слитков дефект выявляется в виде темно-травящихся полосок или пятен. На микрошлифах из зоны дефекта наблюдается скопление сульфидов и оксидов.

Газовая ликвация – характерный дефект слитка кипящей стали, представляющий собой участки структурной и химической неоднородности в виде стреловидной ликвации (каналов в зоне наружной корочки и сегрегационных пятен у внутренних концов сотовых пузырей). Участки газовой ликвации в пузырях загрязнены неметаллическими включениями (сульфидами и оксисульфидами).

Точечно-пятнистая неоднородность типична для высоколегированных жаропрочных сталей и сплавов и представляет собой локальные участки, обогащенные ликвирующими примесями в виде избыточных фаз.

Ликвационный квадрат – дефект, выявляющийся в поперечных макрошлифах деформированного металла, представляет собой структурную неоднородность в виде различно травящихся зон, контуры которых повторяют форму слитка.

Газовые пузыри или раковины в литом металле представляют собой полости (округлые, овальные или продолговатые) с чистой и гладкой, иногда окисленной поверхностью. По расположению в слитках пузыри могут быть внутренние и подкорковые. Внутренние пузыри расположены произвольно по объему слитков в спокойной стали, преимущественно в верхней части слитков, а в кипящей – в средней по высоте и сечению зоне. Подкорковые пузыри расположены у поверхности слитков и представляют собой тонкие извилистые каналы, часто выходящие на поверхность. Горячая деформация приводит к завариванию пузырей в том случае, если их стенки не содержат стойких оксидов или силикатов, а имеются только оксиды же-

леза и марганца. На поперечных макрошлифах спокойной стали незава- рившиеся пузыри имеют вид тонких полосок. Микроструктура в зоне, рас- положенной возле незавазившихся пузырей, характеризуется ликвацион- ными участками и скоплениями сульфидов. Газовые пузыри в литом ме- талле образуются вследствие выделения газов в период кристаллизации, поскольку их растворимость в твердом металле значительно меньше, чем в жидком.

Песчаная раковина – полость в теле отливки, частично или полно- стью заполненная формовочным материалом.

Шлаковая раковина – полость, заполненная шлаком.

Вскип, вскиповая раковина – оксидные складки или раковины, обра- зующиеся при кипении сплава. Различают скипы со стороны формы, стержня и от холодильника.

Поверхностное окисление (загар, горение) встречается у отливок из магниевых сплавов в виде сплошной окисной пленки черного или серого цвета; отдельных или групповых раковин, заполненных порошком черного или серого цвета; наростов (грибков) черного цвета.

Неметаллические включения бывают двоякого рода и происхождения:

- включения неметаллических частиц, попавших в металл извне (частицы шлака, огнеупора, графита, песка и т.д. могут попасть в форму вместе с расплавом и образовать шлаковые и песчаные включения, ко- торые чаще всего расположены в верхних частях отливки или на их по- верхности);

- включения частиц окислов, сульфидов, силикатов, нитридов, обра- зующихся внутри металла вследствие химического взаимодействия ком- понентов при расплавлении и заливке сплава. Они располагаются в виде цепочек или сетки, часто по границам зерен. По форме бывают округлые или удлиненные. Последние могут сильно снижать пластичность металла.

Корочки представляют собой участки металла, загрязненные неме- таллическими включениями; располагаются в объеме слитков или у по- верхности, могут быть темными или светлыми. *Темная корочка* – дефект макроструктуры, представляющий собой участки различной формы, ха- рактеризующиеся плохой полируемостью и повышенной травимостью из- за наличия неметаллических включений и повышенного содержания при- месей серы, фосфора. *Светлая корочка* – дефект макроструктуры нижней части слитка, имеет вид светлых полос, сопровождающихся неметалличе- скими включениями.

Завороты корки – дефект, представляющий собой завернувшиеся корки металла, окислившиеся заливины и брызги, расположенные у поверхности слитков. В деформированном металле дефект представляет собой разрывы или частичное отслоение, образовавшееся в результате раскатки завернувшихся корок или брызг. При горячей деформации дефекты вытягиваются вдоль ее направления.

Металлические включения – инородные металлические тела в основном металле отливки. Такими телами могут быть нерасплавленный легирующий компонент, модификатор, внутренний холодильник и т.д.

Королек – металлическое включение того же состава, что и отливка. В большинстве случаев включение полностью окружено металлом.

Утяжина – углубление с пологими краями на массивной части отливки, образовавшееся вследствие усадки металла при затвердевании. Под утяжиной возможны внутренние дефекты.

Ужимины – длинные узкие вмятины в теле отливки, наслоения металла, отдельные прослойки формовочной смеси при литье в песчаные формы или прослойки краски при литье в кокиль.

Плены – пленки на поверхности или внутри отливки, состоящие из окислов, часто с включениями формовочного материала. К образованию плен склонны высоколегированные сплавы. Плены в отливках возникают в результате того, что при заполнении формы составляющие расплава вступают в химическую реакцию с атмосферой и материалом формы, а из продуктов реакции окислов хрома, алюминия, титана и нитридов, не растворяющихся в сплаве, на поверхности расплава образуется тугоплавкая и плотная пленка. При механическом разрушении этой пленки в процессе заливки формы отдельные куски ее оседают в различных местах формы.

Спаи – сквозные или поверхностные с закругленными краями щели или углубления в теле отливки, образованные неслившимися потоками преждевременно застывшего металла. При прерывистой заливке и неравномерном поступлении металла в форму иногда возникают внутренние спаи неслитины, одной из причин которых могут быть окисные плены, создающие значительное сопротивление движению расплава.

Оксидный спай – нарушение сплошности отливки в виде неслившихся потоков металла, разделенных пленкой. Наиболее часто проявляются в тонких сечениях отливки.

Пригар – неравномерные утолщения из формовочной или стержневой смеси, пропитанные металлом, располагающиеся в местах ее соприкосновения с наиболее горячими участками формы.

Горячие трещины – обычно хорошо видимые разрывы поверхности отливки, распространяющиеся по границам кристаллов и имеющие неровную окисленную поверхность, на которой при увеличении видны дендриты. Образуются вследствие усадки при застывании расплава в формах. Характерными признаками горячих трещин являются их неровные рваные края и значительная ширина.

Холодные трещины – очень тонкие разрывы поверхности отливки, имеющие обычно чистую светлую с цветами побежалости зернистую поверхность. Образуются из-за внутренних напряжений или механического воздействия при температуре ниже температуры свечения отливки. В отличие от горячих холодные трещины распространяются по зернам, а не по их границам; располагаются они преимущественно в острых углах и других местах концентрации напряжений.

Термические трещины – обычно хорошо видимые глубокие разрывы поверхности отливки. Поверхность излома раскрытой трещины мелкозернистая, окисленная или с цветами побежалости. Обнаруживаются эти трещины в отливках после термической обработки. Причина возникновения – высокие температурные растягивающие напряжения, совпадающие по знаку с остаточными напряжениями.

Межкристаллические трещины представляют собой тонкие нарушения сплошности, образующиеся по границам кристаллов при низкой прочности этих границ. Пониженная прочность границ часто связана с присутствием на них прослоек неметаллической фазы и ликватов.

Литейные подрезы – дефекты литья в виде углублений в местах конструктивных концентраторов напряжений. Образование литейных подрезов связано с недостаточной жидкотекучестью металла в процессе отливки детали из-за понижения температуры.

Коробление – искажение геометрии и конфигурации отливки. Обнаруживается после остывания отливки в форме выбивки и заварки.

Отклонение микроструктуры – отличие микроструктуры от требований стандарта по виду, количеству и величине структурных составляющих.

Путем визуальных осмотров определяется техническое состояние внутренних полостей сложноразборных конструкций. Так, например, у газовых турбин производится диагностика лопаток компрессора, лопаток турбины, камеры сгорания. Это осуществляется при помощи эндоскопии.

Техническая эндоскопия – это современная методика неразрушающего контроля материалов и оборудования путем **визуального осмотра** поверхностей и узлов технических средств в случае затрудненности доступа к этим поверхностям при помощи обычных средств измерений.

В зависимости от степени доступности для проведения осмотров применяются различные виды **эндоскопов**.

Для визуального контроля узлов и объектов, к которым возможен прямолинейный доступ, предназначены **жесткие эндоскопы** (рис. 5.1).

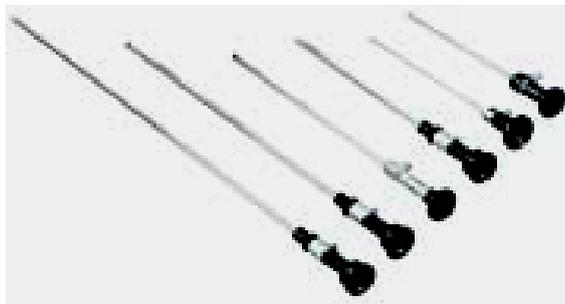


Рис. 5.1. Жесткие эндоскопы марки Эксперт PRO

Жесткие эндоскопы марки **Эксперт PRO** могут быть использованы в различных областях науки и техники. Модельный ряд эндоскопов, обладающих высокими техническими параметрами, позволяет выбрать прибор, наиболее пригодный для конкретных условий использования. Для работы с эндоскопом может быть использован любой световод и осветитель, присоединительные размеры которых соответствуют стандартам. Уровень освещенности, создаваемый эндоскопами, в значительной мере определяется мощностью лампы осветителя.

Присоединительные размеры окулярной воронки эндоскопов соответствуют стандарту DIN, что позволяет использовать фото- и видеоадаптеры со стандартными присоединительными размерами, в том числе фирмы Интек.

Жесткие технические эндоскопы серии КЛ

Жесткие эндоскопы технические линзовые серии КЛ (рис. 5.2) предназначены для осмотра внутреннего или труднодоступного пространства объектов различного назначения. Эндоскопы серии КЛ могут быть оснащены фокусируемым окуляром.

Технические эндоскопы серии КЛ имеют две конструктивные модификации: прямого (0) и бокового (90) направления наблюдения.

Эндоскопы серии КЛ 5.5 прямого наблюдения комплектуются зеркальными насадками, при вращении обеспечивающими панорамный обзор под углами направления наблюдения 90 и 110.

При использовании зеркальной насадки бокового наблюдения рассматриваемое изображение оказывается зеркальным.



Рис. 5.2. Жесткие эндоскопы технические линзовые серии КЛ

Модельный ряд эндоскопов, обладающих высокими техническими параметрами, позволяет выбрать прибор, наиболее пригодный для конкретных условий использования.

Технические характеристики:

- диаметр рабочей части: КЛ 5.5 – 5,5 мм; КЛ 8.0 – 8,0 мм;
- длина рабочей части: от 20 до 57 см;
- минимальная общая длина эндоскопов серии КЛ: 31 см;
- максимальная общая длина эндоскопов серии КЛ: 67 см.

Жесткие технические эндоскопы серии ОТ

Сверхтонкие эндоскопы серии ОТ (рис. 5.3) предназначены для осмотра объектов, имеющих малые размеры отверстий, используемых для ввода рабочей части прибора.



Рис. 5.3. Жесткие технические эндоскопы серии ОТ

Эндоскопы комплектуются насадкой 90 и оснащены фокусируемым окуляром.

Технические характеристики:

- диаметр рабочей части: ОТ 2 – 2 мм; ОТ 3 – 3 мм;
- длина рабочей части: 26,5 см;
- угол направления наблюдения: 0;
- максимальная общая длина эндоскопов серии КЛ: 44 см.



Рис. 5.4. Гибкие оптоволоконные эндоскопы технической марки Эксперт PRO

Гибкие оптоволоконные эндоскопы технической марки Эксперт PRO (рис 5.4) предназначены для визуального контроля объектов, имеющих сложную геометрию, и объектов, к которым невозможен прямой доступ. Примерами таких объектов могут быть газотурбинные, электрические двигатели, турбогенераторы, котлы, теплообменники, трубы водоснабжения, канализации, промышленные коммуникации.

Для облегчения ввода рабочей части эндоскопа в обследуемое пространство она выполнена гибкой. Возможность управления изгибом головной части существенно упрощает прохождение обследуемых полостей. При разработке эндоскопов использованы последние достижения волоконно-оптической технологии.

Полугибкие эндоскопы серии ТЭУ (рис 5.5) имеют управляемый дистальный конец, изгибающийся в одной плоскости. Механизм управления изгибом конструктивно идентичен моделям серии АРТ с двухсторонней артикуляцией, за исключением механизма фиксации.

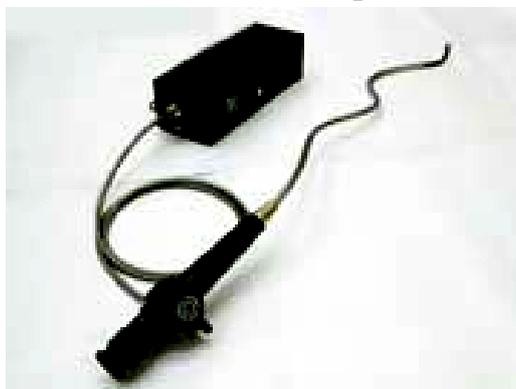


Рис. 5.5. Полугибкие эндоскопы серии ТЭУ

Рабочая часть полугибких эндоскопов находится внутри полугибкой металлической трубки из нержавеющей стали – флекстрона. Внешней металлической оболочке рабочей части предварительно может быть задана необходимая геометрическая форма (эффект запоминания заданной формы), что позволяет обследовать «теневые» полости, недоступные для эндоскопов других типов (жестких, гибких). Приборы не применяются для работы в жидких средах. Полугибкие технические эндоскопы отличает высокая надежность и простота работы.

Контрольные вопросы:

1. Что такое неразрушающий контроль?
2. В чем сущность метода визуального осмотра?
3. Какие дефекты выявляются с использованием метода неразрушающего контроля?
4. Что такое техническая эндоскопия?
5. Перечислите основное оборудование, применяемое в технической эндоскопии?

6. МЕТОД АКУСТИКО-ЭМИССИОННОГО КОНТРОЛЯ

Акустико-эмиссионный метод неразрушающего контроля основан на излучении и регистрации волн напряжений при быстрой локальной перестройке структуры материала. Дефекты, которые возникают и развиваются в материале в период эксплуатации, вызывают концентрацию деформаций. Если во время нагружения локальная деформация, вызванная присутствием дефекта (перенапряжение), превышает пороговый для эмиссии уровень, возникает акустическая эмиссия (АЭ). Чем выше деформация, вызванная дефектом, тем выше уровень эмиссии и тем ниже уровень нагрузки, при котором она появляется. Суммарная энергия эмиссии является мерой опасности дефекта. Дефект, расположенный в более напряженном месте объекта, вызывает больший уровень концентрации напряжений и большую эмиссию, чем аналогичный дефект, находящийся в менее нагруженном участке. С точки зрения структурной целостности объекта дефект, находящийся в более нагруженном участке более опасен, чем аналогичный дефект в менее нагруженном участке. Акустико-эмиссионные испытания позволяют устанавливать это различие.

Классическими источниками АЭ являются процессы пластической деформации и разрушения. Быстрое движение (рост) источника АЭ вызывает возникновение волн напряжений, которые распространяются в структуре материала и достигают пьезоэлектрического преобразователя. Электрические сигналы эмиссии, полученные в результате преобразования датчиком волн напряжений, усиливаются, регистрируются аппаратурой и подвергаются дальнейшей обработке и интерпретации (рис. 6.1).

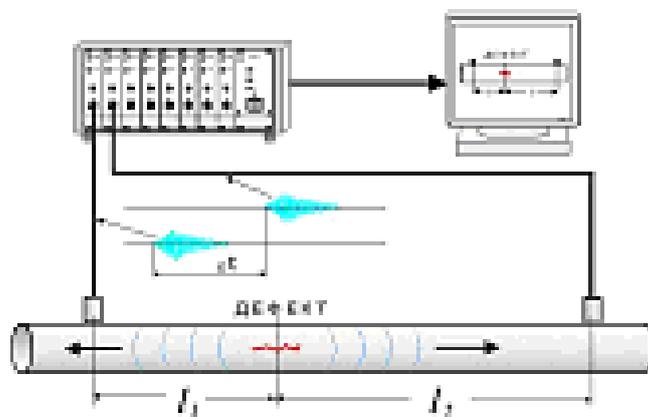


Рис. 6.1. Регистрации волн напряжений АЭ

Современные системы измеряют как отдельные параметры АЭ сигнала: амплитуду, длительность, энергию, осцилляции, время прихода, время нарастания и другие параметры, связанные с его частотными характеристиками, так и форму оцифрованного сигнала. Анализ совокупности параметров последовательности АЭ сигналов позволяет определять местоположение источника, его тип и степень опасности. Детальный анализ формы/спектра оцифрованного сигнала служит для уточнения типа источника и характеристик распространения сигнала.

Поскольку источником акустико-эмиссионной энергии служит поле упругих напряжений в материале, АЭ контроль обычно проводится путем нагружения контролируемого объекта. Это может быть проверочный контроль перед запуском объекта, периодический контроль в процессе эксплуатации или мониторинг. Акустическая эмиссия отличается от большинства методов неразрушающего контроля рядом ключевых аспектов:

- источником сигнала служит сам материал, а не внешний источник, т.е. метод является пассивным, а не активным, как большинство других методов контроля. Это, в свою очередь, приводит к тому, что в отличие от других методов АЭ обнаруживает развивающиеся, т.е. наиболее опасные дефекты;

- данный метод является дистанционным, он не требует сканирования поверхности объекта для поиска локальных дефектов, а лишь правильного размещения датчиков на поверхности объекта для осуществления локализации источника АЭ.

Возможности, связанные с дистанционным использованием метода, дают большие преимущества по сравнению с другими методами контроля, которые требуют, например, удаления изоляционных оболочек, освобождения объектов контроля от внутреннего содержимого или сканирования больших поверхностей.

Благодаря отличию по своим возможностям от традиционных методов контроля на практике очень полезно совмещать акустическую эмиссию с другими методами.

Использование метода АЭ значительно сокращает время проведения диагностических работ и экономит средства, затрачиваемые на их проведение и вывод из эксплуатации оборудования.

Контрольные вопросы:

1. В чем сущность акустико-эмиссионного контроля?
2. Что является источником акустической эмиссии?

3. В чем преимущества метода акустической эмиссии?

7. АКУСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ

Методы неразрушающего контроля, основанные на измерении частоты собственных колебаний (ЧСК), хотя и не нашли до настоящего времени такого широкого распространения, как ультразвуковая дефектоскопия, но области их применения в последние годы существенно расширились. В соответствии с общепринятой классификацией акустических методов контроля они разделяются на методы свободных колебаний и методы вынужденных колебаний, которые, в свою очередь, подразделяются на локальные и интегральные методы контроля.

Метод свободных колебаний является одним из самых древних методов неразрушающего контроля, когда способом простукивания по дребезжащему звуку, издаваемому керамическим изделием после нанесения по нему удара, удавалось обнаруживать гончарные изделия с трещинами и другими видами дефектов. Этот метод дожил до наших дней, и им широко пользуются продавцы посуды во всем мире. С развитием техники области применения этого метода расширялись, и наиболее широко он распространен на железнодорожном транспорте. Практически на любой железнодорожной станции, где поезд стоит дольше 10 минут, выглянув в окно вагона, мы можем увидеть специалиста в области контроля с молотком, который субъективно, по только ему понятным признакам пытается обнаружить дефекты, которые могут привести к аварийной ситуации на транспорте. Методы, основанные на измерении ЧСК, нашли также достаточно широкое распространение для определения физико-механических свойств различного рода материалов и изделий. Еще 200 лет тому назад известный ученый в области теории колебаний Юнг использовал метод вынужденных колебаний для определения динамического модуля нормальной упругости (модуля Юнга) – одной из основных характеристик, определяющих упругие свойства материала.

До последнего времени достаточно серьезным препятствием на пути практического применения метода и снижения субъективного фактора при контроле являлась сильная зависимость ЧСК от формы и размеров контролируемого изделия, однако успехи, достигнутые в области анализа спектров ЧСК изделий различных форм и размеров, а также широкое применение компьютерной техники позволяют в настоящее время существенно упростить процесс контроля, что в свою очередь приводит к расширению областей применения этого метода.

В основу акустического метода неразрушающего контроля, основанного на измерении ЧСК, положено наличие корреляционных зависимостей между упругими константами материала, из которого изготовлено изделие, и такими физико-механическими свойствами, как твердость, пористость, плотность, прочность и т. п., а также эксплуатационными характеристиками изделий и параметрами их изготовления.

В процессе контроля измеряют частоту собственных колебаний изделия, соответствующую определенному виду колебаний, рассчитывают приведенную скорость распространения акустических волн (стержневую скорость звука) C и по ранее найденным корреляционным зависимостям определяют необходимые физико-механические свойства. Параметр скорости C является весьма информативным и в ряде случаев достаточно полно характеризует физико-механические свойства изделий, определяющие их поведение при эксплуатации

Для реализации метода наиболее широкое распространение в промышленности нашли специальные измерители частот собственных колебаний типа «Звук» двух модификаций: приборы, основанные на методе свободных колебаний, – «Звук-203» (рис. 7.1) и приборы, основанные на резонансном методе измерений, – «Звук-107» (рис. 7.2).



Рис. 7.1. Прибор «Звук-203»



Рис. 7.2. Прибор «Звук-107»

Приборы имеют полное метрологическое обеспечение, они прошли госиспытания и были включены в госреестр под № 6542-78. Из известных зарубежных аналогов наиболее широкое применение в мировой практике нашли приборы типа «Grindo Sonic», выпускаемые бельгийской фирмой «J.W.Lemmens N.V.», действие которых, аналогично прибору «Звук-203», основано на использовании метода свободных колебаний, но с применением несколько отличающейся методики измерения и расшифровки спектра ЧСК. При этом приборы «Grindo Sonic», так же как и приборы «Звук-203», не могут быть использованы для контроля малогабаритных изделий.

Единственным методом контроля подобных изделий (малогабаритные абразивные круги, бруски и головки, режущие пластинки из керамики и твердого сплава и т.п.) является метод вынужденных колебаний с применением оригинальной методики расшифровки спектра ЧСК, реализованный в приборах «Звук-107», аналоги которых до сих пор широкого распространения не нашли.

В настоящее время закончена разработка приборов «Звук» нового поколения, работающих в комплекте с современными компьютерными средствами.

Прибор «Звук-110М» состоит из измерительной стойки и электронной платы, устанавливаемой в компьютер IBM PC/AT. Измерение производится автоматически сразу после закрепления контролируемого изделия в измерительной стойке и запуска специальной программы, по которой осуществляются анализ спектра ЧСК и необходимые расчеты. При этом результаты измерений и их обработки выводятся на экран монитора, хранятся на диске и могут быть распечатаны в удобном для пользования виде.

Прибор «Звук-203М» – это портативный прибор, который оператор при работе легко удерживает в руке (рис. 7.3). Прибор снабжен встроенным электретным микрофоном для приема акустических колебаний, жидкокристаллическим дисплеем для индикации результатов измерения и пленочной клавиатурой для управления работой прибора. Практически мгновенно после нанесения удара по контролируемому изделию на дисплее высвечивается результат в одной из заданных оператором форм: ЧСК в герцах, приведенная скорость распространения акустических волн в метрах в секунду, звуковой индекс – градация этой скорости по определенной шкале или степень твердости абразивных изделий в буквенном виде (в том числе по международной шкале Нортон).



Рис. 7.3. Прибор «Звук-203М»

Возможна индикация и других физико-механических свойств изделий, например, модуля Юнга, прочности, плотности, пористости и др. при введении в прибор соответствующих корреляционных или аналитических зависимостей. Питание прибора осуществляется от аккумуляторных батарей или от сети с одновременной подзарядкой батарей. В приборе предусмотрена возможность передачи данных на внешнее устройство по интерфейсу RS-232.

Метод контроля, основанный на измерении ЧСК, и приборы типа «Звук» уже в настоящее время нашли достаточно широкое применение для контроля изделий из различных материалов.

7.1. Ультразвуковой метод

Ультразвук – это механические упругие колебания среды с частотами свыше 20000 колебаний в секунду, не воспринимаемые человеческим ухом. Ультразвуковые колебания отличаются большой проникающей способностью в твердых телах, особенно в металлах, а также способностью отражаться от границы раздела двух веществ (рис. 7.4).

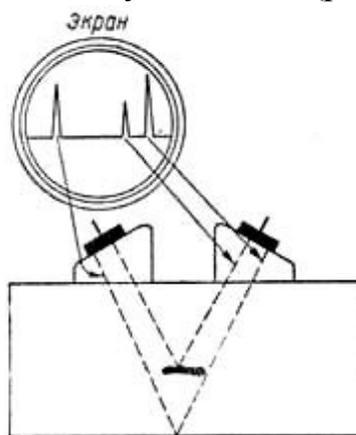


Рис. 7.4. Схема ультразвукового метода контроля

Эти две особенности ультразвука используются для обнаружения дефектов в сварных швах. С этой целью к поверхности детали прикладывается источник ультразвуковых колебаний (кварцевая пластинка), от которой короткими порциями (импульсами) излучаются упругие ультразвуковые колебания. Если в металле шва имеются неметаллические включения, поры, трещины, непровары, то ультразвуковые колебания отражаются и улавливаются искателем (пьезоприемником).

Отраженные колебания преобразуются в электрические импульсы, которые видны на экране электронно-лучевой трубки дефектоскопа.

Самым быстрым и простейшим методом определения остаточной толщины объектов, подверженных коррозии, является использование ультразвукового толщиномера. Цифровые толщиномеры серии T-GAGE IV дают хорошие результаты, однако в ряде случаев стабильные показания прибора возможны, только если отражающая поверхность объекта контроля достаточно гладкая. Если же поверхность грубая, то при контроле оператор медленно перемещает преобразователь, пытаясь зафиксировать хоть какой-нибудь результат. Фактически результатом является не толщина объекта с коррозионным поражением, а толщина объекта в том месте, где удалось провести измерение.

Решением проблемы может быть использование толщиномеров с представлением A-развертки на дисплее (Alphagage) или дефектоскопов. При контроле труб, подверженных эрозии, именно этот метод является наиболее предпочтительным. Однако в случае наличия дефектов, вызванных химической реакцией, зачастую не удается выявить коррозию, так как дефекты представляют собой изолированные области, иногда имеющие конические границы. Дефектоскопист вынужден осуществлять сплошное сканирование области контроля, следя за перемещением преобразователя и одновременно фиксируя результаты (возможно, постоянно меняющиеся) измерения толщины на дисплее. Работа усложняется, а повторяемость результатов работы оставляет желать лучшего (как правило, «проблемные» зоны контролируются недостаточно тщательно). В этом случае особую ценность приобретает использование C-Scan изображения области контроля. Для получения C-Scan изображения требуется производить запись результатов измерения толщины одновременно с X-Y координатами точек, в которых был получен данный результат. Совокупность таких точек представляет из себя сетку или карту контроля.

Такое оборудование как MultiScan и ThetaScan позволяет получать C-Scan изображение автоматически. В установку MultiScan входит дистанционно управляемый сканер, оснащенный магнитными колесами, позволяющими ему перемещаться в любом положении, в том числе вертикальном или перевернутом, по объектам контроля (емкостям, трубам). К сканеру присоединен горизонтальный манипулятор длиной 340 мм с закрепленным ультразвуковым преобразователем. В сканер встроен декодер для задания перемещения преобразователя.

Ультразвуковая часть установки управляется посредством стандартного ультразвукового дефектоскопа Sitiescan 140 (или более мощного), так как все дефектоскопы производства Sonatest оснащены необходимыми

пропорциональными выходами. На выходы подается напряжение, пропорциональное значению расстояния на дисплее дефектоскопа. Таким образом, принцип работы установки MultiScan заключается в калиброванном горизонтальном перемещении преобразователя по поверхности объекта контроля с шагом 1 мм, при этом значения измерений, полученные дефектоскопом, последовательно передаются на компьютер. При достижении конца линии карты контроля сканер перемещается вперед на расстояние, задаваемое оператором, и начинается следующий цикл горизонтального перемещения преобразователя вдоль манипулятора. Таким образом, сканируется вся площадь. Преимуществом установки MultiScan является то, что оператор может видеть в реальном времени и А-развертку, и С-развертку на дисплее компьютера. Установка ThetaScan обрабатывает карту контроля тем же способом, только вместо сканера для перемещения преобразователя используется R-ThetaScan манипулятор. Полученные данные впоследствии могут быть обработаны с целью получения достоверной информации об inspected объекте.

7.2. Оценка целостности границ с помощью анализа отраженной звуковой волны

Ультразвук используется для определения наличия или отсутствия целостности границ между внешним слоем из материала с высоким акустическим импедансом (произведение плотности и скорости звука в материале, например, металл или керамика) и внутренним слоем из материала с низким импедансом – пластика, композитов или резины. Этот метод также применим при исследовании клеевых соединений двух металлов.

При соединении двух материалов со схожим акустическим импедансом (произведение плотности на скорость звука в материале) – сварка и спайка металлов или сплавление пластика в пластик – наличие или отсутствие целостности определяется по амплитуде первого отраженного от границы материалов сигнала. Различное состояние стыка приводит к возникновению существенной разницы в отраженных сигналах.

Тем не менее, при соединении двух материалов с различным акустическим сопротивлением, как в случае металла и полимера, из-за несовпадения импеданса отраженный сигнал большой амплитуды возникает и при хорошем их соединении. Разница амплитуд сигналов, отраженных от границ различного состояния, может быть незначительна или трудно опреде-

лима, особенно при различных условиях передачи звуковой волны в тестовый образец.

Подобные затруднения возникают при соединении двух металлов посредством эпоксидной смолы или других связующих материалов с низким акустическим сопротивлением. Даже очень тонкий слой клея создает границу с низким акустическим сопротивлением и значительным отражением звуковой волны и при хорошем сцеплении материалов.

При использовании материала с низким акустическим сопротивлением в качестве внешнего слоя или в случае, если геометрия детали позволяет установить датчик на стороне с низким сопротивлением, рекомендуется использовать процедуру определения фазового сдвига. Эта методика описана в разделе «Применение» сайта фирмы Panametrics-NDT: Оценка целостности границ с помощью определения фазового сдвига.

В случае проведения исследований со стороны материала с высоким акустическим импедансом оптимальной является описанная в данном разделе методика анализа отраженной звуковой волны. Этот способ заключается в наблюдении серии отраженных от границы сигналов и определении разницы в степени изменения амплитуд последовательных сигналов в случае целостности границы или при возникновении дефекта. Отражение волны происходит в металлах или других материалах с высоким импедансом, и изменение амплитуды усиливается при каждом шаге. Например, трудно-различимая разница амплитуд при разных состояниях стыка материалов для первого эхосигнала составляет 5 %, тогда как на пятом сигнале это значение достигает 25 %, а на десятом – уже 50 %. Разница амплитуд первичных эхосигналов может быть очень мала, но тенденция изменения серии сигналов позволяет быстро провести сравнительный анализ. В обычных условиях разные состояния границы стыка приводят к формированию различных траекторий отраженных звуковых волн.

Оборудование

Подобные исследования могут осуществляться с помощью стандартных ультразвуковых дефектоскопов, например, Epoch. Также возможно использование ультразвукового генератора/приемника. Для обычных измерений подходят обычные датчики с линией задержки в диапазоне частот между 2,25 и 20 МГц – V207-RB, V206-RB, V202-RM или V208-RM. Специальные датчики подбираются исходя из толщины, геометрии и акустических свойств материала.

Процедура

Как и в других методах дефектоскопии, для настройки прибора требуются калибровочные образцы с соответствующим материалом и геометрией детали, содержащие известные участки с нарушением целостности.

Датчик с линией задержки (или иммерсионный) обычно используется при проведении подобных тестов, так как он генерирует большее количество множественных эхосигналов от материала с высоким акустическим импедансом, чем в случае с контактными датчиками, чья поверхность лучше прилегает к образцу. Выберите датчик с линией задержки, генерирующий пять и более эхосигналов от границы двух материалов. Настройте время работы на диапазон, достаточный для отображения серии как минимум пяти последовательных эхосигналов. Приложите датчик к калибровочному образцу, представляющему случай нарушения связанности границы, и настройте параметры затухания, фильтрации и в случае необходимости – получения более четко выраженных пиков, ректификации.

Нужно настраивать коэффициент усиления так, чтобы первый отраженный эхосигнал отображался на всю высоту экрана. Первый пик, отображенный на дисплее формы волны, является интерфейсным эхом линии задержки, а последующие эхосигналы – множественные эхосигналы от стального образца при отсутствии границы с другим материалом. Так как в этом случае металл граничит с воздухом, спад амплитуды происходит относительно медленно (рис. 7.5).

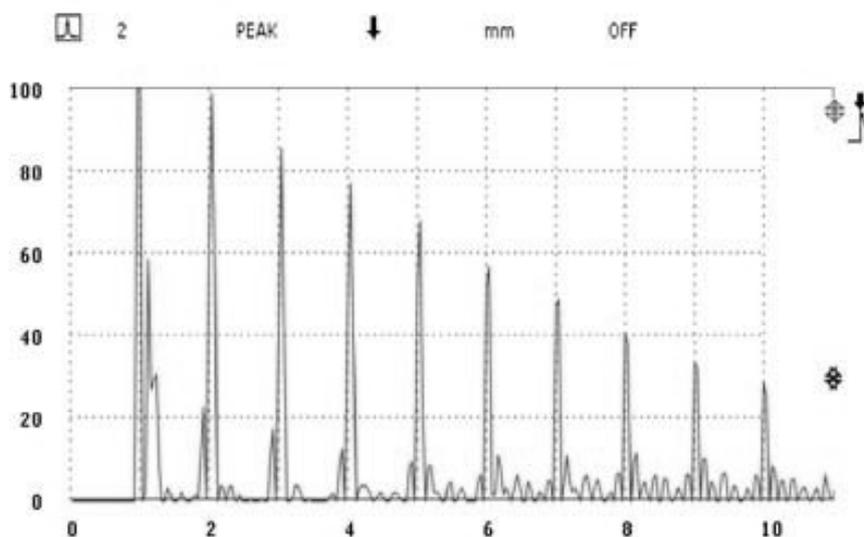


Рис. 7.5. Спад амплитуд при соприкосновении металла с воздухом

Затем присоедините датчик к калибровочному образцу, содержащему качественный стык материалов, и отследите степень изменения амплитуды. Ниже на дисплее формы волны представлен калибровочный блок из стали, граничащей с полимером. Степень спада амплитуды на каждом пике значительно превышает данный показатель предыдущего примера (рис. 7.6).

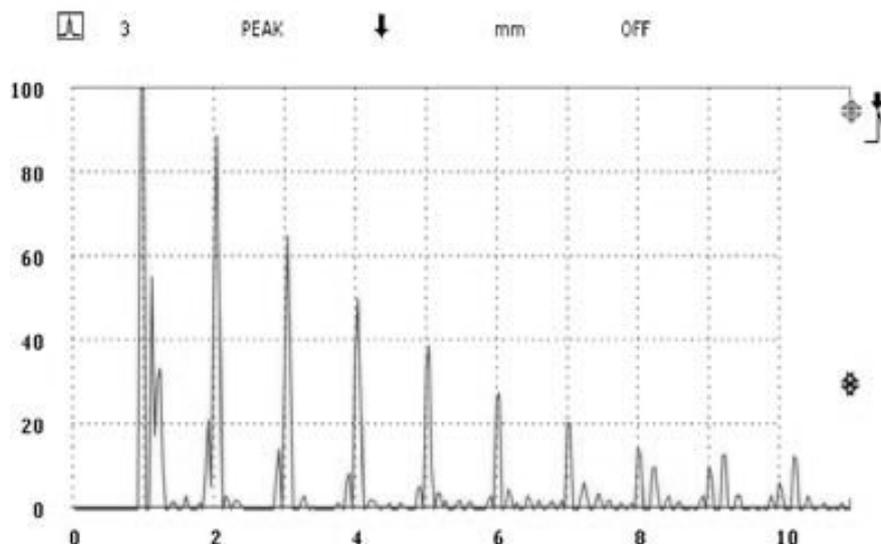


Рис. 7.6. Спад амплитуд сигналов, отражаемых от границы материалов

Следует обратить внимание на то, что уменьшение амплитуды множественных эхосигналов осуществляется быстрее по направлению к правой части дисплея. Полимер, граничащий со сталью с обратной стороны, образует механизм затухания и вызывает более быстрое сокращение амплитуды. Точное значение дисперсии траекторий эхосигналов, отраженных от материалов с разным состоянием сцепления, определяется относительным акустическим импедансом и факторами затухания, но по сути этот вид тестирования подходит для определения целостности границ любых материалов, первый из которых обладает высоким, а второй низким акустическим импедансом. Определение наличия или отсутствия целостности границы двух материалов производится путем сопоставления формы волны от эталона и тестового образца.

Если прибор оснащен функцией «Корректировка Расстояния от Амплитуды» (КРА), то с помощью этой функции на дисплей можно вывести кривую уровня амплитуды эхосигналов от хорошо соединенных материалов. После этого кривая может быть использована для быстрого определения отсутствия сцепления между материалами, что будет выглядеть как серия пиков, возвышающихся над ранее созданной кривой. Более того, для дальнейшего определения состояния границы материалов может быть использована функция сигнализации.

Кривая КРА (рис. 7.7), представляющая контур пиков эхосигналов при хорошем сцеплении материалов, отображается на дисплее амплитуд эхосигналов, возникающих при отсутствии сцепления.

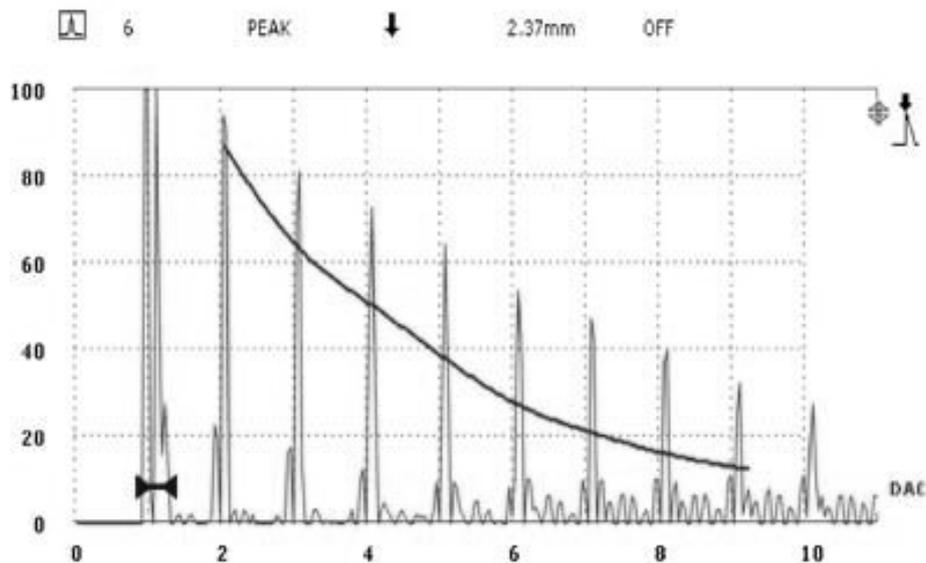


Рис. 7.7. Кривая КРА

Необходимо помнить, что данный вид тестирования применяется только для определения наличия или отсутствия целостности границ, а для оценки ее прочности материалы должны соединяться клеем или схожим связующим материалом. Прессовка не обеспечивает создания акустической границы.

Контрольные вопросы:

1. Перечислите примеры акустических методов контроля.
2. В чем сущность ультразвукового метода контроля?
3. Какие приборы используются для акустических методов контроля?
4. Как производится оценка целостности границ с помощью анализа отраженной звуковой волны?

8. ВИХРЕТОКОВЫЕ МЕТОДЫ

Вихретоковый метод контроля основан на анализе взаимодействия внешнего электромагнитного поля с электромагнитным полем вихревых токов, наводимых возбуждающей катушкой в электропроводящем объекте контроля (ОК) этим полем. В качестве источника электромагнитного поля чаще всего используется индуктивная катушка (одна или несколько), называемая вихретоковым преобразователем (ВТП).

Синусоидальный (или импульсный) ток, действующий в катушках ВТП, создает электромагнитное поле, которое возбуждает вихревые токи в электромагнитном объекте. Электромагнитное поле вихревых токов воздействует на катушки преобразователя, наводя в них ЭДС или изменяя их полное электрическое сопротивление. Регистрируя напряжение на катушках или их сопротивление, получают информацию о свойствах объекта и о положении преобразователя относительно его. Особенность вихретокового контроля состоит в том, что его можно проводить без контакта преобразователя и объекта. Их взаимодействие происходит на расстояниях, достаточных для свободного движения преобразователя относительно объекта (от долей миллиметров до нескольких миллиметров). Поэтому такими методами можно получать хорошие результаты контроля даже при высоких скоростях движения объектов.

Вихретоковый метод применяется в основном для контроля качества электропроводящих объектов: металлов, сплавов, графита, полупроводников и т. д. Приборы и установки, реализующие вихретоковый метод, широко используются для обнаружения несплошностей материалов (дефектоскопия и дефектометрия), контроля размеров ОК и параметров вибраций (толщинометрия и виброметрия), определения физико-механических параметров и структурного состояния (структуроскопия), обнаружения электропроводящих объектов (металлоискатели) и для других целей. Объектами вихретокового контроля могут быть электропроводящие прутки, проволока, трубы, листы, пластины, покрытия, в том числе многослойные, железнодорожные рельсы, корпуса атомных реакторов, шарики и ролики подшипников, крепежные детали и многие другие промышленные изделия.

Дефектоскопы, реализующие вихретоковый метод, предназначены для обнаружения различных трещин, расслоений, закатов, раковин, неметаллических включений и т. д. В частности, разработан дефектоскоп ВД-701 (рис. 8.1) с проходным ВТП, позволяющий контролировать протяженные объекты (трубы, прутки, проволоку с поперечными размерами от 5 до 121 мм).

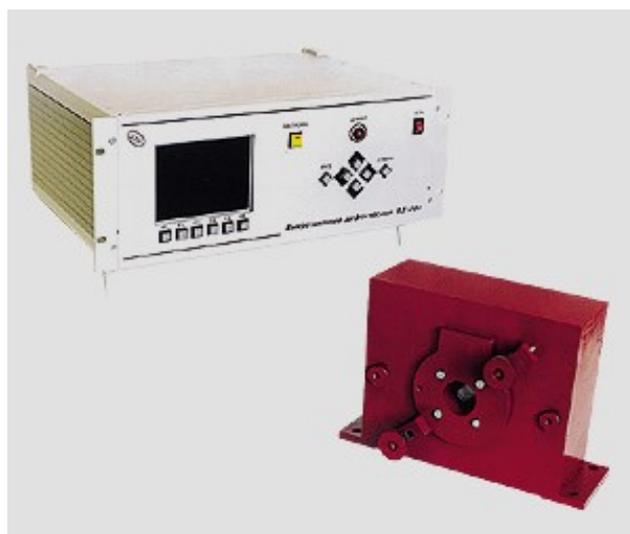


Рис. 8.1. Вихретоковый дефектоскоп ВД-701

Вихретоковый дефектоскоп ВД-701 применяется для контроля труб, прутков, проволоки как в потоке их производства, так и для входного контроля. Дефектоскоп позволяет контролировать изделия из ферромагнитных и немагнитных сталей и цветных металлов. Выявляемые дефекты: нарушение сплошности, непровары, ужимы, трещины, волосовины, закаты, рванины, неметаллические включения и т. д.

Толщиномеры, основанные на вихретоковом методе, применяются для контроля толщины электропроводящих листов, пленок, пластин, покрытий на них, стенок труб, цилиндрических и сферических баллонов и т.д. В частности, толщиномер ВТ-201 (рис. 8.2), имеющий накладной ВТП, предназначен для измерения толщины неметаллических покрытий (краска, эмаль, пластик) на металлическом основании (алюминий, медь, титан).



Рис. 8.2. Толщиномер ВТ-201

8.1. Классификация и применение вихретоковых преобразователей

В настоящее время разработано большое количество типов и разновидностей вихретоковых преобразователей (ВТП). Для более правильного использования целесообразно знать их классификацию. Можно предложить несколько различных классификационных признаков.

По рабочему положению относительно объекта контроля преобразователи делят на *проходные*, *накладные* и *комбинированные*.

Проходные ВТП делятся на наружные, внутренние, погружные. Особенность проходных ВТП заключается в том, что они в процессе контроля проходят либо снаружи объекта, охватывая его (наружные), либо внутри объекта (внутренние), либо погружаются в жидкий объект (погружные). Они имеют однородное поле в зоне контроля, в результате чего радиальные смещения однородного объекта контроля не влияют на выходной сигнал преобразователя.

С помощью наружных проходных ВТП контролируют линейно протяженные объекты (проволоку, прутки, трубы и т. д.), осуществляют массовый контроль мелких изделий. Посредством внутренних проходных ВТП контролируют внутренние поверхности труб, баллонов, а также отверстий в различных деталях. Погружные ВТП применяют для контроля жидких сред, экранные проходные – для контроля труб, щелевые – для контроля проволоки.

Накладные ВТП обычно представляют собой одну или несколько катушек, к торцам которых подводится поверхность объекта. Накладные преобразователи могут иметь катушки круглые коаксиальные, прямоугольные, прямоугольные крестообразные, катушки со взаимно перпендикулярными осями.

Накладные ВТП обладают значительно большими возможностями для контроля, чем проходные. Они позволяют контролировать геометрические и электромагнитные параметры ОК сложной формы. Они применяются также, когда надо обеспечить локальность и высокую чувствительность контроля.

Комбинированные ВТП представляют собой комбинацию проходных возбуждающих катушек и накладных измерительных катушек.

По типу преобразования параметров ОК в выходной сигнал ВТП подразделяются на *параметрические* и *трансформаторные*. Преимущество параметрических ВТП заключается в их простоте, а недостаток, кото-

рый значительно слабее выражен в трансформаторных ВТП, – в зависимости выходного сигнала от температуры преобразователя.

По способу соединения катушек (обмоток) ВТП подразделяются на *абсолютные* и *дифференциальные*. Абсолютным называют ВТП, выходной сигнал которого определяется абсолютными значениями параметров ОК в зоне контроля. Дифференциальным ВТП принято называть совокупность двух ВТП, обмотки которых соединены таким образом, что выходной сигнал определяется разностью параметров ОК соответствующих зон контроля.

Ниже показаны основные элементы ВТП-толщиномера диэлектрических покрытий ВТ-201 (рис. 8.3, *а*) и приведена электрическая схема соединения обмоток ВТП (рис. 8.3 *б*). Обмотки включены по дифференциальной схеме для компенсации начального напряжения U_0 .

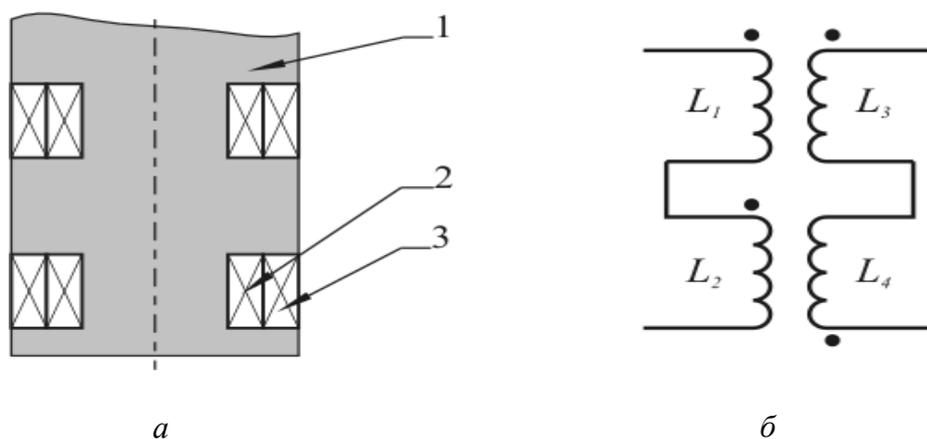


Рис. 8.3. Основные элементы ВТ-201:

а: 1 – каркас; 2 – возбуждающая катушка; 3 – измерительная катушка;
б: L_1 (L_2) – возбуждающие обмотки; L_3 (L_4) – измерительные обмотки

Контрольные вопросы:

1. В чем сущность вихретокового метода контроля?
2. Какие приборы используются для вихретокового метода контроля?
3. Перечислите виды вихретоковых преобразователей?

9. КАПИЛЛЯРНЫЕ МЕТОДЫ

Процесс **капиллярного контроля** может быть разделен на три основные стадии: нанесение на контролируемую поверхность проникающей индикаторной жидкости (пенетранта), удаление излишков пенетранта с поверхности и проявление индикаций. При проведении капиллярного контроля используют комплект дефектоскопических материалов, включающий пенетрант, очиститель, проявитель, причем эти материалы взаимосвязаны.

Индикаторный пенетрант проникает в открытые с поверхности пустоты и остается там, в то время как излишек пенетранта удаляется с поверхности объекта контроля с помощью различных очистителей. После этого индикаторный пенетрант, оставшийся в несплошности, извлекается оттуда наносимым на поверхность проявителем с образованием индикаторного рисунка, который заметен гораздо лучше, чем сама несплошность.

В качестве проникающих веществ используют керосин, цветные и люминесцентные жидкости, а также применяют метод избирательно фильтрующихся частиц для выборочного контроля. Процессу контроля должна предшествовать стадия подготовки поверхности с использованием процедур очистки. Проявившиеся индикации должны быть верно оценены, а контролируемые детали после завершения контроля полностью очищены от остатков дефектоскопических материалов.

Преимущества капиллярного контроля:

- высокая чувствительность обнаружения;
- широкий спектр контролируемых материалов;
- проверка деталей сложной геометрической формы;
- возможность применения разных методик с различной чувствительностью;
- высокая достоверность и воспроизводимость результатов;
- простота выполнения при выборочном контроле и, следовательно, дешевизна;
- высокая производительность при поточном контроле.

Недостатки капиллярного контроля:

- выявляет только поверхностные дефекты;
- неприменим к пористым материалам;
- контролируемая поверхность требует предварительной очистки от загрязнений, снижающих эффективность контроля;

- нельзя использовать после операций обработки, снимающих поверхностный слой металла, загрязняющих поверхность и создающих защитное покрытие;
- отрицательная температура снижает чувствительность метода, контроль высокотемпературных поверхностей (выше 90 °С) требует применения специальных составов;
- дефекты с большой шириной раскрытия капиллярными методами могут не выявиться;
- уменьшение времени контакта с пенетрантами снижает выявляемость дефектов;
- некоторые материалы (резина и пластмассы) химически не стойки к пенетранту;
- качество проведения контроля зависит от квалификации исполнителя;
- требует индивидуальных средств защиты.

Области применения капиллярного контроля

Капиллярный контроль – один из наиболее широко используемых в промышленности методов неразрушающего контроля. Его применяют для обнаружения невидимых или слабо видимых невооруженным глазом поверхностных дефектов в объектах любых размеров и форм, изготовленных из металлических или любых других твердых непористых материалов. Этот метод позволяет выявлять дефекты производственно-технологического и эксплуатационного происхождения, любой геометрии размером около 1 мкм и более.

Капиллярный метод неразрушающего контроля (ГОСТ 18442-80) основан на капиллярном проникновении внутрь дефекта индикаторной жидкости, хорошо смачивающей материал объекта контроля (ОК) с последующей регистрацией индикаторных следов.

Данный метод пригоден для выявления несплошностей с поперечными размерами 0,1 – 500 мкм, в том числе сквозных, на поверхности черных и цветных металлов, сплавов, керамики, стекла и т. п. Широко применяется для контроля целостности сварного шва.

Красящий пенетрант наносится на поверхность ОК. Благодаря особым качествам, которые обеспечиваются подбором определенных физических свойств пенетранта: поверхностного натяжения, вязкости, плотности, – он под действием капиллярных сил проникает в мельчайшие дефекты, имеющие выход на поверхность объекта контроля. Проявитель, наносимый на поверхность объекта контроля через некоторое время после осторожного удаления с поверхности пенетранта, растворяет находящийся внутри де-

фекта краситель и за счет диффузии «вытягивает» оставшийся в дефекте пенетрант на поверхность объекта контроля. Имеющиеся дефекты видны достаточно контрастно. Индикаторные следы в виде линий указывают на трещины или царапины, отдельные точки – на поры.

Процесс обнаружения дефектов капиллярным методом разделяется на 5 стадий:

1 стадия – предварительная очистка поверхности (рис. 9.1). Чтобы краситель мог проникнуть в дефекты на поверхности, ее предварительно следует очистить водой или органическим очистителем. Все загрязняющие вещества (масла, ржавчина и т.п.), любые покрытия (ЛКП, металлизация) должны быть удалены с контролируемого участка. После этого поверхность высушивается, чтобы внутри дефекта не оставалось воды или очистителя.



Рис. 9.1. Предварительная очистка поверхности дефекта

2 стадия – нанесение пенетранта, обычно красного цвета (рис. 9.2). Он наносится на поверхность путем распыления, кистью или погружением ОК в ванну, для хорошей пропитки и полного покрытия, как правило, при температуре 5 – 50 °С на время 5 – 30 мин.



Рис. 9.2. Нанесение пенетранта на поверхность дефекта

3 стадия – удаление излишков пенетранта (рис. 9.3). Избыток пенетранта удаляется протиркой салфеткой, промыванием водой или тем же очистителем, что и на стадии предварительной очистки. При этом пенетрант должен быть удален с поверхности, но никак не из полости дефекта. Поверхность далее высушивается салфеткой без ворса или струей воздуха. При использовании очистителя есть риск вымывания пенетранта и неправильной его индикации.



Рис. 9.3. Удаление излишков пенетранта с поверхности дефекта

4 стадия – нанесение проявителя (рис. 9.4). После просушки сразу же на ОК наносится тонким ровным слоем проявитель, обычно белого цвета.



Рис. 9.4. Нанесение проявителя

5 стадия – контроль. Инспектирование ОК начинается непосредственно после окончания процесса проявки и заканчивается согласно разным стандартам не более чем через 30 мин. Интенсивность окраски говорит о глубине дефекта, чем бледнее окраска, тем дефект мельче. Интенсивную окраску имеют глубокие трещины. После проведения контроля проявитель удаляется водой или очистителем.

Наиболее удобны распылители, например, аэрозольные баллоны. Можно наносить проявитель и окунанием. Сухие проявители наносятся в вихревой камере либо электростатически. После нанесения проявителя следует выждать время от 5 мин для крупных дефектов до 1 часа для мелких дефектов. Дефекты будут проявляться, как красные следы на белом фоне.

Сквозные трещины на тонкостенных изделиях можно обнаруживать, нанося проявитель и пенетрант с разных сторон изделия. Прошедший насквозь краситель будет хорошо виден в слое проявителя.

Согласно ГОСТ 18442-80 класс чувствительности контроля определяется в зависимости от размера выявляемых дефектов. В качестве параметра размера дефекта принимается поперечный размер дефекта на поверхности объекта контроля – так называемая ширина раскрытия дефекта. Нижний порог чувствительности, т.е. минимальная величина раскрытия выявленных дефектов ограничивается тем, что весьма малое количество пенетранта, задержавшееся в полости небольшого дефекта,

оказывается недостаточным, чтобы получить контрастную индикацию при данной толщине слоя проявляющего вещества. Существует также верхний порог чувствительности, который определяется тем, что из широких, но неглубоких дефектов пенетрант вымывается при устранении его излишков на поверхности.

Установлено пять классов чувствительности (по нижнему порогу) в зависимости от размеров дефектов (табл. 9.1).

Таблица 9.1

Классы чувствительности (по нижнему порогу) в зависимости от ширины раскрытия дефекта

Класс чувствительности	Ширина раскрытия дефекта, мкм
I	менее 1
II	от 1 до 10
III	от 10 до 100
IV	от 100 до 500
технологический	не нормируется

За рубежом установлены другие шкалы чувствительности пенетрантов. Например, в немецком промышленном стандарте DIN 54 152 чувствительность пенетрантов разделяется на четыре класса, но шкала чувствительности обратная (табл. 9.2)

Таблица 9.2

Классы чувствительности согласно немецкому промышленному стандарту DIN 54 152

Класс чувствительности	Ширина раскрытия дефекта, мкм ($\pm 20\%$)	Толщина никелевого покрытия, мкм ($\pm 10\%$)
I – низкий	4	100
II – средний	2	60
III – высокий	1	60
IV – очень высокий	0,6	50

Чувствительность дефектоскопических материалов определяется на контрольных образцах, т.е. на пластинах определенной шероховатости с заранее нанесенными на них нормированными трещинами. Это, как правило, стальные, алюминиевые или титановые пластины. С помощью контрольных образцов можно судить о возможностях того или иного набора; степени ухудшения свойств с течением времени; правильности применяемых методик.

Регламентирующие документы для капиллярного метода

Российские стандарты:

ГОСТ 18442-80. Контроль неразрушающий. Капиллярные методы. Общие требования;

ГОСТ 24522-80. Контроль неразрушающий капиллярный. Термины и определения;

ГОСТ 23349-78. Дефектоскопы капиллярные. Общие технические требования и методы испытаний;

ГОСТ 26182-84. Контроль неразрушающий. Люминесцентный метод течеискания.

Зарубежные стандарты:

MIL-I-25135E. Дефектоскопические материалы, капиллярные. Военные технические условия;

QPL-AMS-2644. Перечень сертифицированной продукции;

ASTM E 165. Стандартная методика контроля материалов капиллярным методом;

ASTM E 1417. Типовые процедуры капиллярного контроля;

EN ISO 3452-2. Неразрушающий контроль. Капиллярный контроль. Часть 2: Испытание проникающих жидкостей;

EN ISO 3452-3. Неразрушающий контроль. Капиллярный контроль.

Часть 3: Эталонные испытательные образцы;

EN ISO 3452-4. Неразрушающий контроль. Капиллярный контроль.

Часть 4: Оборудование;

EN 571-1 Капиллярный контроль. Общие принципы.

Классификация капиллярных методов и пенетрантов

По ГОСТ 18442-80 основные капиллярные методы и пенетранты классифицируются следующим образом:

- люминесцентный;
- цветной;
- люминесцентно-цветной;
- яркостный (ахроматический);

В зависимости от технологических признаков пенетранты бывают:

- удаляемые органическими растворителями;
- водосмываемые;
- водосмываемые после воздействия очистителя или поверхностно-активных веществ;
- нейтрализуемые гашением люминесценции или цвета.

Пенетрантные системы (пенетрант – эмульгатор) по чувствительности, определяемой наименьшим размером уверенно выявляемого дефекта, можно расположить в порядке уменьшения чувствительности следующим образом:

- люминесцентный последующего эмульгирования;
- люминесцентный, удаляемый растворителем;
- люминесцентный, смываемый водой;
- цветной последующего эмульгирования;
- цветной, удаляемый растворителем;
- цветной, смываемый водой.

Стоимость материалов непосредственно связана с чувствительностью системы, и использование более высокой чувствительности, чем требуется, приводит к ненужному увеличению затрат.

Контрольные вопросы:

1. В чем сущность капиллярных методов контроля?
2. Какие приборы используются для капиллярных методов контроля?
3. Перечислите стадии процесса капиллярных методов контроля ?
4. Какие нормативные документы регламентируют капиллярные методы контроля?

10. МАГНИТНЫЕ МЕТОДЫ

Магнитный метод контроля применяют в основном для контроля изделий из ферромагнитных материалов, т. е. из материалов, которые способны существенно изменять свои магнитные характеристики под воздействием внешнего (намагничивающего) магнитного поля. **Магнитный неразрушающий контроль** – метод неразрушающего контроля, основанный на регистрации магнитных полей рассеяния, возникающих над дефектами, или на определении магнитных свойств объекта контроля.

Магнитная дефектоскопия – выявление дефектов методами магнитного неразрушающего контроля.

По способу получения первичной информации различают следующие методы магнитного контроля: **магнитопорошковый (МП), магнитографический (МГ), феррозондовый (ФЗ), индукционный (И), эффекта Холла (ЭХ), пондеромоторный (ПМ), магниторезисторный (МР).**

Из перечисленных методов только магнитопорошковый требует обязательного участия человека.

Магнитные преобразователи. В подавляющем большинстве случаев при магнитном контроле приходится иметь дело с измерением или индикацией магнитных полей вблизи поверхности изделий. Для этого применяют различные магнитные преобразователи, из которых наиболее широкое распространение получили **индукционные, феррозондовые, датчик Холла и магниторезистивные.** В магнитопорошковых и магнитографических установках применяют различные порошки и ленты.

10.1. Магнитопорошковый метод

Магнитопорошковый метод – один из четырех классических методов неразрушающего контроля, а также один из наиболее старых методов НК, связанных с применением приборов и дефектоскопических материалов.

Первые опыты описали феномен полей магнитного рассеяния и объяснили их значение. Впоследствии были предприняты попытки найти применение этому явлению и ввести его в техническую практику. В 1868 г. англичанин Саксби применил компас для определения дефектов в пушечных стволах. В 1917 г. американец Хок применил железные опилки для обнаружения трещин в стальных деталях.

Суть метода такова: магнитный поток в бездефектной части изделия не меняет своего направления; если же на пути его встречаются участки

с пониженной магнитной проницаемостью, например, дефекты в виде разрыва сплошности металла (трещины, неметаллические включения и т.д.), то часть силовых линий магнитного поля выходит из детали наружу и входит в нее обратно, при этом возникают местные магнитные полюсы (N и S) и, как следствие, магнитное поле над дефектом. Так как магнитное поле над дефектом неоднородно, то на магнитные частицы, попавшие в это поле, действует сила, стремящаяся затянуть частицы в место наибольшей концентрации магнитных силовых линий, то есть к дефекту. Частицы в области поля дефекта намагничиваются и притягиваются друг к другу как магнитные диполи под действием силы так, что образуют цепочные структуры, ориентированные по магнитным силовым линиям поля.

Магнитопорошковый метод предназначен для выявления тонких поверхностных и подповерхностных нарушений сплошности металла – дефектов, распространяющихся в глубь изделий. Такими дефектами могут быть трещины, волосовины, надрывы, флокены, непровары, поры.

Наибольшая вероятность выявления дефектов достигается в случае, когда плоскость дефекта составляет угол 90° с направлением намагничивающего поля (магнитного потока). С уменьшением этого угла чувствительность снижается и при углах, существенно меньших 90° , дефекты могут быть не обнаружены.

Обобщенно: Магнитопорошковый метод состоит в том, что металл намагничивается с помощью соленоидов, электромагнитов или путем пропускания тока через исследуемую сварную деталь. Перед намагничиванием на шов наносят магнитный порошок в сухом виде или в смеси с маслом, керосином и т. п. Если в шве имеется дефект, то над ним скапливается магнитный порошок.

Этим способом определяются дефекты, залегающие на глубине до 5 мм.

Чувствительность метода определяется:

- магнитными характеристиками материала контролируемого изделия (магнитной индукцией (B));
- остаточной намагниченностью (Br);
- максимальной магнитной проницаемостью (μ_{\max});
- коэрцитивной силой (H_0);
- шероховатостью поверхности контроля;
- напряженностью намагничивающего поля, его ориентацией по отношению к плоскости дефекта;
- качеством дефектоскопических средств и освещенностью контролируемой поверхности.

Отрасли промышленности, в которых магнитопорошковый метод находит практическое применение:

- металлургия;
- машиностроение;
- авиапромышленность;
- автомобильная промышленность;
- судостроение;
- строительство (стальные конструкции, трубопроводы);
- энергетическое и химическое машиностроение;
- транспорт (трубопроводный, авиационный, железнодорожный, автомобильный).

Магнитопорошковый метод является самостоятельным технологическим процессом и включает в себя:

- подготовку поверхностей изделий к контролю;
- намагничивание деталей;
- обработку поверхности детали суспензией (порошком);
- осмотр деталей;
- размагничивание;
- контроль качества процесса;
- тренировку и сертификацию персонала.

Регламентирующие документы по магнитопорошковому методу:

Российские стандарты

ГОСТ 24450-80. Контроль неразрушающий магнитный. Термины и определения.

ГОСТ 21105-90. Контроль неразрушающий. Магнитопорошковый метод.

ГОСТ 8.283-78. Дефектоскопы электромагнитные. Методы и средства поверки.

ГОСТ 26697-85. Контроль неразрушающий. Дефектоскопы магнитные и вихретоковые. Общие технические требования.

Европейские стандарты

EN ISO 9934-1. Неразрушающий контроль. Магнитопорошковый контроль. Часть 1: Общие принципы.

EN ISO 9934-2. Неразрушающий контроль. Магнитопорошковый контроль. Часть 2: Материалы для обнаружения.

EN ISO 12707. Июнь 2000. Неразрушающий контроль. Терминология – Термины, используемые в магнитопорошковом контроле.

EN ISO 3059. Неразрушающий контроль – Капиллярный и магнитопорошковый контроль. Условия осмотра.

Рекомендуемая литература по магнитопорошковому методу

Неразрушающий контроль. Россия. 1900 – 2000гг. Справочник. Под ред. В.В. Клюева. М.: Машиностроение, 2001.

Шелихов Г.С. Магнитопорошковая дефектоскопия деталей и узлов. – М.: Научно-технический центр «Эксперт», 1995.

Магнитопорошковый метод. Курс обучения специалистов III уровня. Американское общество НК (АНТ). Перевод с англ.: Международный учебно-научный центр МНПО «Спектр», М. 1994.

Способы магнитопорошкового контроля

В зависимости от магнитных свойств материала, формы и размеров контролируемого объекта, наличия на нем немагнитного покрытия применяют два способа контроля:

- способ остаточной намагниченности (СОН);
- способ приложенного поля (СПП).

Выбор способа контроля осуществляют в зависимости от магнитных свойств материала объекта и требуемой чувствительности контроля.

Контроль СПП проводят в следующих случаях:

- деталь выполнена из магнитомягкого материала;
- деталь имеет сложную форму или малое удлинение (отношение длины к диаметру);
- деталь контролируют с целью обнаружения подповерхностных дефектов на глубине более 0,01 мм или дефектов, скрытых под слоем немагнитного покрытия;
- деталь имеет большой диаметр, а мощность дефектоскопа недостаточна для получения требуемой силы тока для намагничивания такой детали;
- если контролируют небольшие участки крупногабаритной детали с помощью переносных электромагнитов или с применением дефектоскопов на постоянных магнитах;
- если контролируют детали с использованием электромагнитов постоянного тока.

Контроль СОН проводят в следующих случаях:

- деталь выполнена из магнитотвердого материала;
- выявление поверхностных дефектов;
- намагничивающее устройство позволяет создать поле напряженностью, близкой к напряженности технического магнитного насыщения образца.

Контроль способом остаточной намагниченности имеет ряд существенных достоинств:

- возможность установки проверяемой детали в любое удобное положение для хорошего освещения поверхности и осмотра невооруженным глазом, с применением луп и других оптических приборов;
- возможность нанесения суспензии как путем полива, так и одновременным погружением нескольких деталей в ванну с суспензией;
- простота расшифровки осадений порошка, так как при контроле СОН порошок в меньшей степени оседает по рискам, наклепу, местам грубой обработки поверхности;
- меньшая возможность перегрева деталей в местах их контакта с дисками зажимного устройства дефектоскопа, так как ток пропускают кратковременно;
- часто обеспечивается более высокая производительность контроля.

Поэтому более предпочтительным является способ контроля СОН, если нет ограничений на его применение.

Последовательность выполнения технологических операций магнитопорошкового контроля:

- подготовка детали;
- намагничивание детали;
- нанесение на поверхность детали магнитного индикатора (порошка или суспензии);
- осмотр детали;
- расшифровка индикаторного рисунка и разбраковка;
- размагничивание и контроль размагниченности;
- удаление с детали остатков магнитного индикатора.

При контроле способом приложенного поля операции намагничивания, нанесения на поверхность детали магнитного индикатора, осмотра выполняются одновременно.

Способы намагничивания

При магнитопорошковом контроле объектов применяют циркуляционное, полюсное (продольное, поперечное, нормальное) и комбинированное намагничивание. Виды, способы и схемы намагничивания приведены в ГОСТ 21105-90.

Виды токов, применяемых при магнитопорошковом контроле

Для намагничивания и размагничивания деталей при магнитопорошковом контроле используют следующие виды токов:

- переменный промышленной и повышенной частоты;
- выпрямленный однополупериодный;

- выпрямленный двухполупериодный;
- выпрямленный трехфазный;
- постоянный;
- импульсный.

Переменный, выпрямленный, постоянный токи используют для циркуляционного, полюсного и комбинированного намагничивания. Импульсный ток обычно применяют для циркуляционного и полюсного намагничивания.

Магнитные индикаторы (магнитные порошки, пасты, суспензии) и **способы их нанесения:**

- **магнитный порошок** – порошок из ферромагнетика, используемый в качестве индикатора магнитного поля рассеяния;
- **магнитная паста** – смесь, содержащая магнитный или люминесцентный магнитный порошок, жидкую основу и, при необходимости, смазывающую антикоррозийную и другие добавки;
- **магнитная суспензия** – взвесь магнитного или люминесцентного магнитного порошка в дисперсионной среде (в жидкости – воде, керосине, техническом масле и др.), содержащей смазывающие, антикоррозийные и, при необходимости, антивспенивающие, антикоагулирующие и другие добавки.

Для нанесения магнитного индикатора на поверхность объекта контроля применяют два способа:

- «мокрый способ» – намагниченную поверхность обрабатывают суспензией со взвешенными частицами порошка. Магнитную суспензию наносят путем полива, погружения объекта в ванну с суспензией или аэрозольным способом;
- «сухой способ» – намагниченную поверхность обрабатывают сухим порошком при помощи различных распылителей (пульверизаторов, резиновых груш, качающихся сит, сеток), погружением объекта в емкость (камеру) с порошком, а также способом «воздушной взвеси» – распылением в специальных установках.

«Сухой способ» применяют реже, так как он требует дополнительных мер по выполнению санитарных и гигиенических требований.

При магнитопорошковом методе контроля в зависимости от размеров выявляемых дефектов приняты три условных уровня чувствительности (табл. 10.1).

Таблица 10.1

Условные уровни чувствительности в зависимости от размеров выявляемых дефектов

Условный уровень чувствительности	Размеры условного дефекта			
	ширина, мкм	глубина, мкм	длина, мм	шероховатость, мкм
А	2	20	0,5	2,5
Б	10	100	1,0	10
В	20	250	2,0	более 10

Условный уровень чувствительности позволяет ориентировочно определить для каждой марки стали минимальное значение напряженности магнитного поля, достаточное для формирования поля дефекта, и подобрать необходимые средства контроля.

10.2. Магнитографический метод

Магнитографический метод состоит в том, что на шов накладывают ферромагнитную ленту (магнитная лента значительно шире той, которую применяют на магнитофонах) и намагничивают его. В месте расположения дефекта изменяется степень намагничивания пленки, что фиксируется с помощью специального прибора, позволяющего судить о величине и характере дефекта шва.

10.3. Индукционный метод

Индукционный метод требует использования индукционного комплекта, состоящего из двух частей – индукционного генератора и индукционного приемника.

Один из способов применения метода – поиск прохождения уложенного кабеля. За счет протекания переменного тока вокруг кабельной линии образуется переменное магнитное поле. Перемещаясь над кабельной линией со специальным индукционным приемником, оснащенный поисковой катушкой, можно определить трассу прохождения кабельной линии, глубину залегания и точное место обрыва или короткого замыкания.

В зависимости от задачи (определение трассы, определение точного места короткого замыкания или места обрыва кабельной линии) могут использоваться частоты индукционного генератора, а значит и принимаемые частоты приемника в пределах от 480 до 10000 Гц. Для уменьшения влия-

ния промышленной сети на чувствительность приемника обычно выбирается рабочая частота, не кратная 50 (60) Гц (в зависимости от частоты сети).

В зависимости от типа кабельной линии, на которой выполняются работы, глубины ее залегания, питания от сети или аккумуляторов генераторы могут иметь выходную мощность от единиц до нескольких сотен ватт.

Индукционные приемники могут быть как простые, содержащие усилитель и поисковую катушку, так и сложные, имеющие несколько катушек, указатель нахождения над трассой кабеля и цифровую индикацию глубины залегания кабельной линии.

При **пассивном индукционном** методе достаточно использовать только индукционный приемник. При этом приемник должен принимать магнитное поле от работающего кабеля на частоте 50...60 Гц.

10.4. Метод эффекта Холла

Эффектом Холла называется появление в проводнике с током плотностью j , помещённом в магнитное поле H , электрического поля E_x , перпендикулярного H и j .

Если металлическую пластинку, вдоль которой течет постоянный электрический ток, поместить в перпендикулярное к ней магнитное поле, то между гранями, параллельными направлениям тока и поля, возникает разность потенциалов $U = j_1 - j_2$. Она называется холловской разностью потенциалов (ЭДС Холла) и определяется выражением

$$U_h = R \cdot b \cdot j \cdot B, \quad (10.1)$$

где b – ширина пластинки, j – плотность тока, B – магнитная индукция поля, R – коэффициент пропорциональности, получивший название постоянной Холла.

Датчик ЭДС Холла – это элемент автоматики, радиоэлектроники и измерительной техники, используемый в качестве измерительного преобразователя, действие которого основано на эффекте Холла. Он представляет собой тонкую прямоугольную пластину (площадь – несколько мм²) или пленку, изготовленную из полупроводника (Si, Ge, InSb, InAs), имеет четыре электрода для подвода тока и съёма ЭДС Холла. Чтобы избежать механических повреждений, пластинки датчика ЭДС Холла монтируют (пленку напыляют в вакууме) на прочной подложке из диэлектрика (слюды, керамики). Для получения наибольшего эффекта толщина пластины (плёнки) делается возможно меньшей. Датчики ЭДС Холла применяют для бесконтактного измерения магнитных полей (от 10^{-6} до 10^5 В). При изме-

рении слабых магнитных полей пользуются датчиками ЭДС Холла, смонтированными в зазоре ферро- или ферритмагнитного стержня (концентрактора), что позволяет значительно повысить чувствительность датчика. Так как в полупроводниках концентрация носителей зарядов (а, следовательно, и коэффициент Холла) может зависеть от температуры, то в случае точных измерений необходимо либо термостатировать датчик ЭДС Холла, либо применять сильнолегированные полупроводники (последнее снижает чувствительность датчика).

При помощи датчика ЭДС Холла можно измерять любую физическую величину, которая однозначно связана с магнитным полем; в частности, можно изменять силу тока, так как вокруг проводника с током образуется магнитное поле, которое можно измерить. На основе датчика ЭДС Холла созданы амперметры на токи до 100 кА. Кроме того, датчики ЭДС Холла применяются в измерителях линейных и угловых перемещений, а также в измерителях градиента магнитного поля, магнитного потока и мощности электрических машин, в бесконтактных преобразователях постоянного тока в переменный и, наконец, в воспроизводящих головках систем звукозаписи.

10.5. Применение матричных преобразователей для магнитной дефектоскопии стальных труб

Одним из путей совершенствования магнитного метода НК является применение матричных преобразователей высокого разрешения. Изготовление матричных преобразователей (МП) с требуемыми характеристиками стало возможно только в результате привлечения современных методов нанотехнологии, что потребовало разработки новых физических принципов регистрации магнитного поля, позволяющих использовать эту технологию при их создании.

Для реконструкции топографии магнитных полей рассеяния от микронесплошностей в ферромагнитных изделиях был синтезирован МП с 256-ю тонкопленочными МЧЭ (8 строк и 32 столбца).

С помощью тонкопленочных МП, изготовленных по интегральной технологии, был решен ряд прикладных проблем, имеющих важное практическое значение. Создана установка УМД-104 для магнитной дефектоскопии труб нефтяного сортамента в процессе их изготовления и при восстановлении труб, бывших в эксплуатации. Для выявления различно ориентированных дефектов используется классический магнитный метод с комби-

нированным намагничиванием трубы и считыванием магнитных полей рассеяния матричным преобразователем. В качестве МЧЭ в нем используются тонкопленочные анизотропные магниторезистивные преобразователи. Отличительная особенность таких преобразователей: благодаря их чрезвычайно высокой чувствительности контроль ведется с рабочим зазором 3 – 4 мм, что существенно повышает надежность первичных преобразователей. По сравнению с существующими магнитными дефектоскопами этот показатель улучшен почти на порядок (там зазор составляет 0,5 мм).

Впервые созданы и нашли широкое применение автоматизированные установки УМД-101 для объемно-шовной дефектоскопии всего тела электросварных нефтегазопроводных труб малого и среднего диаметра (от 20 до 530 мм). Особенностью этих дефектоскопов является возможность контроля труб по всему периметру без вращения. Здесь также применены однокристалльные тонкопленочные матричные преобразователи, которые в шахматном порядке равномерно размещены в специальных кассетах по всему периметру трубы. Она непрерывно движется со скоростью до 2 м/с относительно неподвижных МЧЭ, расположенных на расстоянии 3 – 4 мм от поверхности трубы. Интересно, что для неразрушающего контроля трубы диаметром, например, 159 мм по всему объему требуется всего 32 матричных преобразователя. Для сравнения: при использовании одиночных МЧЭ типа феррозондов или датчиков ЭДС Холла их количество возросло бы до 500 шт.

Контрольные вопросы:

1. В чем сущность магнитных методов контроля?
2. Какие существуют методы магнитного контроля?
3. Какие приборы используются для магнитных методов контроля?
4. Какие преобразователи используются для магнитных методов контроля
5. В чем сущность магнитопорошкового метода контроля?
6. Какие нормативные документы регламентируют магнитопорошковый метод контроля?
7. В чем сущность индукционного метода контроля?
8. В чем сущность метода эффекта Холла?

11. ОПТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ

Оптические методы получили свое распространение благодаря простоте и дешевизне их применения. Оптические эксперименты могут проводиться в широком спектральном диапазоне от ультрафиолета до инфракрасной области (0,2...500 мкм).

Используемые экспериментальные методы:

- традиционные методы оптических измерений: преломление света, отражение, поглощение, фото- и электролюминесценция, фотопроводимость;
- новые методы модуляционной спектроскопии: фотоотражение и фотопропускание для определения характеристики поверхности полупроводников и границ раздела;
- методы нестационарной емкостной спектроскопии глубоких уровней (DLTS) и C-V-измерения для определения характеристики электронного спектра структур и готовых приборов оптоэлектроники;
- топографические поляризационные измерения внутренних напряжений;
- изготовление омических контактов и *p-n* переходов с помощью лазерного излучения.

Эти методы используются для диагностики оптоэлектронных материалов структур и приборов: полупроводниковых лазеров, светоизлучающих диодов, фотоприемников, приборов НЕМТs и т.д. С помощью этих методик можно определить качество материалов, состав твердых растворов, концентрацию свободных носителей и примеси, толщину тонких пленок, величину внутренних напряжений и электрического поля в эпитаксиальных слоях и наноструктурах.

Благодаря разнообразию способов использования метод оптического контроля нашел свое применение практически во всех областях промышленности. Так, например, после проведения операции притирки поверхностей торцевых уплотнений насосов они подвергаются проверке качества при помощи оптического контроля на отражение светового импульса.

Контрольные вопросы:

1. В чем сущность оптических методов контроля?
2. Какие существуют оптические методы контроля?

12. РАДИАЦИОННЫЕ МЕТОДЫ

Просвечивание швов рентгеновскими и гамма-лучами. Этот способ применяется для обнаружения внутренних дефектов в сварных швах – трещин, пор, шлаковых включений. Просвечивание производится по схеме просвечивания (рис. 12.1). На рисунке: 1 – рентгеновская трубка; 2 – рентгеновские лучи; 3 – сваренная деталь; 4 – фотопленка; 5 – экран; 6 – кассета. Принцип действия следующий: пучок рентгеновских или гамма-лучей направляется на испытуемый сварной шов. Эти лучи, невидимые для человеческого глаза, способны проникать сквозь металл и действовать на фотографическую пленку, расположенную с обратной стороны шва. В месте нахождения дефекта (трещина, непровар) поглощение лучей металлом будет меньше и они окажут более сильное действие на пленку. При проявлении фотопленки в данном месте появится более темное пятно, по своей форме соответствующее дефекту шва. Снимок сварного шва на пленке называется рентгенограммой шва. Рентгеновские лучи получают с помощью специальных рентгеновских трубок.

Гамма-лучи – это лучи, излучаемые радиоактивными элементами: радием, мезоторием, кобальтом и другими. Для просвечивания сварных швов применяют мезоторий и кобальт. Просвечивание рентгеновскими лучами и гамма-лучами применяется для ответственных конструкций.

При радиационном контроле используют, как минимум, три основных элемента:

- источник ионизирующего излучения;
- контролируемый объект; детектор, регистрирующий дефектоскопическую информацию.

При прохождении через изделие ионизирующее излучение ослабляется – поглощается и рассеивается. Степень ослабления зависит от толщины, плотности и атомного номера материала контролируемого объекта, а также от интенсивности и энергии излучения. При наличии в веществе дефектов изменяются интенсивность и энергия пучка излучения.

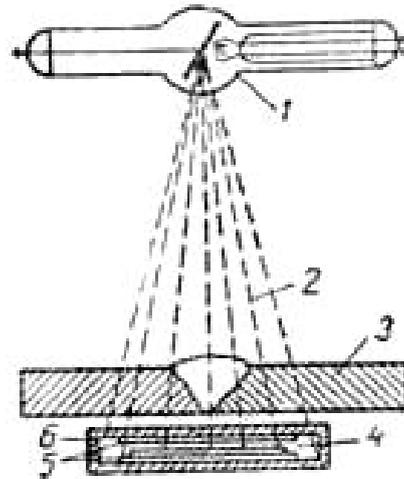


Рис. 12.1. Схема просвечивания шва рентгеновскими лучами:

Методы радиационного контроля различаются способами детектирования дефектоскопической информации и соответственно делятся:

- на радиографические;
- на радиоскопические;
- на радиометрические.

Радиографические методы радиационного неразрушающего контроля основаны на преобразовании радиационного изображения контролируемого объекта в радиографический снимок или запись этого изображения на запоминающем устройстве с последующим преобразованием в световое изображение. На практике этот метод наиболее широко распространен в связи с его простотой и документным подтверждением получаемых результатов.

В зависимости от используемых детекторов различают:

- пленочную радиографию;
- ксерорадиографию (электрорадиографию).

В первом случае детектором скрытого изображения и регистратором статического видимого изображения служит фоточувствительная пленка, во втором – полупроводниковая пластина, а в качестве регистратора используют обычную бумагу.

Радиационная интроскопия

Метод неразрушающего контроля, основанный на преобразовании радиационного изображения контролируемого объекта в световое изображение на выходном экране радиационно-оптического преобразователя, причем анализ полученного изображения проводится в процессе контроля.

Чувствительность этого метода несколько меньше, чем радиографии, но его преимуществами являются повышенная достоверность получаемых результатов благодаря возможности стереоскопического видения дефектов и рассмотрения изделий под разными углами, «экспрессность» и непрерывность контроля.

Радиометрическая дефектоскопия

Метод получения информации о внутреннем состоянии контролируемого изделия, просвечиваемого ионизирующим излучением, в виде электрических сигналов различной величины, длительности или количества.

Этот метод обеспечивает наибольшие возможности автоматизации процесса контроля и осуществления автоматической обратной связи контроля и технологического процесса изготовления изделия. Преимуществом метода является возможность проведения непрерывного высокопроизводительного контроля качества изделия, обусловленная высоким быстро-

действием применения аппаратуры. По чувствительности этот метод не уступает радиографии.

Контрольные вопросы:

1. В чем сущность радиационных методов контроля?
2. Какие существуют радиационные методы контроля?

13. РАДИОВОЛНОВЫЕ МЕТОДЫ

Радиоволновой неразрушающий контроль основан на регистрации изменения параметров электромагнитных колебаний СВЧ, взаимодействующих с ОК. Диапазон длин волн, преимущественно используемый в радиоволновом контроле, ограничен 1...100 мм. Более освоены и обеспечены измерительной аппаратурой трехсантиметровые и восьмимиллиметровые поддиапазоны.

Радиоволновой контроль применяют для решения всех типовых задач НК: толщинометрии, дефектоскопии, структуроскопии и интроскопии (контроля внутреннего строения ОК). Используемая при этом аппаратура, как правило, построена на базе стандартных или модернизированных элементов СВЧ. Специальным элементом при решении конкретной задачи может быть источник или приемник излучения, а также приспособление для крепления и перемещения ОК.

Среди других особенностей радиоволнового контроля по сравнению с оптическим и радиационным следует отметить использование импедансного метода для расчета параметров сигналов и соизмеримость длины волны излучения с размерами радиоволнового тракта «источник излучения – объект контроля – приемник излучения».

Контрольные вопросы:

1. В чем сущность радиоволновых методов контроля?
2. В чем особенность радиоволновых методов контроля?

14. ТЕПЛОВЫЕ МЕТОДЫ

14.1. Физическая сущность теплового контроля

Методы неразрушающего контроля теплового вида используют при исследовании тепловых процессов в изделиях. При нарушении термодинамического равновесия объекта с окружающей средой на его поверхности возникает избыточное температурное поле, характер которого позволяет получить информацию об интересующих свойствах объектов.

Методы теплового неразрушающего контроля (ТНК) основаны на взаимодействии теплового поля объекта с термодинамическими чувствительными элементами (термопарой, фотоприемником, жидкокристаллическим индикатором и т.д.), преобразовании параметров поля (интенсивности, температурного градиента, контраста, лучистости и др.) в электрический сигнал и передаче его на регистрирующий прибор.

Термография основана на анализе тепловой карты объекта, получаемой с помощью тепловизора. По тепловой карте (термограмме) можно судить о внутренней структуре объекта (аналогия с рентгеноскопией), в частности, обнаруживать ее аномалии, т.е. скрытые дефекты и нарушения (см. приложение А, рис. А.1, А.2, А.3 и А.4).

Достоинствами теплового контроля являются дистанционность (для ИК-систем: тепловизоров, тепловых дефектоскопов), высокая скорость обработки информации; высокая производительность испытаний; высокое линейное разрешение; возможность контроля при одно- и двустороннем подходе к изделию; теоретическая возможность контроля любых материалов; многопараметрический характер испытаний; возможность взаимодополняющего сочетания ТНК с другими видами неразрушающего контроля; сочетаемость со стандартными системами обработки информации; возможность поточного контроля и создания автоматизированных систем контроля и управления технологическими процессами.

Различают пассивный и активный ТНК.

Пассивный ТНК (ПТНК) не нуждается во внешнем источнике теплового воздействия (ИТВ) – тепловое поле в объекте контроля (ОК) возникает при его эксплуатации (изделия радиоэлектроники, энергетическое оборудование, металлургические печи и т.п.) или изготовлении (закалке, отжиге, сварке и т. п.).

Активный ТНК (АТНК) предусматривает воздействие внешнего ИТВ на ОК, имеющий в исходном состоянии температуру окружающей среды. В случае использования АТНК в дефектоскопии, например, для обнаруже-

ния дефектов в виде нарушения сплошности (раковин, трещин, мест непроклея), информацию о дефектах несут в себе локальные неоднородности температурного поля на поверхности ОК.

В соответствии с классификацией тепловых методов АТНК включает следующие:

- контактный и собственного излучения;
- стационарный и нестационарный.

В первом случае классификационным признаком является тип термочувствительного элемента, во втором – длительность теплового воздействия.

В методе АТНК можно выделить три основных направления развития:

- тепловая дефектоскопия;
- тепловая дефектометрия;
- тепловая томография.

Тепловая дефектоскопия состоит в определении факта наличия дефекта и его расположения в объекте контроля. В настоящее время это наиболее разработанное направление.

Тепловая дефектометрия (ТД) – направление АТНК, представляющее собой методы и средства количественной оценки глубины залегания дефектов, их толщины и поперечных размеров. С математической точки зрения ТД требует решения обратных теплофизических задач.

Тепловая томография (ТТ) является последующим развитием ТД и состоит в послойном синтезе внутренней структуры объекта контроля на основе использования методов проективной компьютерной томографии.

14.2 Аппаратура АТНК

В соответствии с ГОСТ 23483-79 процедура неразрушающего контроля включает в себя две операции: воздействие на контролируемый объект и регистрацию его отклика на воздействие. Применительно к АТНК это соответствует операциям нагрева (охлаждения, сочетания нагрева с охлаждением) ОК и регистрации температурного поля на поверхности ОК. В подавляющем большинстве случаев эти операции необходимо производить многократно, так как габариты ОК обычно таковы, что их контроль производится по частям, т.е. сканированием. Таким образом, составляющими частями аппаратуры, реализующей АТНК, должны быть:

- источник теплового возбуждения (ИТВ);
- регистрирующее устройство (РУ);
- устройство сканирования и управления.

Источники теплового возбуждения

Многообразие объектов и условий теплового неразрушающего контроля в каждом конкретном случае требует своего способа и источника теплового возбуждения.

При разработке ИТВ используют как стандартные элементы (лампы, лазеры и др.), так и полностью оригинальные (сканирующие системы, фокусирующая оптика, индукторы и др.).

До сих пор терминология, относящаяся к облучательным ИК-средствам не определена никакими стандартами, хотя в этом направлении делаются некоторые попытки, не идущие далее рекомендаций. ИК-техника, используемая для нагрева, имеет много общих черт со светотехникой. Как ИК-техника, так и светотехника использует первичные источники излучения, те же методы перераспределения лучистого потока в нужных направлениях посредством отражателей, концентраторов (внешних, иногда внутренних), те же способы питания от электрических сетей и т. д. Как уже указывалось, полная классификация ИТВ отсутствует. Однако существует классификация ИТВ по пространственным характеристикам:

- точечные;
- полосовые;
- площадочные.

Классификацию применяемых ИТВ можно представить следующей схемой (рис. 14.1).



Рис. 14.1. Классификация источников теплового возбуждения

Регистрирующие устройства

В соответствии со сложившейся терминологией РУ температурных полей делятся на контактные и бесконтактные. Контактные датчики разделяются на две большие группы:

- термометры (жидкостные, манометрические, термоэлектрические (термопары), термометры сопротивления (термисторы);
- термоиндикаторы (термоиндикаторные краски, жидкие кристаллы, люминофоры).

Наиболее перспективным направлением является применение устройств бесконтактного действия, в особенности ИК-радиометров (пирометров) и тепловизоров. Ориентировочная оценка показывает, что не менее 90 % разработок в области АТНК основывается на этих приборах.

Особенно важную роль играют тепловизоры. Применение их для АТНК значительно повышает производительность контроля (до десятков квадратных метров поверхности в час), чувствительность к температурным контрастам (десятые и сотые доли градуса), информативность и наглядность контроля и т. д. В свою очередь, использование ИК-радиометров, хотя и приводит к снижению производительности контроля, позволяет существенно улучшить выявляемость дефектов.

Менее известными, но представляющими определенный интерес, являются другие устройства этого класса, которые трудно объединить общими признаками. К ним относятся твердотельные преобразователи изображения, телевизионные ИК-системы, эвапорографы и т. п.

Несмотря на преимущества бесконтактных устройств дистанционного типа, для некоторых задач АТНК более эффективными оказываются околоповерхностные датчики. Их применяют для контроля изделий сложной формы, объектов с существенной неоднородностью по коэффициенту теплового излучения и для других задач. Классификацию бесконтактных устройств можно представить схемой (рис. 14.2).

Опыт показывает, что визуальный анализ термограмм без определенной обработки дает только малую часть возможной информации об объекте.

Применение специальных математических методов расшифровки термограмм позволяет резко повысить их информативность и дает качественно новые данные об объекте контроля.

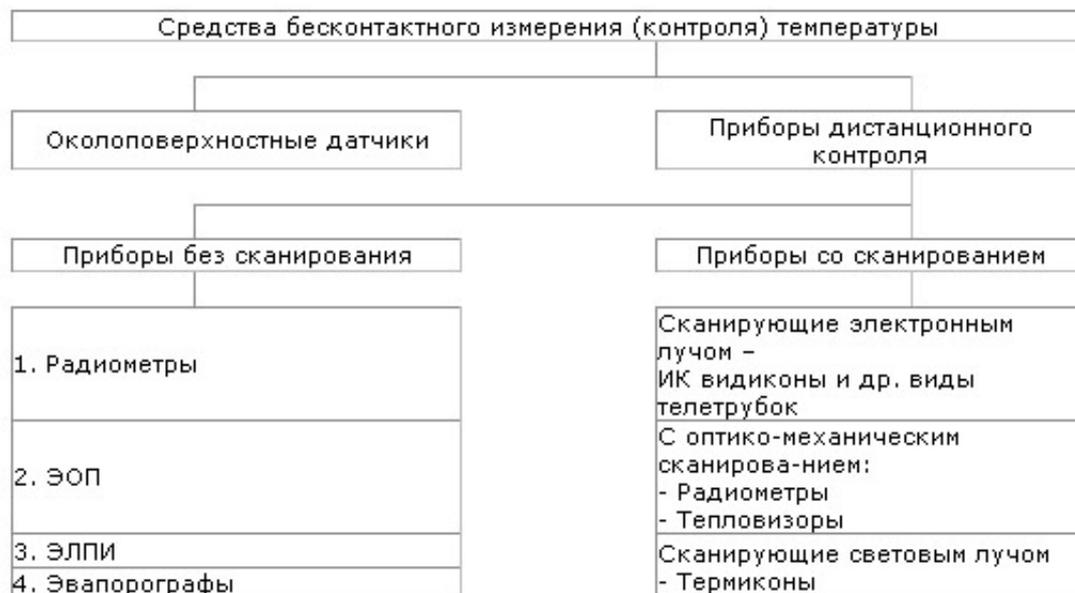


Рис. 14.2. Классификация бесконтактных средств измерения и контроля температуры и температурных полей

Объекты и области применения ТНК

Объектами ТНК служат дефектные структуры с трещинами, порами, раковинами, непроварами, участками плохой тепло- и электроизоляции, неоднородным составом, посторонними примесями, зонами термического и усталостного перенапряжения, а также с отклонениями геометрических и теплофизических характеристик от допустимых значений.

Возможности ТНК ограничены в основном теплопроводностью (метод неприменим для материалов как с высокой, так и низкой теплопроводностью); структурными помехами, вызванными флуктуациями теплофизических и оптических свойств объектов контроля; внешними тепловыми помехами.

В соответствии с физической сущностью теплового метода изделия из высокотеплопроводных материалов не являются лучшим объектом контроля. Однако для таких подповерхностных дефектов, как трещины, раковины, отслоения покрытий, характерных для определенного класса металлических конструкций, АТНК оказывается эффективнее других методов НК, обычно используемых для контроля металлов. Применение АТНК наиболее эффективно для плит, образованных соединением разных по твердости слоев. Характерными для этого объекта контроля дефектами являются отслоения, которые могут образовываться за счет нарушения технологии. Для соединений металл – неметалл сфера применения АТНК значительно шире. В частности, АТНК успешно используется для контроля соединения металлов с такими материалами, как каучук, стекло, резина, пластик и т. д.

Рассмотрим область применения термографии (табл. 14.1).

Таблица 14.1

Область применения термографии

Область применения	Объекты контроля	Обнаруживаемые дефекты
Энергетика	<p>Электрические подстанции. Линии электропередач. Тепло- трассы. Тепломеханическое оборудование. Парораспреде- лительные сети. Трубы дымовые. Статоры турбогенераторов. Щетки электромашин. Склады сыпучих материалов. Электролизные ванны</p>	<p>Ухудшение электро- и теп- лоизоляции. Прямые утечки воды, пара, газов. Ослабление механического контакта. Засорение теплообменника. Трещины в трубах. Короткие замыкания. Пробой изоляторов. Износ токоведущих частей. Места самовозгорания сы- пучих материалов</p>
Машиностроение, ме- таллургия, производ- ство конструкционных материалов	<p>Печи металлургические. Ковши для разлива металла. Горячий прокат. Шины. Композиционные материалы. Сварные соединения. Паяные соединения. Клееные соединения. Трубы. Бойлеры. Машины и механизмы. Теплообменники. Коксовые батареи. Трубопро- воды</p>	<p>Утолщение, трещины и от- сутствие футеровки. Краевые расслоения. Непровары, непрочности, непропаи и другие наруше- ния сплошности. Утонение стенок. Коррозионный износ. Дефекты сборки. Посторонние примеси. Износ механических частей. Засорение труб. Утечка воды, пара.</p>
Электроника	<p>Полупроводниковые приборы. Интегральные микросхемы. Печатные платы. Узлы и блоки электронной аппаратуры. Резисторы, конденсаторы</p>	<p>Однородность полупровод- ников. Трещины, непрочности, непрочности, непропаи. Дефекты р-п-перехода. Изменение номинала. Короткие замыкания. Обрывы, загрязнения. Токовые утечки</p>
ИК-аэрофотосъемка	<p>Элементы земного ландшафта. Подземные теплотрассы. Лес и водные бассейны. Участки геотермальной деятельности. Фауна. Геология. Сельхозпосевы. Служба спасения людей</p>	<p>Тепловое загрязнение водно- го и воздушного бассейна. Очаги пожаров. Поиск полезных ископаемых. Тектонические изменения. Утечки тепла. Болезни растений. Степень созревания культур. Поиск пропавших людей</p>

Аэрокосмическая техника	Бортовое радиооборудование. Лопасты пропеллеров. Панели ракет и самолетов. Теплозащитная обшивка	Дефекты тепло- и электрооборудования. Трещины. Некачественное литье. Дефекты сплошности. Места инфильтрации воды
Нефтехимия	Энергохозяйство. Трубопроводы. Цистерны. Химические реакторы	Утечки тепло- и электрической энергии. Утечки газов и нефти. Контроль уровня жидкости. Дефекты теплоизоляции. Утонение стенок
Прочие области	Искусство. Медицина. Строительство. Железнодорожный транспорт и метрополитен. Автомобилестроение. Криминалистика. Ядерная энергетика	

Перспективы развития ТНК

В настоящее время тепловой контроль является одним из наиболее динамически развивающихся методов. Анализ современного уровня развития активного теплового контроля показывает, что этот метод неразрушающих испытаний доказал свою состоятельность и утвердился как эффективный инструмент контроля качества для широкого круга исследовательских и производственных задач. О большом интересе к ТНК говорит тот факт, что на XIV Всемирной конференции по неразрушающему контролю (Копенгаген, 1996 г.) более 10 % докладов были посвящены тепловому методу.

Тем не менее, практически отсутствует отечественная аппаратурная база. Опытные отечественные образцы значительно уступают по техническим и эксплуатационным характеристикам тепловизорам ведущих мировых производителей (AGEMA, NIPPON, AVIONICS, TOMSON, BARNES, JEOL).

Практически отсутствуют методики расшифровки термограмм.

Отсутствует нормативно-методическая база проведения термографических обследований. На данном этапе практически завершено формирование теоретических основ АТНК, сложившихся в одну из прикладных теорий теплообмена, установлены основные закономерности АТНК, разработаны методы моделирования дефектов, средства и методики измерений.

Основные направления работ в области ТНК можно сформулировать следующим образом:

- совершенствование теоретической модели ТНК как в смысле ее дальнейшего углубления (учет зависимости теплофизических характери-

стик от температуры, дополнение теплопроводности другими видами теплопередачи, развитие дефектометрии и томографии на основе обратных задач и т.д.), так и в смысле ее упрощения, вплоть до создания пакета программ для инженерных расчетов;

- поиск новых областей применения ТНК, особенно для класса теплоизоляционных материалов;
- разработка универсального алгоритма проведения экспериментальных исследований новых объектов ТНК, основанного на теории планируемого эксперимента;
- создание единой модели «объект контроля – средство контроля – методика контроля», ее анализ и оптимизация на этой основе решения задач АТНК;
- разработка принципов построения аппаратуры ТНК, базирующихся как на классических представлениях, известных в тепловидении, ИК-технике, оптико-электронном приборостроении, так и на специфических особенностях тепловой дефектоскопии;
- совершенствование существующих средств контроля;
- решение проблемы метрологического обеспечения метода ТНК;
- создание на базе средств ТНК систем автоматизированного управления качеством продукции;
- поиск путей повышения эффективности неразрушающего контроля за счет сочетания ТНК с другими методами при испытании ответственных объектов.

Решение указанных проблем позволит более эффективно применять ТНК для повышения качества продукции.

Контрольные вопросы:

1. В чем сущность тепловых методов контроля?
2. Какие существуют тепловые методы контроля?
3. Какие приборы используются для тепловых методов контроля?
4. Какие существуют области применения тепловых методов контроля и каковы перспективы применения?

15. ТЕЧЕИСКАНИЕ

В технике под течеисканием понимается совокупность средств, методов и способов обнаружения течей и установления степени герметичности систем.

Место нарушения целостности оболочки называют течью. Это обычно микропоры в самом материале оболочки и в сварных швах, риски на рабочей поверхности фланцев и металлических уплотнителей, образующие сквозной канал с выходом на обе стороны оболочки. Величина течи, как и степень герметичности, характеризуется потоком воздуха, перетекающего через течь в единицу времени при нормальных условиях.

В вакуумной технике количество газа, натекающего в систему, часто характеризуют произведением объема проникшего газа V на его давление P . Количество газа, проникшего в систему, деленное на время натекания, определяет поток газа.

В системе СИ основными единицами объема, давления и времени являются метр кубический (м^3), паскаль, равный ньютону, деленному на метр квадратный ($\text{Па} = \text{Н}/\text{м}^2$) и секунда (с). Отсюда поток будет выражаться

$$\frac{[\text{м}^3] \left[\frac{\text{Н}}{\text{м}^2} \right]}{[\text{с}]} = \frac{[\text{Н} \cdot \text{м}]}{[\text{с}]} = \frac{[\text{Дж}]}{[\text{с}]} = [\text{Вт}]$$

До настоящего времени в вакуумной технике, в частности, в течеискании, еще широко применяется в качестве единицы измерения потока газа литр на микрометр ртутного столба в секунду ($\text{л} \cdot \text{мм рт. ст.} / \text{с}$), равный $1,33 \cdot 10^4$ Вт.

Требования к степени герметичности вакуумной системы определяются величиной максимально допустимого натекания в систему. При контроле герметичности изделия следует различать две основные технологические операции:

- 1) контроль герметичности – технологическая операция, служащая для установления степени герметичности изделия;
- 2) поиск течи – операция, заключающаяся в обнаружении и установлении мест расположения единичных течей.

Для установления степени герметичности системы с одной стороны оболочки подают пробное вещество – газ или жидкость, легко выделяемые (идентифицируемые) в окружающей среде или в составе остаточного газа; с другой стороны оболочки фиксируют появление и количественное изменение содержания пробного вещества.

По способу создания потока и идентификации пробного вещества различают следующие методы контроля герметичности: опрессовки, искрового разряда, люминесцентный, манометрический, галогенный, масс-спектрометрический и некоторые другие. В вакуумной технике наибольшее распространение получили масс-спектрометрический и манометрический методы в различных модификациях.

15.1. Манометрический метод

Для поиска течей могут быть использованы любые манометрические преобразователи, показания которых зависят от рода газа, например, электронные ионизационные и теплоэлектрические. Поиск течей сводится к следующему. После установления давления в вакуумной системе подозреваемое в натекании место обдувают пробным газом или смачивают жидким пробным веществом. Изменение показаний вакуумметра свидетельствует о наличии течи. Наибольший эффект дает работа с жидкими пробными веществами: ацетоном, спиртом и эфирами. Небольшие количества жидкости, проникшие в вакуумную систему через течь, испаряясь в вакууме, резко увеличивают общее давление в системе.

Поиск течей с помощью жидких пробных веществ наряду с большой эффективностью имеет свои неудобства. Подъем жидкости по капилляру малых течей, меньших $10 - 7$ Вт (10^{-3} л·ммк рт. ст/с), происходит за время от нескольких минут до нескольких часов. Поэтому вакуумметр может среагировать на пробное вещество в тот момент, когда будет обследоваться уже другой участок поверхности. Тем самым возникнет ложное представление о месте расположения течи. Чтобы убедиться в правильности обнаружения места расположения течи, удаляют пробное вещество (если имеется возможность, прогревают контролируемую поверхность, например, легким пламенем горелки) и после установления давления в системе повторяют испытания.

Минимальная величина течей, выявляемых манометрическим методом, зависит от общего давления в системе, которое в данном случае является фоном. По мере обнаружения и устранения течей установившееся

давление в системе понижается и соответственно повышается вероятность обнаружения все более малых течей.

Поиск течей целесообразно вести, когда стрелка вакуумметра находится в конце шкалы прибора. Если стрелка вакуумметра находится в начале шкалы, целесообразно несколько снизить быстроту откачки, прикрыв высоковакуумный затвор, и переключить вакуумметр на более грубый диапазон. При этом относительная минимальная регистрируемая величина изменения показаний вакуумметра будет увеличена.

15.2. Масс-спектрометрический метод

Наиболее распространенным в вакуумной технике методом контроля герметичности и поиска течей является масс-спектрометрический, обладающий высокой чувствительностью. Сущность его заключается в регистрации прохождения через оболочку пробного вещества с помощью масс-спектрометра, настроенного на данное пробное вещество. Отечественной промышленностью выпускается серия масс-спектрометрических течеискателей и измерителей концентрации, настроенных на гелий. Основным элементом течеискателя является масс-спектрометрический анализатор, представляющий собой масс-спектрометр с магнитным отклонением пучка ионов. Принцип действия демонстрируется на рис. 15.1, на котором показана масс-спектрометрическая камера течеискателя, предназначенного для работы с гелием в качестве пробного газа. Электроны, эмиттируемые катодом 9, попадают в камеру ионизации 8. Источник питания катода 11 подключен к анализатору через фланец 10. В случае негерметичности вакуумной системы, обдуваемой пробным газом, молекулы гелия через фланец 5 проникают в камеру ионизации. Положительные ионы гелия ускоряющим напряжением направляются в камеру магнитного анализатора 6. Ускоряющее напряжение E_y и магнитная индукция B подбираются таким образом, чтобы ионы гелия, прошедшие через входную щель 7, двигаясь по траектории 4, попали в выходную щель 2. Остаточные газы по траектории 3 разряжаются на стенках анализатора.

В отличие от анализаторов парциальных давлений, которые должны иметь высокую разрешающую способность и перестраиваться на различные массовые числа, датчик течеискателя настраивается только на пробный газ. При этом входная и выходная щели могут быть расширены, что увеличивает чувствительность течеискателя. Этот способ повышения чувствительности можно применять для гелия, не имеющего в составе воздуха веществ с близкими массовыми числами.

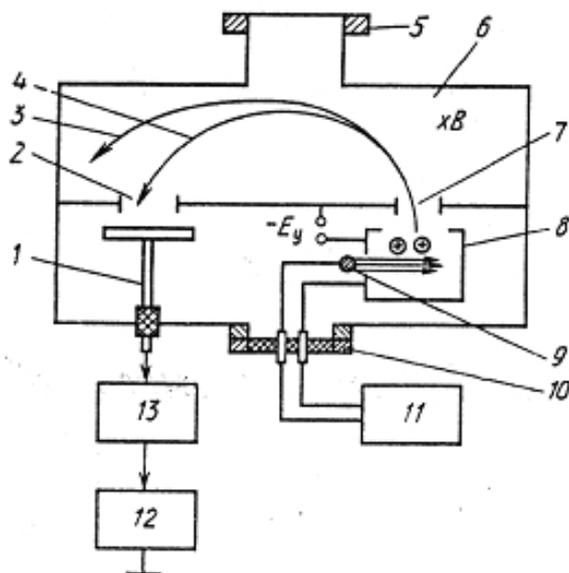


Рис. 15.1. Масс-спектрометрическая камера течеискателя

Коллектор ионов 1 соединяется с электрометрическим каскадом 13, усиливающим падение напряжения на высокоомном сопротивлении. Блок измерения ионного тока 12 после дополнительного усиления выходного сигнала электрометрического каскада выводит результаты измерений на стрелочный прибор или самописец.

Схема типового течеискателя представлена на рис. 15.2. Пароструйный и механический насосы служат для создания и поддержания в камере течеискателя давления $2,5 \cdot 10^{-3} - 2,5 \cdot 10^{-2}$ Па ($2,5 \cdot 10^{-5} - 2,5 \cdot 10^{-4}$ торр). Напряжение на нагревателе пароструйного насоса регулируется автотрансформатором.

Заливная азотная ловушка предназначена для предотвращения попадания паров рабочей жидкости насосов в масс-спектрометрическую камеру, а также для защиты камеры от загрязнения ее конденсирующимися парами и газами, поступающими от испытуемого объекта. Дросселирующий клапан Ду-32 (поз. 6) служит для сообщения объекта испытаний с вакуумной системой течеискателя. Клапан Ду-25 (поз. 5) служит для отделения масс-спектрометрической камеры от вакуумной системы течеискателя. Необходимость в этом возникает, например, при замене катода или чистке камеры. Трехходовые клапаны Ду-8 (поз. 7, 2, 3 и 4) служат для управления форвакуумной и предварительной (байпасной) откачкой вакуумной системы механическим насосом, а также для напуска атмосферы в вакуумную систему.

Клапаны устроены так, что два канала клапана на рисунке, расположенные в горизонтальной плоскости, постоянно сообщаются между собой, образуя один сквозной канал. Третий канал может закрываться и открываться, сообщая соответствующие участки вакуумной системы с линией низковакуумной откачки.

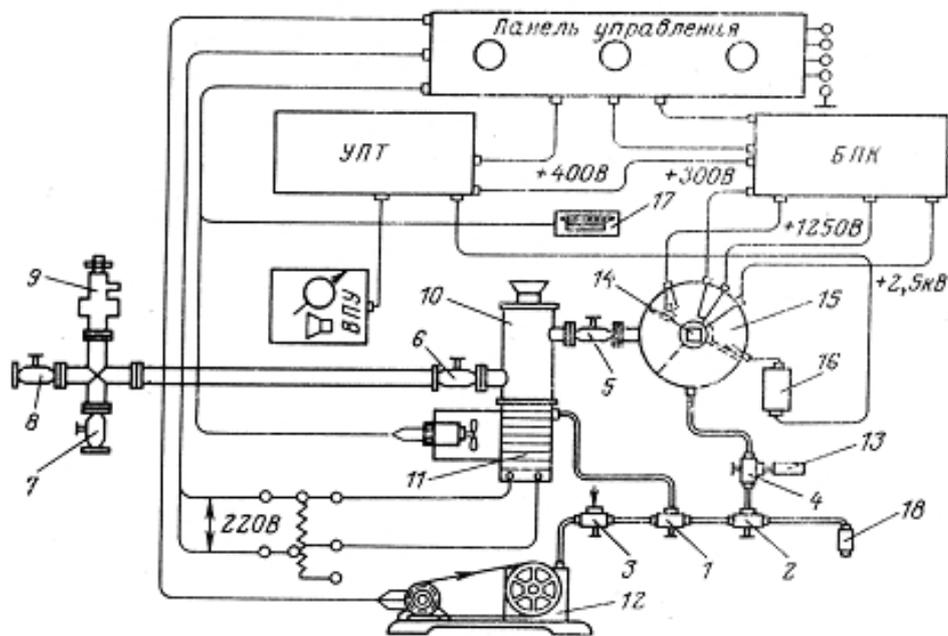


Рис. 15.2. Схема гелиевого течеискателя:

1 – 8 – клапаны; 9 – натекатель; 10 – вымораживающая ловушка; 11 – диффузионный паромасляный насос; 12 – механический вакуумный насос с масляным уплотнением; 13 – калиброванная гелиевая течь; 14 – магниторазрядный манометрический преобразователь; 15 – масс-спектрометрическая камера; 16 – выносной электроизмерительный каскад; 17 – вентилятор электронных блоков; 18 – термопарный манометрический преобразователь; «Панель управления» – основная панель управления, содержащая приборы и переключатели, необходимые для управления работой течеискателя и измерения «ускоряющего напряжения», «тока эмиссии», давления в системе и напряжения на нагревателе диффузионного насоса; УЛТ – усилитель постоянного тока; БПК – блок питания масс-спектрометрической камеры и магниторазрядного манометрического преобразователя; ВПУ – выносной пульт управления

Включение течеискателя осуществляется в следующей последовательности. Проверяют, все ли клапаны закрыты. Включают общее питание течеискателя. Включают механический насос. Включают термопарный вакуумметр. После достижения необходимого разряжения в форвакуумной линии открывают клапан «Пароструйный насос». Включают нагреватель пароструйного насоса, устанавливая необходимое напряжение питания нагревателя. Включают усилитель постоянного тока. Времени выхода на режим диффузионного насоса бывает достаточно и для прогрева электроизмерительного блока. Спустя 30 – 35 мин с начала включения течеискателя заливают жидкий азот в ловушку. О том, что в диффузионном насосе полностью сформировались струи и началась высоковакуумная откачка,

можно судить по величине давления в форвакуумной линии. По прошествии 40 – 45 мин с момента включения диффузионного насоса – времени, достаточного для его разогрева, закрывают клапан «Пароструйный насос», открывают клапан «Камера», производят предварительную откачку масс-спектрометрической камеры. Во избежание сильного замасливания масс-спектрометрической камеры не следует долго оставлять камеру под откачкой механическим насосом. После достижения в ней давления 5 – 8 Па ($\sim 5 \cdot 10^{-2}$ торр) следует закрыть клапан «Камера» и открыть клапан «Пароструйный насос». После этого открывают клапан между масс-спектрометрической камерой и диффузионным насосом. При последующем выключении течеискателя масс-спектрометрическую камеру оставляют «под вакуумом». Тогда в дальнейшем отпадает необходимость в предварительной откачке камеры механическим насосом, соответственно уменьшается загрязнение ее парами масла механического насоса. (Для удобства работы полезно маховик клапана 5, расположенного между камерой и диффузионным насосом, вынести выше верхней крышки течеискателя).

Выключение течеискателя осуществляется в обратной последовательности. При этом следует помнить, что ловушку необходимо полностью разморозить при откачке ее диффузионным насосом. При размораживании ловушки клапан 5 должен быть уже закрыт. Клапан «Пароструйный насос» закрывается при остывании нижней части насоса до температуры 60 – 80 °С. После выключения механического насоса необходимо открыть клапан «Атмосфера», напустить атмосферный воздух в форвакуумную линию и закрыть клапан. Перед началом испытаний новой партии приборов необходимо произвести градуировку течеискателя. Градуировку следует производить при рабочем давлении в камере с помощью диффузионной гелиевой течи «Гелит», встроенной в течеискатель. Для этого закрывают клапан Ду-32 (поз. 6), выключают катод ионного источника, выключают магнитный электроразрядный вакуумметр, предварительно переключив его на шкалу 2500 мкА. Разобщают масс-спектрометрическую камеру с высоковакуумной откачкой закрытием клапана Ду-25 (поз. 5). Откачивают гелиевую течь до давления 2,5 – 5 Па ($\sim 0,02$ – $0,03$ торр), открыв для этого клапаны «Камера» и «Гелиевая течь». Закрывают клапан «Камера» и открывают клапан Ду-25 (поз. 5). Включают магниторазрядный вакуумметр и откачивают камеру до давления $2,5 \cdot 10^{-3}$ – $5 \cdot 10^{-3}$ торр (50 – 80 мкА по шкале магниторазрядного вакуумметра). Включают катод ионного источника и фиксируют установившиеся показания от стрелочного прибора выносного пульта управления ВПУ. Закрывают клапан «Гелие-

вая течь». При этом отсчет течеискателя начнет уменьшаться. Рассчитывают чувствительность течеискателя к потоку гелия по формуле

$$S_Q = \frac{Q}{\alpha_T - \alpha_\phi}, \quad (15.1)$$

где S_Q – чувствительность течеискателя к потоку гелия; Q – величина потока гелия калиброванной гелиевой течи, α_ϕ – максимальная амплитуда флуктуаций фона, α_T – текущая флуктуация фона.

Чем меньше численная величина S_Q , тем лучше, так как это означает, что меньшему потоку гелия, поступающему в течеискатель, будет соответствовать больший отсчет течеискателя.

Градуировка течеискателей, в которых отсутствует встроенная течь, осуществляется следующим образом. Через клапан 8 к течеискателю подсоединяется калиброванная гелиевая течь. Через клапан 7 подсоединяется вспомогательный насос. Течеискатель включается в рабочий режим. Вспомогательным насосом через клапаны 7 и 8 производится откачка гелиевой течи до давления 2,5 – 5 Па. Закрывают клапан 8 и после стабилизации показаний течеискателя фиксируют параметр α_ϕ . Закрывают клапан 6. Производят расчет чувствительности течеискателя. Выключается катод масс-спектрометрической камеры. Закрывается клапан 7, открывается дросселирующий клапан 6 течеискателя. Выключается вспомогательный насос. После установления давления в камере фиксируют показания течеискателя.

Хотя градуировка течеискателя производится по потоку гелия, в действительности его масс-спектрометрический анализатор определяет концентрацию гелия в камере. Соответствие установившейся концентрации гелия в камере и потока гелия, поступающего в течеискатель, устанавливается известной формулой

$$P_G = \frac{Q_G}{S_G}, \quad (15.2)$$

где P_G — давление гелия в камере; Q_G — поток гелия в течеискатель; S_G — быстрота откачки камеры по гелию.

Изменение быстроты действия диффузионного насоса по гелию в зависимости от мощности подогрева насоса открывает возможности для регулирования чувствительности течеискателя. При снижении мощности подогрева снижается быстрота действия по гелию. При этом быстрота действия по воздуху в широком диапазоне остается практически постоянной. Это позволяет повысить чувствительность течеискателя в результате увеличения давления гелия в камере при том же потоке гелия и сохранении

общего давления в камере. При изменении мощности, подводимой к нагревателю пароструйного насоса, должна быть произведена повторная градуировка течеискателя.

С помощью гелиевого течеискателя может производиться как контроль герметичности, так и поиск течей. Для повышения достоверности и обеспечения большей точности измерений градуировку течеискателя следует производить при рабочем давлении в камере, давлении, которое будет в процессе испытаний.

Предельные возможности течеискателя характеризуются минимальным потоком гелия, который регистрируется течеискателем

$$Q = 2 \cdot D \cdot a_{\phi} \cdot S_Q, \quad (15.3)$$

где D – отсчет течеискателя, принимаемый за достоверный; a_{ϕ} – максимальная амплитуда флуктуаций фона, S_Q – чувствительность течеискателя к потоку гелия.

Расширения предельных возможностей течеискателя (снижения Q_{\min}) можно достичь повышением его чувствительности (снижением численного значения S_Q) в результате снижения мощности подогрева пароструйного насоса. Однако следует иметь в виду, что одновременно с повышением чувствительности повышается флуктуация фона. Так, увеличение чувствительности при снижении напряжения на нагревателе насоса ниже 180 В полностью компенсируется увеличением флуктуаций фона течеискателя.

С помощью масс-спектрометрического течеискателя контроль герметичности и поиск течей осуществляются способами обдува и гелиевых чехлов (камер), способом щупа, барокамеры, вакуумных присосок и способом накопления. Способ обдува и гелиевых чехлов в основном применяется для испытаний вакуумных систем с собственными средствами откачки и элементов вакуумных систем. В этом случае на наружную поверхность изделия подается пробный газ. Во внутренней полости изделия создается разрежение и фиксируется проникновение в нее пробного газа.

Способы щупа, барокамеры и вакуумных присосок применяются для испытаний изделий, в которых нельзя или нецелесообразно создавать разрежение. В этом случае в изделии создается избыточное давление пробного газа и фиксируется проникновение его на наружную поверхность. Способом вакуумных присосок, кроме того, могут быть испытаны изделия без замкнутой оболочки, например, листы металла на целостность. Способ накопления может явиться разновидностью любого из перечисленных способов, за исключением, пожалуй, способа щупа.

В вакуумной технике наибольшее распространение получили **способы обдува и гелиевых чехлов**, причем первый обычно применяется для поиска течей, второй – для контроля герметичности. В обоих случаях вакуумная система течеискателя соединяется с вакуумной системой испытываемой установки. Рекомендуется подключать течеискатель в форвакуумную линию испытываемой установки, как показано на рис. 15.3. Такое подключение обеспечивает максимальную чувствительность испытаний. Подсоединять вакуумную систему течеискателя к испытываемой установке лучше всего гибким металлическим шлангом, при отсутствии такового – резиновым вакуумным шлангом.

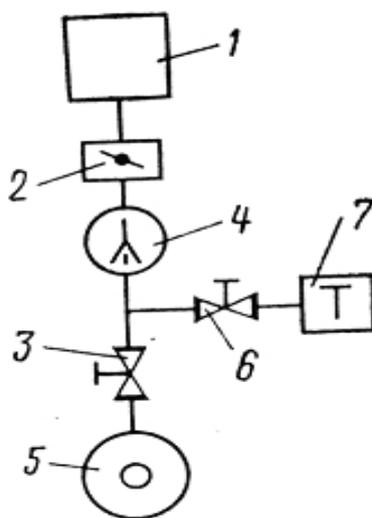


Рис. 15.3. Схема присоединения течеискателя при испытаниях вакуумных систем способом обдува и гелиевых камер (чехлов):

- 1 – рабочая камера установки; 2 – затвор; 3 – клапан; 4 – высоковакуумный насос;
5 – форвакуумный насос; 6 – дросселирующий клапан; 7 – течеискатель

Испытания проводятся в следующей последовательности. В испытываемой установке создают рабочее давление. При создании разрежения в вакуумной системе трубопровод, соединяющий вакуумную установку с течеискателем, также должен быть откачан. Затем открывают клапан 6 и устанавливают рабочее давление в масс-спектрометрической камере течеискателя. Если клапан 6 полностью открыт и показания магниторазрядного вакуумметра течеискателя меньше 350 мкА, закрывают клапан 3, направляя весь поток газа, откачиваемого высоковакуумным насосом установки, через вакуумную систему течеискателя. Включают катод масс-спектрометрической камеры течеискателя. Далее производят обдув гелием, начиная

с той точки рабочей камеры установки, которая наиболее удалена по схеме вакуумной системы испытуемой установки от низковакуумного насоса и находится выше других в пространстве, постепенно приближаясь к низковакуумному насосу как по схеме вакуумной системы, так и по расположению в пространстве обследуемых участков оболочки вакуумной системы.

Обдув производят с помощью обдувателя, входящего в комплект течеискателя, присоединяемого к баллону с гелием. На практике не всегда имеется возможность разместить поблизости баллон с гелием. Тогда удобно пользоваться медицинской кислородной подушкой, заполненной гелием. При отсутствии обдувателя в качестве такового может быть использована игла от медицинского шприца или тонкая, сплюснутая на конце металлическая трубка.

Проводя испытания разветвленных вакуумных систем с большой длиной соединительных трубопроводов способом обдува, необходимо учитывать временные характеристики течеискателя и высоковакуумного насоса испытуемой установки. Начиная с момента поднесения струи гелия к течи, содержание его в рабочей камере испытуемой установки увеличивается. Общее количество гелия в высоковакуумной части испытуемой установки определится разностью потоков гелия, поступающего через течь и удаляемого в результате откачки.

Для установления максимальной концентрации пробного газа в датчике необходимо некоторое время. При постоянном перемещении щупа по поверхности поступление пробного газа в датчик начнет уменьшаться в результате удаления его от течи, прежде чем будет достигнута максимальная концентрация. Характер изменения во времени концентрации пробного газа в датчике показан на рис. 15.4.

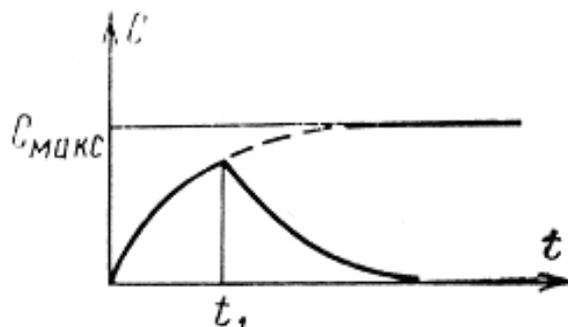


Рис. 15.4. Изменение во времени концентрации пробного газа

Момент времени t_1 соответствует прохождению щупа над течью. Таким образом, реакция течеискателя и соответственно чувствительность испытаний зависят от степени приближения щупа к контролируемой поверхности и от скорости перемещения щупа. Максимальная чувствительность испытаний, равная чувствительности течеискателя, достигается в том случае, если остановить щуп над течью.

Рекомендуемая скорость перемещения щупа 1 см/с. Щуп должен находиться на расстоянии 0,5 мм от контролируемой поверхности для большинства реальных условий испытаний. Снижение скорости перемещения неоправданно увеличит длительность испытаний; увеличение скорости перемещения обдувателя может привести к пропуску малых течей. Способ щупа в масс-спектрометрическом методе, так же как и способ обдува, применяется для поиска течей. Для осуществления этого способа к тече-искателю через вакуумный шланг присоединяется щуп. Устанавливается такой поток газа через щуп, чтобы в масс-спектрометрической камере течеискателя поддерживалось рабочее давление. Испытания проводятся так же, как и испытания с применением галогенного течеискателя.

Способ барокамеры отличается тем, что изделие, заполненное пробным газом, помещается в барокамеру, в которой создается разрежение и к которой подключается течеискатель. Этим способом осуществляются операции контроля герметичности, позволяющие численно охарактеризовать суммарное истечение пробного газа из изделия.

Способ вакуумных присосок нашел широкое распространение в вакуумной технике для контроля герметичности элементов вакуумных систем в процессе их изготовления. Испытания способом вакуумных присосок проводятся обязательно со вспомогательным низковакуумным насосом, который подсоединяется через клапан 7 (см. рис. 15.1). Через клапан 8 гибким шлангом присоединяется к течеискателю вакуумная присоска. Конструкция вакуумных присосок бывает самая различная в зависимости от формы проверяемых поверхностей. Обычно для проверки плоскости – это металлический лист необходимого контура с приклеенным к нему по контуру резиновым уплотнителем достаточно большой высоты. Наибольшее распространение получили присоски в виде металлического стакана (рис. 15.5).

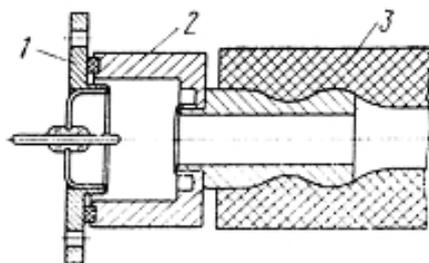


Рис. 15.5. Контроль герметичности электрического ввода с помощью присоски:

1 – проверяемое изделие; 2 – вакуумная присоска; 3 – вакуумный шланг

Испытания проводятся в следующей последовательности. Испытуемое изделие слегка прижимают к уплотнителю присоски. Вспомогательным насосом производят откачку внутренней полости присоски. При этом атмосферное давление прижимает испытуемое изделие к присоске, обеспечивая надежное уплотнение. Плавно открывают дросселирующий клапан течеискателя. Закрывают клапан, соединяющий присоску со вспомогательным насосом. Проводят испытания.

В зависимости от цели испытания – поиск течи или контроль герметичности – обдувают испытуемое изделие гелием или создают вокруг него гелиевую камеру.

Часто для увеличения надежности создания уплотнения поверхности соприкосновения испытуемого изделия и уплотнителя присоски смачивают вакуумным маслом или спиртом. Чрезмерное смачивание вредно, так как случайно может быть перекрыта течь. Смачивать лучше только торцевую поверхность уплотнителя.

Для осуществления **способа накопления** к клапану 7 (см. рис. 15.1) присоединяют вспомогательный насос с относительно большой быстротой действия по воздуху и малой быстротой действия по гелию, например, цеолитовый насос. Дросселирующий клапан 6 течеискателя заменяют клапаном с малым временем открытия и закрытия, например, клапаном с эксцентриковым приводом. Эксцентриковый клапан можно ставить и последовательно с клапаном в течеискателе. Испытуемое изделие присоединяют непосредственно к клапану 8 или через короткий трубопровод. В соединительной коммуникации между испытуемым изделием, вспомогательным насосом и течеискателем устанавливают средства измерения давления.

Способ накопления обычно совмещают со **способом гелиевых камер**. Испытания проводят в следующей последовательности. В крупносерийном производстве испытуемое изделие помещают в герметичную камеру. В лабораторной практике и в единичном производстве вокруг присоединенного к течеискателю испытуемого изделия создают чехол, например, из полиэтилена или другого аналогичного материала. Край чехла дальше проверяемой поверхности закрепляют липкой полихлорвиниловой лентой. Затем включают течеискатель (течеискатель может быть включен заранее). При закрытом эксцентриковом клапане откачивают испытуемое изделие до давления не выше рабочего давления в масс-спектро-

метрической камере течеискателя. Открывают эксцентриковый клапан. Фиксируют фоновый отсчет течеискателя. Закрывают эксцентриковый клапан. В камеру (или чехол) под незначительным избыточным давлением подают пробный газ – гелий. Фиксируют время его подачи. По истечении времени накопления открывают эксцентриковый клапан и фиксируют максимальный отсчет течеискателя. По разности показаний течеискателя оценивают величину натекания гелия в изделие.

Перед испытаниями производят градуировку течеискателя. Для этого на изделии устанавливают калиброванную гелиевую течь. Последовательность операций при градуировке аналогична последовательности при испытаниях. Как и при испытаниях, фоновым отсчетом являются установившиеся показания течеискателя при открытом эксцентриковом клапане. Применением способа накопления можно в десятки и сотни раз повысить чувствительность испытаний, проводимых с применением масс-спектрометрического течеискателя методами обдува и гелиевой камеры.

Контрольные вопросы:

1. Что понимают под течеисканием?
2. Какие существуют методы течеискания?
3. Какие приборы используются для методов контроля?

16. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ

На сегодняшний день существует множество электрических методов неразрушающего контроля:

Электростатический порошковый метод контроля - метод электрического НК, основанный на регистрации электростатических полей рассеяния с использованием в качестве индикатора наэлектризованного порошка термоэлектрический метод;

Термоэлектрический метод контроля - метод электрического НК, основанный на регистрации величины термоЭДС, возникающей при прямом контакте нагретого образца известного материала с объектом контроля;

Электрискровой метод контроля - метод электрического НК, основанный на регистрации возникновения электрического пробоя и (или) изменений его параметров в окружающей объект контроля среде или на его участке

Трибоэлектрический метод - метод дефектоскопии, основанный на возникновении электрических зарядов при трении разнородных материалов;

Метод высокочастотной фотографии (метод Кирлиана). В настоящее время под термином эффект Кирлиан понимается визуальное наблюдение или регистрация на фотоматериале свечения газового разряда, возникающего вблизи поверхности объекта при помещении его в электрическое поле высокой напряженности. Технические применения эффекта Кирлиана для неразрушающего контроля целостности изделий и диэлектрических покрытий пока также носят чисто демонстрационный характер. Данный метод очень прихотлив к атмосферным условиям и, что наиболее существенно, достаточно агрессивен по отношению к поверхности и малочувствителен к скрытым объемным дефектам.

Метод контактной разности потенциалов - метод электрического НК, основанный на регистрации контактной разности потенциалов на участках объекта контроля, через который пропускается электрический ток.

Электропараметрический метод контроля - метод электрического НК, основанный на регистрации электрических характеристик объекта контроля

Метод рекомбинационного излучения - метод электрического НК, основанный на регистрации рекомбинационного излучения р - п переходов в полупроводниковых изделиях.

Метод экзоэлектронной эмиссии - метод электрического НК, основанный на регистрации экзоэлектронов, эмитированных поверхностью контролируемого объекта при приложении к нему внешнего стимулирующей воздействию.

Электропотенциальный метод - метод основан на регистрации распределения потенциалов по поверхности объекта контроля. Таким методом можно воспользоваться например, для измерения глубины поверхностных трещин.

Электрорезистивный метод - метод применяется для комплексного диагностирования объектов (например, подшипников качения), и основан на использовании нормированного интегрального времени электрического микроконтактирования в объекте в качестве диагностического параметра. Метод обеспечивает возможность поиска локальных дефектов рабочих поверхностей, контроль реальной макрогеометрии рабочих поверхностей и комплексную оценку состояния объекта как системы «объект –режимы и условия работы».

Емкостный метод - метод базируется на регистрации электрической ёмкости и/или тангенса угла диэлектрических потерь первичного преобразователя в виде электрического конденсатора, в состав которого входит объект контроля (ОК) или его часть. Если ОК диэлектрический (пластик, композит, бумага и т.д), то электрическое поле в нём создаётся емкостным преобразователем (конденсатором), обкладки которого подключают к генератору переменного напряжения. Если же ОК электропроводящий, например стенка трубопровода, или содержит диэлектрические слои на электропроводящей основе, то одной из обкладок емкостного преобразователя может служить сам ОК либо его электропроводящая основа. Информативные параметры емкостного преобразователя - электрическая ёмкость C и тангенс угла диэлектрических потерь tgd . С ними коррелируют различные физико-механические, геометрические свойства и параметры ОК: относительная диэлектрическая проницаемость ϵ ; размеры и форма; плотность, радиопрозрачность; содержание компонентов в смесях; влажность; степень полимеризации и старения полимерных материалов; наличие и размеры нарушений сплошности (пустот, включений); прочность; предел пластичности и т.д. Степень корреляции C и tgd с параметрами ОК различна. Так, ёмкость сильно зависит от ϵ и геометрических размеров. Значение тангенса диэлектрических потерь в значительной степени определяется составом и влажностью ОК, степенью полимеризации его материала, а размеры ОК и состояние его поверхности

слабо влияют на этот параметр. Конструкция электремкостного преобразователя (ЭП) зависит от объекта контроля и в первую очередь от агрегатного состояния исследуемой среды (твёрдая, жидкая, газообразная). Наиболее сложную задачу представляет контроль твёрдых материалов, так как жидкие и газообразные среды могут принимать любую форму, и конструкцию ЭП в данных случаях выбирают на основании условий обеспечения наибольшей точности измерения, разрешающей способности метода, характера взаимодействия среды с электродами и т.п. В случае контроля твёрдых сплошных материалов конструкцию ЭП определяет в первую очередь условие неразрушающего контроля, часто при одностороннем доступе к поверхности изделия. Для решения такого рода задач применяют накладные ЭП, электроды которых расположены на одной стороне поверхности объекта контроля или на поверхности контролируемого объекта, или в непосредственной близости от него. При этом электроды ЭП находятся в одной плоскости или криволинейной поверхности. С целью обеспечения дистанционного контроля часто некоторые элементы измерительной схемы располагают в выносном блоке преобразователя. Накладные ЭП характеризуются большой неоднородностью создаваемого ими электростатического поля (следовательно и максимальной чувствительностью) непосредственно у поверхности электродов и быстрым ослаблением поля по мере удаления от электродов. В связи с этим использование накладных ЭП обычно требует осуществления мер по компенсации влияния контактных условий (шероховатость поверхности, её загрязнение и пр.) Для контроля размеров поперечного сечения линейно протяжённых изделий (например, труб, проволоки, проката, полосы, фольги, прутков и пр.) применяют проходные ЭП. Контроль твёрдых дисперсных (сыпучих) материалов допускает большую свободу в выборе конструкции ЭП, так как контролируемая среда может принять любую форму в соответствии с применяемой конструкцией ЭП.

Контрольные вопросы:

1. Перечислите существующие электрические методы контроля?
2. В чем физическая сущность электрических методов контроля?
3. Какие приборы используются для методов контроля?

17. ДИАГНОСТИКА МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

17.1. Анализ методов внутритрубного диагностического контроля линейной части магистральных нефтепроводов

Для диагностирования технического состояния линейной части МН используются физические методы неразрушающего контроля. Неразрушающий контроль с применением приборов-дефектоскопов основан на получении информации в виде электрических, световых, звуковых и других сигналов о качестве проверяемых объектов при их взаимодействии с физическими полями (электрическими, магнитными, акустическими и др.) и (или) веществами.

В зависимости от принципа работы средств контроля методы НК подразделяются на акустические, ультразвуковые, капиллярные, магнитные, оптические, радиационные, токовихревые (электромагнитные) и др. (тепловые, радиоволновые, электрические, методы контроля течеисканием).

Мировой опыт обследования магистральных трубопроводов (диагностические фирмы «Бритиш Газ», «Пайптроникс», «Тьюбо-скоп», «Розен», «Ветко», ОАО ЦТД «Диаскан») показывает, что наиболее перспективными методами неразрушающего контроля этих объектов являются ультразвуковой и магнитный. Достоинства этих методов нашли практическую реализацию в виде высокопроизводительных автоматизированных («интеллектуальных») внутритрубных инспекционных снарядов (ВИС) ультразвукового и магнитного принципа действия.

Анализ развития средств внутритрубной диагностики трубопроводов показал, что в настоящее время совершенствование внутритрубных приборов ведется в целях получения более полной информации о состоянии трубопроводов по следующим основным направлениям:

- повышение вероятности обнаружения дефектов;
- повышение достоверности определения параметров дефектов;
- повышение точности определения местонахождения дефектов;
- получение данных о пространственном положении трубопровода;
- улучшение эксплуатационных характеристик диагностических приборов в целях увеличения длины эффективного пробега и возможности их применения без снижения производительности трубопровода.

Для этих целей ведущими фирмами-изготовителями проводятся исследования по созданию:

- комбинированных снарядов, использующих одновременно несколько физических принципов обнаружения дефектов;
- модификаций датчиков и конструкций их носителей;
- новых типов датчиков, использующих нетрадиционные принципы;
- навигационных блоков, взаимодействующих с глобальными системами позиционирования;
- источников бортовой энергии повышенной емкости;
- усовершенствованных программ интерпретации данных внутритрубной диагностики и методов оценки степени опасности обнаруженных дефектов.

В настоящее время ведущими зарубежными диагностическими фирмами в области разработки средств внутритрубной диагностики и предоставления диагностических услуг на мировом рынке используются следующие типы ВИС:

- снаряды-профилемеры для измерения внутреннего диаметра трубы и обнаружения дефектов геометрии трубопровода (вмятины, гофры, овальности), а также для обнаружения и измерения поворотов трубопровода:
 - электронно-механический прибор фирмы Pipetronix-PII;
 - электронный вихретоковый профилемер с высокой разрешающей способностью фирмы Rosen для бесконтактных измерений;
- ультразвуковые снаряды-дефектоскопы Ультраскан-WM (Pipetronix) для обнаружения и измерения потерь металла, расслоений и зон неметаллических включений в трубопроводах;
- магнитные снаряды высокого разрешения.

Для обнаружения трещиноподобных дефектов в поперечных сварных швах и потерь металла применяются:

- основанные на принципе рассеяния магнитного потока дефектоскопы (MFL фирм РП, Rosen и Tuboscope-Vetco);
- использующие вихретоковые датчики (Tuboscope-Vetco);
- магнитный снаряд серии ТрансСкан TFI фирмы РП – внутритрубный дефектоскоп новой конструкции, предназначенный для обнаружения продольно ориентированных трещиноподобных дефектов сварных швов и основного металла труб, а также дефектов потери металла стенки трубы;
- ультразвуковые снаряды для обнаружения трещиноподобных дефектов:

– ультразвуковой снаряд Ультраскан CD фирмы Pipetronix – для обнаружения и измерения в трубопроводах продольных и поперечных (в зависимости от типа установленного носителя датчиков) трещин и трещиноподобных дефектов;

– ультразвуковой снаряд серии EW («упругая волна») фирмы РП. Предназначен для обнаружения продольных трещиноподобных дефектов. Ультразвуковые датчики находятся внутри колес, наполненных жидкостью. За счет эластичного материала шин колес обеспечивается акустический контакт датчиков с трубой. Благодаря такой конструкции дефектоскоп может обследовать газопроводы без использования жидкостной пробки. Снаряд позволяет также обнаруживать места с отслоившейся внешней изоляцией, а также определять тип изоляционного покрытия (битумное, эпоксидное, пленочное);

- внутритрубные навигационные приборы. Предназначены для определения координат трубопровода. Фирмами РП, Tuboscope-Vetco и Rosen разработаны системы, устанавливаемые на магнитные дефектоскопы и профилемеры. Такой метод в сочетании с привязкой маркеров системой глобального позиционирования GPS к географическим координатам позволяет совмещать данные внутритрубного обследования с картой местности и аэрофотосъемкой;

- приборы для анализа окружения трубопровода. Фирма Rosen разработала внутритрубный магнитный многоканальный прибор для анализа наличия грунта под трубопроводом, обнаруживающий провисания трубопровода и аномалии бетонных пригрузов на подводных трубопроводах;

- приборы для анализа отложений в трубопроводе. Фирма Rosen разработала внутритрубный магнитный многоканальный прибор для обнаружения отложений в трубе. Он предназначен для обнаружения карбоната кальция, скоплений грязи, определения размеров этих отложений, а также для измерения толщины внутренней изоляции трубы.

17.2. Четырехуровневая система диагностирования

Мировой и отечественный опыт диагностирования магистральных трубопроводов показали, что в настоящее время не существует универсального снаряда-дефектоскопа, способного выявлять все основные типы дефектов, которые могут приводить к авариям, отказам линейной части магистральных трубопроводов. Как было показано выше, это дефекты четырех типов, проявляющие себя на разных стадиях жизненного цикла тру-

бопровода: дефекты геометрии трубы (вмятины, гофры), дефекты потери металла коррозионного и механического происхождения, а также дефекты кольцевых (монтажных) и продольных (заводских) сварных швов.

Для обеспечения безопасности трубопроводной системы в целом, состоящей из магистральных нефтепроводов различных «возрастов», условий прокладки и уровней нагруженности, требуется обязательное выявление всех четырех перечисленных типов дефектов. Следовательно, для получения полной информации о техническом состоянии всей системы нефтепроводов требуется использование такого комплекса дефектоскопов, который обеспечивает комплексный четырехуровневый диагностический контроль с использованием приборов-дефектоскопов, основанных на различных физических принципах неразрушающего контроля. Проведение такого контроля позволяет выявлять потенциально опасные дефекты всех типов, которые могут являться причинами аварий на трубопроводах.

Поэтому ОАО ЦТД «Диаскан» провел диагностический контроль магистральных трубопроводов с использованием следующего оборудования (рис. 17.1):

- приборов-профилемеров (I уровень);
- ультразвуковых дефектоскопов-толщиномеров (II уровень);
- магнитных дефектоскопов высокого разрешения (III уровень);
- ультразвуковых дефектоскопов для определения продольных трещин (IV уровень);
- полного спектра вспомогательного оборудования (скребков стандартных и специальных – щеточных), комплектов локаторно-маркерных систем, компьютерных систем обработки диагностической информации, а также другого сопутствующего оборудования и приборов.

В связи с постоянным совершенствованием технологий, элементной базы, минимизацией размеров электронной части внутритрубных приборов появляется возможность для наращивания количества датчиков. Соответственно, в перспективе принципиально возможно создание единого диагностического комплекса, обеспечивающего выявление дефектов, которые в настоящее время обнаруживаются с помощью четырех отдельных типов ВИС.

Создание системы четырехуровневого диагностического контроля с применением приборов высокого разрешения дает возможность реализовать принципиальные преимущества внутритрубной диагностики:

- исключить дорогостоящие периодические гидроиспытания повышенным давлением;



Рис. 17.1. Схема комплексного четырехуровневого диагностического контроля магистральных трубопроводов

- проводить обследование состояния нефтепровода без нарушения режима его нормальной эксплуатации;
- обнаруживать и определять геометрические параметры не только критических, но и потенциально опасных дефектов;
- количественно оценивать техническое состояние трубопровода на основе определения степени опасности дефектов по результатам расчетов дефектосодержащих участков на прочность и долговечность, определять очередность ремонта;

– создать безопасные, управляемые условия эксплуатации нефтепровода путем своевременного проведения предупреждающих воздействий на основе проведения диагностирования с обоснованной периодичностью, при которой дефекты не получают развития до критических размеров.

По результатам четырехуровневого диагностирования эксплуатационные и ремонтные службы получают информацию о техническом состоянии линейной части трубопровода, т. е. о том, способен ли трубопровод работать в проектом режиме, должен ли эксплуатироваться при пониженных параметрах или его следует вывести в ремонт – и планируют ремонтные затраты.

Как отмечалось выше, каждый из известных методов неразрушающего контроля обладает ограниченными возможностями как по обнаружению дефектов, так и по точности их измерения. Это подтверждает мировой и отечественный опыт проведения внутритрубной диагностики: он показывает, что каждый тип ВИС предназначен для выявления определенного типа дефектов, несмотря на то, что функциональные возможности приборов разных типов в обнаружении дефектов какого-то типа перекрываются (например, дефекты потери металла обнаруживают ультразвуковые и магнитные приборы).

Рассмотрим состав дефектов, выявляемых эксплуатируемыми в АК «Транснефть» ультразвуковыми приборами-дефектоскопами WM (II уровень контроля), магнитными приборами высокого разрешения MFL (III уровень) и ультразвуковыми приборами CD для обнаружения продольных трещин (IV уровень).

Дефектоскоп «Ультраскан WM» проводит измерения глубины дефектов потери металла с погрешностью до $\pm 0,5$ мм. Магнитный прибор MFL с вероятностью 95 % обеспечивает измерение размеров дефектов при уровне погрешности $\pm 0,22 t$ (где t – толщина стенки трубопровода).

Приборы «Ультраскан WM» снабжены радиально расположенными ультразвуковыми датчиками и обеспечивают прямое измерение толщины стенки трубы. Это позволяет прибору уверенно обнаруживать и измерять дефекты, элементы рельефа которых имеют площадки, параллельные стенке трубопровода, – расслоения, включения, протяженные коррозионные дефекты. Применение магнитных приборов основано на использовании принципа рассеяния магнитного потока, поэтому измерения дефектов этими приборами носят качественный характер, т. к. осуществляются по линиям искривления магнитного поля.

Был выполнен сравнительный анализ возможностей снарядов-дефектоскопов различных типов (ультразвуковых WM и магнитных MFL) по обнаружению дефектов потери металла. Анализ совмещенных данных, полученных снарядами двух типов при обследовании одного и того же участка нефтепровода, показал, что при отношении глубины дефекта потери металла к его длине менее 0,016 – 0,028 магнитный дефектоскоп занижает длину дефекта. На протяженных дефектах потери металла с небольшой глубиной рассеяние магнитного потока не достигает порогового значения, при котором происходит регистрация сигналов от датчиков, установленных между полюсами магнитов, намагничивающих стенку трубопровода. Поэтому дефекты потери металла с отношением глубины к длине менее 0,0025 – 0,005 магнитным дефектоскопом могут быть не обнаружены и, следовательно, не измерены.

Приведенные данные показывают, что вследствие более низкой точности магнитного дефектоскопа его применение для контроля дефектов потери металла, особенно протяженных коррозионных дефектов, недостаточно эффективно. Поэтому основной задачей магнитного дефектоскопа типа MFL должен быть контроль дефектов в поперечных сварных швах типа трещин, непроваров, несплавлений, шлаковых включений, пор, смещений кромок, т.е. обеспечение III уровня контроля.

Рассмотрим возможности ультразвукового и магнитного методов контроля для определения дефектов других типов.

Ультразвуковой дефектоскоп типа «Ультраскан WM» не может выявлять острые дефекты, расположенные параллельно распространению ультразвуковых импульсов. Если дефект или какая-либо особенность имеют наклонные площадки, ультразвуковые импульсы, попадая на эти площадки, отклоняются в сторону, и отраженный сигнал не возвращается на датчик. Происходит так называемая потеря сигнала, фиксируемая регистрирующей системой снаряда.

Эффект потери сигнала возможен для дефектов типа питтинговой коррозии, боковые площадки которых могут располагаться под значительными углами к образующей цилиндрической поверхности трубопровода. Поэтому питтинговая коррозия не всегда может быть обнаружена ультразвуковым снарядом. В ряде случаев питтинговую коррозию по отраженному сигналу не всегда можно отличить от дефекта типа расслоения или включения.

При магнитном контроле не возникает проблемы определения различий между питтинговой коррозией и расслоениями (включениями) не-

больших размеров, т. к. магнитный поток не реагирует на расслоения, неметаллические включения, параллельные стенке трубы. По этой же причине магнитный снаряд способен обнаруживать дефекты потери металла на наружной поверхности, экранированные расслоениями, что недоступно для ультразвукового снаряда. Однако магнитный снаряд не может отличить глубокие питтинги от мест локального изменения магнитных свойств материала, вызванных зонами локального нагрева трубы (например, сварочной дугой).

Достаточно распространенными дефектами отечественных трубопроводов являются вмятины и гофры. В связи с этим представляет интерес реакция каждого из снарядов на эти дефекты. Ультразвуковой снаряд WM позволяет обнаруживать вмятины и гофры по характерному очертанию зоны локальной потери сигналов на наклонных площадках этих дефектов. Однако потеря сигнала препятствует возможности обнаружения дефектов механического происхождения (рисок, выбоин), которые могут находиться на дне этих вмятин, особенно если вмятины имеют резко очерченный профиль. Наличие или отсутствие рисков на дне вмятин может быть установлено при проведении дополнительного дефектоскопического контроля.

Магнитный снаряд способен определять наличие вмятин и гофров только с резко очерченным профилем и в случае, когда они расположены вне зоны поперечного сварного шва. Вмятины и гофры с плавными очертаниями магнитный снаряд не обнаруживает.

Расслоения с выходом на поверхность по характерным признакам этих дефектов обнаруживают снаряды обоих типов. Но измерение протяженности, глубины залегания таких наклонных расслоений осуществляет только ультразвуковой дефектоскоп, что дает возможность оценивать опасность этого вида дефектов.

Для таких опасных дефектов, как протяженные продольные риски, возникновение которых обычно происходит под воздействием рабочих органов землеройных машин, магнитный снаряд отчетливо фиксирует положения начала и конца риски. Ультразвуковой дефектоскоп обнаруживает продольные риски шириной более 8 мм. Наклонные к оси трубы риски, царапины обнаруживают оба снаряда.

Ультразвуковой и магнитный снаряды обеспечивают обнаружение всех основных видов трубной арматуры: задвижек, вантузов тройников, а также приварных муфт. Магнитный снаряд способен обнаруживать кроме

этого кожухи, неприварные муфты и другие находящиеся вблизи трубопровода предметы, изготовленные из ферромагнитных материалов.

В систематизированном виде возможности ультразвуковых снарядов WM и магнитных дефектоскопов MFL по обнаружению дефектов представлены в таблице 17.1, из которой следует, что ультразвуковые снаряды способны выявлять более широкий состав дефектов, чем магнитные.

Таблица 17.1

Сравнение возможностей ультразвуковых и магнитных дефектоскопов по обнаружению особенностей (дефектов) трубопровода

Наименование особенности (дефекта)	Обнаружение ультразвуковым дефектоскопом WM	Обнаружение магнитным дефектоскопом MFL
1	2	3
Дефекты геометрии трубы		
Вмятина	+	+*
Гофр	+	+*
Овальность	–	–
Внутрстенные дефекты		
Расслоение	+	–
Расслоение с выходом на поверхность трубы, в том числе, плены, закаты	+	+
Наклонное расслоение	+	–
Расслоение, примыкающее к сварным швам	+	–
Включение	+	–
Потери металла (внешние и внутренние)		
Общая коррозия (длина и ширина коррозии больше трех номинальных толщин стенки трубы)	+	+
Протяженные потери металла с гладким профилем	+	–
Питтинговая коррозия (длина и ширина коррозии меньше трех номинальных толщин стенки трубы)	+ (затруднена интерпретация дефекта)	+
Потери металла на вмятинах, гофрах	+ (на вмятинах с плоской вершиной)	+
Риска, расположенная	+	–

вдоль оси трубы		
Риска, расположенная наклонно к оси трубы	+	+
Дефекты сварных швов (трещины, непровары, газовые поры, смещения кромок, наплывы)		
Поперечные швы	–	+
Продольные швы	–	–

Окончание табл. 17.1

1	2	3
Особенности, связанные с ремонтом трубопровода		
Приварная муфта	+	+
Неприварная муфта	–	+
Заплата	+	+
Трубная арматура		
Задвижка	+	+
Тройник (отвод)	+	+
Вантуз	+	+
Сварное присоединение	+	+
Кожух	–	+
* Вмятина (гофр) может быть не обнаружена в районе поперечного сварного шва или если она имеет гладкий профиль		

Оценивая возможности используемых ультразвуковых (типа WM) и магнитных (типа MFL) снарядов можно заключить, что применение внутритрубных дефектоскопов какого-либо одного типа не исключает необходимости и целесообразности использования другого, даже если их функциональные возможности в определении дефектов какого-то типа перекрываются.

Если ультразвуковой снаряд не может четко различить питтинговую коррозию от локальных включений в металле, а магнитный – питтинговую коррозию от локальных зон термического воздействия, то совместное применение этих двух снарядов позволит произвести точную идентификацию указанных дефектов.

В качестве области эффективного применения магнитного снаряда следует рассматривать определение поперечных трещин и дефектов в кольцевых сварных швах, т.е. реализацию III уровня контроля, а также определение питтинговой коррозии (при совмещении результатов инспекции снарядами обоих типов).

Для обнаружения продольных трещин в основном металле стенки трубы и продольных сварных швах, на внутренней и внешней поверхности трубы предназначен ультразвуковой дефектоскоп CD (IV уровень контроля).

На основании изложенных выше данных можно заключить, что проведение контроля трубопроводов снарядами какого-либо одного типа не обеспечивает выявление всех дефектов, представляющих опасность для целостности нефтепроводов. Необходимая полнота контроля трубопроводов и обеспечение их надежной и безопасной эксплуатации могут быть достигнуты только при реализации четырехуровневой системы диагностирования.

Контрольные вопросы:

1. Какие существуют методы внутритрубной диагностики?
2. Какие приборы используются для внутритрубной диагностики?
3. Почему наиболее широко распространена четырехуровневая система диагностирования? В чем её преимущества?

РАЗДЕЛ 3. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ

18. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ

В задачах диагностики состояние системы часто описывается с помощью комплекса признаков

$$K = (k_1, k_2, k_3, \dots, k_v), \quad (18.1)$$

где k_j – признак, имеющий m_j разрядов.

В общем случае каждый экземпляр системы соответствует некоторой реализации комплекса признаков

$$K = (k_1^*, k_2^*, k_3^*, \dots, k_v^*) \quad (18.2)$$

Во многих алгоритмах распознавания удобно характеризовать системы параметрами x_j , образующими v -мерный вектор или точку в v -мерном пространстве

$$X = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_v). \quad (18.3)$$

Отсюда видно, что принципиальных отличий при описании системы с помощью признаков или параметров нет.

Существует два основных подхода к задаче распознавания: вероятностный и детерминистский. Постановка задачи при вероятностных методах такова. Имеется система, которая находится в одном из n случайных состояний D_i . Известна совокупность признаков (параметров), каждый из которых с определенной вероятностью характеризует состояние системы. Требуется построить решающее правило, с помощью которого диагностируемая совокупность признаков была бы отнесена к одному из возможных состояний. Желательно также оценить достоверность решения и степень риска ошибочного решения. При детерминистских методах распознавания удобно формулировать задачу на геометрическом языке. Если система характеризуется v -мерным вектором X , то любое состояние системы представляет собой точку в v -мерном пространстве параметров (признаков). Задача здесь сводится к разделению пространства параметров на области диагнозов. При детерминистском подходе области диагнозов обычно считаются непересекающимися, т.е. вероятность одного диагноза равна единице, вероятность других равна нулю.

Контрольные вопросы:

1. Сформулируйте задачи технической диагностики?
2. Как описывается состояние системы?

19. СТАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ РАСПОЗНАВАНИЯ

Основное преимущество статических методов распознавания состоит в возможности одновременного учета признаков различной физической природы, т. к. они характеризуются безразмерными величинами – вероятностями их появления при различных состояниях системы.

19.1. Метод Байесса

Среди методов ТД выделяется метод, основанный на обобщенной формуле Байесса, который занимает особое место благодаря простоте и эффективности.

Основные недостатки: большой объем предварительной информации, учитывание редко встречающихся диагнозов и др.

Основы метода

Метод основан на простой формуле Байесса. Если имеется диагноз D_i и простой признак k_j , встречающийся при этом диагнозе, то вероятность совместного появления событий

$$P(D_i k_j) = P(D_i) \cdot P(k_j / D_i) = P(k_j) \cdot P(D_i / k_j), \quad (19.1)$$

Из этого равенства формула Байесса

$$P(D_i / k_j) = P(D_i) \cdot \frac{P(k_j / D_i)}{P(k_j)}, \quad (19.2)$$

где $P(D_i)$ – вероятность диагноза D_i , определяемая по статистическим данным (априорная вероятность диагноза). Так, если предварительно обследовано N объектов и N_j имели состояние D_i , то

$$P(D_i) = N_i / N; \quad (19.3)$$

$P(k_j / D_i)$ – вероятность появления признака k_j у объектов с состоянием D_i .

Если среди N_i объектов, имеющих диагноз D_i , у N_{ij} появился признак k_j , то

$$P(k_j / D_i) = \frac{N_{ij}}{N_i}; \quad (19.4)$$

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

$$P(k_j) = \frac{N_j}{N}, \quad (19.5)$$

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

Обобщенная формула Байесса

Эта формула относится к случаю, когда обследование проводится по комплексу признаков K , включающему признаки $k_1, k_2, k_3, \dots, k_v$. Каждый из признаков k_j имеет m_j разрядов $(k_{j1}, k_{j2}, k_{j3}, k_{js}, \dots, k_{jmj})$. В результате обследования становится известной реализация признака и всего комплекса K^* (* означает конкретное значение признака)

$$k_j^* = k_{js}. \quad (19.6)$$

Формула Байесса для комплекса признаков

$$P(D_i/K^*) = P(D_i) \cdot P(K^*/D_i) / P(K^*), \quad (19.7)$$

где $P(D_i/K^*)$ – вероятность диагноза D_i , после того как стали известны результаты обследования по комплексу признаков K ; $P(D_i)$ – предварительная вероятность диагноза D_i (по предшествующей статистике). Здесь предполагается, что система находится только в одном из состояний

$$\sum_{s=1}^n P(D_s) = 1. \quad (19.8)$$

Если комплекс признаков состоит из v признаков, то

$$P(K^*/D_i) = P(k_1^*/D_i) \cdot P(k_2^*/k_1^*D_i) \dots P(k_v^*/k_1^* \cdot k_{v-1}^*D_i). \quad (19.9)$$

Для диагностически независимых признаков

$$P(K^*/D_i) = P(k_1^*/D_i) \cdot P(k_2^*/D_i) \dots P(k_v^*/D_i). \quad (19.10)$$

Вероятность появления комплекса признаков K^*

$$P(K^*) = \sum P(D_s) \cdot P(K^*/D_s). \quad (19.11)$$

Обобщенная формула Байесса может быть записана в виде

$$P(K^*) = \frac{P(D_i) \cdot P(K^*/D_i)}{\sum_{S=1}^n P(D_S) P(K^*/D_S)}, \quad (19.12)$$

где $P(K^*/D_i)$ определяется по (19.9) или (19.10). Из соотношения вытекает

$$\sum_{i=1}^n P(D_i/K^*) = 1. \quad (19.13)$$

Следует отметить, что знаменатель формулы Байесса одинаков для всех диагнозов. Это позволяет определить сначала вероятность совместного появления i -того диапазона и данной реализации

$$P(D_i / K^*) = P(D_i) \cdot P(K^* / D_i), \quad (19.14)$$

и затем апостериорную вероятность диагноза

$$P(D_i / K^*) = \frac{P(D_i K^*)}{\sum_{S=1}^n P(D_S K^*)}. \quad (19.15)$$

Если реализация некоторого комплекса признаков K^* является детерминирующей для диагноза D_s , то этот комплекс не встречается при других диагнозах

$$P(K^* / D_s) = \begin{cases} 0 & \text{при } s \neq p \\ \neq 0 & \text{при } s = p \end{cases}$$

Тогда

$$P(D_s / K^*) = \begin{cases} 0 & \text{при } s \neq p \\ 1 & \text{при } s = p \end{cases} \quad (19.16)$$

Для определения вероятности диагнозов по методу Байесса необходимо составить диагностическую матрицу (табл. 19.1), которая формируется на основе предварительного статистического материала.

Таблица 19.1

Диагностическая матрица для определения вероятностей по методу Байесса

Диагноз D_i	Признак k_j									$P(D_i)$
	k_1			k_2				k_3		
	$P(k_{11}/D_i)$	$P(k_{12}/D_i)$	$P(k_{13}/D_i)$	$P(k_{21}/D_i)$	$P(k_{22}/D_i)$	$P(k_{23}/D_i)$	$P(k_{24}/D_i)$	$P(k_{31}/D_i)$	$P(k_{32}/D_i)$	
D_1	0,8	0,2	0	0,1	0,1	0,6	0,2	0,2	0,8	0,3
D_2	0,1	0,7	0,2	0	0	0,3	0,7	0,1	0,9	0,1
\vdots

В диагностическую матрицу включены априорные вероятности диагнозов. Процесс обучения в методе Байесса состоит в формировании диагностической матрицы. Важно предусмотреть возможность уточнения таблицы в процессе диагностики. Для этого в памяти ЭВМ следует хранить не

только значения $P(k_{js}/D_i)$, но и следующие величины: N – общее число объектов, использованных при составлении матрицы; N_i – число объектов с диагнозом D_i ; N_{ij} – число объектов с диагнозом D_i , обследованных по признаку k_j . Если поступает новый объект с диагнозом D_μ , то производится корректировка прежних априорных вероятностей диагнозов

$$P(D_i) = \begin{cases} \frac{N}{N+1} = P(D_i) \cdot \frac{N}{N+1}; & i=1,2,\dots,n \quad i \neq \mu \\ \frac{N_{\mu+1}}{N+1} = P(D_\mu) \frac{N}{N+1} + \frac{1}{N+1}; & i = \mu \end{cases}, \quad (19.17)$$

Далее вводится поправка к вероятностям признаков

$$P(k_{js}/D_\mu) = \begin{cases} P(k_{js}/D_\mu) \frac{N_{\mu j}}{N_{\mu j}+1}; & s \neq r \\ P(k_{jr}/D_\mu) \frac{N_{\mu j}}{N_{\mu j}+1} + \frac{1}{N_{\mu j}+1}; & s = r \end{cases}. \quad (19.18)$$

где r – разряд признака k_j .

Решающее правило

Решающее - правило, в соответствии с которым принимается решение о диагнозе. В методе Байесса объект с комплексом признаков K^* относится к диагнозу с наибольшей (апостериорной) вероятностью

$$K^* \in D_i, \text{ если } P(D_i/K^*) > P(D_j/K^*) \quad (j=1, 2\dots n, \quad i \neq j). \quad (19.19)$$

Пороговое значение для вероятности диагноза

$$P(D_i/K^*) \geq P_i, \quad (19.20)$$

где P_i – заранее выбранный уровень распознавания для диагноза D_i .

При

$$P(D_i/K^*) < P_i \quad (19.21)$$

решение о диагнозе не принимается (отказ от распознавания) и для решения необходимо поступление новой информации.

При практических расчетах целесообразно провести диагностику и для случая равновероятностных диагнозов, положив

$$P(D_i) = 1/n. \quad (19.22)$$

Тогда наибольшим значением апостериорной вероятности будет обладать D_i , для которого $P(K^* / D_i)$ максимальна.

$$K^* \in D_i, \text{ если } P(K^* / D_i) > P(K^* / D_j) \quad (j=1,2,\dots,ni \neq j) \quad (19.23)$$

Такое решающее правило соответствует методу максимального правдоподобия.

Пороговое значение для (19.23)

$$P(K^* / D_i) \geq P_i \quad (19.24)$$

19.2. Метод последовательного анализа (метод Вальда)

Применяется для дифференциальной диагностики (двух состояний). В отличие от метода Байесса, число обследований заранее не устанавливается, их проводится столько, сколько необходимо для принятия решения с определенной степенью риска.

Для независимых признаков составим соотношения для распознавания D_1 и D_2

$$\frac{P(D_2 / K^*)}{P(D_1 / K^*)} = \frac{P(D_2)}{P(D_1)} \cdot \frac{P(k_1^* / D_2) \dots P(k_v^* / D_2)}{P(k_1^* / D_1) \dots P(k_v^* / D_1)}, \quad (19.25)$$

Если

$$\frac{P(D_2 / K^*)}{P(D_1 / K^*)} > 1, \quad (19.26)$$

или

$$\frac{P(k_1^* / D_2)}{P(k_1^* / D_1)} \dots \frac{P(k_v^* / D_2)}{P(k_v^* / D_1)} > \frac{P(D_1)}{P(D_2)}, \quad (19.27)$$

то принимается решение $K^* \in D_2$.

В методе последовательного анализа рассматриваемые отношения вероятностей признаков составляют не сразу, а в последовательном порядке. Поэтому, как правило, требуется меньшее число обследований.

Пример

Пусть при диагнозе D_1 простой признак k_1 встречается с вероятностью $P(k_1 / D_1)$ и отсутствует с вероятностью $P(\bar{k}_1 / D_1)$, для диагноза D_2

соответственно $P(k_1/D_2)$ и $P(\bar{k}_1/D_2)$. Если у объекта K^* наблюдается признак k_1 и при диагнозе D_2 он встречается значительно чаще, чем при D_1 , то можно сделать вывод в пользу диагноза D_2

при
$$\frac{P(k_1/D_2)}{P(k_1/D_1)} > A \quad K^* \in D_2,$$

где A – верхняя граница принятия решения.

В противоположном случае, когда признак k_1 значительно чаще встречается при диагнозе D_1 , принимается решение в пользу диагноза D_1

при
$$\frac{P(k_1/D_2)}{P(k_1/D_1)} < B \quad K^* \in D_1,$$

где B – нижняя граница принятия решения.

Если отношение вероятностей, которое часто называется отношением правдоподобия удовлетворяет условию:

$$B < \frac{P(k_1/D_2)}{P(k_1/D_1)} < A,$$

то для решения требуется поступление дополнительной информации. Тогда проводится обследование по признаку k_2 .

Пусть, например, у диагностируемого объекта признак k_2 отсутствует. Тогда составляется произведение двух отношений правдоподобия и при

$$\frac{P(k_1/D_2)}{P(k_1/D_1)} \cdot \frac{P(\bar{k}_2/D_2)}{P(\bar{k}_2/D_1)} > A \quad K^* \in D_2 \quad (19.28)$$

принимается решение об отнесении объекта к диагнозу D_2 . Подобным образом учитывается нижняя граница принятия решения. Если признаки зависимые, то используется отношение $P(\bar{k}_2/k_1D_2)/P(\bar{k}_2/k_1D_1)$, в котором учитывается вероятность отсутствия признака k_2 , при условии, что признак k_1 имеется. Дополнительные обследования проводятся до тех пор, пока при выбранных границах A и B можно принять определенное решение.

Часто оказывается удобным рассматривать не отношение правдоподобия, а натуральный логарифм этого отношения. Тогда условие (19.28) будет таким

$$\ln(P(k_1/D_2)/P(k_1/D_1)) + \ln(P(\bar{k}_2/D_2)/P(\bar{k}_2/D_1)) > \ln A.$$

Подобная форма применяется при нормальном распределении количественных признаков.

Общая процедура метода

Считаем, что признаки являются независимыми. Пусть проведено $v-1$ обследований, которые еще не дали возможности принятия решения

$$B < \frac{P(k_1^*/D_2)}{P(k_1^*/D_1)} \dots \frac{P(k_r^*/D_2)}{P(k_r^*/D_1)} < A, r = 1, 2, \dots, v-1;$$

но после v обследования

$$\frac{P(k_1^*/D_2)}{P(k_1^*/D_1)} \dots \frac{P(k_v^*/D_2)}{P(k_v^*/D_1)} > A, \quad (19.29)$$

Тогда принимается решение об отношении объекта к диагнозу D_2 : $K^* \in D_2$. Если после v -того обследования

$$\frac{P(k_1^*/D_2)}{P(k_1^*/D_1)} \dots \frac{P(k_v^*/D_2)}{P(k_v^*/D_1)} < B, \quad (19.30)$$

то объект относится к диагнозу D_1 .

При распознавании могут быть ошибки двоякого рода. Ошибка, относящаяся к D_1 (принимается решение в пользу D_2 , когда в действительности решение принадлежит D_1), называется ошибкой первого рода. Когда наоборот – второго рода. Считая состояние D_1 неисправным, а D_2 – дефектным, легко понять, что ошибка первого рода является ложной тревогой, а второго рода – пропуском дефекта.

Обозначим вероятность ошибки первого рода α , второго рода β

$$\frac{1-\beta}{\alpha} \geq A; \quad B \geq \frac{\beta}{1-\alpha}.$$

В практических расчетах принимают $\alpha = \beta = 0,05$ $\alpha = \beta = 0,1$.

Контрольные вопросы:

1. В чем суть метода Байеса? На чем основан метод?
2. Что такое решающее правило?
3. В чем суть метода последовательного анализа (метода Вальда)?

20. МЕТРИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ РАСПОЗНАВАНИЯ

В большинстве методов распознавания делается естественное предположение, что изображения объектов одного плана более близки друг другу, чем изображения парных классов. Метрические методы основаны на количественной оценке этой близости. В качестве изображения объекта принимается точка в пространстве признаков, мерой близости считается расстояние между точками.

Как известно, в пространстве признаков объект характеризуется N -мерным вектором

$$x = (x_1, x_2, \dots, x_N). \quad (20.1)$$

В диагностическом пространстве объект описывается вектором, размерность которого может отличаться от размерности вектора в пространстве признаков. В качестве координат диагностического пространства принимаются функции

$$z_j = \varphi_j(x). \quad (20.2)$$

В дальнейшем рассматриваются метрические методы в пространстве признаков, которые легко переносятся на диагностическое пространство.

Евклидово расстояние между точками x и a пространства признаков описывается уравнением:

$$l(x, a) = |x - a| = \left\{ \sum_{i=1}^N (x_i - a_i)^2 \right\}^{1/2} \quad (20.3)$$

Обобщенное расстояние порядка ν описывается уравнением:

$$l_\nu(x, a) = \left(\sum_{i=1}^N (x_i - a_i)^\nu \right)^{1/\nu} \quad (20.4)$$

Диагностическая мера расстояния

Иногда оказывается целесообразным использовать в качестве диагностической меры расстояния некоторую степень расстояния

$$L = \ln_{(\nu)}^\mu(x, a) = \left(\sum_{j=1}^N (x_j - a_j)^\nu \right)^{\mu/\nu}. \quad (20.5)$$

При использовании квадратичного расстояния диагностическая мера расстояния

$$L = l^2 = \sum_{j=1}^N (x_j - a_j)^2. \quad (20.6)$$

Для неизотропного пространства признаков вводят весовые коэффициенты λ_j по координате j

$$l^2(x, a) = \sum_{j=1}^N \lambda_j^2 (x_j - a_j)^2. \quad (20.7)$$

С помощью компонентов весового вектора $\lambda = (\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_N)$ можно учесть различную диагностическую ценность признаков, придавая большее значение наиболее значимым признакам. Так же вводят условие нормирования $\lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \dots \cdot \lambda_N = \prod_{j=1}^N \lambda_j = 1$ для того чтобы сохранился объем областей диагнозов.

Обобщенная метрика пространства признаков

Соотношение (20.7) устанавливает неравноправие отдельных координат в пространстве признаков, но оно не учитывает роль координаты x_j для диагноза D_i . Диагностическое значение признаков различно для различных диагнозов и расстояние точки x до точки a_i , принадлежащей диагнозу D_i ,

$$l_i(x, a_i) = \left\{ \sum_{j=1}^N \lambda_{ij}^2 (x_j - a_{ij})^2 \right\}^{1/2} \quad (20.8)$$

Часто целесообразно принять

$$\lambda_{ij} = 1/\sigma_{ij},$$

где σ_{ij} – среднее квадратичное отклонение параметра x_j для образцов с диагнозом D_i .

Физический смысл λ_{ij} : чем больше расстояние признака по объектам, тем больше его диагностическое значение. В более общем случае

$$\lambda_{ij} = C_{ij} / \sigma_{ij}, \quad (20.9)$$

где безразмерный коэффициент C_{ij} характеризует диагностическую ценность признака. Для дискретного параметра x_j имеющего m_j дискретных значений $x_{j1}, x_{j2}, \dots, x_{jm}$ можно принять

$$C_{ij} = Z_{Di}(x_i) = \sum_{s=1}^{m_j} P(x_{js} / D_i) \log_2 \left(P(x_{js} / D_i) / P(x_{js}) \right) \quad (20.10)$$

Условие нормирования при обобщенной матрице

$$\left. \begin{aligned} \sum_{j=1}^N \lambda_{ij} = 1 \quad (i=1,2,\dots,n) \\ \prod_{j=1}^n \lambda_{ij} = 1 \quad (i=1,2,\dots,n) \end{aligned} \right\} \quad (20.11)$$

Замечание о квалификации пространства признаков

В зависимости от используемой метрики различают три вида пространства признаков:

1 – неизотропное, неоднородное, соответствует метрике общего вида ($\lambda_{ij} \neq 1$);

2 – однородное, неизотропное ($\lambda_{ij} = \lambda_i (i=1,2,\dots,n)$);

3 – однородное изотропное ($\lambda_{ij} = \lambda_i = 1 (i=1,2,\dots,n; j=1,2,\dots,N)$).

Рассматриваемые методы подразделяют на две группы: диагностика по расстоянию до эталона и по расстоянию до множества.

Выбор эталона

В методе эталонов отнесение предъявленного для распознавания объекта к одному из n диагнозов совершается по наименьшему расстоянию до эталона. В качестве эталона для диагноза D_i принимается типичный объект, имеющий диагноз D_i (рис. 20.1).

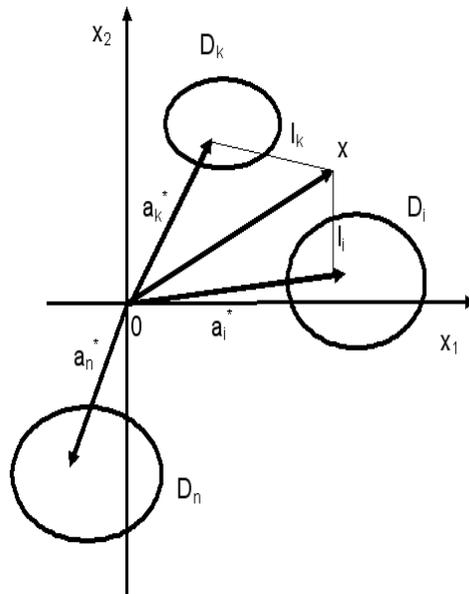


Рис. 20.1. Выбор эталона

Если известны M_i объектов с диагнозом D_i , то в качестве эталона диагноза D_i можно принять

$$a_i^* = \bar{a}_i = \frac{1}{M_i} \sum_{s=1}^{M_i} a_i^{(s)}, \quad (20.12)$$

где $a_i^{(s)}$ – объект с диагнозом D_i .

Допустим, что в пространстве признаков используется диагностическая мера расстояния L и предъявлен для диагностики объект x . Для отнесения x к одному из n диагнозов определяются L до эталонных точек $a_1^*, a_2^*, \dots, a_n^*$, объект относят к диагнозу D_i , если мера расстояния между точками x и a_i^* минимальна

$$\left. \begin{array}{l} \text{если } L_i = \min, \text{ то } X \in D_i \\ \text{или } X \in D_i \text{ если } L_i < L_k \quad (k=1, 2, \dots, n, k \neq i) \end{array} \right\} \quad (20.13)$$

В некоторых случаях принимают $L_k - L_i > \varepsilon$ (ε – порог распознавания).

Если в качестве диагностической меры принимают квадрат расстояния $L_i = l_i^2 = \sum_{j=1}^N \lambda_j^2 (x_j - a_{ij}^*)^2$, то $x \in D_i$ при условии

$$l_i^2 < l_k^2 \quad (k=1, 2, \dots, n; k \neq i) \quad (20.14)$$

Если вводится дополнительный порог распознавания то (20.9) и (20.10) являются только необходимыми. Также дополнительным условием принимается

$$x \in D_i \text{ если } |x - a_i^*| < \rho_i, \quad (20.15)$$

где ρ_i – радиус сферы, в которую должна входить точка для отнесения этой точки к диагнозу (используется для изотропного, однородного пространства признаков).

Для неизотропного и неоднородного пространства признаков соответствует ограничение

$$\delta_{ij}^{(1)} \langle x_j - a_{ij}^* \rangle \delta_{ij}^{(2)}, \quad (20.16)$$

где $\delta_{ij}^{(1)}, \delta_{ij}^{(2)}$ – границы области принятия решения.

Надежность распознавания

Надежность распознавания тем выше, чем меньше L_i по сравнению с другими расстояниями. Это можно охарактеризовать коэффициентом распознавания

$$\xi_i = \frac{1/L_i}{\sum_{s=1}^n 1/L_s}, \quad (20.17)$$

$$\sum_{i=1}^n \xi_i = 1$$

Распознавание в соответствии с (2.3.1-13) признается надежным если

$$\xi_i > \xi_0, \quad (20.18)$$

где ξ_0 – заранее выбранный уровень распознавания.

При диагностике с порогами распознавания характерным является коэффициент помех

$$\eta_i = L_i / L_i^*, \quad (20.19)$$

где L_i^* – диагональ граничной области диагноза D_i .

При квадратичной мере

$$L_i = \sum_{j=1}^N \lambda_{ij}^2 (x_j - a_{ij}^*)^2,$$

$$L_i^* = \sum \lambda_{ij}^2 (\delta_{ij}^{(2)} - \delta_{ij}^{(1)})^2.$$

Чем больше коэффициент помех, тем ближе к предельной, граничной области распознавания объект, предъявленный для распознавания.

Диагностика по угловому расстоянию

Близость вектора x к эталонному вектору a_i (рис. 20.2) можно охарактеризовать с помощью угла между векторами, определяя его с помощью скалярного произведения

$$\cos \gamma_i = \frac{\sum_{i=1}^n x_j a_{ij}}{\sqrt{\left(\sum_{j=1}^N x_j^2 \right) \left(\sum_{j=1}^N a_{ij}^2 \right)}} \quad (20.20)$$

При диагностике принимается решение

$$x \in D_i \quad \text{если} \quad \cos \gamma_i = \max$$

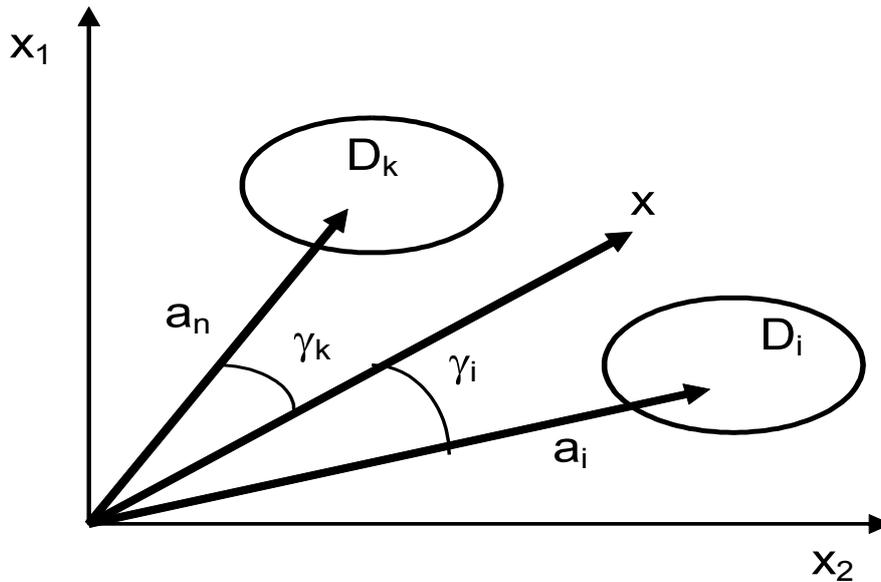


Рис. 20.2. Диагностика по угловому расстоянию

Диагностика по расстоянию до множества

Оценивается расстояние от точки x (объекта) до всех точек множества с данным диагнозом (рис. 20.3).

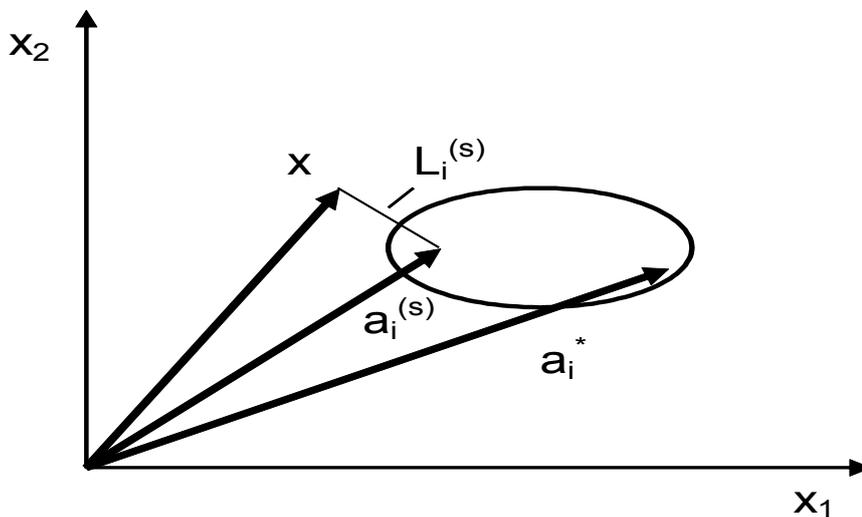


Рис. 20.3. Диагностика по расстоянию до множества

Пусть для диагноза D_i группа содержит M_i образцов. Допустим, что выбрана диагностическая мера расстояния и тогда расстояние от точки x до $a_i^{(s)}$, входящей в группу образцов

$$L_i^{(s)} = \sum_{j=1}^N \lambda_{ij}^2 (x_j - a_{ij}^{(s)})^2 \quad (20.21)$$

Можно определить среднее расстояние

$$L_i = \frac{1}{M_i} \sum_{s=1}^{M_i} L_i^{(s)} = \frac{1}{M_i} \sum_{s=1}^{M_i} \sum_{j=1}^N \lambda_{ij}^2 (x_j - a_{ij}^{(s)})^2 \quad (20.22)$$

При обобщенной диагностической мере

$$L_i = \frac{1}{M_i} \sum_{s=1}^{M_i} \left\{ \sum_{j=1}^N \lambda_{ij}^v (x_j - a_{ij}^{(s)})^v \right\}^{\mu/v} \quad (20.23)$$

Алгоритм распознавания по методу среднего расстояния

Принимается решение

$$x \in D_i \quad \text{если} \quad L_i < L_k \quad (k = 1, 2, \dots, n) \quad k \neq i$$

$$\text{или} \quad x \in D_i \quad \text{если} \quad L_i = \min$$

Метод минимального расстояния до множества

Возьмем в качестве расстояния до множества минимальное среди всех расстояний от точки x до точек, входящих в группу диагноза D_i

$$L_i = \min_{a_i^{(s)} \in D_i} L_i^{(s)} \quad (20.24)$$

Определяется расстояние от x до всех точек, входящих в группу, и запоминается минимальное расстояние. Принимается решение

$$x \in D_i \quad \text{если} \quad L_i = \min \left(\min_{a_k^{(s)} \in D_k} L_k^{(s)} \right) \quad (k = 1, 2, \dots, n \quad k \neq i),$$

или

$$L_i < L_k \quad (k = 1, 2, \dots, n; k \neq i), \quad (20.25)$$

где $L_i = \min_{a_k^{(s)} \in D_k} L_k^{(s)}$ – минимальное расстояние до точек с диагнозом D_k .

Контрольные вопросы:

1. На чем основаны метрические методы распознавания?
2. Что такое диагностическая мера расстояния?
3. Для чего используется выбор эталона?
4. В чем суть диагностики по угловому расстоянию?

21. ЛОГИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ РАСПОЗНАВАНИЯ

Логические методы распознавания основаны на установлении логических связей между признаками и состояниями объектов, поэтому рассматриваться будут только простые признаки, для которых возможны лишь два значения (например, 0 или 1). Точно так же и состояния ТС (диагноза) в рассматриваемых методах могут иметь только два значения (наличие и отсутствие).

Перемещения величины или функции, принимающие только два значения, называются логическими или булевыми. Исследованием таких переменных занимается математическая логика. Во многих задачах логические методы пригодны для начальных этапов распознавания. Весьма перспективны методы математической логики для второго направления ТД – поиска и локализации неисправностей ТС.

Основные понятия алгебры логики

Логическая величина – величина, принимающая только одно из двух значений (0 или 1, «ложь» или «истина»). Логические переменные обозначаются заглавными буквами латинского алфавита.

Логической суммой двух логических переменных A и B (дизъюнкцией) называют логическую величину C

$$A \vee B = C, \quad (21.1)$$

где \vee – знак сложения.

Величина C является истинной, если истинно хотя бы одно из высказываний

$$\begin{aligned} 1 \vee 1 &= 1 \\ 0 \vee 1 &= 1 \\ 1 \vee 0 &= 1 \\ 0 \vee 0 &= 0 \end{aligned} \quad (21.2)$$

Логическим произведением двух логических величин A и B (конъюнкцией) называют величину C

$$\begin{aligned} A \wedge B &= C \\ 1 \wedge 1 &= 1 \quad 1 \wedge 0 = 0 \\ 0 \wedge 1 &= 0 \quad 0 \wedge 0 = 0 \end{aligned} \quad (21.3)$$

Операция отрицания высказывания \bar{A} (читается как «не A »). Операции «и», «или», «не» (конъюнкция, дизъюнкция, отрицание) позволяют составить различные комбинации *высказываний*, которые называются булевыми

скими функциями. Простейшие наиболее употребительные функции получили название операций импликации и эквивалентности.

Импликация двух высказываний

$$A \rightarrow B, \quad (21.4)$$

где « A влечет B ».

Импликация может быть выражена в форме

$$A \rightarrow B = \bar{A} \vee B. \quad (21.5)$$

Эквивалентность двух высказываний

$$(A \equiv B) = C \quad (21.6)$$

$$C = A \wedge B \vee \bar{A} \wedge \bar{B}$$

Следовательно, если эквивалентность истинна, то величины A и B обе или истинны, или ложны.

Булевой называется функция, значение которой зависит от других логических величин $F = f(A, B, C)$. Примером может служить функция $F = A \vee B \wedge C$. В дальнейшем рассмотрим $F = \bar{A} \vee B \wedge \bar{C} \vee D$ или $F = (A \rightarrow B) \wedge (C \rightarrow D)$

Правила упрощения булевских функций

1. Правило абсорбции

$$A + A = A; \quad A \cdot A = A \quad (21.7)$$

2. Правило коммутативности

$$A + B = B + A; \quad A \cdot B = B \cdot A \quad (21.8)$$

3. Правило ассоциативности

$$(A + B) + C = A + (B + C) = A + B + C \quad (21.9)$$

$$(A \cdot B) \cdot C = A \cdot (B \cdot C) = A \cdot B \cdot C$$

4. Правило дистрибутивности умножения относительно сложения

$$A \cdot (B + C) = A \cdot B + A \cdot C \quad (21.10)$$

5. Правило дистрибутивности сложения относительно умножения

$$A + B \cdot C = (A + B) \cdot (A + C) \quad (21.11)$$

6. Правило отрицания

$$\overline{A \cdot B} = \bar{A} + \bar{B} \quad (21.12)$$

$$\overline{A + B} = \bar{A} \cdot \bar{B}$$

7. Правило поглощения

$$A \cdot B + A \cdot \bar{B} = A; \quad (A + B) \cdot (A + \bar{B}) = A \quad (21.13)$$

$$A + A \cdot B = A \quad A(A + B) = A$$

Базис булевой функции – это совокупность всех возможных значений ее аргументов (область задания функции). Если булевская функция содержит n логических переменных, то базис состоит из двух чисел (0 и 1). Для функции трех аргументов (A, B, C) нормальный базис имеет вид

A	01	01	01	01
B	00	11	00	11
C	00	00	11	11

Изображающее число A в базисе (A, B, C) $\#A = 01010101$

Для отображающих чисел справедливы операции «и, или, не».

Использование булевских функций для построения диагностических устройств

Диагностические устройства представляют собой приборы, моделирующие связи признаков и состояний. Связь признаков и состояний системы выражается булевой функцией, которая называется булевой диагностической функцией.

Пусть имеются простые (двоичные) признаки (k_1, k_2, \dots) с помощью которых различаются состояния системы: наличия –1, отсутствия –0. Обозначим наличие k_j , отсутствие \bar{k}_j . Аналогично получим состояние системы

$$D_i = \begin{cases} 0 - \text{наличия} \\ 1 - \text{отсутствия} \end{cases}$$

Рассмотрим систему, имеющую два состояния: D_1 – исправное, D_2 – неисправное. Пусть состояние системы описывается четырьмя признаками k_1, k_2, k_3, k_4 , причем неисправное состояние системы возникает при наборе признаков, указанных в табл. 21.1.

Таблица 21.1

Зависимость состояния системы от набора признаков

k_1	k_2	k_3	k_4
1	0	0	0
1	1	0	0
0	0	0	1

Во всех остальных случаях система находится в исправном состоянии ($D_1 = 1$). Булевская логическая функция:

$$F = (\bar{k}_1 \vee k_2 \vee k_3 \vee k_4) \vee (\bar{k}_1 \vee \bar{k}_2 \vee k_3 \vee k_4) \wedge (k_1 \vee k_2 \vee k_3 \vee \bar{k}_4) \equiv D_1 \wedge \bar{D}_2$$

Чтобы система была исправна, необходимо выполнение $F = 1$.

Булевская диагностическая функция легко реализуется в диагностических устройствах с помощью логических элементов «или» и «и».

21.1. Использование булевских функций для задач распознавания

Метод сокращенного базиса

Задача распознавания формулируется следующим образом.

Известны логические связи признаков и состояний в виде булевской диагностической функции $F(k_1, k_2, \dots, k_m, D_1, D_2, \dots, D_n)$, и задана булевская функция признаков $G(k_1, \dots, k_m)$. Требуется найти такую булевскую функцию состояний $f(D_1, \dots, D_n)$, для которой выполняется условие $G \rightarrow f$ (G влечет f) при $F(k_1, k_2, \dots, k_m, D_1, \dots, D_n) = 1$.

Логические методы позволяют выявить состояния, не противоречащие имеющимся техническим сведениям о связях состояний и признаков.

Распознавание кривых

Во многих случаях информация о состоянии системы содержится в виде записи значений диагностического параметра и его отклонений от нормального или первоначального уровня в различные моменты времени. Результаты представляются в виде непрерывных функций (кривых) или совокупности дискретных значений $\{x(t_i)\}$.

Разберем сначала непрерывную запись параметра в виде кривой $x(t)$ (запись вибрации по времени). Наличие неисправности может проявиться в росте отдельных периодических составляющих в спектральном составе, в существенном изменении значений диагностического параметра и т.п. Анализируя протекание кривой $x(t)$, можно во многих случаях сделать важные заключения о техническом состоянии системы.

Установление соответствия между состоянием системы и протекаем кривой отображается функцией $x(t)$, которая называется распознаванием (идентификацией) кривых.

Для технической диагностики представляет интерес решение двух основных вопросов:

– являются ли наблюдаемые во время эксплуатации изменения кривой $x(t)$ следствием случайных изменений в системе или они вызваны более серьезными причинами;

– если отличия в протекание кривой являются значительными, то с какими из возможных состояний системы они связаны.

Пример

Пусть в случае двух признаков и двух состояний логические связи таковы:

1. При состоянии D_1 появляется признак k_1 .
2. Обнаружение признака k_2 свидетельствует об отсутствии состояния D_1 .
3. При состоянии D_2 появляются оба признака.

На основании этих сведений булевская диагностическая функция

$$F(k_1, k_2, D_1, D_2) = (D_1 \rightarrow k_1) \wedge (k_2 \rightarrow \bar{D}_1) \wedge (D_2 \rightarrow k_1 \wedge k_2) \quad (21.14)$$

Пусть при обследовании обнаружено наличие признака k_1 и отсутствие признака k_2 . Тогда булевская функция признаков

$$G = k_1 \wedge \bar{k}_2 \quad (21.15)$$

Требуется найти булевскую функцию состояний.

Воспользуемся общим методом отыскания булевской функции состояния – методом сокращенного базиса. Для этого сначала выписываем полный базис (табл. 21.2).

Таблица 21.2

Полный базис

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
k_1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1
k_2	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1
D_1	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1
D_2	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1

Далее находим изображающее число для булевской диагностической функции (табл. 21.3).

Таблица 21.3

Нахождение изображающего числа для булевской диагностической функции

Номер столбца	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
$D_1 \rightarrow k_1 = \bar{D}_1 \vee k_1$	1	1	1	1	0	1	0	1	1	1	1	1	0	1	0	1
$k_2 \rightarrow \bar{D}_1 = \bar{k}_2 \vee \bar{D}_1$	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	0	1	0	1
$\bar{D}_2 \vee (k_1 \wedge k_2)$	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1	0	0	0	1
$\#F$	1	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0

В изображающем числе для функции F , полученном в соответствии с формулой (21.14), единицы строят в столбцах, отражающих возможные (не противоречащие F) сочетания признаков и диагнозов. По булевой функции признаков $k_1=1; k_2=0$. Такое сочетание признаков при $F=1$ имеется только в столбцах 1 и 5, для которых $D_1=0, D_2=0$ и $D_1=1, D_2=0$. Столбцы 9 и 13, имеющие сочетание $k_1=1, k_2=0$ (равенства 2), исключаются из рассмотрения, так как в соответствующих столбцах $F=0$ они противоречат диагностической функции, т. е. условиям (21.14). Таким образом, булевская функция диагнозов (столбцы 1 и 5)

$$f = (\bar{D}_1 \wedge \bar{D}_2) \vee (D_1 \wedge \bar{D}_2) = \bar{D}_2 \quad (21.16)$$

Преобразование равенства (21.16) можно получить из формул поглощения, но его легко найти с помощью изображающих чисел. Так как рассмотрение относится к двум булевым величинам, то базис

$$D_1 0101$$

$$D_2 0011$$

Далее находим

$$\begin{array}{r} \# \bar{D}_1 \wedge \bar{D}_2 1000 \\ \# D_1 \wedge \bar{D}_2 0100 \\ \hline \# (\bar{D}_1 \wedge \bar{D}_2) \vee (D_1 \wedge \bar{D}_2) 1100 = \# \bar{D}_2 \end{array}$$

Наличие признака k_1 и отсутствие признака k_2 приводит к отрицанию диагноза D_2 и не позволяет вывести заключение о состоянии D_1 .

Контрольные вопросы:

1. На чем основаны логические методы распознавания?
2. Приведите правила упрощения булевских функций?
3. Как применяются булевские функции для задач распознавания?

22. ОБНАРУЖЕНИЕ НЕСЛУЧАЙНЫХ ОТКЛОНЕНИЙ СРЕДНИХ

Предположим, что ведется непрерывное наблюдение за параметром x и анализируются данные за два периода k и l . Сопоставляются n_k значений за один промежуток времени и n_l за другой промежуток времени x_k и x_l . Для оценки двух выборок x_k и x_l используют большое количество методов, одним из которых является метод средних. В соответствии с ним определяется среднее значение и среднеквадратичное отклонение каждой из выборок (рис. 22.1).

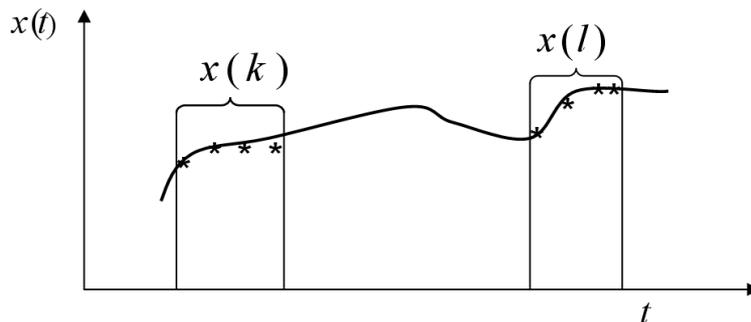


Рис. 22.1. Метод средних

$$\bar{x}_k = \frac{n_k}{\sum_{i=1}^{n_k} x_{k(i)}}, \quad \bar{x}_l = \frac{n_l}{\sum_{j=1}^{n_l} x_{l(j)}} \quad (22.1)$$

$$S_k^2 = \frac{1}{n_k - 1} \sum_{i=1}^{n_k} (x_{k(i)} - \bar{x}_k)^2; \quad S_l^2 = \frac{1}{n_l - 1} \sum_{j=1}^{n_l} (x_{l(j)} - \bar{x}_l)^2$$

Далее оценивается достоверность различия с помощью критерия Стьюдента

$$[t] = \frac{|\bar{x}_k - \bar{x}_l|}{\sqrt{\frac{(n_k - 1)S_k^2 + (n_l - 1)S_l^2}{n_k + n_l - 2} \cdot \left(\frac{1}{n_k} + \frac{1}{n_l}\right)}} \quad (22.2)$$

Различие признается существенным, если $[t] > t_c(n, P_D)$, где $t_c(n, P_D)$ — коэффициент для степени свободы $n = n_k + n_l - 2$ и доверительная вероятность P_D .

Оценка неслучайных отклонений по контрольным уровням

В практических задачах оценки неслучайных отклонений часто используют заранее назначенные контрольные уровни.

Часто для повышения достоверности оценки используются предупредительный уровень Δ_1 и предельный уровень Δ_2 .

При достижении параметром $x(t)$ отклонения Δ_1 сверх нормального уровня x_0 загорается лампочка, а при достижении $x_0 + \Delta_2$ происходит автоматическое выключение системы (рис. 22.2).

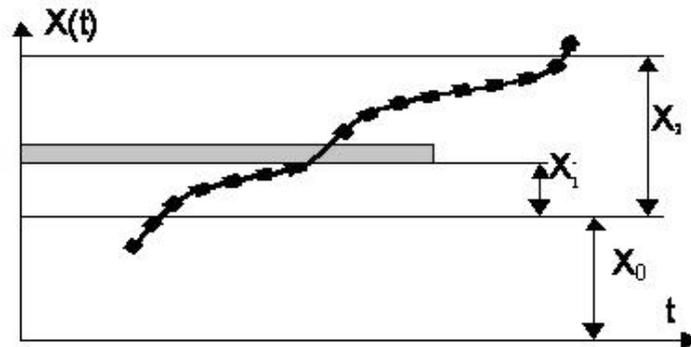


Рис. 22.2. Оценка неслучайных отклонений по контрольным уровням

Если учесть случайную нестабильность параметра, то

$$\Delta_1 \geq k_1 \sigma_x, \quad \Delta_2 \geq k_2 \sigma_x,$$

где σ_x – среднеквадратичное отклонение параметра.

При контроле технологических процессов $k_1 = 2$, $k_2 = 3$.

Оценка текущего значения параметра

В практических случаях возникает задача оценки значения измеряемого параметра $x(t)$. Требуется определить, является значение $x(t_n)$ одним из его случайных отклонений или его нельзя согласовать с предыдущим значением процесса.

Рассмотрим совокупность n предыдущих значений параметра в моменты времени t_0, t_1, \dots, t_{n-1} и обозначим их x_0, x_1, \dots, x_{n-1} . Предположим x_i удовлетворяет нормальному распределению. Тогда при степени значимости q и с доверительной вероятностью P_D

$$x(t_n) > \bar{x}_n + K(n, q, P_D) \cdot S_n, \quad (22.2)$$

где $\bar{x}_n = \sum_{i=0}^{n-1} x(t_i)$; $S_n = \left\{ \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} (x(t_i) - \bar{x}_n)^2 \right\}^{1/2}$;

$K(n, q, P_D)$ – представляет собой односторонний толерантный коэффициент, значение которого резко возрастает при малом объеме выборки. В связи с этим для эффективности оценки текущего значения $x(t)$ необходимо знать не менее десяти предыдущих значений.

Контрольные вопросы:

1. В чем суть обнаружения неслучайных отклонений?
2. Как производится оценка неслучайных отклонений по контрольным уровням?
3. Как производится оценка текущего значения параметра?

23. МЕТОД ПРИЗНАКОВ

Метод признаков предназначен для решения более общей задачи распознавания – установления связи между поведением кривой и состоянием системы.

Пусть имеется некоторое число состояний системы D_i и предполагается, что каждому состоянию соответствует определенный класс кривых $x_i(t)$. Предъявляется для распознавания кривая $x(t)$ за период T и требуется отнести ее к одному из указанных классов. Для того чтобы свести задачу к изученной проблеме распознавания, необходимо отобразить кривые в конечно-мерном пространстве признаков.

Формирование признаков с помощью разложения в ряд по ортогональным функциям

В качестве признаков кривой $x(t)$ на участке $t_0 \leq t \leq t_1$ можно принять коэффициенты разложения функции в ряд Фурье. Не ограничивая общности, будем считать $t_0 = 0$ $t_1 = T$, T – длина участка по времени (рис. 23.1).

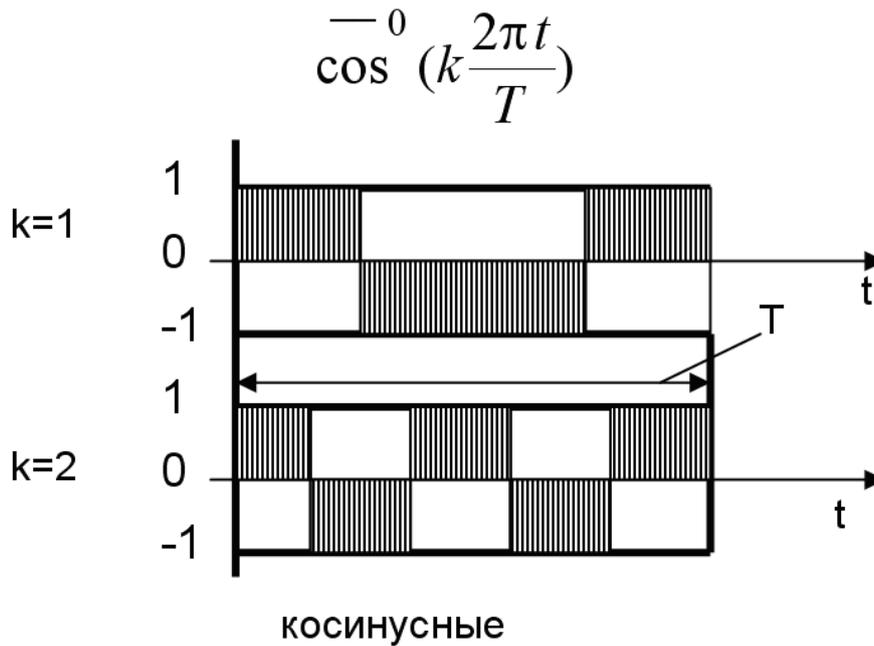


Рис. 23.1. Формирование признаков с помощью разложения в ряд

На указанном участке функция

$$X(t) = \frac{1}{2} a_0 + \sum_{k=1}^{\infty} a_k \cos \left(k \frac{2\pi t}{T} \right) + \sum_{k=1}^{\infty} b_k \sin \left(k \frac{2\pi t}{T} \right), \quad (23.1)$$

где коэффициенты Фурье

$$a_k = \frac{2}{T} \int_0^T x(t) \cos\left(k \frac{2\pi t}{T}\right) dt \quad (k=0,1,\dots), \quad (23.2)$$

$$b_k = \frac{2}{T} \int_0^T x(t) \sin\left(k \frac{2\pi t}{T}\right) dt \quad (k=0,1,\dots) \quad (23.3)$$

В соответствии с равенством (23.1) $x(t)$ представлена в виде разложения в ряд по ортогональным функциям

$$1, \cos \frac{2\pi t}{T}, \sin \frac{2\pi t}{T}; \cos\left(2 \frac{2\pi t}{T}\right), \dots \quad (23.4)$$

Система функций $\{\varphi_i(t)\}$ называется ортогональной на участке $(0, T)$, если

$$\int_0^T \varphi_i(t) \cdot \varphi_k(t) dt = 0 \quad i \neq k \quad (23.5)$$

Ограничиваясь гармоникой (вставка $k \leq 10$), можно охарактеризовать кривую $x(t)$ с помощью признаков $n=2k+1$, причем признаками становятся величины $a_0, a_1, b_1, \dots, a_k, b_k$.

Рассмотрим ортогональную систему, представляющую собой «спрямляющие» функции для обычных тригонометрических функций. Наиболее простая аппроксимация получается с помощью частично-постоянных функций (рис. 23.2).

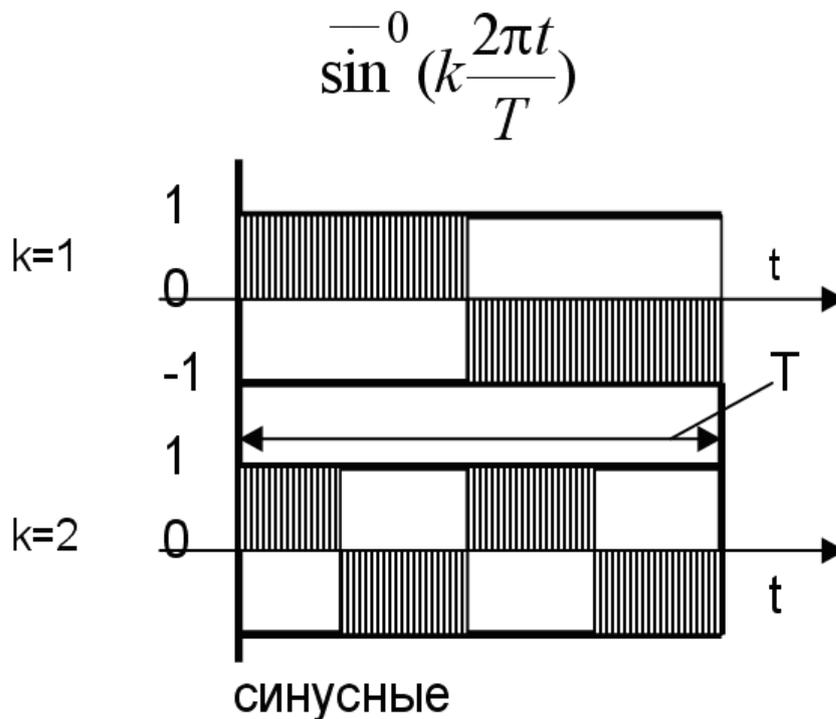


Рис. 23.2. Частично-постоянные функции

Будем называть косинусными и синусными функциями первой гармоники

$$\overline{\cos}^0 \frac{2\pi t}{T} = \begin{cases} 1 & 0 \leq t \leq \frac{T}{4} \\ -1 & \frac{T}{4} < t < \frac{3}{4}T \\ 1 & \frac{3T}{4} \leq t \leq T \end{cases} \quad \overline{\sin}^0 \frac{2\pi t}{T} = \begin{cases} 1 & 0 \leq t \leq \frac{T}{2} \\ -1 & \frac{T}{2} < t \leq T \end{cases}$$

В более компактной форме

$$\overline{\cos}^0 \frac{2\pi t}{T} = \text{sign}\left(\cos \frac{2\pi}{T}t\right); \quad \overline{\sin}^0 \frac{2\pi t}{T} = \text{sign}\left(\sin \frac{2\pi}{T}t\right). \quad (23.6)$$

Диагностический параметр $x(t)$ выражается теперь модифицированным рядом Фурье

$$x(t) = a_0 + \sum_{k=1}^{\infty} a_k \overline{\cos}^0\left(k \frac{2\pi t}{T}\right) + \sum_{k=1}^{\infty} b_k \overline{\sin}^0\left(k \frac{2\pi t}{T}\right), \quad (23.7)$$

где
$$a_k = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) \overline{\cos}^0\left(k \frac{2\pi t}{T}\right) dt, \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad (23.8)$$

$$b_k = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) \overline{\sin}^0\left(k \frac{2\pi t}{T}\right) dt, \quad k = 1, 2, 3, \dots \quad (23.9)$$

Вычисления по (23.8) просты

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt \quad (23.10)$$

$$a_1 = \frac{1}{T} \left(\int_0^{T/4} x(t) dt - \int_{T/4}^{3T/4} x(t) dt + \int_{3T/4}^T x(t) dt \right) \quad (23.11)$$

$$b_1 = \frac{1}{T} \left(\int_0^{T/2} x(t) dt - \int_0^T x(t) dt \right). \quad (23.12)$$

Более точное описание дает система частично-линейных косинусных и синусных функций $\overline{\cos}(k \frac{2\pi t}{T})$, $\overline{\sin}(k \frac{2\pi t}{T})$:

$$x(t) = \frac{1}{3} a_0 + \sum_{k=1}^{\infty} a_k \overline{\cos}(k \frac{2\pi t}{T}) + \sum_{k=1}^{\infty} b_k \overline{\sin}(k \frac{2\pi t}{T}), \quad k = 0, 1, \dots \quad (23.13)$$

$$a_k = \frac{3}{T} \int_0^T x(t) \cos k \frac{2\pi t}{T} dt, \quad k = 1, 2, \dots \quad (23.14)$$

Модифицированный ряд Фурье дает описание функции и ее первой производной, но не пригоден для старших производных.

Формирование признаков по методу элементов

В качестве признаков могут быть использованы характерные элементы кривой $x(t)$: точки \min и \max и др. В задачах ТД в качестве элементов часто используется значение амплитуды колебаний с некоторой частотой. В этом случае проводится предварительный анализ спектра частот колебаний, возникающих при различных неисправностях и отказах.

Формирование кривых по комплексу признаков

Если кривая на некотором участке представлена комплексом диагностических параметров x_1, x_2, \dots, x_n , то процесс распознавания осуществляется известными методами. Задача распознавания облегчается тем, что обычно признаки x_i являются параметрами одной размерности.

Сглаживание кривых

Во многих случаях кривая изменения диагностического параметра существенно искажается за счет неизбежных ошибок измерений. В таких случаях целесообразно проводить анализ предварительно сглаженных кривых. Существуют два основных метода сглаживания:

- наименьших квадратов;
- преобразования.

По методу наименьших квадратов $x(t)$ на участке от t_1 до t_2 заменяется полиномом

$$x(t) \approx a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + \dots, \quad (23.15)$$

где a_0, a_1, \dots – параметры, подлежащие определению. Не рекомендуется брать полином больше трех, так как сглаживание получается более жесткое, лучше всего уменьшить длину рассматриваемого участка.

Допустим, на рассматриваемом участке содержится N экспериментальных точек x_j , соответствующее t_j . Требуется подобрать a_0, a_1, a_2 . Из условия минимума среднеквадратичной погрешности между полем экспериментальных значений и полиномом (23.15)

$$\Delta = \sum (x_j - a_0 + a_1 t_j + a_2 t_j^2)^2 = \min.$$

Из условий $\frac{\partial \Delta}{\partial a_0} = 0$; $\frac{\partial \Delta}{\partial a_1} = 0$; $\frac{\partial \Delta}{\partial a_2} = 0$ получаем систему трех линейных уравнений, из которых определяем a_0, a_1, a_2 .

Для метода преобразования исходных значений x_j в другие сглаженные \tilde{x}_j часто применяется метод скользящего среднего

$$\tilde{x}_j = \frac{1}{2n+1}(x_{j-1} + x_{j-(n-1)} + \dots + x_j + x_{j+n-1} + x_{j+n}). \quad (23.16)$$

Практически осреднение проводится не более чем для 10 соседних значений параметра. Естественно, что в начале и конце общего интервала времени для n точек сглаженные значения не могут быть получены. Для этого кривая сглаженных значений по касательной экстраполируется на граничные точки.

Применяется способ повторного сглаживания, в результате которого получают $\tilde{\tilde{x}}_j$. Это эквивалентно тому, что в равенство (23.12) значения x_j входят с другими весовыми коэффициентами. Это называется релаксационным сглаживанием. Сумма весовых коэффициентов равна 1.

Одна из простых процедур релаксационного сглаживания может быть получена

$$\tilde{\tilde{x}}_j = \alpha x_j + (1 - \alpha) \cdot \tilde{x}_{j-1} \quad (23.17)$$

На практике $0,1 < \alpha < 0,5$. Выбор метода сглаживания и весовых коэффициентов определяется особенностями кривой $x(t)$, характером случайных отклонений, задачами диагностики и осуществляется на основании практического опыта.

Контрольные вопросы:

1. В чем суть метода признаков?
2. Какими методами осуществляется формирование признаков?
3. Как производится анализ параметров при наличии ошибок измерений?

24. ДИАГНОСТИЧЕСКАЯ ЦЕННОСТЬ ПРИЗНАКОВ

В технической диагностике важное значение имеет описание объекта в системе признаков, обладающих большой диагностической ценностью. Диагностическая ценность признака определяется информацией, которая вносится признаком в систему состояний.

Пусть имеется система D , которая находится в одном из n возможных состояний D_i ($i = 1, 2, \dots, n$).

Простой признак – это результат обследования, который может быть выражен одним из двух символов или двоичным числом. С точки зрения теории информации простой признак можно рассматривать как систему, имеющую одно из двух возможных состояний. Если k_j – простой признак, то два его состояния k_j – наличие, \bar{k}_j – отсутствие.

Сложный признак (разряда m) – результат наблюдения, который может быть выражен одним из m символов. Разряд признака часто называют диагностическим интервалом. Если в результате обследования выявлено, что признак k_j имеет для данного объекта значение k_{js} , то это значение будем называть реализацией признака k_j

$$k_j^* = k_{js}.$$

В качестве диагностического веса реализации признака k_j для диагноза D_i примем

$$Z_{D_i}(k_j^*) = Z_{D_i}(k_{js}) = \log_2 \frac{P(D_i / k_{js})}{P(D_i)}, \quad (24.1)$$

где $P(D_i / k_{js})$ – вероятность D_i при условии, что признак k_j получил значение k_{js} ; $P(D_i)$ – априорная вероятность диагноза.

Диагностический вес в интервале s

$$Z_{D_i}(k_{js}) = \log_2 \frac{P(k_{js} / D_i)}{P(k_{js})}, \quad (24.2)$$

где $P(k_{js} / D_i)$ – вероятность появления интервала s признака k_j для объекта с диагнозом D_i ; $P(k_{js})$ – вероятность появления этого интервала у всех объектов с различными диагнозами

$$P(k_{js}) \cdot P(D_i / k_{js}) = P(D_i) \cdot P(k_{js} / D_i) = P(k_{js} \cdot D_i).$$

Связь диагностических весов реализаций простого признака

Так как $k_{j1} = k_j$ $k_{j2} = \bar{k}_j$, то диагностический вес наличия признака k_j для диагноза D_i

$$Z_{Di}(k_j) = \log_2 \frac{P(k_j / D_i)}{P(k_j)}, \quad (24.3)$$

отсутствия

$$Z_{Di}(\bar{k}_j) = \log_2 \frac{P(\bar{k}_j / D_i)}{P(\bar{k}_j)}, \quad (24.4)$$

так как

$$P(\bar{k}_j) = 1 - P(k_j), \quad (24.5)$$

$$P(k_j) = 1 - P(\bar{k}_j), \quad (24.6)$$

следовательно

$$Z_{Di}(k_j) = \log_2 \frac{1 - P(k_j / D_i)}{1 - P(k_j)} = \log_2 \frac{1 - P(k_j) \cdot 2^{Z_{Di}(k_j)}}{1 - P(k_j)} \quad (24.7)$$

Если k_j является случайным для данного диагноза, то оба диагностических веса равны нулю.

Условный и независимый диагностические веса

Диагностическое значение реализации признака во многих случаях зависит от того, какие реализации признаков получились в предыдущих обследованиях. Бывает, что сам по себе признак не имеет существенного значения, но его появление после некоторого другого позволяет однозначно поставить диагноз.

Пусть проводится обследование сначала по признаку k_1 , а затем по признаку k_2 . При обследовании объекта по признаку k_1 была получена реализация k_{1s} . Требуется определить диагностический вес реализации k_{2P} признака k_2 для диагнозов D_i

$$Z_{Di}(k_{2P} / k_{1s}) = \log_2 [P(k_{2P} / D_i \cdot k_{1s}) / P(k_{2P} / k_{1s})] \quad (24.8)$$

Формула (24.8) определяет условный диагностический вес реализации признака. Независимый диагностический вес этой реализации:

$$Z_{Di}(k_{2P}) = \log_2 [P(k_{2P} / D_i) / P(k_{2P})] \quad (24.9)$$

Если k_1 и k_2 являются независимыми для всей совокупности объектов с различными диагнозами

$$P(k_{2P}) = P(k_{2P} / k_{1S}), \quad (24.10)$$

и условно независимыми

$$P(k_{2P} / D_i) = P(k_{2P} / D_i \cdot k_{1S}), \quad (24.11)$$

то условный и независимый диагностические веса реализации совпадают.

Диагностический вес реализации комплекса признаков

При рассмотрении диагностического веса реализации комплекса признаков K , состоящего из признака k_1 с реализацией k_{1S} и признака k_2 с реализацией k_{2P} , возможны два варианта проведения обследования по комплексу признаков: последовательный и параллельный.

При последовательном обследовании сначала по k_1 , затем по k_2

$$\begin{aligned} Z_{D_i}(k_{1S}) &= \log_2 [P(k_{1S} / D_i) P(k_{1S})] \\ Z_{D_i}(k_{2P} / k_{1S}) &= \log_2 P(k_{2P} / D_i \cdot k_{1S}) / P(k_{2P} / k_{1S}) \\ Z_{D_i}(k_{1S} \cdot k_{2P}) &= Z_{D_i}(k_{1S}) + Z_{D_i}(k_{2P} / k_{1S}) \end{aligned} \quad (24.12)$$

При параллельном (одновременном)

$$Z_{D_i}(k_{1S} \cdot k_{2P}) = \log_2 [P(k_{1S} / D_i) \cdot P(k_{2P} / D_i \cdot k_{1S})] \quad (24.13)$$

Если проводится обследование по комплексу признаков $K^{(\eta)}$, то диагностический вес реализации комплекса $K^{(\mu)}$ для диагноза D_i

$$Z_{D_i}(K_*^{(\mu)} \cdot K_*^{(\eta)}) = \log_2 [P(K_*^{(\mu)} / D_i \cdot K_*^{(\eta)}) / P(K_*^{(\mu)} / K_*^{(\eta)})] \quad (24.14)$$

Диагностический вес реализации двух комплексов

$$Z_{D_i}(K_*^{(\mu)} \cdot K_*^{(\eta)}) = Z_{D_i}(K_*^{(\mu)}) + Z_{D_i}(K_*^{(\eta)} / K_*^{(\mu)}) \quad (24.15)$$

не зависит от порядка обследования по двум комплексам.

Диагностический вес той или иной реализации признака еще не дает представления о диагностической ценности обследования по данному признаку.

Условимся считать диагностической ценностью обследования по признаку k_j для диагноза D_i величину информации, вносимую всеми реализациями признака k_j в установление D_i .

Для m -разрядного признака

$$Z_{D_i}(k_j) = \sum_{S=1}^m P(k_{jS} / D_i) \cdot Z_{D_i}(k_{jS}) \quad (24.16)$$

Диагностическая ценность представляет собой математическое ожидание величины информации, вносимой отдельными реализациями. Так как $Z_{D_i}(k_j)$ относится только к одному диагнозу D_i , то будем называть ее частной диагностической ценностью обследования по признаку k_j ; $Z_{D_i}(k_i)$ может быть записана в трех эквивалентных формах

$$\begin{aligned} Z_{D_i}(k_i) &= \sum_{S=1}^m P(k_{jS} / D_i) \log_2 [P(k_{jS} / D_j) / P(k_{jS})] \\ Z_{D_i}(k_j) &= \sum_{S=1}^m P(k_{jS} / D_i) \log_2 [P(D_i / k_{jS}) / P(D_i)] \\ Z_{D_i}(k_i) &= \sum_{S=1}^m P(k_{jS} / D_i) \log_2 [P(D_i / k_{jS}) / P(D_i)P(k_{jS})] \end{aligned} \quad (24.17)$$

Для простого признака

$$\begin{aligned} Z_{D_i}(k_j) &= P(k_j / D_i) \log_2 [P(k_j / D_i) / P(k_j)] + P(\bar{k}_j / D_i) \log_2 [P(\bar{k}_j / D_i) / P(\bar{k}_j)] = \\ &= P(k_j / D_i) \log_2 [P(k_j / D_i) / P(k_j)] + (1 - P(k_j / D_i)) \cdot \log_2 \frac{1 - P(k_j / D_i)}{1 - P(k_j)} \end{aligned} \quad (24.18)$$

24.1. Общая диагностическая ценность обследования

$$\begin{aligned} Z_D(k_j) &= \sum_{i=1}^n P(D_i) \cdot Z_{D_i}(k_j) = \\ &= \sum_{i=1}^n \sum_{S=1}^m P(D_i) P(k_{jS} / D_i) \log_2 [P(k_{jS} / D_i) / P(k_{jS})] \end{aligned} \quad (24.19)$$

$Z_{D_i}(k_j)$ представляет собой ожидаемое (среднее) значение, которое может быть внесено обследованием в установление заранее диагноза, принадлежащего рассматриваемой системе диагнозов. В другой форме

$$Z_D(k_j) = \sum_{i=1}^n \sum_{S=1}^m P(D_i \cdot k_{jS}) \log_2 \frac{P(D_i \cdot k_{jS})}{P(D_i) \cdot P(k_{jS})} \quad (24.20)$$

Внесенная информация равна разности энтропий системы диагнозов

$$Z_D(k_j) = H(D) - H(D/k_j), \quad (24.21)$$

где $H(D) = -\sum_{i=1}^n P(D_i) \log_2 P(D_i)$ – первоначальная (априорная) энтропия;

$H(D/k_j) = -\sum_{i=1}^n P(D_i/k_{jS}) \log_2 P(D_i/k_{jS})$ – ожидаемое значение энтропии.

Контрольные вопросы:

1. В чем заключается диагностическая ценность признаков?
2. В чем отличие простого и сложного признаков?
3. Что такое диагностический вес признака?
4. Что такое диагностическая ценность?

25. ДИАГНОСТИЧЕСКАЯ ЦЕННОСТЬ ОДНОВРЕМЕННОГО ОБСЛЕДОВАНИЯ ПО КОМПЛЕКСУ ПРИЗНАКОВ

25.1. Общая диагностическая ценность

Рассмотрим сначала случай, когда комплекс признаков K состоит из двух признаков k_1 и k_2 , имеющих m_1 и m_2 разрядов. Будем сначала считать, что результаты обследования по признаку k_1 заранее неизвестны и требуется определить диагностическую ценность (ДЦ) одновременного обследования по признакам k_1 и k_2 .

Диагностическая ценность обследования по этому комплексу признаков для всей системы диагнозов измеряется количеством информации, вносимой k_1 и k_2 в систему D

$$Z_D(k_1k_2) = H(D) - H(D/k_1k_2), \quad (25.1)$$

где $H(D)$ – априорная энтропия системы диагнозов после обследования по признакам k_1 и k_2 . Учитывая

$$H(D/k_1k_2) = -\sum_{i=1}^n \sum_{S=1}^{m_2} \sum_{P=1}^{m_1} P(D_i k_{1S} k_{2P}) \cdot \log_2 P(D_i k_{1S} k_{2P}) = \quad (25.2)$$

$$H(D) + H(k_1/D) + H(k_2/Dk_1) = H(k_1) + H(k_2/k_1) + H(D/k_1k_2),$$

получим

$$Z_D(k_1k_2) = H(D) - H(k_1) + H(k_2/k_1) - H(Dk_1k_2). \quad (25.3)$$

Далее найдем

$$\begin{aligned} Z_D(k_1k_2) &= -\sum_{i=1}^n P(D_i) \cdot \log_2 P(D_i) - \sum_{S=1}^{m_1} P(k_{1S}) \log_2 P(k_{1S}) - \\ &- \sum_{S=1}^{m_1} \sum_{P=1}^{m_2} P(k_{1S}) P(k_{2P}/k_{1S}) \cdot \log_2 P(k_{2P}/k_{1S}) + \\ &+ \sum_{i=1}^n \sum_{S=1}^{m_1} \sum_{P=1}^{m_2} P(D_i k_{1S} k_{2P}) \cdot \log_2 P(D_i k_{1S} k_{2P}) = \\ &= \sum_{i=1}^n \sum_{S=1}^{m_1} \sum_{P=1}^{m_2} P(D_i k_{1S} k_{2P}) \log_2 \frac{P(D_i k_{1S} k_{2P})}{P(D_i) P(k_{1S} k_{2P})} \end{aligned} \quad (25.4)$$

Полученное равенство можно представить

$$Z_D(k_1k_2) = Z_D(k_1) + Z_D(k_2/k_1) \quad (25.5)$$

Пример определения условного и независимого диагностического веса

Рассматривается обследование по двум простым признакам k_1 и k_2 . Для получения статистических данных выбрано по 15 объектов с диагнозами D_1 и D_2 (табл. 25.1).

Таблица 25.1

Значение признаков k_1 и k_2 для объектов с состояниями D_1 и D_2

№ объекта	D_1		D_2	
	k_1	k_2	k_1	k_2
1	1	1	0	1
2	0	1	0	1
3	1	0	1	1
4	1	0	0	1
5	1	0	1	1
6	1	1	0	0
7	1	0	1	0
8	1	0	1	0
9	1	1	0	1
10	0	1	0	1
11	0	0	0	1
12	1	0	0	0
13	1	0	1	1
14	0	1	0	1
15	0	1	1	1

Считаем, что приводится последовательное обследование (сначала по признаку k_1 , затем по признаку k_2).

Из таблицы 25.1 устанавливаем

$$P(k_2 / D_1 k_1) = 3/10; \quad P(k_2 / D_2 k_1) = 4/6;$$

$$P(k_2 / D_1 \bar{k}_1) = 4/5; \quad P(k_2 / D_2 \bar{k}_1) = 7/9;$$

$$P(\bar{k}_2 / D_1 k_1) = 7/10; \quad P(\bar{k}_2 / D_2 k_1) = 2/6;$$

$$P(\bar{k}_2 / D_1 \bar{k}_1) = 1/5; \quad P(\bar{k}_2 / D_2 \bar{k}_1) = 2/9;$$

Например, величина $P(k_2 / D_1 k_1)$ подсчитывается следующим образом. Из 15 объектов с состоянием D_1 признак k_1 встретился у 10; из этих 10 объектов признак k_2 наблюдался в трех случаях. Для того чтобы найти частоту появления признаков для всей совокупности объектов, необходимо знать вероятности состояний D_1 и D_2 . Предположим, что $P(D_1) = 0,6$; $P(D_2) = 0,4$.

Тогда

$$P(k_1/k_2) = P(D_1)P(k_2/D_1k_1) + P(D_2)P(k_2/D_2k_1) = 0,6 \frac{3}{10} + 0,4 \frac{4}{6} = 0,45$$

Аналогично $P(k_2/\bar{k}_1) = 0,79$; $P(\bar{k}_2/k_1) = 0,55$; $P(\bar{k}_2/\bar{k}_1) = 0,21$.

Условный диагностический вес реализации признака k_2

$$Z_{D1}(k_2/k_1) = \log_2 \frac{P(k_2/D_1k_1)}{P(k_2/k_1)} = \log_2 \frac{0,3}{0,45} = -0,58;$$

$$Z_{D2}(k_2/k_1) = \log_2 \frac{P(k_2/D_2k_1)}{P(k_2/k_1)} = \log_2 \frac{0,67}{0,45} = 0,57;$$

$$Z_{D1}(k_2/\bar{k}_1) = \log_2 \frac{P(k_2/D_1\bar{k}_1)}{P(k_2/\bar{k}_1)} = \log_2 \frac{0,8}{0,79} = 0,02;$$

$$Z_{D2}(k_2/\bar{k}_1) = \log_2 \frac{P(k_2/D_2\bar{k}_1)}{P(k_2/\bar{k}_1)} = \log_2 \frac{0,78}{0,79} = -0,02;$$

Подобным образом находим

$$Z_{D1}(\bar{k}_2/k_1) = 0,35; \quad Z_{D1}(\bar{k}_2/\bar{k}_1) = -0,70;$$

$$Z_{D2}(\bar{k}_2/k_1) = -0,72; \quad Z_{D2}(\bar{k}_2/\bar{k}_1) = 0,08;$$

Для определения независимого диагностического веса реализаций признака k_2 находим

$$P(k_2/D_1) = \frac{7}{15}; \quad P(k_2/D_2) = \frac{11}{15}$$

$$P(k_2) = P(D_1)P(k_2/D_1) + P(D_2)P(k_2/D_2) = 0,6 \frac{7}{15} + 0,4 \frac{11}{15} = 0,06$$

Независимый диагностический вес реализации признака k_2

$$Z_{D1}(k_2) = \log_2 \frac{P(k_2/D_1)}{P(k_2)} = 3,03; \quad Z_{D2}(k_2) = \log_2 \frac{P(k_2/D_2)}{P(k_2)} = 3,68;$$

$$Z_{D1}(\bar{k}_2) = \log_2 \frac{P(\bar{k}_2/D_1)}{P(\bar{k}_2)} = -0,82; \quad Z_{D2}(\bar{k}_2) = \log_2 \frac{P(\bar{k}_2/D_2)}{P(\bar{k}_2)} = -1,82;$$

Контрольные вопросы:

1. В чем заключается общая диагностическая ценность признаков?
2. Как определяется условный и независимый диагностические веса?

26. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ НАДЕЖНОСТИ. КЛАССИФИКАЦИЯ ОТКАЗОВ. СОСТАВЛЯЮЩИЕ НАДЕЖНОСТИ

Термины и определения, используемые в теории надежности, регламентированы ГОСТ 27.002-89. Надежность в технике. Термины и определения.

26.1. Основные понятия

Надежность – свойство объекта выполнять заданные функции, сохраняя во времени и в заданных пределах значения установленных эксплуатационных показателей.

Объект – техническое изделие определенного целевого назначения, рассматриваемое в периоды проектирования, производства, испытаний и эксплуатации.

Объектами могут быть различные системы и их элементы.

Элемент – простейшая составная часть изделия, в задачах надежности может состоять из многих деталей.

Система – совокупность совместно действующих элементов, предназначенная для самостоятельного выполнения заданных функций.

Понятия элемента и системы трансформируются в зависимости от поставленной задачи. Например, станок при установлении его собственной надежности рассматривается как система, состоящая из отдельных элементов – механизмов, деталей и т.п., а при изучении надежности технологической линии – как элемент.

Надежность объекта характеризуется следующими основными *состояниями и событиями*.

Исправность – состояние объекта, при котором он соответствует всем требованиям, установленным нормативно-технической документацией (НТД).

Работоспособность – состояние объекта, при котором он способен выполнять заданные функции, сохраняя значения основных параметров, установленных НТД.

Основные параметры характеризуют функционирование объекта при выполнении поставленных задач.

Понятие *исправность* шире, чем понятие *работоспособность*. Работоспособный объект обязан удовлетворять лишь тем требованиям НТД, выполнение которых обеспечивает нормальное применение объекта по назначению. Таким образом, если объект неработоспособен, то это свиде-

тельствует о его неисправности. С другой стороны, если объект неисправен, то это не означает, что он неработоспособен.

Предельное состояние – состояние объекта, при котором его применение по назначению недопустимо или нецелесообразно.

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

- при неустранимом нарушении безопасности;
- при неустранимом отклонении величин заданных параметров;
- при 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 путем 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 повреждениями 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 восстанавливаемым.

Отказ – событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния объекта.

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

26.2. Классификация и характеристики отказов

По *типу* отказы подразделяются:

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

По своей *природе* отказы могут быть:

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

Основные признаки классификации отказов:

- характер возникновения (табл. 26.1);
- причина возникновения;
- характер устранения;
- последствия отказов;
- дальнейшее использование объекта;
- легкость обнаружения;
- время возникновения.

Таблица 26.1

Классификация отказов в зависимости от характера возникновения

характер возникновения:	• <i>внезапный отказ</i> – отказ, проявляющийся в резком (мгновенном) изменении характеристик объекта;
	• <i>постепенный отказ</i> – отказ, происходящий в результате медленного, постепенного ухудшения качества объекта.

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.

Постепенные отказы связаны с износом деталей и старением материалов.

Рассмотрим подробнее каждый из классификационных признаков (табл. 26.2).

Таблица 26.2

Классификация отказов в зависимости от других признаков

причина возникновения:	• <i>конструкционный отказ</i> , вызванный недостатками и неудачной конструкцией объекта;
	• <i>производственный отказ</i> , связанный с ошибками при изготовлении объекта по причине несовершенства или нарушения технологии;
	• <i>эксплуатационный отказ</i> , вызванный нарушением правил эксплуатации.

характер устранения:	• <i>устойчивый отказ;</i>
	• <i>перемежающийся отказ</i> (возникающий/исчезающий), последствия отказа: легкий отказ (легкоустранимый);
	• <i>средний отказ</i> (не вызывающий отказы смежных узлов – вторичные отказы);
	• <i>тяжелый отказ</i> (вызывающий вторичные отказы или приводящий к угрозе жизни и здоровью человека).
дальнейшее использование объекта:	• <i>полные отказы</i> , исключающие возможность работы объекта до их устранения;
	• <i>частичные отказы</i> , при которых объект может частично использоваться.
легкость обнаружения:	• <i>очевидные (явные) отказы;</i>
	• <i>скрытые (неявные) отказы.</i>
время возникновения:	• <i>отказы при нормальной эксплуатации;</i>
	• <i>износостойкие отказы</i> , вызванные необратимыми процессами износа деталей, старения материалов и пр.

26.3. Составляющие надежности

Надежность является *комплексным* свойством, включающим в себя в зависимости от назначения объекта или условий его эксплуатации *ряд простых свойств*:

- *безотказность;*
- *долговечность;*
- *ремонтпригодность;*
- *сохраняемость.*

Безотказность – свойство объекта непрерывно сохранять работоспособность в течение некоторой наработки или в течение некоторого времени.

Наработка – продолжительность или объем работы объекта, измеряемая в любых неубывающих величинах (единица времени, число циклов нагружения, километры пробега и т. п.).

Долговечность – свойство объекта сохранять работоспособность до наступления предельного состояния при установленной системе технического обслуживания и ремонтов.

Ремонтпригодность – свойство объекта, заключающееся в его приспособленности к предупреждению и обнаружению причин возникновения отказов, поддержанию и восстановлению работоспособности путем проведения ремонтов и технического обслуживания.

Сохраняемость – свойство объекта непрерывно сохранять требуемые эксплуатационные показатели в течение (и после) срока хранения и транспортирования.

В зависимости от объекта надежность может определяться всеми перечисленными свойствами или частью их. Например, надежность колеса зубчатой передачи, подшипников определяется их долговечностью, а станка – долговечностью, безотказностью и ремонтпригодностью.

Основные показатели надежности

Показатель надежности количественно характеризует, в какой степени данному объекту присущи определенные свойства, обуславливающие надежность. Одни показатели надежности (например, технический ресурс, срок службы) могут иметь размерность, ряд других (например, вероятность безотказной работы, коэффициент готовности) являются безразмерными.

Рассмотрим составляющую надежности – долговечность.

Технический ресурс – наработка объекта от начала его эксплуатации или возобновления эксплуатации после ремонта до наступления предельного состояния. Строго говоря, технический ресурс может быть регламентирован следующим образом: до среднего, капитального, от капитального до ближайшего среднего ремонта и т. п. Если регламентация отсутствует, то имеется в виду ресурс от начала эксплуатации до достижения предельного состояния после всех видов ремонтов.

Для невосстанавливаемых объектов понятия технического ресурса и наработки до отказа совпадают.

Назначенный ресурс – суммарная наработка объекта, при достижении которой эксплуатация должна быть прекращена независимо от его состояния.

Срок службы – календарная продолжительность эксплуатации (в том числе, хранение, ремонт и т. п.) от ее начала до наступления предельного состояния.

Графическая интерпретация перечисленных показателей приведена на рис. 26.1. 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 в ремонт, соответственно, средний и капитальный;
- t_9 – момент прекращения эксплуатации;
- t_{10} – момент отказа объекта.

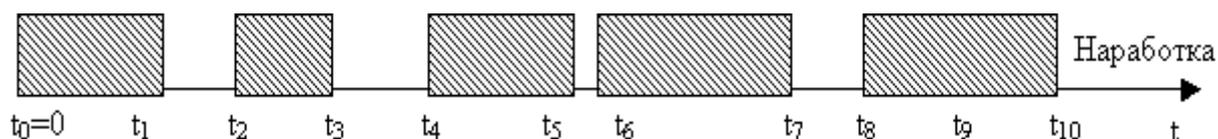


Рис. 26.1 Графическая интерпретация показателей надежности

Технический ресурс (наработка до отказа)

$$TP = t_1 + (t_3 - t_2) + (t_5 - t_4) + (t_7 - t_6) + (t_9 - t_8). \quad (26.1)$$

Назначенный ресурс

$$TN = t_1 + (t_3 - t_2) + (t_5 - t_4) + (t_7 - t_6) + (t_9 - t_8). \quad (26.2)$$

Срок службы объекта $ТС = t_{10}$.

Для большинства объектов электромеханики в качестве критерия долговечности чаще всего используется технический ресурс.

Контрольные вопросы

1. В чем заключается понятие надежности как свойства объекта?
2. Перечислите и дайте определения основных состояний и событий, которыми характеризуется надежность?
3. В чем общность и отличия состояний «исправность» и «работоспособность» объекта?
4. При каких условиях наступает предельное состояние объекта?
5. Какими могут быть объекты по способности к восстановлению работоспособного состояния?
6. Какими могут быть отказы по типу и природе происхождения?
7. Перечислите основные признаки классификации отказов.
8. Перечислите и дайте определение свойств (составляющих) надежности.
9. Дайте определение показателя надежности.
10. Перечислите и поясните показатели долговечности.

27. КОЛИЧЕСТВЕННЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ БЕЗОТКАЗНОСТИ: ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ.

27.1. Общие понятия

Наиболее важные показатели надежности невосстанавливаемых объектов – *показатели безотказности*, к которым относятся:

- *вероятность безотказной работы;*
- *плотность распределения отказов;*
- *интенсивность отказов;*
- *средняя наработка до отказа.*

Показатели надежности представляются в двух формах (определениях):
– статистическая (выборочные оценки);
– вероятностная.

Статистические определения (выборочные оценки) показателей получаются по результатам испытаний на надежность.

Допустим, что в ходе испытаний какого-то числа однотипных объектов получено конечное число интересующего нас параметра – наработки до отказа. Полученные числа представляют собой выборку некоего объема из общей «генеральной совокупности», имеющей неограниченный объем данных о наработке до отказа объекта.

Количественные показатели, определенные для «генеральной совокупности», являются *истинными (вероятностными) показателями*, поскольку объективно характеризуют случайную величину – наработку до отказа.

Показатели, определенные для выборки и позволяющие сделать какие-то выводы о случайной величине, являются *выборочными (статистическими) оценками*. Очевидно, что при достаточно большом числе испытаний (большой выборке) оценки *приближаются* к вероятностным показателям.

Вероятностная форма представления показателей удобна при аналитических расчетах, а статистическая – при экспериментальном исследовании надежности.

Для обозначения статистических оценок будем использовать знак « \wedge » размещаемый сверху рассматриваемой величины.

Примем следующую *схему испытаний* для оценки надежности.

Пусть на испытания поставлено N одинаковых серийных объектов. Условия испытаний идентичны, а испытания каждого из объектов проводятся до его отказа.

Введем следующие обозначения:

$T = \{0, t_1, \dots, t_N\} = \{t\}$ – случайная величина наработки объекта до отказа;

$N(t)$ – число объектов, работоспособных к моменту наработки t ;

$n(t)$ – число объектов, отказавших к моменту наработки t ;

$\Delta n(t, t + \Delta t)$ – число объектов, отказавших в интервале наработки $(t, t + \Delta t)$;

Δt – длительность интервала наработки.

Поскольку в дальнейшем определение выборочных оценок базируется на математических моделях теории вероятностей и математической статистики, то ниже приводятся основные (минимально необходимые) сведения из теории вероятностей.

27.2. Основные сведения о математических моделях расчета в теории вероятностей

Теория вероятностей – математическая наука, изучающая закономерности в случайных явлениях.

Основные понятия теории множеств

Одним из основных понятий является случайное событие.

Событием называется всякий факт (исход), который в результате опыта (испытания) может произойти или не произойти.

Каждому из таких событий можно поставить в соответствие определенное число, называемое его **вероятностью** и являющееся мерой возможного совершения этого события.

Теория вероятностей основывается на аксиоматическом подходе и опирается на понятия теории множеств.

Множество – это любая совокупность объектов произвольной природы, каждый из которых называется элементом множества.

Предположим, что производится некоторый опыт (испытание), результат которого заранее неизвестен. Тогда **множество** Ω всех возможных исходов опыта представляет пространство элементарных событий, а каждый его элемент $\alpha \in \Omega$ (отдельный исход опыта) является **элементарным событием**. Любой набор элементарных событий (любое их сочетание) считается **подмножеством** (частью) множества Ω и является **случайным событием**, т. е. любое событие A – это подмножество множества Ω : $A \in \Omega$.

В общем случае, если множество Ω содержит n элементов, то в нем можно выделить 2^n подмножеств (событий).

Введем ряд определений.

Совместные (несовместные) события – такие события, появление одного из которых не исключает (исключает) возможности появления другого.

Зависимые (независимые) события – такие события, появление одного из которых влияет (не влияет) на появление другого события.

Противоположное событие относительно некоторого выбранного события A – событие, состоящее в не появлении этого выбранного события (обозначается \bar{A}).

Полная группа событий – такая совокупность событий, при которой в результате опыта должно произойти хотя бы одно из событий этой совокупности.

Аксиомы теории вероятностей

Вероятность события A обозначается $P(A)$ или $P\{A\}$. Вероятность выбирают так, чтобы она удовлетворяла следующим условиям или аксиомам:

$$P(\Omega) = 1; \quad P(\emptyset) = 0 \quad (27.1)$$

$$P(\emptyset) \leq P(A) \leq P(\Omega) \quad (27.2)$$

Если A_i и A_j несовместные события, т. е. $A_i \cap A_j = \emptyset$, то

$$P(A_i \vee A_j) = P(A_i) + P(A_j), \quad (27.3)$$

где \vee – знак логического сложения событий, \emptyset – пустое множество (отсутствие событий).

Аксиома (27.3) обобщается на любое число несовместных событий $\{A_i\}^n = 1$

$$P\left\{ \bigcup_{i=1}^n A_i \right\} = \sum_{i=1}^n P(A_i) \quad (27.4)$$

Частотное определение вероятности любого события A

$$P(A) = \frac{m_A}{n} \quad (27.5)$$

представляет отношение числа случаев (m_A), благоприятных появлению события A , к общему числу случаев (возможному числу исходов опыта) n .

При неограниченном возрастании числа n наблюдается статистическое упорядочение, когда частота события A (выборочная оценка) все меньше изменяется и приближается к постоянному значению – вероятности события A .

Основные правила теории вероятностей. Теорема сложения вероятностей

Если A_1, A_2, \dots, A_n – несовместные события и A – сумма этих событий, то вероятность события A равна сумме вероятностей событий A_1, A_2, \dots, A_n

$$P(A) = P\left\{\bigcup_{i=1}^n A_i\right\} = \sum_{i=1}^n P(A_i). \quad (26.6)$$

Поскольку противоположные события A и \bar{A} несовместны и образуют полную группу, то сумма их вероятностей

$$P(A) + P(\bar{A}) = 1 \quad (27.7)$$

Теорема умножения вероятностей

Вероятность произведения двух событий A_1 и A_2 равна вероятности одного из них, умноженной на условную вероятность другого, в предположении, что первое событие произошло

$$P(A_1 \wedge A_2) = P(A_1) \cdot P(A_2 | A_1) = P(A_2) \cdot P(A_1 | A_2), \quad (27.8)$$

где условная вероятность события A_1 при наступлении события A_2 – вероятность события A_1 , вычисленная в предположении, что событие A_2 произошло

$$P(A_1 | A_2) = P(A_1 \cdot A_2) / P(A_2). \quad (27.9)$$

Для любого конечного числа событий теорема умножения имеет вид

$$P\left\{\bigcap_{i=1}^n A_i\right\} = P(A_1 | A_2 \dots A_n) \cdot P(A_2 | A_3 \dots A_n) \cdot \dots \cdot P(A_{n-1} | A_n) \cdot P(A_n). \quad (27.10)$$

Если события A_1 и A_2 независимы, то соответствующие условные вероятности

$$P(A_1 | A_2) = P(A_1); \quad P(A_2 | A_1) = P(A_2),$$

поэтому теорема умножения вероятностей (27.8) принимает вид

$$P(A_1 \wedge A_2) = P(A_1) \cdot P(A_2), \quad (27.11)$$

а для конечного числа n независимых событий

$$P\left\{\bigcap_{i=1}^n A_i\right\} = \prod_{i=1}^n P\{A_i\}. \quad (27.12)$$

Следствия основных теорем

Следствия основных теорем – формула полной вероятности (ФПВ) и формула Байеса находят широкое применение при решении большого числа задач.

Формула полной вероятности

Если по результатам опыта можно сделать n исключаящих друг друга предположений (гипотез) H_1, H_2, \dots, H_n , представляющих полную группу несовместных событий (для которой $\sum_{i=1}^n P(i) = 1$), то вероятность события A , которое может появиться только с одной из этих гипотез, определяется

$$P(A) = P(H_j) \cdot P(A|H_j), \quad (27.13)$$

где $P(H_i)$ – вероятность гипотезы H_i ;

$P(A|H_i)$ – условная вероятность события A при гипотезе H_i .

Поскольку событие A может появиться с одной из гипотез H_1, H_2, \dots, H_n , то $A = AH_1 \vee AH_2 \vee \dots \vee AH_n$, но H_1, H_2, \dots, H_n несовместны, поэтому

$$P(A) = P(A \wedge H_1) + \dots + P(A \wedge H_n) = \sum_{i=1}^n P(AH_i).$$

При зависимости события A от появления гипотезы H_i $P(AH_i) = P(H_i) \cdot P(A|H_i)$, откуда и следует выражение (27.13).

Формула Байеса (формула вероятностей гипотез)

Если до опыта вероятности гипотез H_1, H_2, \dots, H_n были равны $P(H_1), P(H_2), \dots, P(H_n)$, а в результате опыта произошло событие A , то новые (условные) вероятности гипотез вычисляются

$$P(A|H_j) = \frac{P(H_j) \cdot P(A|H_j)}{\sum_{i=1}^n P(H_i) \cdot P(A|H_i)} = \frac{P(H_j) \cdot P(A|H_j)}{P(A)}. \quad (27.14)$$

Доопытные (первоначальные) вероятности гипотез $P(H_1), P(H_2), \dots, P(H_n)$ называются **априорными**, а послеопытные – $P(H_1|A), \dots, P(H_n|A)$ – **апостериорными**.

Формула Байеса позволяет «пересмотреть» возможности гипотез с учетом полученного результата опыта.

Доказательство формулы Байеса следует из предшествующего материала. Поскольку $P(H_i \wedge A) = P(H_i) \cdot P(A|H_i) = P(H_i) \cdot P(H_i|A)$

$$P(H_i|A) = \frac{P(H_i \wedge A)}{P(A)} = \frac{P(H_i) \cdot P(A|H_i)}{P(A)}, \quad (27.15)$$

откуда, с учетом (27.13), получается выражение (27.15).

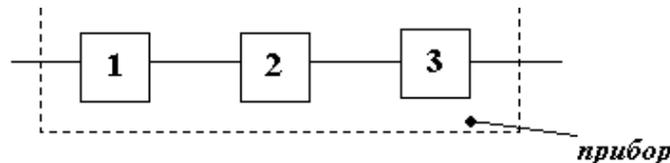
Если после опыта, давшего событие A , проводится еще один опыт, в результате которого может произойти или нет событие A_1 , то условная вероятность этого последнего события вычисляется по (27.13), в которую входят не прежние вероятности гипотез $P(H_i)$, а новые – $P(H_i|A)$

$$P(A_1|A) = \sum_{i=1}^n P(H_i|A) \cdot P(A_1|H_i A). \quad (27.16)$$

Выражение (27.16) называют *формулой для вероятностей будущих событий*.

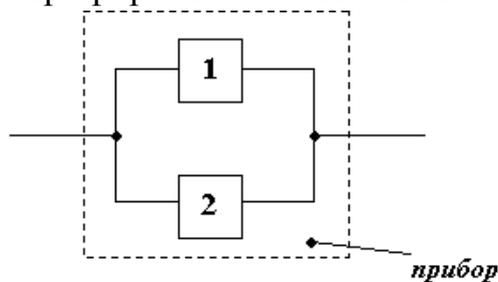
Контрольные вопросы и задачи

1. Перечислите показатели безотказности объекта и поясните, чем отличаются статистическая (выборочные оценки) и вероятностная форма. Дайте определения.
2. Поясните «схему испытаний» объекта при определении выборочных оценок показателей безотказности.
3. Дайте определение «оценки» вероятности события и объясните условие сходимости оценки и вероятности события.
4. Перечислите и поясните основные аксиомы вероятности.
5. Перечислите и поясните смысл основных правил (теорем) теории вероятностей.
6. Назовите следствия основных теорем теории вероятностей.
7. Прибор может работать в двух режимах: «1» и «2». Режим «1» наблюдается в 80 % случаев, режим «2» – в 20 % случаев за время работы T . Вероятность того, что прибор откажет при работе в режиме «1», равна 0,1, а вероятность отказа прибора в режиме «2» – 0,7. Найти вероятность отказа прибора за время T . Ответ: 0,22
8. Прибор состоит из трех блоков, которые независимо друг от друга могут отказаться. Отказ каждого из блоков приводит к отказу всего прибора. Вероятность того, что за время T работы прибора откажет первый блок, равна 0,2, второй – 0,1, третий – 0,3. Найти вероятность того, что за время T прибор проработает безотказно.



Ответ: 0,504

9. Прибор состоит из двух блоков, дублирующих друг друга. Вероятность того, что за время T каждый из блоков проработает безотказно, равна 0,9. Отказ прибора произойдет при отказе обоих блоков. Найти вероятность того, что за время T прибор проработает безотказно.



Ответ: 0,99

28. ПОКАЗАТЕЛИ БЕЗОТКАЗНОСТИ: ВЕРОЯТНОСТЬ БЕЗОТКАЗНОЙ РАБОТЫ, ПЛОТНОСТЬ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОТКАЗОВ, ИНТЕНСИВНОСТЬ ОТКАЗОВ

28.1. Вероятность безотказной работы (ВБР)

Статистическая оценка ВБР (эмпирическая функция надежности) определяется отношением числа $N(t)$ объектов, безотказно проработавших до момента наработки t , к числу объектов, исправных к началу испытаний ($t = 0$) – к общему числу объектов N . Оценку ВБР можно рассматривать как показатель доли работоспособных объектов к моменту наработки t .

$$\hat{P}(t) = \frac{N(t)}{N}, \quad (28.1)$$

Поскольку $N(t) = N - n(t)$, то ВБР по (28.1)

$$\hat{P}(t) = 1 - \frac{n(t)}{N} = 1 - \hat{Q}(t), \quad (28.2)$$

где $\hat{Q}(t) = \frac{n(t)}{N}$ – оценка вероятности отказа (ВО).

В статистическом определении оценка ВО представляет эмпирическую функцию распределения отказов.

Так как события, заключающиеся в наступлении или ненаступлении отказа к моменту наработки t , являются противоположными, то

$$\hat{I}(t) + \hat{Q}(t) = 1. \quad (28.3)$$

Нетрудно убедиться, что ВБР является убывающей, а ВО – возрастающей функцией наработки.

Действительно,

– в момент начала испытаний $t = 0$ число работоспособных объектов равно общему их числу $N(t) = N(0) = N$, а число отказавших – $n(t) = n(0) = 0$, поэтому $\hat{I}(t) = \hat{I}(0) = 1$, а $\hat{Q}(t) = \hat{Q}(0) = 0$;

– при наработке $t \rightarrow \infty$ все объекты, поставленные на испытания, откажут, т. е. $N(\infty) = 0$, а $n(\infty) = N$, поэтому $\hat{I}(t) = \hat{I}(\infty) = 0$, а $\hat{Q}(t) = \hat{Q}(\infty) = 1$.

Вероятностное определение ВБР

$$P(t) = P\{T \leq t\}. \quad (28.4)$$

Таким образом, ВБР есть вероятность того, что случайная величина наработки до отказа T окажется не меньше некоторой заданной наработки t .

Очевидно, что ВО будет являться функцией распределения случайной величины T и представляет вероятность того, что наработка до отказа окажется меньше некоторой заданной наработки t

$$Q(t) = P\{T < t\}. \quad (28.5)$$

Графики ВБР и ВО приведены на рис. 28.1.

В пределе с ростом числа N (увеличение выборки) испытываемых объектов $\hat{I}(t)$ и $\hat{Q}(t)$ сходятся по вероятности (приближаются по значениям) к $P(t)$ и $Q(t)$.

Сходимость по вероятности представляется следующим образом:

$$P\{\lim_{N \rightarrow \infty} |\hat{P}(t) - P(t)| = 0\} = 1. \quad (28.6)$$

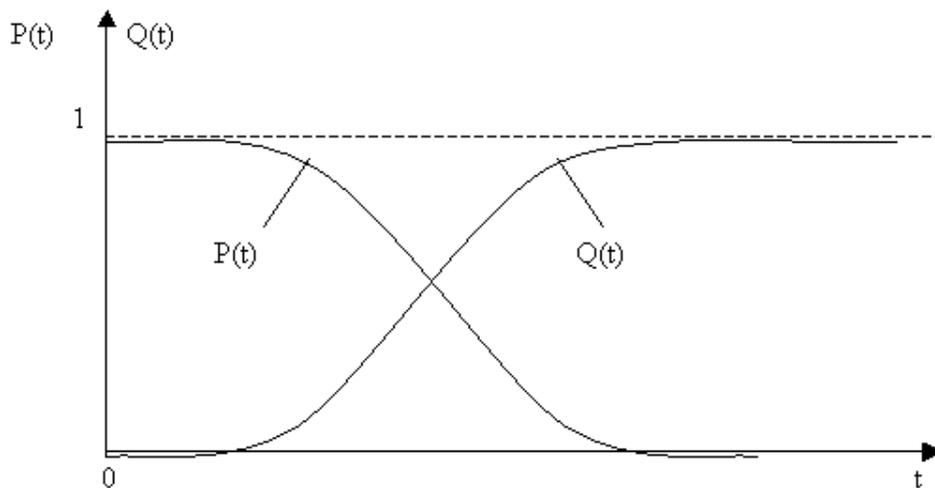


Рис. 28.1. Графики ВБР и ВО

Практический интерес представляет определение *ВБР в интервале наработки* $[t, t + \Delta t]$ при условии, что объект безотказно проработал до начала t интервала. Определим эту вероятность, используя теорему умножения вероятностей и выделив следующие события:

$A = \{\text{безотказная работа объекта до момента } t\}$;

$B = \{\text{безотказная работа объекта в интервале } \Delta t\}$;

$C = A \cdot B = \{\text{безотказная работа объекта до момента } t + \Delta t\}$.

Очевидно $P(C) = P(A \cdot B) = P(A) \cdot P(B|A)$, поскольку события A и B будут зависимыми.

Условная вероятность $P(B|A)$ представляет ВБР $P(t, t + \Delta t)$ в интервале $[t, t + \Delta t]$, поэтому

$$P(B|A) = P(t, t + \Delta t) = P(C)/P(A) = P(t + \Delta t)/P(t). \quad (28.7)$$

В интервале наработки $[t, t + \Delta t]$ с учетом (28.7) ВО равна

$$Q(t, t + \Delta t) = 1 - P(t, t + \Delta t) = [P(t) - P(t + \Delta t)] / P(t). \quad (28.8)$$

28.2. Плотность распределения отказов (ПРО)

Статистическая оценка ПРО определяется отношением числа объектов $\Delta n(t, t + \Delta t)$, отказавших в интервале наработки $[t, t + \Delta t]$, к произведению общего числа объектов N на длительность интервала наработки Δt

$$\hat{f}(t) = \frac{\Delta n(t, t + \Delta t)}{N \Delta t} \quad [\text{ед. наработки}^{-1}] \quad (28.9)$$

Поскольку $\Delta n(t, t + \Delta t) = n(t + \Delta t) - n(t)$, где $n(t + \Delta t)$ – число объектов, отказавших к моменту наработки $t + \Delta t$, то оценку ПРО можно представить

$$\hat{f}(t) = \frac{\Delta n(t + \Delta t) - n(t)}{N \Delta t} = \frac{1}{\Delta t} [\hat{Q}(t + \Delta t) - \hat{Q}(t)] = \frac{\hat{Q}(t, t + \Delta t)}{\Delta t}, \quad (28.10)$$

где $\hat{Q}(t, t + \Delta t)$ – оценка ВО в интервале наработки, т. е. приращение ВО за Δt .

Оценка ПРО **представляет** «частоту» отказов, т. е. число отказов за единицу наработки, отнесенное к первоначальному числу объектов.

Вероятностное определение ПРО следует из (28.10) при стремлении интервала наработки $\Delta t \rightarrow t_0$ и увеличения объема выборки $N \rightarrow \infty$

$$f(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\hat{Q}(t, t + \Delta t)}{\Delta t} = \frac{dQ(t)}{dt} = \frac{d[1 - P(t)]}{dt} = - \frac{dP(t)}{dt}. \quad (28.11)$$

По существу ПРО является плотностью распределения (плотностью вероятности) случайной величины T наработки объекта до отказа.

Поскольку $Q(t)$ является неубывающей функцией своего аргумента, то $f(t) \geq 0$.

Один из возможных видов графика $f(t)$ приведен на рис. 28.2.

Как видно из рис. 28.2, ПРО $f(t)$ характеризует частоту отказов (или приведенную ВО), с которой распределяются конкретные значения наработок всех N объектов (t_1, \dots, t_N), составляющие случайную величину наработки T до отказа объекта данного типа. Допустим, в результате испытаний установлено, что значение наработки t_i присуще наибольшему числу объектов, о чем свидетельствует максимальная величина $f(t_i)$. Напротив, большая наработка t_j была зафиксирована только у нескольких объектов,

поэтому и частота $f(t_j)$ появления такой наработки на общем фоне будет малой.

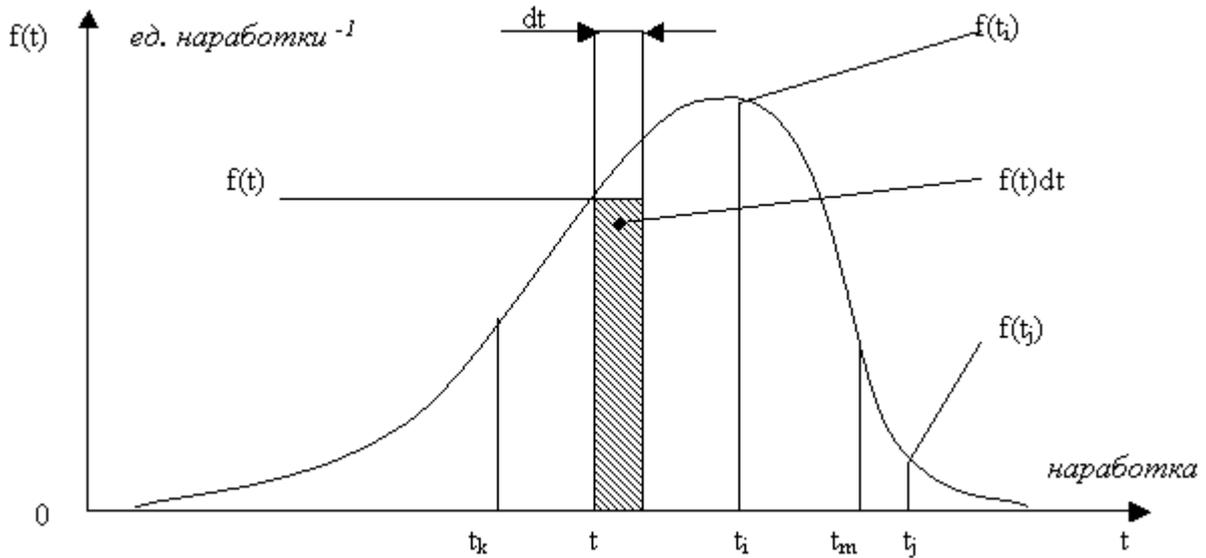


Рис. 28.2. График ПРО

Отложим на оси абсцисс некоторую наработку t и бесконечно малый интервал наработки шириной dt , примыкающий к t .

Тогда вероятность попадания случайной величины наработки T на элементарный участок шириной dt (с точностью до бесконечно малых высшего порядка) равна

$$P\{T \in (t, t + dt)\} = P\{t < T < t + dt\} \approx f(t)dt, \quad (28.12)$$

где $f(t)dt$ – элемент ВО объекта в интервале $[t, t + dt]$ (геометрически это площадь заштрихованного прямоугольника, опирающегося на отрезок dt).

Аналогично вероятность попадания наработки T в интервал $[t_k, t_m]$ равна

$$P\{T \in (t_k, t_m)\} \approx \sum_{t_i \in (t_k, t_m)} f(t_i)dt_i \approx \int_{t_k}^{t_m} f(t)dt, \quad (28.13)$$

что геометрически интерпретируется площадью под кривой $f(t)$, опирающейся на участок $[t_k, t_m]$.

ВО и ВБР можно выразить в функции ПРО.

Поскольку $Q(t) = P\{T < t\}$, то, используя выражение (28.13), получим, расширение интервала слева до нуля вызвано тем, что T не может быть отрицательной величиной

$$Q(t) = P\{0 < T < t\} = P\{T \in (0, t)\} = \int_0^t f(t)dt \quad (28.14)$$

Поскольку $P(t) = P\{T < t\}$, то

$$P(t) = P\{t \leq T < \infty\} = \int_t^{\infty} f(t) dt. \quad (28.15)$$

Очевидно, что $Q(t)$ представляет собой площадь под кривой $f(t)$ слева от t , а $P(t)$ – площадь под $f(t)$ справа от t . Поскольку все полученные при испытаниях значения наработок лежат под кривой $f(t)$, то

$$\int_0^{\infty} f(t) dt = \int_0^t f(t) dt + \int_t^{\infty} f(t) dt = Q(t) + P(t) = 1. \quad (28.16)$$

28.3. Интенсивность отказов (ИО)

Статистическая оценка ИО определяется, как отношение числа объектов $\Delta n(t, t + \Delta t)$, отказавших в интервале наработки $[t, t + \Delta t]$, к произведению числа $N(t)$ работоспособных объектов в момент t на длительности интервала наработки Δt

$$\hat{\lambda}(t) = \frac{\Delta n(t, t + \Delta t)}{N(t) \cdot \Delta t} \cdot \frac{N}{N} \quad [\text{ед. наработки}^{-1}] \quad (28.17)$$

Сравнивая (28.9) и (28.17), можно отметить, что ИО *несколько полнее характеризует надежность объекта на момент наработки t* , т. к. показывает частоту отказов, отнесенную к фактически работоспособному числу объектов на момент наработки t .

Вероятностное определение ИО получим, умножив и поделив правую часть выражения (28.17) на N

$$\hat{\lambda}(t) = \frac{\Delta n(t, t + \Delta t)}{N(t) \cdot \Delta t} \cdot \frac{N}{N} = \frac{\Delta n(t, t + \Delta t)}{N \cdot \Delta t} \cdot \frac{N}{N(t)}.$$

С учетом (28.10), оценку ИО $\hat{\lambda}(t)$ можно представить

$$\hat{\lambda}(t) = \frac{Q(t, t + \Delta t)}{\Delta t} \cdot \frac{1}{P(t)},$$

откуда при стремлении $\Delta t \rightarrow 0$ и $N \rightarrow \infty$ получаем

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\hat{Q}(t, t + \Delta t)}{\Delta t} \cdot \frac{1}{\hat{P}(t)} = \frac{dQ(t)}{dt} \cdot \frac{1}{P(t)} = \frac{f(t)}{P(t)}, \quad (28.18)$$

Возможные виды изменения ИО $\lambda(t)$ приведены на рис. 28.3.

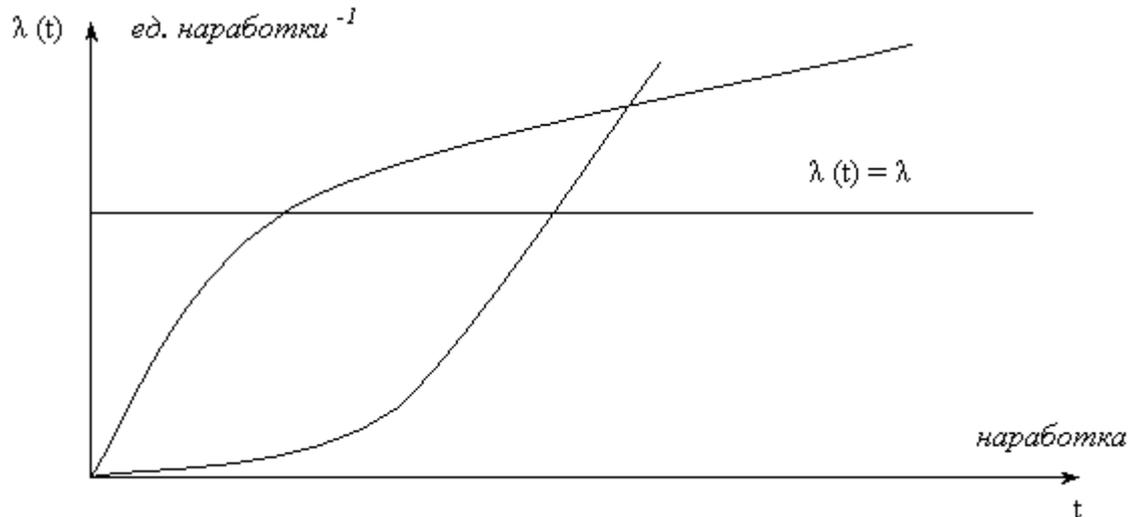


Рис. 28.3. Графики изменения $\lambda(t)$

Контрольные вопросы и задачи

1. Перечислите показатели безотказности объекта и поясните, в чем отличия статистических оценок от вероятностной формы их представления.
2. Дайте определение вероятности безотказной работы (ВБР) объекта и поясните ее смысл.
3. Чем отличается ВБР объекта при наработке t от ВБР в интервале наработки $[t, t + \Delta t]$?
4. Дайте определение плотности распределения отказов (ПРО) и поясните ее смысл при оценке надежности объекта.
5. Дайте графическую интерпретацию понятий ВБР и вероятности отказов (ВО).
6. Дайте определение интенсивности отказов (ИО) и поясните ее смысл при оценке надежности объекта.
7. По результатам испытаний $N = 100$ однотипных элементов определить показатели безотказности для заданных наработок t_i , если известно, что число отказавших элементов $n(t_i)$ к моментам наработки составляет:

$t_1 = 100$ ч	$n(t_1) = 5$
$t_2 = 150$ ч	$n(t_2) = 8$
$t_3 = 200$ ч	$n(t_3) = 11$
$t_4 = 250$ ч	$n(t_4) = 15$

$$t_s = 300 \text{ ч}$$

$$n(t_s) = 21$$

Построить графики расчетных показателей.

29. УРАВНЕНИЕ СВЯЗИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ. ЧИСЛОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ БЕЗОТКАЗНОСТИ

29.1. Уравнение связи показателей надежности

В лекции 28 приведены выражения, определяющие вероятность безотказной работы (ВБР) и вероятность отказов (ВО) в функции ПРО $f(t)$. Поскольку интенсивность отказов (ИО) $\lambda(t)$ является более полной характеристикой надежности, то представляет интерес выразить ВБР $P(t)$ через ИО.

Используя выражение для интенсивности отказов(28.18)

$$\lambda(t) = \frac{f'(t)}{P(t)},$$

запишем

$$dP(t)/dt = -\lambda(t) \cdot P(t).$$

Разделяя переменные (умножив обе части на $dt / P(t)$, получим

$$dP(t) / P(t) = -\lambda(t) dt.$$

Интегрируя от 0 до t и принимая во внимание, что при $t = 0$ ВБР объекта $P(0) = 1$, получаем

$$\int_0^t \frac{dP(t)}{P(t)} = \ln P(t) \Big|_0^t = \ln P(t) = - \int_0^t \lambda(t) dt,$$

откуда уравнение связи основных показателей надежности имеет вид

$$P(t) = \exp \left\{ - \int_0^t \lambda(t) dt \right\}. \quad (29.1)$$

Величина $\lambda(t)dt$ есть вероятность того, что элемент, безотказно проработавший в интервале наработки $[0, t]$, откажет в интервале $[t, t + dt]$.

Уравнение связи показывает, что все показатели надежности $P(t)$, $Q(t)$, $f(t)$ и $\lambda(t)$ равноправны в том смысле, что, зная один из них, можно определить другие.

29.2. Числовые характеристики безотказности невосстанавливаемых объектов

Средняя наработка до отказа

Рассмотренные выше функциональные показатели надежности $P(t)$, $Q(t)$, $f(t)$ и $\lambda(t)$ полностью описывают случайную величину наработки $T = \{t\}$. В то же время для решения ряда практических задач надежности бывает

достаточно знать некоторые числовые характеристики этой случайной величины и в первую очередь **среднюю наработку до отказа**.

Статистическая оценка средней наработки до отказа

$$\hat{T}_0 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_i, \quad (29.2)$$

где t_i – наработка до отказа i -того объекта.

При *вероятностном определении* средняя наработка до отказа представляет собой **математическое ожидание** (МО) случайной величины T и определяется

$$T_0 = M\{T\} = \int_0^{\infty} t f(t) dt. \quad (29.3)$$

Используя выражение для плотности распределения отказов (28.11)

$$f(t) = - \frac{dP(t)}{dt}$$

и интегрирование по частям, можно преобразовать (29.3) к виду

$$T_0 = \int_0^{\infty} P(t) dt, \quad (29.4)$$

с учетом того, что $P(0) = 1$, $P(\infty) = 0$.

Из (29.4) следует, что средняя наработка до отказа геометрически интерпретируется как площадь под кривой $P(t)$ (рис. 29.1).

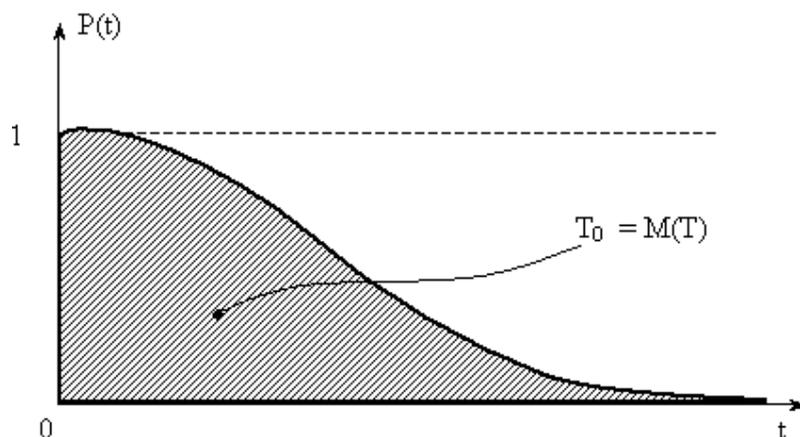


Рис. 29.1. Средняя наработка до отказа, площадь под кривой $P(t)$

Очевидно, что с увеличением выборки испытаний $N \rightarrow \infty$ средняя арифметическая наработка (оценка \hat{T}_0) сходится по вероятности с МО наработки до отказа.

Математическое ожидание наработки T_0 означает математически ожидаемую наработку до отказа однотипных элементов, т. е. усредненную наработку до первого отказа.

На практике представляют интерес *условные средние наработки*:

1) *средняя полезная наработка* ($T_0|t \leq t_1$) определенная при условии, что при достижении наработки t_1 все оставшиеся работоспособными объекты снимаются с эксплуатации;

2) *средняя продолжительность предстоящей работы* ($T_0|t > t_1$) при условии, что объект безотказно работал на интервале $(0, t_1)$.

Причины использования этих показателей:

1. Высоконадежные объекты (элементы электронных схем), как правило, эксплуатируются срок меньший, чем T_0 ($t_{экс} < T_0$), т. е. заменяются по причине морального старения раньше, чем успевают поработать T_0 .

2. Часто для указанных объектов сокращают период испытаний (проводят до наработок, соответствующих их моральному старению), поэтому T_0 в таком случае понимают как среднюю наработку, которая имела бы место в действительности, если бы ИО оставалась такой, какой она была в начальный период испытаний.

Средняя полезная наработка $T_0|t \leq t_1$ (по аналогии с T_0)

$$T_0|_{t \leq t_1} = \int_0^{t_1} P(t) dt \quad (29.5)$$

Средняя продолжительность предстоящей работы $T_0|t > t_1$

$$T_0|_{t > t_1} = M\{T - t_1\} = \frac{1}{P(t_1)} \int_{t_1}^{\infty} P(t) dt \quad (29.6)$$

Соотношение между $T_0|t \leq t_1$, $T_0|t > t_1$ и T_0

$$T_0|t \leq t_1 + T_0|t > t_1 \cdot P(t_1).$$

Графические понятия $T_0|t \leq t_1$ и $T_0|t > t_1$ иллюстрируются рис. 29.3)

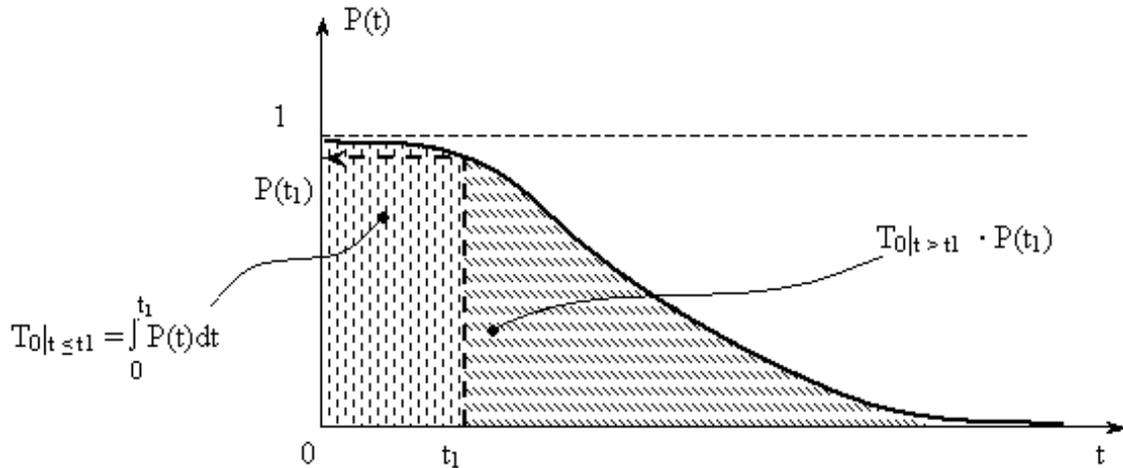


Рис. 29.2. Средняя полезная наработка и средняя продолжительность предстоящей работы представлены площадью под кривой $P(t)$

В то же время средняя наработка не может полностью характеризовать безотказность объекта.

Так при равных средних наработках до отказа T_0 надежность объектов 1 и 2 может весьма существенно различаться (рис. 29.3). Очевидно, что ввиду большего рассеивания наработки до отказа (кривая ПРО $f_2(t)$ ниже и шире) объект 2 менее надежен, чем объект 1.

Поэтому для оценки надежности объекта по величине \hat{T}_0 необходимо еще знать и показатель рассеивания случайной величины $T = \{t\}$ около средней наработки T_0 .

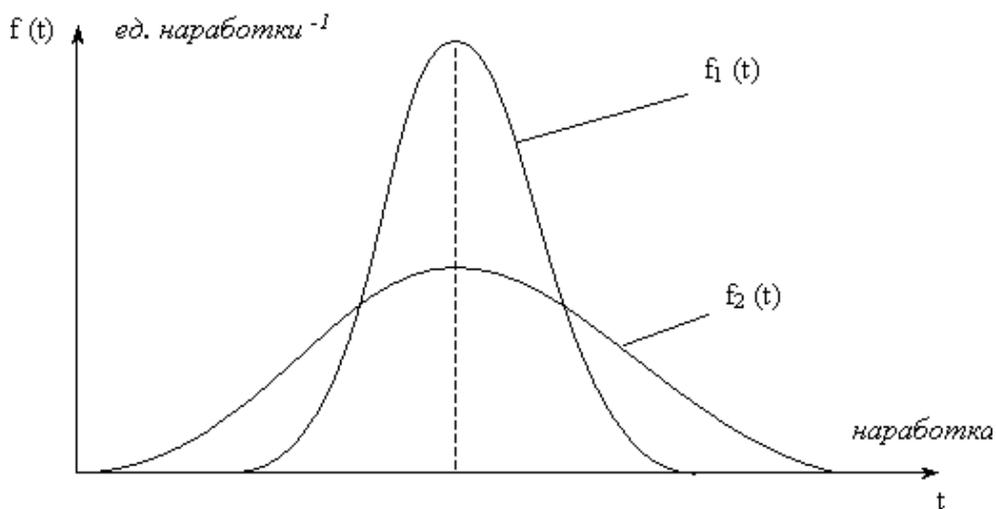


Рис. 29.3. Изменение ПРО в зависимости от рассеивания наработки

К числу показателей рассеивания относятся *дисперсия* и *среднее квадратичное отклонение (СКО)* наработки до отказа.

Дисперсия случайной величины наработки:

– статистическая оценка

$$\hat{D} = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (t_i - \hat{T}_0)^2, \quad (29.7)$$

– вероятностное определение

$$D = D\{T\} = M\{(T - T_0)^2\} = \int_0^{\infty} (t - T_0)^2 f(t) dt. \quad (29.8)$$

Среднее квадратичное отклонение случайной величины наработки:

$$\hat{S}^2 = \hat{D} \text{ или } S^2 = S^2\{T\} = D\{T\}. \quad (29.9)$$

Средняя наработка до отказа T_0 и СКО наработки S имеют размерность [ед. наработки], а дисперсия D – [ед. наработки²].

Контрольные вопросы

1. Поясните смысл уравнения связи показателей безотказности?
2. Дайте определение статистической оценки и вероятностного представления средней наработки до отказа?
3. Перечислите условные средние наработки до отказа и поясните необходимость их использования?
4. Дайте определение статистических оценок и вероятностного представления характеристик рассеивания случайной величины наработки.

30. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ. СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ

30.1. Общие понятия о моделях надежности

Для решения задач по оценке надежности и прогнозированию работоспособности объекта необходимо иметь математическую модель, которая представлена аналитическими выражениями одного из показателей $P(t)$, или $f(t)$, или $\lambda(t)$. Основным путем для получения модели состоит в проведении испытаний, вычислении статистических оценок и их аппроксимации аналитическими функциями.

Далее будут рассмотрены модели, используемые в теории надежности.

Выясним, как изменяется безотказность объектов при их эксплуатации, что позволит классифицировать модели и определить возможности их применения.

Опыт эксплуатации показывает, что изменение ИО $\lambda(t)$ подавляющего большинства объектов описывается U-образной кривой (рис. 30.1).

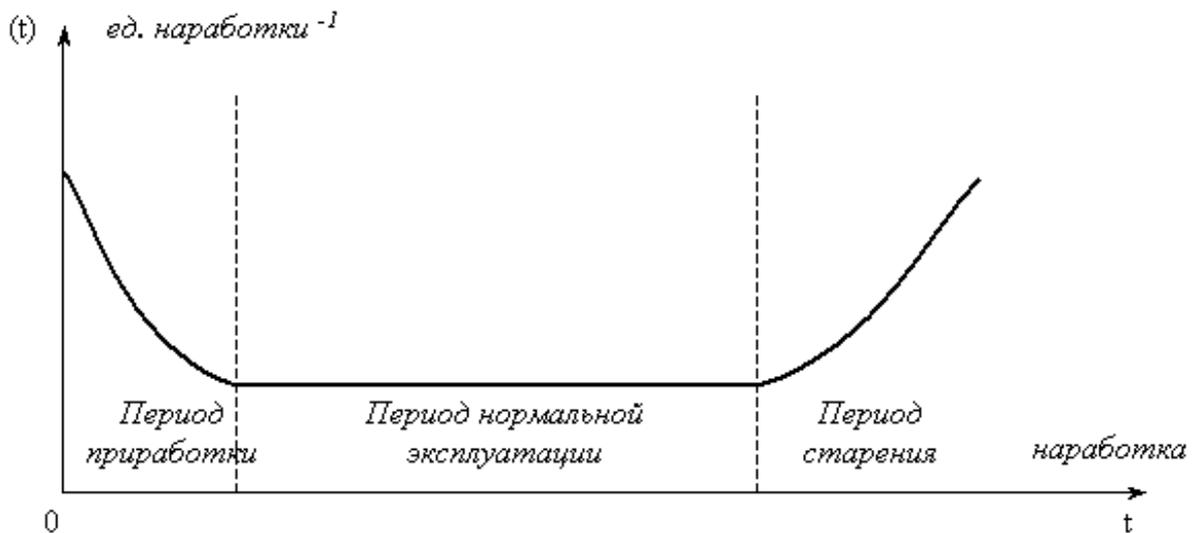


Рис. 30.1. U-образная кривая изменения ИО в зависимости от наработки

Кривую можно условно разделить на три характерных участка:

- первый – период приработки;
- второй – период нормальной эксплуатации;
- третий – период старения объекта.

Период приработки объекта имеет повышенную ИО, вызванную приработочными отказами, обусловленными дефектами производства,

монтажа, наладки. Иногда с окончанием этого периода связывают гарантийное обслуживание объекта, когда устранение отказов производится изготовителем.

В период нормальной эксплуатации ИО уменьшается и практически остается постоянной, при этом отказы носят случайный характер и появляются внезапно, прежде всего, из-за несоблюдения условий эксплуатации, случайных изменений нагрузки, неблагоприятных внешних факторов и т.п. Именно этот период соответствует основному времени эксплуатации объекта.

Возрастание ИО относится к *периоду старения* объекта и вызвано увеличением числа отказов от износа, старения и других причин, связанных с длительной эксплуатацией.

Вид аналитической функции, описывающей изменение показателей надежности $P(t)$, $f(t)$ или $Q(t)$, определяет **закон распределения случайной величины**, который выбирается в зависимости от свойств объекта, его условий работы и характера отказов.

30.2. Статистическая обработка результатов испытаний и определение показателей надежности

Постановка задачи

По результатам испытаний N невосстанавливаемых одинаковых объектов получена статистическая выборка – массив наработки (в любых единицах измерения) до отказа каждого из N испытывавшихся объектов. Выборка характеризует случайную величину наработки до отказа объекта $T = \{t\}$.

Необходимо выбрать закон распределения случайной величины T и проверить правильность выбора по соответствующему критерию.

Подбор закона распределения осуществляется на основе аппроксимации (сглаживания) экспериментальных данных о наработке до отказа, которые должны быть представлены в наиболее компактном графическом виде. Выбор той или иной аппроксимирующей функции носит характер гипотезы, которую выдвигает исследователь. Экспериментальные данные могут с большим или меньшим правдоподобием подтверждать или не подтверждать справедливость той или иной гипотезы. Поэтому исследователь должен получить ответ на вопрос: согласуются ли результаты эксперимента с гипотезой о том, что случайная величина наработки подчинена выбранному им закону распределения? Ответ на этот вопрос дается в результате расчета специальных критериев.

Формирование статистического ряда

При большом числе испытываемых объектов полученный массив наработок $\{\dots, t_i, \dots\}$ является громоздкой и недостаточно наглядной формой записи случайной величины T . Поэтому для компактности и наглядности выборка представляется в графическом изображении статистического ряда – гистограмме наработки до отказа (рис. 30.2).

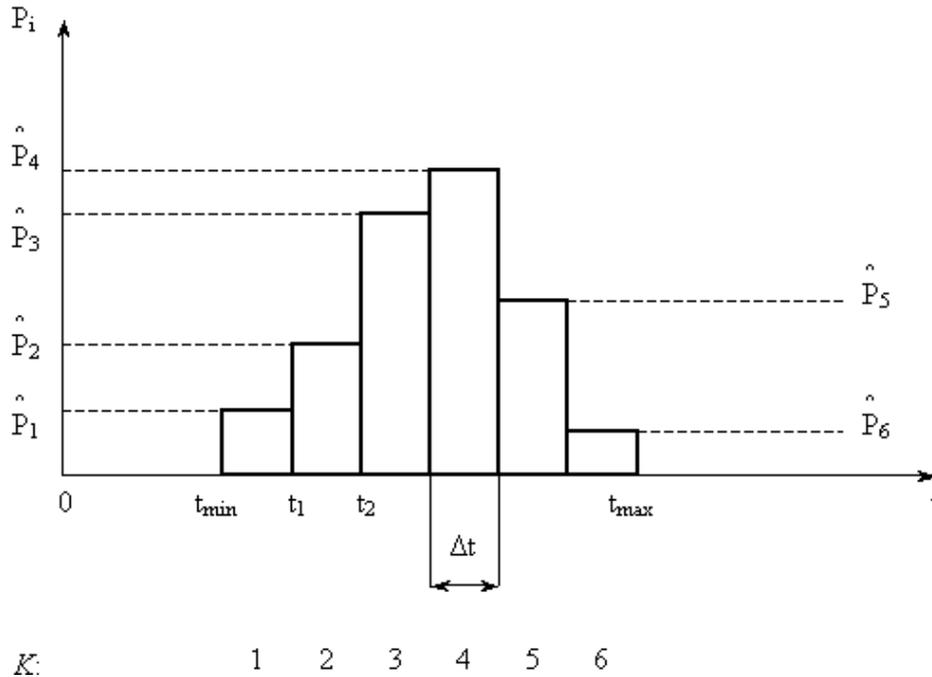


Рис. 30.2. Гистограмма наработки до отказа

Для этого необходимо:

– установить интервал наработки $[t_{\min}, t_{\max}]$ и его длину

$$\zeta_t = t_{\max} - t_{\min}, \quad (30.1)$$

где $t_{\min} \leq \text{МИН}\{\dots, t_i, \dots\}$, $t_{\max} \geq \text{МАКС}\{\dots, t_i, \dots\}$;

– разбить интервал наработки $[t_{\min}, t_{\max}]$ на k интервалов равной ширины Δt – шаг гистограммы

$$\Delta t = \frac{\zeta_t}{k}, \quad \Delta t = t_{i+1} - t_i = t_i - t_{i-1}; \quad (30.2)$$

– подсчитать частоты появления отказов во всех k интервалах

$$P_i = \frac{\Delta n(t_i, t_i + \Delta t)}{N} = \frac{\Delta n(t_i, t_{i+1})}{N}, \quad (30.3)$$

где $\Delta n(t_i, t_i + \Delta t)$ – число объектов, отказавших в интервале $[t_i, t_i + \Delta t]$.

Очевидно, что

$$\sum_1^k \hat{I}_i = 1$$

– полученный статистический ряд представляется в виде гистограммы, которая строится следующим образом. По оси абсцисс (t) откладываются интервалы Δt , на каждом из которых, как на основании, строится прямоугольник, высота которого пропорциональна (в выбранном масштабе) соответствующей частоте \hat{I} (см. рис. 30.2).

Расчет эмпирических функций

Используя данные сформированного статистического ряда, можно определить статистические оценки показателей надежности, т. е. эмпирические функции:

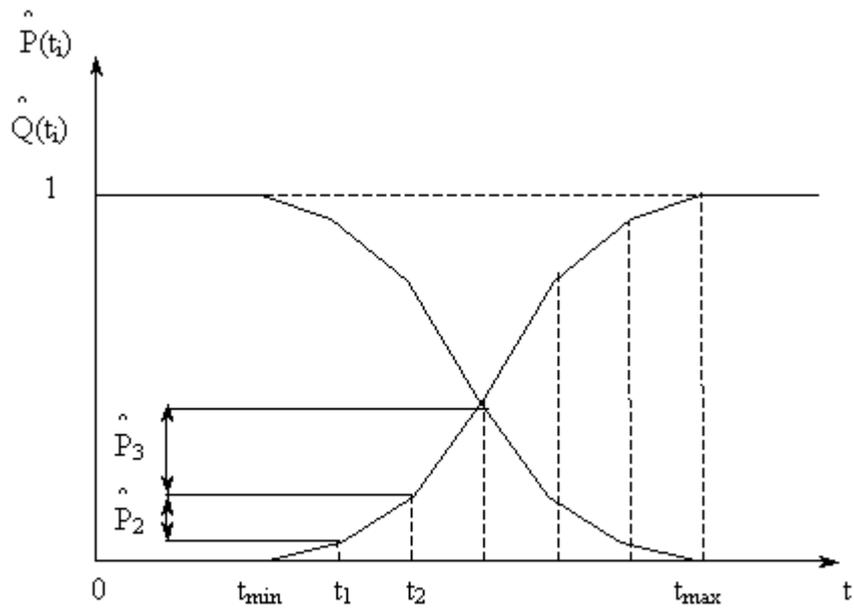
– функция распределения отказов (оценка ВО)

$$\begin{aligned} \hat{Q}(t_{min}) &= \frac{n(t_{min})}{N} = 0 \\ \hat{Q}(t_1) &= \frac{n(t_1)}{N} = \frac{\Delta n(t_{min}, t_1)}{N} = \hat{P}_1; \\ \hat{Q}(t_2) &= \frac{n(t_2)}{N} = \frac{\Delta n(t_{min}, t_1) + \Delta n(t_1, t_2)}{N} = \hat{P}_1 + \hat{P}_2; \\ &\dots\dots\dots \\ \hat{Q}(t_{max}) &= \frac{n(t_{max})}{N} = \sum_1^k \hat{P}_i = 1; \end{aligned} \tag{30.4}$$

– функция надежности (оценка ВБР)

$$\begin{aligned} \hat{P}(t_{min}) &= 1 - \hat{Q}(t_{min}) = 1; \\ &\dots\dots\dots \\ \hat{P}(t_{max}) &= 1 - \hat{Q}(t_{max}) = 0; \end{aligned} \tag{30.5}$$

Графически функции надежности и распределения отказов представлены на рис. 30.3.



К: 1 2 3 4 5 6

Рис. 30.3. Функции надежности и распределения отказов
– плотность распределения отказов (оценка ПРО)

$$\hat{f}(t_i) = \frac{\Delta n(t_i, t_{i+1})}{N \cdot \Delta t} = \frac{\hat{P}_i}{\Delta t}; \quad (30.6)$$

Графически функция плотности распределения отказов представлена на рис. 30.4.

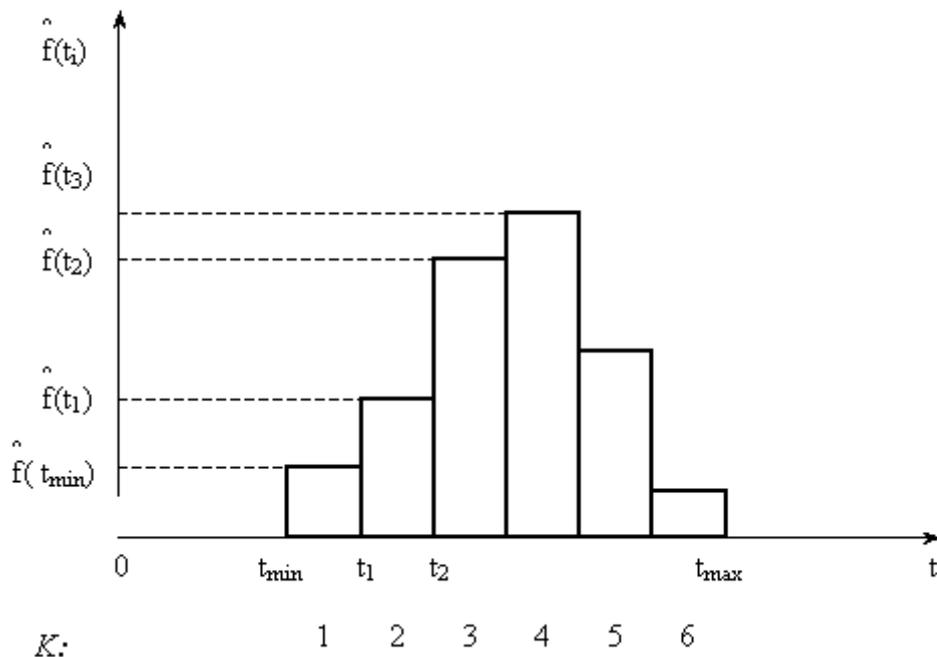


Рис. 30.4. Гистограмма плотности распределения отказов

– *интенсивность отказов* (оценка ИО)

$$\hat{\lambda}(t_j) = \frac{\Delta n(t_i, t_{i+1})}{N(t_j) \cdot \Delta t} = \frac{\Delta n(t_i, t_{i+1})}{[N - n(t_j)] \cdot \Delta t} . \quad (30.7)$$

Расчет статистических оценок числовых характеристик

Для расчета статистических оценок числовых характеристик можно воспользоваться данными сформированного статистического ряда.

Оценки характеристик определяются:

– *оценка средней наработки до отказа* (статистическая средняя наработка)

$$\hat{T}_0 = \sum_I^K \tilde{t}_i \cdot \hat{P}_i ; \quad (30.8)$$

– *оценка дисперсии наработки до отказа* (эмпирическая дисперсия наработки)

$$\hat{D} = \sum_I^K (\tilde{t}_i - \hat{T}_0)^2 \cdot \hat{P}_i , \quad (30.9)$$

где $\tilde{t}_i = t_i + \Delta t/2 = t_{i+1} - \Delta t/2$ – середина i -того интервала наработки, т. е. среднее значение наработки в интервале.

Целесообразно рассчитать оценки и некоторых вспомогательных характеристик рассеивания случайной величины T :

– выборочный коэффициент асимметрии наработки до отказа

$$A = \sum_I^K (\tilde{t}_i - \hat{T}_0)^3 \cdot \hat{P}_i / \hat{S}^3, \quad (30.10)$$

– выборочный эксцесс наработки до отказа

$$E = [\sum_I^K (\tilde{t}_i - \hat{T}_0)^4 \cdot \hat{P}_i / \hat{S}^4] - 3. \quad (30.11)$$

Эти характеристики используются для выбора аппроксимирующей функции.

Так, коэффициент асимметрии является характеристикой «скошенности» распределения, например, если распределение симметрично относительно МО, то $A = 0$.

На рисунке 30.5: а) – распределение $f_2(t)$ имеет положительную асимметрию $A > 0$, б) – $f_3(t)$ – отрицательную $A < 0$.

Эксцесс характеризует «крутость» (остро- или плосковершинность) распределения.

Для нормального распределения $E = 0$.

Кривые $f(t)$, более островершинные по сравнению с нормальной, имеют $E > 0$, а, наоборот, – более плосковершинные $E < 0$ (рис. 30.5, б).

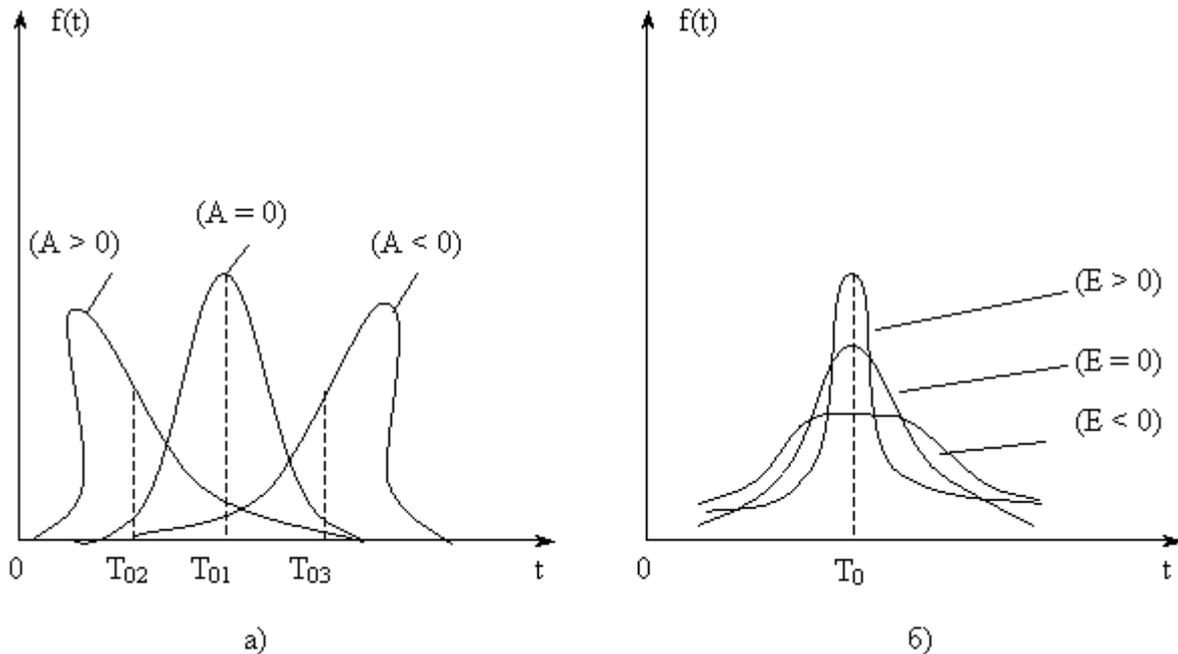


Рис. 30.5. Кривые $f(t)$

Выбор закона распределения

Выбор закона распределения состоит в подборе аналитической функции, наилучшим образом аппроксимирующей эмпирические функции надежности.

Выбор – в значительной мере процедура неопределенная и во многом субъективная, при этом многое зависит от априорных знаний об объекте и его свойствах, условиях работы, а также анализа вида графиков $P(t)$, $f(t)$ и $Q(t)$.

Расчет критерия согласия

Критерий согласия – это критерий проверки гипотезы о том, что случайная величина T , представленная своей выборкой, имеет распределение предполагаемого типа.

Проверка состоит в следующем. Рассчитывается критерий, как некоторая мера расхождения теоретического и эмпирического распределений, причем эта мера является случайной величиной.

Чем больше мера расхождения, тем хуже согласованность эмпирического распределения с теоретическим, т.о. гипотезу о выборе закона распределения следует отвергнуть, как маловероятную. В противном случае – экспериментальные данные не противоречат принятому распределению.

Из известных критериев наиболее применяемый критерий согласия χ^2 (хи-квадрат) Пирсона.

Проверка согласованности распределений по критерию χ^2 производится следующим образом:

– рассчитывается критерий χ^2 (мера расхождения)

$$\chi^2 = N \cdot \sum_{i=1}^k (\hat{P}_i - P_i)^2 / P_i, \quad (30.12)$$

где $P_i = f(\cdot)$ – теоретическая частота (вероятность) попадания случайной величины в интервал $[t_i, t_i + \Delta t]$;

– определяется число степеней свободы $R = k - L$,

где L – число независимых условий, наложенных на частоты \hat{I}_i , например:

а) условие $\sum \hat{I}_i = 1$;

б) условие совпадения $\sum \hat{t}_i - \hat{T}_0 = T_0$; $\sum \hat{t}_i \cdot \hat{P}_i = T_0$;

в) условие совпадения $\sum (\hat{t}_i - \hat{T}_0)^2 \cdot \hat{I}_i = D$ $\sum (\hat{t}_i - \hat{T}_0)^2 \cdot \hat{P}_i = D$ и т. д.

Чаще всего $L = 3$. Чем больше число степеней свободы, тем больше величина P^2 подчиняется распределению Пирсона;

– по рассчитанным χ^2 и R определяется вероятность P того, что величина, имеющая распределение Пирсона с R степенями свободы, превзойдет рассчитанное значение P^2 .

Ответ на вопрос, насколько мала должна быть вероятность P , чтобы отбросить гипотезу о выборе того или иного закона распределения, во многом неопределенный.

На практике, если $P < 0,1$, рекомендуется подыскать другой закон распределения.

В целом с помощью критерия согласия можно опровергнуть выбранную гипотезу, если же P достаточно велика, то это не может служить доказательством правильности гипотезы, а указывает лишь на то, что гипотеза не противоречит данным эксперимента.

Контрольные вопросы

1. Что представляет собой математическая модель и для каких целей она используется в задачах надежности?
2. Из каких условий выбирается закон распределения наработки до отказа объекта?
3. В чем заключается постановка задачи при испытаниях объектов на надежность?
4. Что представляет собой процедура формирования статистического ряда по результатам испытаний?
5. Какие эмпирические функции рассчитываются при обработке результатов испытаний?
6. В чем заключается выбор закона распределения наработки до отказа по результатам испытаний?
7. Что представляет собой критерий согласия?

31. НОРМАЛЬНЫЙ ЗАКОН РАСПРЕДЕЛЕНИЯ

31.1. Классическое нормальное распределение

Нормальное распределение или распределение Гаусса является наиболее универсальным, удобным и широко применяемым.

Считается, что наработка подчинена нормальному распределению (нормально распределена), если плотность распределения отказов описывается выражением

$$f(t) = \frac{1}{b \sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{(t-a)^2}{2b^2}\right\}, \quad (31.1)$$

где a и b – параметры распределения, соответственно, МО и СКО, которые по результатам испытаний принимаются

$$a \approx \hat{T}_0; \quad b^2 \approx \hat{D},$$

где \hat{T}_0 , \hat{D} – оценки средней наработки и дисперсии.

Графики изменения показателей безотказности при нормальном распределении приведены на рис. 31.1.

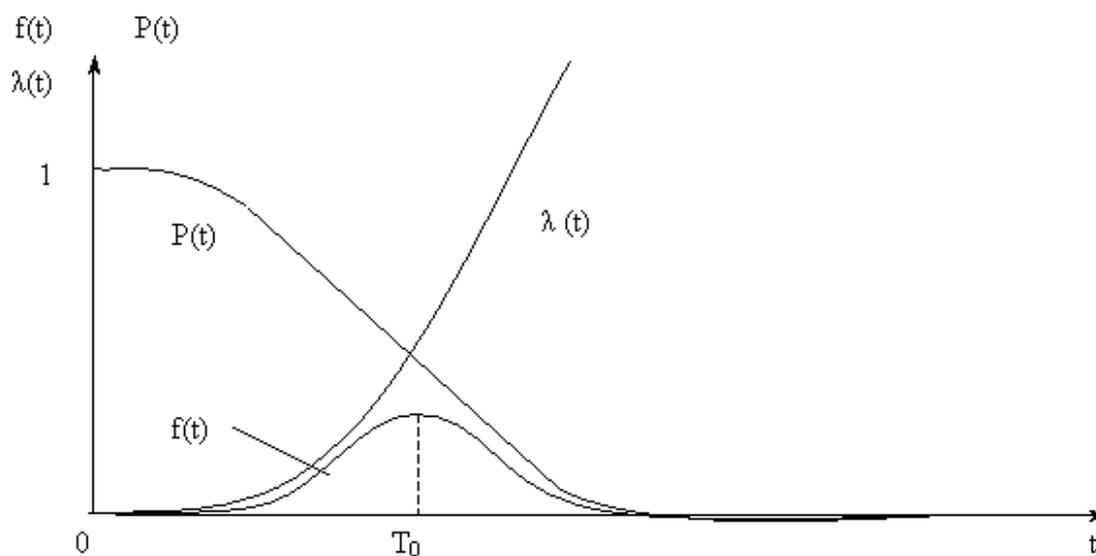


Рис. 31.1. Графики изменения показателей безотказности при нормальном распределении

Выясним смысл параметров T_0 и S нормального распределения. Из графика $f(t)$ видно, что T_0 является центром симметрии распределения, поскольку при изменении знака разности $(t - T_0)$ выражение (31.1) не меняется. При $t = T_0$ ПРО достигает своего максимума:

$$f(t)_{max} \Big|_{t=T_0} = \frac{1}{S\sqrt{2\pi}}$$

При сдвиге T_0 влево (вправо) по оси абсцисс кривая $f(t)$ смещается в ту же сторону, не изменяя своей формы. Таким образом, T_0 является центром рассеивания случайной величины T , т. е. МО.

Параметр S характеризует форму кривой $f(t)$, т. е. рассеивание случайной величины T . Кривая ПРО $f(t)$ тем выше и острее, чем меньше S .

Изменение графиков $P(t)$ и $\lambda(t)$ при различных СКО наработок ($S_1 < S_2 < S_3$) и $T_0 = \text{const}$ приведено на рис. 31.2.

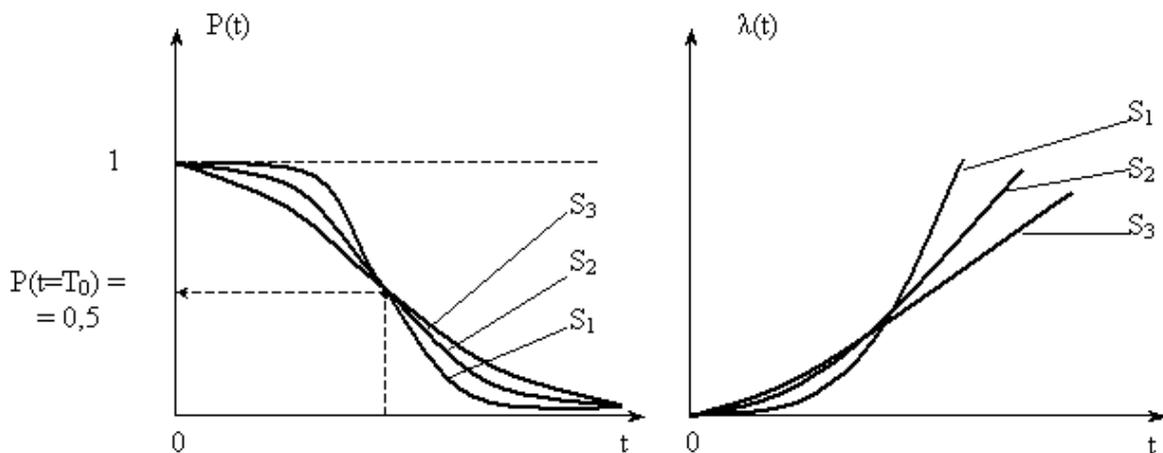


Рис. 31.2. Изменения графиков $P(t)$ и $\lambda(t)$ при различных СКО наработок

Используя полученные ранее (лекции 3.11, 3.12) соотношения между показателями надежности, можно было бы записать выражения для $P(t)$; $Q(t)$ и $\lambda(t)$ по выражению (31.1) для $f(t)$. Легко представить громоздкость этих интегральных выражений, поэтому для практического расчета показателей надежности вычисление интегралов заменим использованием таблиц.

С этой целью перейдем от случайной величины T к некоей случайной величине

$$x = \frac{t - T_0}{S}, \tag{31.2}$$

распределенной нормально с параметрами соответственно МО и СКО $M\{X\} = 0$ и $S\{X\} = 1$ и плотностью распределения

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp(-x^2/2). \tag{31.3}$$

Выражение (31.3) описывает плотность так называемого нормированного нормального распределения (рис. 31.3).

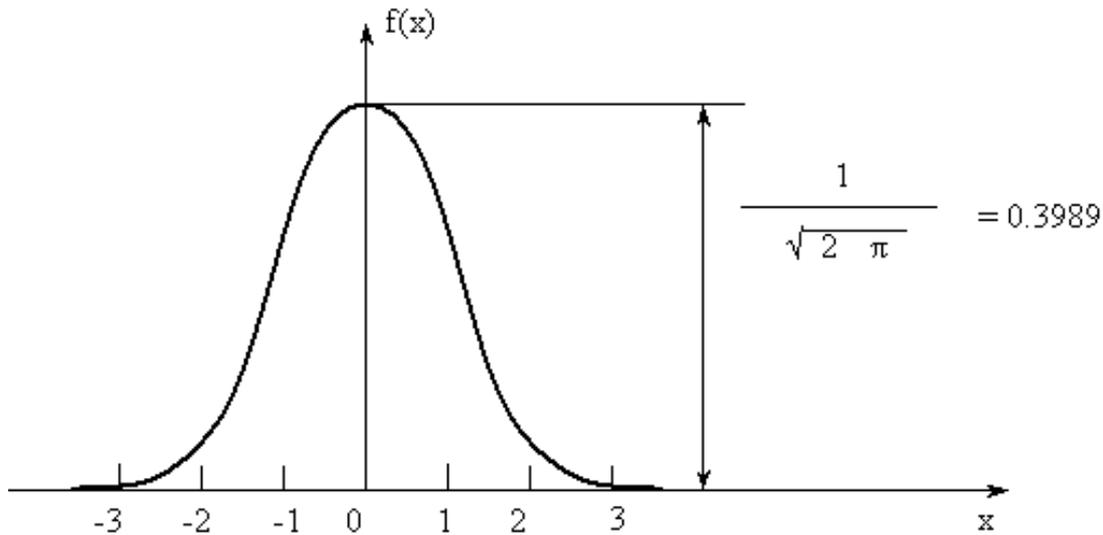


Рис. 31.3. Плотность нормированного нормального распределения

Функция распределения случайной величины X запишется

$$F(x) = \int_{-\infty}^x f(x) dx, \quad (31.4)$$

а из симметрии кривой $f(x)$ относительно МО $M\{X\} = 0$ следует, что $f(-x) = f(x)$, откуда $F(-x) = 1 - F(x)$.

В справочной литературе приведены расчетные значения функций $f(x)$ и $F(x)$ для различных $x = (t - T_0)/S$.

Показатели безотказности объекта через табличные значения $f(x)$ и $F(x)$ определяются по выражениям

$$f(t) = f(x)/S; \quad (31.5)$$

$$Q(t) = F(x); \quad (31.6)$$

$$P(t) = 1 - F(x); \quad (31.7)$$

$$\lambda(t) = f(x)/S(1 - F(x)). \quad (31.8)$$

В практических расчетах часто вместо функции $F(x)$ пользуются функцией Лапласа, представляющей распределение положительных значений случайной величины X в виде

$$\Phi(x) = \int_0^x f(x) dx = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x \exp(-x^2/2) dx. \quad (31.9)$$

Очевидно, что $F(x)$ связана с $\Phi(x)$ следующим образом

$$F(x) = \int_{-\infty}^x f(x) dx = \int_{-\infty}^0 f(x) dx + \int_0^x f(x) dx = 0,5 + \Phi(x). \quad (31.10)$$

Как и всякая функция распределения, функция $\Phi(x)$ обладает свойствами

$$\Phi(x)(-\infty) = -0,5; \quad \Phi(x)(\infty) = 0,5; \quad \Phi(x)(-x) = -\Phi(x).$$

В литературе могут встретиться и другие выражения для $\Phi(x)$, поэтому, какой записью $\Phi(x)$ пользоваться – это личный выбор инженера.

Показатели надежности объекта можно определить через $\Phi(x)$, используя выражения (31.5) – (31.8) и (31.10)

$$Q(t) = 0,5 + \Phi(x); \quad (31.11)$$

$$P(t) = 0,5 - \Phi(x); \quad (31.12)$$

$$\lambda(t) = f(x)/S((0,5 - \Phi(x))). \quad (31.13)$$

Чаще всего при оценке надежности объекта приходится решать **прямую задачу** – при заданных параметрах T_0 и S нормально распределенной наработки до отказа определяется тот или иной показатель безотказности (например, ВБР) к интересующему значению наработки t .

Но в ходе проектных работ приходится решать и **обратную задачу** – определение наработки, требуемой по техническому заданию, ВБР объекта.

Для решения подобных задач используют квантили нормированного нормального распределения.

Квантиль – значение случайной величины, соответствующее заданной вероятности.

Обозначим:

t_p – значение наработки, соответствующее ВБР P ;

x_p – значение случайной величины X , соответствующее вероятности P .

Тогда из уравнения связи x и t

$$x_p = \frac{t_p - T_0}{S}$$

при $x = x_p$; $t = t_p$, получаем

$$t_p = T_0 + x_p S.$$

где t_p , x_p – ненормированные и нормированные квантили нормального распределения, соответствующие вероятности P .

Значения квантилей x_p приводятся в справочной литературе для $P \geq 0,5$.

При заданной вероятности $P < 0,5$ используется соотношение

$$x_p = -x_{1-p}.$$

Например, при $P = 0,3$

$$x_{0,3} = -x_{1-0,3} = -x_{0,7}$$

Вероятность попадания случайной величины наработки T в заданный интервал $[t_1, t_2]$ наработки определяется

$$P\{T \in (t_1, t_2)\} = F(x_2) - F(x_1) = \Phi(x_2) - \Phi(x_1), \quad (31.14)$$

где $x_1 = (t_1 - T_0)/S$, $x_2 = (t_2 - T_0)/S$.

Отметим, что наработка до отказа всегда положительна, а кривая ПРО $f(t)$ в общем случае начинается от $t = -\infty$ и распространяется до $t = \infty$.

Это не является существенным недостатком, если $T_0 \gg S$, поскольку по (31.14) нетрудно подсчитать, что вероятность попадания случайной величины T в интервал $P\{T_0 - 3S < T < T_0 + 3S\} \approx 1,0$ с точностью до 1 %. Это означает, что все возможные значения (с погрешностью не выше 1 %) нормально распределенной случайной величины с соотношением характеристик $T_0 > 3S$, находятся на участке $T_0 \pm 3S$.

При большем разбросе значений случайной величины T область возможных значений ограничивается слева $(0, \infty)$ и используется усеченное нормальное распределение.

31.2. Усеченное нормальное распределение

Известно, что корректность использования классического нормального распределения наработки достигается при $T_0 \geq 3S$.

При малых значениях T_0 и большом S может возникнуть ситуация, когда ПРО $f(t)$ «покрывает» своей левой ветвью область отрицательных наработок (рис. 31.4).

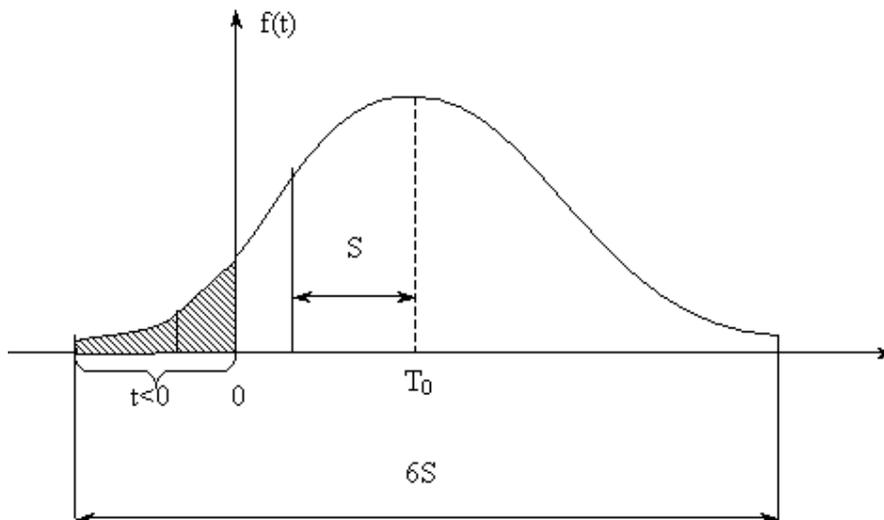


Рис. 31.4. ПРО «покрывает» своей левой ветвью область отрицательных наработок

Таким образом, нормальное распределение, являясь общим случаем распределения случайной величины в диапазоне $(-\infty, \infty)$, лишь в частности (при определенных условиях) может быть использовано для моделей надежности.

Усеченным нормальным распределением называется распределение, получаемое из классического нормального, при ограничении интервала возможных значений наработки до отказа.

В общем случае усечение может быть:

- *левым* – $(0; \infty)$;
- *двусторонним* – (t_1, t_2) .

Смысл усеченного нормального распределения (УНР) рассмотрен для случая ограничения случайной величины наработки интервалом (t_1, t_2) .

Плотность УНР

$$\bar{f}(t) = c f(t), \quad (31.15)$$

где

$$f(t) = \frac{1}{S \sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{(t - T_0)^2}{2S^2}\right\}; \quad (31.16)$$

c – нормирующий множитель, определяемый из условия, что площадь под кривой $\bar{f}(t)$ равна 1, т. е.

$$\int_{t_1}^{t_2} \bar{f}(t) dt = \int_{t_1}^{t_2} c f(t) dt = c \int_{t_1}^{t_2} f(t) dt = 1.$$

откуда

$$c = \frac{1}{\int_{t_1}^{t_2} f(t) dt},$$

где

$$\int_{t_1}^{t_2} f(t) dt = P(t_1 < T < t_2) = F(t_2) - F(t_1) = Q(t_2) - Q(t_1),$$

Применяя переход от случайной величины $T = \{t\}$ к величине $X = \{x\}$

$$x_2 = (t_2 - T_0)/S; \quad x_1 = (t_1 - T_0)/S,$$

получаем

$$\int_{t_1}^{t_2} f(t) dt = Q(t_2) - Q(t_1) = 0,5 + \Phi(x_2) - 0,5 - \Phi(x_1) = \Phi(x_2) - \Phi(x_1)$$

поэтому нормирующий множитель c равен

$$c = \frac{1}{\Phi(x_2) - \Phi(x_1)} . \quad (31.17)$$

Поскольку $[\Phi(x)(x_2) - \Phi(x)(x_1)] < 1$, то $c > 1$, поэтому $\bar{f}(t) > f(t)$. Кривая $\bar{f}(t)$ выше, чем $f(t)$, т. к. площади под кривыми $\bar{f}(t)$ и $f(t)$ одинаковы и равны 1 (рис. 31.5)

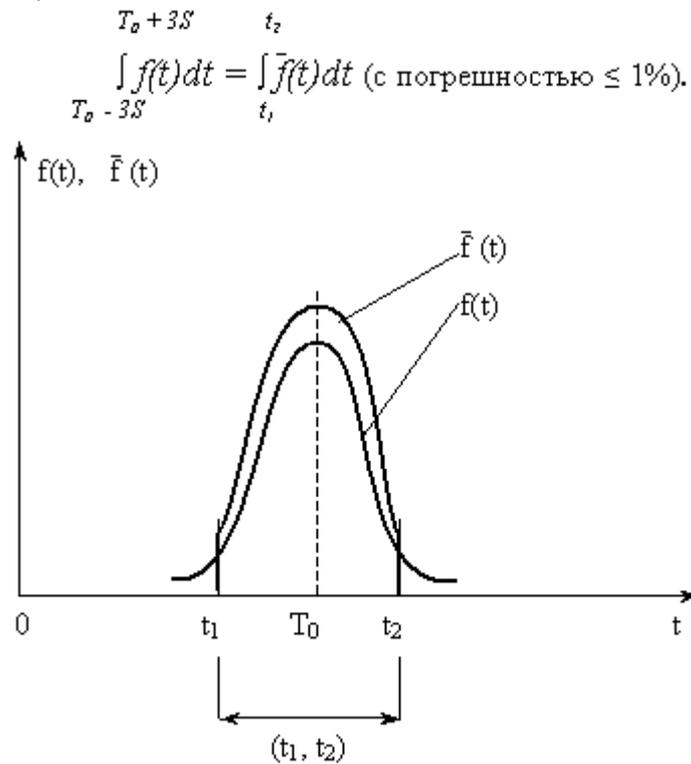


Рис. 31.5. Кривые $\bar{f}(t)$ и $f(t)$

Показатели безотказности для УНР в диапазоне (t_1, t_2) :

$$\bar{f}(t) = c f(t) = c f(x) / S ;$$

$$\bar{P}(t) = \int_t c f(t) dt = c \int_t f(t) dt = c [0,5 - \Phi(x)] ;$$

$$\bar{Q}(t) = 1 - c [0,5 + \Phi(x)] ;$$

$$\bar{\lambda}(t) = \bar{f}(t) / \bar{P}(t) = f(x) / S(0,5 - \Phi(x)) = \lambda(t) .$$

УНР для положительной наработки до отказа – диапазон $(0; \infty)$ имеет ПРО

$$\bar{f}(t) = c_0 f(t),$$

где c_0 – нормирующий множитель определяется из условия

$$c_0 \int_0^{\infty} f(t) dt = 1$$

и равен (аналогично предыдущему)

$$c_0 = \frac{1}{\int_0^{\infty} f(t) dt} = \frac{1}{Q(\infty) - Q(0)} = \frac{1}{\Phi(\infty) - \Phi(-T_0/S)} = \frac{1}{0,5 + \Phi(T_0/S)}.$$

Показатели безотказности УНР (0; ∞).

Изменение нормирующего множителя c_0 в зависимости от отношения T_0/S приведено на рис. 31.6.

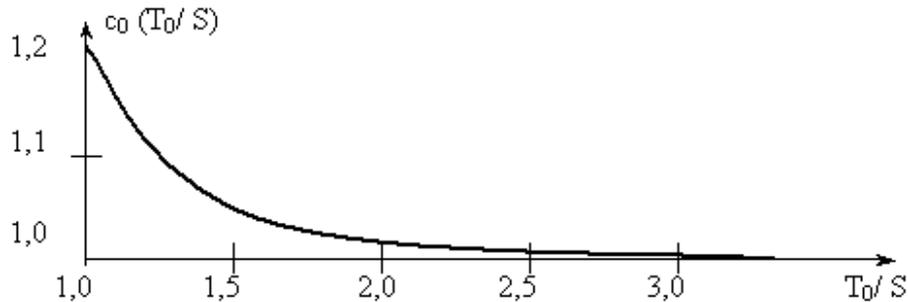


Рис. 31.6. Изменение нормирующего множителя c_0 в зависимости от отношения T_0/S

Если $T_0 = S$; $T_0/S = 1$, то $c_0 = \max(c_0) \approx 1,2$.

Если $T_0/S \geq 2,5$, то $c_0 = 1$, т.е. $\bar{f}(t) = f(t)$.

Контрольные вопросы и задачи

1. Объясните, почему распределение Гаусса называется нормальным?
2. Поясните на изменении кривой плотности распределения отказов влияние параметров распределения: математического ожидания и дисперсии.
3. Приведите расчетные выражения для показателей безотказности, определенные через табличные функции: $f(x)$, $F(x)$ и $\Phi(x)$?
4. При каких условиях корректно использовать классическое нормальное распределение и в каких случаях целесообразно применять усеченные нормальные распределения?
5. Приведите расчетные выражения показателей безотказности для усеченного «слева» нормального распределения.
6. Нарботка до отказа серийно выпускаемой детали распределена нормально с параметрами: $T_0 = M(T) = 104$ ч, $S = S(T) = 250$ ч. Определить:
 - 1) вероятность того, что при монтаже прибора в него будут поставлены детали, наработка до отказа которых будет находиться в интервале [5000, 9000 ч];

2) вероятность того, что при монтаже прибора в него будут поставлены детали, наработка до отказа которых будет находиться в интервале $[T_0 - 3S, T_0 + 3S]$;

3) вероятность того, что, безотказно проработав до момента времени 5000 ч, деталь безотказно проработает и до 9000 ч.

Ответ: 1) 0,00003, 2) 0,9974, 3) 0,99997.

7. Комплектуемая деталь, используемая при изготовлении устройства, по данным поставщика этой детали имеет нормальное распределение наработки с параметрами: $T_0 = 4 \cdot 10^3$ ч, $S = 800$ ч. Определить интересующую конструктора прибора:

1) наработку до отказа, соответствующую 90 % надежности детали;

2) вероятность того, что при монтаже деталь имеет наработку, лежащую в интервале $[2,5 \cdot 10^3, 3 \cdot 10^3]$;

3) вероятность того, что при монтаже деталь имеет наработку большую, чем $2,5 \cdot 10^3$ ч.

Ответ: 1) 2974,4, 2) 0,0755, 3) 0,9699.

32. ЗАКОНЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАРАБОТКИ ДО ОТКАЗА

32.1. Экспоненциальное распределение

Экспоненциальное распределение описывает наработку до отказа объектов, у которых в результате сдаточных испытаний (выходного контроля) отсутствует период приработки, а назначенный ресурс установлен до окончания периода нормальной эксплуатации.

Эти объекты можно отнести к «нестареющим», поскольку они работают только на участке с $\lambda(t) = \lambda = \text{const}$. Круг таких объектов широк: сложные технические системы с множеством компонентов, средства вычислительной техники и системы автоматического регулирования и т. п. Экспоненциальное распределение широко применяется для оценки надежности энергетических объектов.

Считается, что случайная величина наработки объекта до отказа подчинена экспоненциальному распределению, если ПРО описывается выражением

$$f(t) = \alpha \exp(-\alpha t), \quad (32.1)$$

где α – параметр распределения, который по результатам испытаний принимается равным $\alpha \approx 1/\hat{T}_0$; \hat{T}_0 – оценка средней наработки до отказа.

Остальные показатели безотказности при известной $f(t)$ определяются:
– *вероятность безотказной работы (ВБР)*

$$P(t) = \exp(-\alpha t); \quad (32.2)$$

– *вероятность отказа (ВО)*

$$Q(t) = 1 - \exp(-\alpha t); \quad (32.3)$$

– *интенсивность отказов (ИО)*

$$\alpha(t) = \alpha \exp(-\alpha t) / \exp(-\alpha t) = \alpha. \quad (32.4)$$

Из (32.4) следует, что ИО является постоянной величиной, не зависящей от времени, и обратно пропорциональной оценке средней наработки $\lambda(t) = \lambda = 1/\hat{T}_0$.

Числовые характеристики наработки до отказа определяются:

– *средняя наработка (МО наработки) до отказа:*

$$T_0 = \int_0^{\infty} P(t) dt = 1/\lambda, \quad (32.5)$$

– *дисперсия наработки до отказа:*

$$D = D\{t\} = \int_0^{\infty} (t - T_0)^2 f(t) dt = 1/\lambda^2. \quad (32.6)$$

Графики изменения показателей безотказности при экспоненциальном распределении приведены на рис. 32.1.

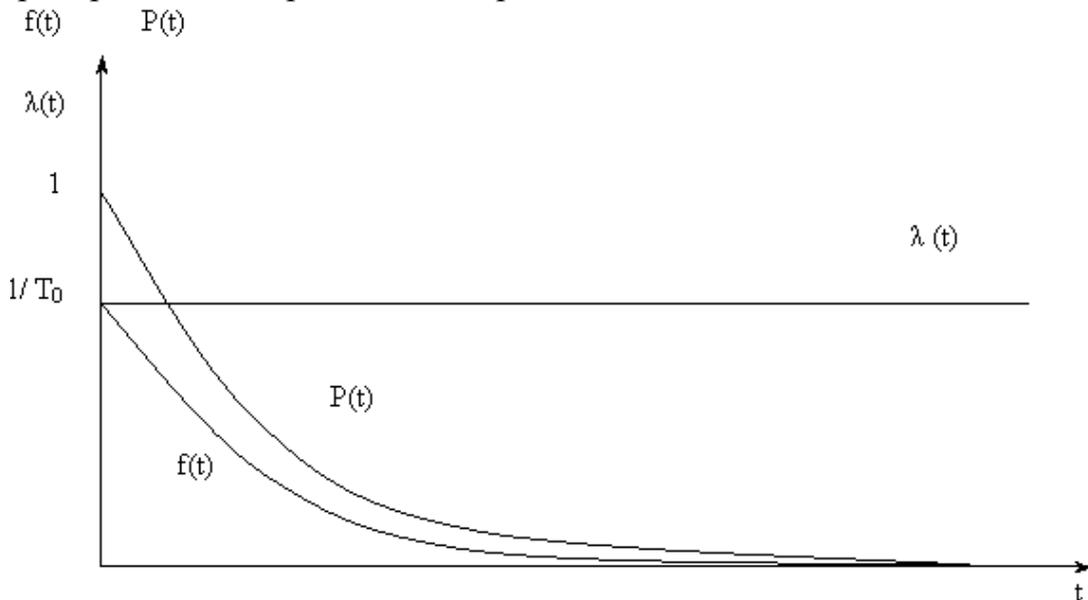


Рис. 32.1 Графики изменения показателей безотказности при экспоненциальном распределении

Следует отметить, что при $\lambda t \ll 1$, т. е. при наработке t много меньшей, чем средняя наработка T_0 , выражения (32.1) – (32.4) можно упростить, заменив $e^{-\lambda t}$ двумя первыми членами разложения $e^{-\lambda t}$ в степенной ряд.

Например, выражение для ВБР примет вид

$$P(t) = 1 - \lambda t + \frac{(\lambda t)^2}{2!} - \frac{(\lambda t)^3}{3!} + \dots \approx 1 - \lambda t,$$

при этом погрешность вычисления $P(t)$ не превышает $0,5 (\lambda t)^2$.

Все рассмотренные далее законы распределения наработки до отказа используются на практике для описания надежности «стареющих» объектов, подверженных износным отказам.

32.2. Логарифмически нормальное (логнормальное) распределение

При логарифмически нормальном распределении нормально распределенным является логарифм ($\lg t$) случайной величины T , а не сама эта величина.

Логарифмически нормальное распределение во многом более точно, чем нормальное, описывает наработку до отказа тех объектов, у которых отказ возникает вследствие усталости, например, подшипников качения, электронных ламп и пр.

Если величина $\lg t$ имеет нормальное распределение с параметрами МО U и СКО V , то величина T считается логарифмически нормально распределенной с ПРО, описываемой

$$f(t) = \frac{1}{Vt\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\lg t - U)^2}{2V^2}\right). \quad (32.7)$$

Параметры U и V по результатам испытаний принимаются:

$$U \approx \hat{U} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \lg t_i, \quad (32.8)$$

$$V \approx \hat{V} = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\lg t_i - \hat{U})^2, \quad (32.9)$$

где \hat{U} и \hat{V} – оценки параметров U и V .

Показатели надежности можно рассчитать по приведенным ранее выражениям, пользуясь табулированными функциями $f(x)$ и, соответственно, $F(x)$ и $\Phi(x)$ для нормального распределения при $x = (\lg t - U) / V$.

Графики изменения показателей надежности при логарифмически нормальном распределении приведены на рис. 32.2.

Числовые характеристики наработки до отказа:

– средняя наработка (МО наработки) до отказа:

$$T_0 = \exp(U + V^2/2), \quad (32.10)$$

– дисперсия наработки до отказа:

$$D = D\{T\} = \exp(2U + V^2) [\exp(V^2) - 1]. \quad (32.11)$$

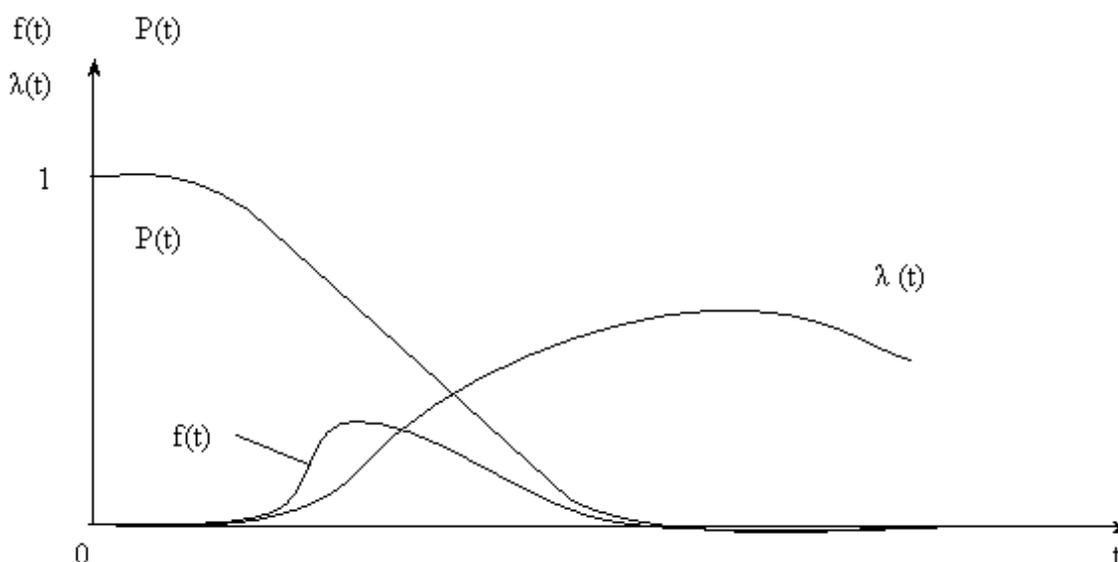


Рис. 32.2. Графики изменения показателей надежности при логарифмически нормальном распределении

32.3. Гамма-распределение

Случайная величина наработки до отказа T имеет гамма-распределение с параметрами α (масштабный параметр) и β (параметр формы), где $\alpha, \beta > 0$, причем β – целое число, если ПРО величины описывается выражением

$$f(t) = \frac{\alpha^\beta \cdot t^{\beta-1}}{\Gamma(\beta)} \exp(-\alpha t), \quad (32.12)$$

где $\Gamma(\beta) = (\beta - 1)!$ – гамма-распределение Эйлера. Очевидно, что при $\beta = 1$ выражение (32.12) упрощается до вида (32.1), соответствующего экспоненциальному распределению.

Гамма-распределение наиболее хорошо описывает распределение суммы независимых случайных величин, каждая из которых распределена по экспоненциальному закону.

При больших β гамма-распределение приводится к нормальному распределению с параметрами: $a = \beta \cdot \alpha$, $b = \beta \cdot \alpha^2$.

Графики изменения показателей надежности при гамма-распределении приведены на рис. 32.3.

Числовые характеристики наработки до отказа:

– средняя наработка (МО наработки) до отказа:

$$T_0 = \beta / \alpha, \quad (32.13)$$

– дисперсия наработки до отказа:

$$D = D\{T\} = \beta / \alpha^2. \quad (32.14)$$

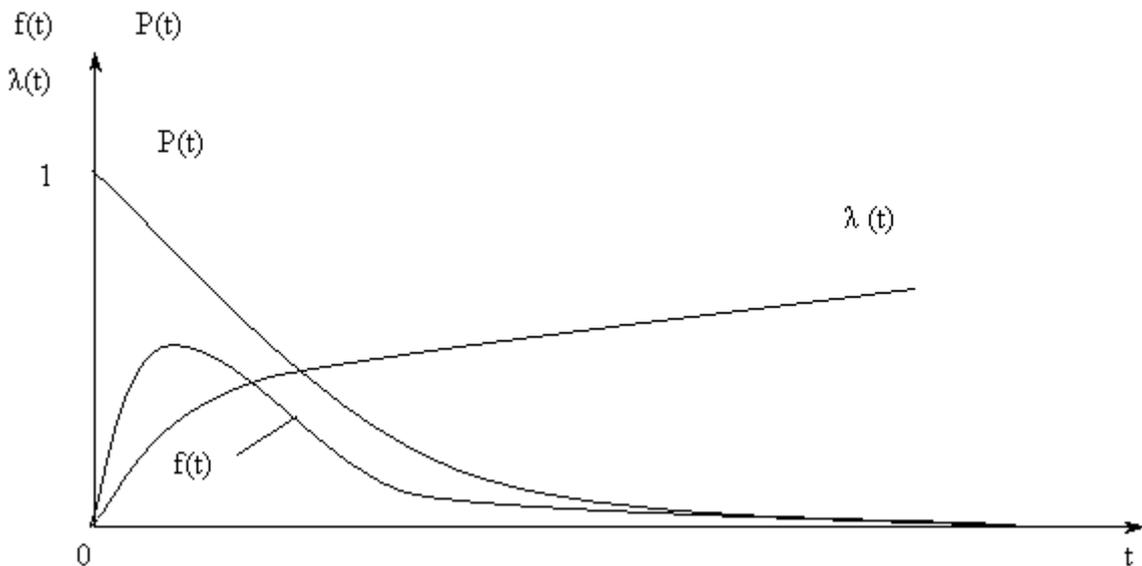


Рис. 32.3. Графики изменения показателей надежности при гамма-распределении

Помимо рассмотренных законов распределения, в качестве моделей надежности объектов могут использоваться и другие, например, распределение Вейбулла, хорошо описывающее наработку объектов до отказа по усталостным разрушениям, распределение Релея, Эрланга и т. п.

Контрольные вопросы и задачи

1. Как описывается изменение плотности распределения отказов при экспоненциальном распределении наработки до отказа?
2. Получите расчетное выражение для ВБР, ВО и ИО при экспоненциальном распределении наработки до отказа?
3. Как связаны числовые характеристики наработки до отказа с интенсивностью отказов при экспоненциальном распределении наработки до отказа?
4. Для описания надежности каких объектов используется логарифмически нормальное распределение?
5. Какой из параметров в выражении плотности распределения отказов при гамма-распределении наработки является параметром формы и параметром масштаба? Известно, что серийно выпускаемая деталь имеет экспоненциальное распределение наработки до отказа с параметром $\lambda = 10^{-5} \text{ ч}^{-1}$. Деталь используется конструктором при разработке нового прибора. Назначенный ресурс прибора предполагается $T_n = 10^4 \text{ ч}$. Определить интегральную функцию конструктора:

- 1) среднюю полезную наработку детали к моменту T_n ;
- 2) вероятность того, что деталь безотказно проработает в интервале наработки $[0, T_n]$;
- 3) вероятность того, что деталь безотказно проработает в интервале наработки $[10^3, 10^4 \text{ ч}]$?

Ответы: 1) $9,5 \cdot 10^3 \text{ ч}$; 2) 0,905; 3) 0,914.

6. На сборку прибора поступила деталь, прошедшая испытания на надежность. Известно, что наработка до отказа детали подчиняется экспоненциальному распределению с параметром $\lambda = 5 \cdot 10^{-5} \text{ ч}^{-1}$. Определить вероятность того, что при монтаже прибора в него будут поставлены детали, наработка до отказа которых будет находиться в интервале $[10^3, 10^4 \text{ ч}]$?

Ответ: 0,345

33. НАДЕЖНОСТЬ СИСТЕМ.

33.1. Основы расчета надежности систем. Общие понятия

Задача расчета надежности: определение показателей безотказности системы, состоящей из невосстанавливаемых элементов, по данным о надежности элементов и связях между ними.

Цель расчета надежности:

- обосновать выбор того или иного конструктивного решения;
- выяснить возможность и целесообразность резервирования;
- выяснить, достижима ли требуемая надежность при существующей технологии разработки и производства.

Расчет надежности состоит из следующих этапов:

1. Определение состава рассчитываемых показателей надежности (табл. 33.1).

2. Составление (синтез) структурной логической схемы надежности (структуры системы), основанное на анализе функционирования системы (какие блоки включены, в чем состоит их работа, перечень свойств исправной системы и т. п.), и выбор метода расчета надежности.

3. Составление математической модели, связывающей рассчитываемые показатели системы с показателями надежности элементов.

4. Выполнение расчета, анализ полученных результатов, корректировка расчетной модели.

Таблица 33.1

Состав рассчитываемых показателей

Системы из невосстанавливаемых элементов	– средняя наработка до отказа (T_{0c});
	– ВБР к заданной наработке $P_c(t)$;
	– ИО к заданной наработке $\lambda_c(t)$;
	– ПРО к заданной наработке $f_c(t)$;
	– коэффициент готовности;
	– коэффициент оперативной готовности.

Структура системы – логическая схема взаимодействия элементов, определяющая работоспособность системы, другими словами, графическое отображение элементов системы, позволяющее однозначно определить состояние системы (работоспособное/неработоспособное) по состоянию элементов.

По структуре системы могут быть:

- система без резервирования (основная система);
- система с резервированием.

Для одних и тех же систем могут быть составлены различные структурные схемы надежности в зависимости от вида отказов элементов (рис. 33.1).

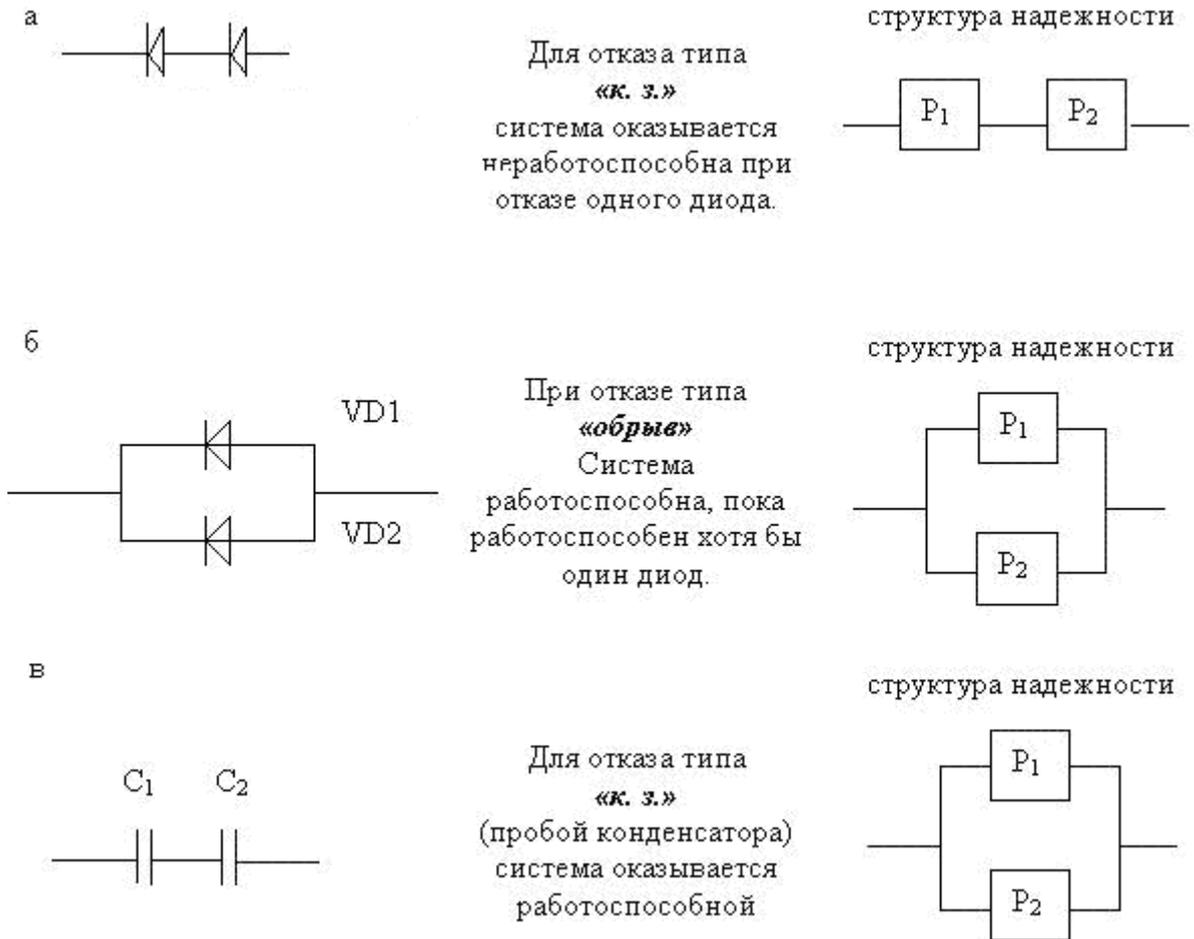


Рис. 33.1. Структурные схемы надежности в зависимости от вида отказов элементов

Математическая модель надежности – формальные преобразования, позволяющие получить расчетные формулы.

Модели могут быть реализованы с помощью:

- метода интегральных и дифференциальных уравнений;
- на основе графа возможных состояний системы;
- на основе логико-вероятностных методов;
- на основе дедуктивного метода (дерево отказов).

Наиболее важным этапом расчета надежности является составление структуры системы и определение показателей надежности составляющих ее элементов.

Во-первых, классифицируется понятие (вид) отказов, который существенным образом влияет на работоспособность системы.

Во-вторых, в состав системы в виде отдельных элементов могут входить электрические соединения пайкой, сжатием или сваркой, а также другие соединения (штепсельные и пр.), поскольку на их долю приходится 10 – 50 % общего числа отказов.

В-третьих, имеется неполная информация о показателях надежности элементов, поэтому приходится либо интерполировать показатели, либо использовать показатели аналогов.

Практически расчет надежности производится в несколько этапов:

1. На стадии составления технического задания на проектируемую систему, когда ее структура не определена, производится предварительная оценка надежности, исходя из априорной информации о надежности близких по характеру систем и надежности комплектующих элементов.

2. Составляется структурная схема с показателями надежности элементов, заданными при нормальных (номинальных) условиях эксплуатации.

3. Окончательный (коэффициентный) расчет надежности проводится на стадии завершения технического проекта, когда произведена эксплуатация опытных образцов и известны все возможные условия эксплуатации. При этом корректируются показатели надежности элементов, часто в сторону их уменьшения, вносятся изменения в структуру – выбирается резервирование.

Системы с резервированием. Общие понятия

Работоспособность систем без резервирования требует работоспособности всех элементов системы. В сложных технических устройствах без резервирования никогда не удастся достичь высокой надежности, даже если использовать элементы с высокими показателями безотказности.

Система с резервированием – это система с избыточностью элементов, т. е. с резервными составляющими, избыточными по отношению к минимально необходимой (основной) структуре и выполняющими те же функции, что и основные элементы.

В системах с резервированием работоспособность обеспечивается до тех пор, пока для замены отказавших основных элементов имеются в наличии резервные.

Структурное резервирование

Пример структурного резервирования представлен на рис. 33.2.

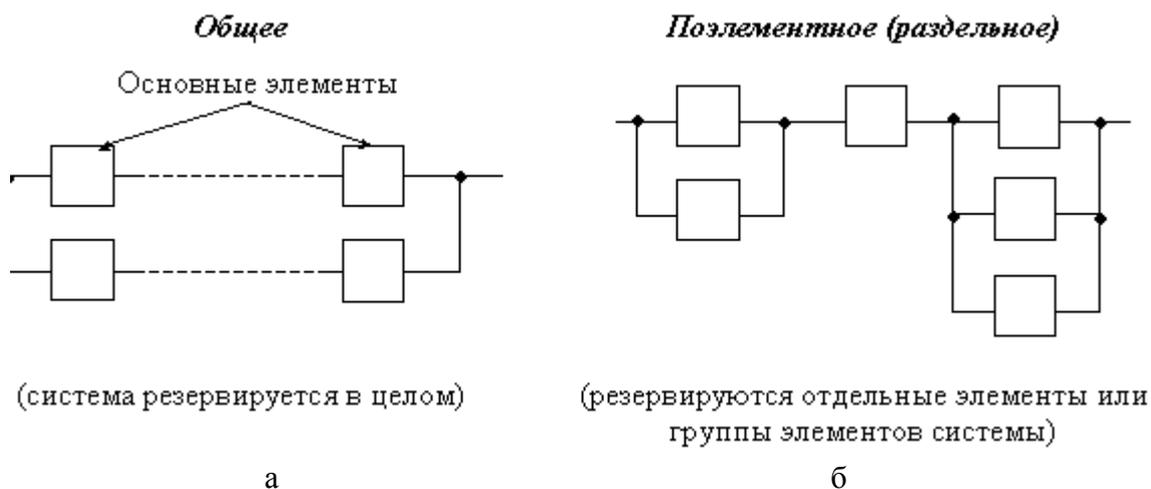


Рис. 33.2. Структурное резервирование:
а – общее; б – поэлементное (раздельное)

По виду резервирование подразделяют:

- на *пассивное (нагруженное)* – резервные элементы функционируют наравне с основными (постоянно включены в работу);
- на *активное (ненагруженное)* – резервные элементы вводятся в работу только после отказа основных элементов (резервирование замещением).

При *нагруженном резервировании* резервные элементы расходуют свой ресурс, имеют одинаковое распределение наработок до отказа и интенсивность отказов основных λ_o и резервных λ_n элементов одинакова ($\lambda_o = \lambda_n$).

При *нагруженном резервировании* различие между основными и резервными элементами часто условно. Для обеспечения нормальной работы (сохранения работоспособности) необходимо, чтобы число работоспособных элементов не становилось меньше минимально необходимого.

Разновидностью *нагруженного резервирования* является *резервирование с облегченным резервом*, т. е. резервные элементы также находятся под нагрузкой, но меньшей, чем основные. Интенсивность отказов резервных элементов $\lambda_{об}$ ниже, чем основных λ_o , т. е. $\lambda_o > \lambda_{об}$.

При *ненагруженном резервировании* резервные элементы не подвергаются нагрузке, их показатели надежности не изменяются и они не могут

отказать за время нахождения в резерве, т. е. интенсивность отказов резервных элементов $\lambda_x = 0$.

Примеры ненагруженного резервирования представлены на рис. 33.3.

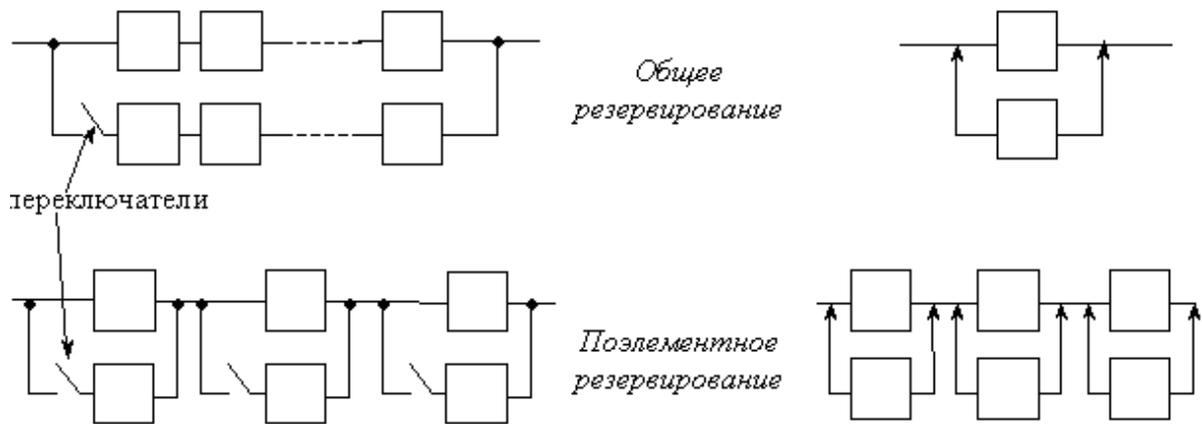


Рис. 33.3. Ненагруженное резервирование

Резервные элементы включаются в работу только после отказа основных элементов. Переключение производится вручную или автоматически (вручную – замена инструмента или оснастки при производстве, включение эскалаторов в метро в часы «пик» и т. д.; автоматически – включение резервных машин и элементов в энергетике, в бортовых сетях судов и самолетов и т. д.).

Разновидностью ненагруженного резервирования является *скользящее резервирование*, когда один и тот же резервный элемент может быть использован для замены любого из элементов основной системы.

Рассмотрим два характерных вида резервирования (рис. 33.4).

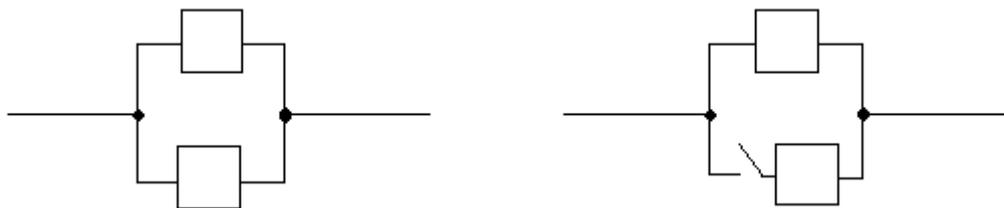


Рис. 33.4. Резервирование нагруженное и ненагруженное

Очевидно, что при равенстве числа основных и резервных элементов ненагруженный резерв обеспечивает большую надежность. Но это справедливо только тогда, когда перевод резервного элемента в работу происходит абсолютно надежно (т. е. ВБР переключателя должна быть равна 1,0). Выполнение этого условия связано со значительными техническими труд-

ностями; иногда оно нецелесообразно по экономическим или техническим причинам.

Обозначим:

n – число однотипных элементов в системе;

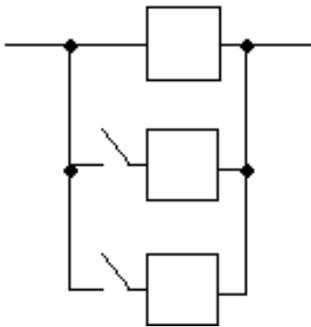
r – число элементов, необходимых для функционирования системы.

Кратность резервирования – это соотношение между общим числом однотипных элементов и элементов, необходимых для работы системы

$$k = (n - r)/r. \quad (33.1)$$

Кратность резервирования может быть целой, если $r = 1$, или дробной, если $r > 1$.

Пример:



$$r = 1, k = (3 - 1)/1 = 2$$

Контрольные вопросы:

1. Основные цели и задачи расчета показателей надежности систем?
2. Определите состав рассчитываемых показателей безотказности системы?
3. Перечислите и поясните основные этапы расчета надежности систем?
4. Что такое структура надежности?
5. Что такое математическая модель расчета надежности?
6. Какие виды резервирования существуют? В чем отличие нагруженного и ненагруженного резервирования?
7. Что такое кратность резервирования и в чем отличие целой и дробной кратности?

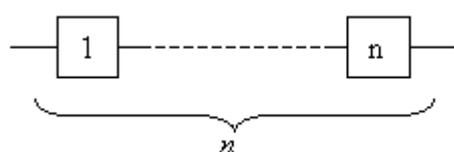
34. НАДЕЖНОСТЬ ОСНОВНОЙ СИСТЕМЫ

Основные системы (ОС) являются простейшими техническими системами, в которых отказ одного элемента приводит к отказу всей системы.

Работоспособность основной системы обеспечивается при условии, когда все n элементов системы находятся в работоспособном состоянии.

Структура системы

Случайная наработка до отказа:



$$T_c = \underset{i = \overline{1, n}}{\text{МИН}}\{ T_1, \dots, T_n \} = \underset{i = \overline{1, n}}{\text{МИН}}\{ T_i \},$$

Поскольку события, заключающиеся в работоспособности элементов системы, являются независимыми, то

– вероятность безотказной работы (**ВБР**) ОС:

$$P_c(t) = P_1(t) \cdot \dots \cdot P_n(t) = \prod_{i=1}^n P_i(t); \tag{34.1}$$

– вероятность отказа (**ВО**) ОС:

$$Q_c(t) = 1 - P_c(t) = 1 - \prod_{i=1}^n P_i(t) \tag{34.2}$$

При идентичных элементах ОС $P_1(t) = \dots = P_n(t) = P(t)$:

ВБР: $P_c(t) = P^n(t);$

ВО: $Q_c(t) = 1 - P^n(t)$

Поскольку на участке нормальной эксплуатации наработку до отказа можно описать экспоненциальным распределением каждого элемента

$$P_i(t) = \exp(-\lambda_i \cdot t), \tag{34.3}$$

где $\lambda_i = \text{const}$, то ВБР ОС

$$P_c(t) = \prod_{i=1}^n \exp(-\lambda_i \cdot t) = \exp\left(-\sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot t\right). \tag{34.4}$$

Используя уравнение связи показателей безотказности, выражающее ВБР любого объекта, в том числе и системы:

$$P_c(t) = \exp\left\{ - \int_0^t \lambda(t) dt \right\},$$

и полагая

$$P_c(t) = \exp(-\lambda_c \cdot t) = \exp\left(-\sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot t\right),$$

получаем, что интенсивность отказов (ИО) ОС равна сумме ИО элементов

$$\lambda_c = \sum_{i=1}^n \lambda_i. \quad (34.5)$$

В общем случае, для любого распределения наработки ИО системы равна

$$\lambda_c(t) = \lambda_1(t) + \dots + \lambda_n(t) = \sum_{i=1}^n \lambda_i(t). \quad (34.6)$$

Для n идентичных элементов $\lambda_1(t) = \dots = \lambda_n(t) = \lambda(t)$

$$\lambda_c(t) = \sum_{i=1}^n \lambda(t) = n \cdot \lambda(t). \quad (34.7)$$

При экспоненциальном распределении наработки до отказа каждого из n элементов ОС $P_i(t) = \exp(-\lambda_i \cdot t)$, где $\lambda_i = \text{const}$, показатели безотказности ОС определяются по формулам (табл. 34.1).

Таблица 34.1

Показатели безотказности ОС при экспоненциальном распределении наработки до отказа

Показатели безотказности ОС	Неидентичные элементы $\lambda_1 = \dots = \lambda_n = \lambda$	Идентичные элементы $\lambda_1 = \dots = \lambda_n = \lambda$
ВБР:	$P_c(t) = \prod_{i=1}^n P_i(t) = \exp\left(-t \cdot \sum_{i=1}^n \lambda_i\right) = \exp(-t \cdot \lambda_c);$	$P_c(t) = \exp(-n \cdot t \cdot \lambda);$
ВО:	$Q_c(t) = 1 - P_c(t) = 1 - \exp(-t \cdot \lambda_c);$	$Q_c(t) = 1 - \exp(-n \cdot t \cdot \lambda);$
ИО:	$\lambda_c = \sum_{i=1}^n \lambda_i.$	$\lambda_c = n \cdot \lambda;$
МО наработки до отказа:	$T_{0c} = \frac{1}{\lambda_c} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \lambda_i} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n 1/T_{0i}}$	$T_{0c} = \frac{1}{\lambda_c} = \frac{1}{n \cdot \lambda} = \frac{1}{n} \cdot \frac{1}{T_0} = \frac{1}{n} \cdot T_0.$

Выражения для МО наработки до отказа получены из формулы

$$T_{0c} = \int_0^{\infty} P_c(t) dt = \int_0^{\infty} \exp(-t \cdot \lambda_c) dt = - \frac{1}{\lambda_c} \exp(-t \cdot \lambda_c) \Big|_0^{\infty} = - \frac{1}{\lambda_c} [\exp(-\infty) - \exp(0)] = - \frac{1}{\lambda_c} (0 - 1) = \frac{1}{\lambda_c}.$$

ПРО: $fc(t) = -d P_c(t)/dt = \lambda_c \exp(-t \cdot \lambda_c); \quad fc(t) = n \cdot \lambda \cdot \exp(-n \cdot t \cdot \lambda).$

Таким образом, при экспоненциальной наработке до отказа каждого из n элементов распределение наработки до отказа ОС также подчиняется экспоненциальному распределению.

Для ОС общая надежность меньше надежности каждого из элементов. С увеличением числа элементов надежность ОС уменьшается.

Например, при $n = 1000$, $P_i(t) = 0,99$, $P_c(t) < 10^{-4}$ и средняя наработка до отказа системы в 1000 раз меньше средней наработки каждого из элементов.

Распределение норм надежности основной системы по элементам

Рассмотренные модели позволяют определить показатели безотказности ОС по известным показателям надежности элементов – так решается задача при завершении технического проекта, после испытаний опытных образцов системы и составляющих элементов.

Иначе говоря, значения $P_i(t)$ i -тых элементов хорошо известны и лишь уточняется значение $P_c(t)$ и сравнивается с заданным в ТЗ на проект. При этом, если $P_c(t)$ получается меньшей, чем в ТЗ, то принимаются меры по ее повышению (резервирование, использование более надежных элементов и т. п.).

На начальной стадии проектирования в ТЗ указывается лишь ВБР проектируемой системы. При проектировании используются как элементы с известной надежностью, так и элементы, о надежности которых можно судить лишь по их аналогам (прототипам). При этом необходима предварительная оценка надежности элементов, которая в дальнейшем уточняется в ходе испытания опытных образцов системы и элементов.

Существуют различные *способы распределения норм надежности*:

- по принципу равнонадежности элементов;
- с учетом данных об аналогах элементов;
- с учетом перспектив совершенствования элементов.

Выбор того или иного способа зависит от имеющейся информации о проектируемой системе.

1. Распределение надежности по принципу равнонадежности элементов

Задано: по техническому заданию $P_c(t)$; n – число элементов системы. Распределение наработки до отказа элементов – экспоненциальное.

При идентичных (равнонадежных) элементах ($\lambda_1 = \dots = \lambda_i = \dots = \lambda_n = \lambda$)

$$\lambda_c = n \cdot \lambda; \quad T_{0c} = \frac{1}{n} T_0.$$

интенсивность отказа i -того элемента

$$\ln P_c(t) = -n \cdot \lambda \cdot t,$$
$$\lambda = \frac{1}{n} \cdot (-\ln P_c(t) / t).$$

2. Распределение надежности с учетом данных о надежности аналогов

Задано: по техническому заданию $P_c(t)$; n – число элементов системы.

Интенсивность отказов аналогов – λ_{ai} .

Определяется доля отказов системы из-за отказов i -того элемента

$$k_i = \lambda_{ai} / \lambda_{ac},$$

где $\lambda_{ac} = \sum_{i=1}^n \lambda_{ai}$ – ИО системы по данным об аналогах.

Определяется ИО проектируемой системы

$$P_c(t) = \exp(-\lambda_c \cdot t)$$
$$\lambda_c = -\ln P_c(t) / t \text{ при } (\lambda_c > 0; \ln P(t) < 0)$$

и ИО составляющих элементов

$$\lambda_i = k_i \cdot \lambda_c.$$

3. Распределение надежности с учетом перспектив совершенствования элементов.

Задано: по техническому заданию $P_c(t)$; n – число элементов системы.

Изменение ИО аналогов за временной период [19XY по 200Z] годы, аппроксимировано выражением

$$\lambda_{ai} = \varphi(\hat{\lambda}_{ai}, 19XY),$$

где λ_{ai} – ИО i -того аналога в 19XY году.

По выражению $\lambda_{ai} = \varphi(\hat{\lambda}_{ai}, 19XY)$ экстраполируется ИО элементов-аналогов к нынешнему году (году проектирования системы), получаются

$$\lambda_{a1(94)}, \dots, \lambda_{ai(94)}, \dots$$

Определяется доля отказов системы из-за отказов i -того элемента

$$k_i = \lambda_{ai(94)} / \lambda_{ac(94)}, \text{ где } \lambda_{ac(94)} = \sum_{i=1}^n \lambda_{ai(94)},$$

и ИО элементов системы

$$\lambda_i = k_i \cdot \lambda_c = k_i \cdot (-\ln P_c(t) / t).$$

Принципы распределения показателей надежности по второму и третьему способам отличаются лишь экстраполяцией значений на год проектирования.

Контрольные вопросы и задачи:

1. Что такое основная система и в чем состоит условие ее безотказной работы?

2. Как определяются показатели безотказности основной системы – ВБР и ИО?

3. Как определяются показатели безотказности основной системы – ПРО и МО наработки до отказа?

4. Какой закон распределения наработки до отказа будет иметь основная система, если законы распределения наработки до отказа элементов являются экспоненциальными? (Привести доказательство).

5. В чем заключается необходимость распределения норм надежности между элементами основной системы?

6. Какие существуют способы распределения норм надежности между элементами основной системы? Чем они отличаются?

7. Структура проектируемой системы представлена основной системой, состоящей из 10 элементов «А», 15 элементов «В», 32 элементов «D» и 8 элементов «F». Интенсивности отказов элементов известны и равны: $\lambda_A = 2 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$, $\lambda_B = 4 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$, $\lambda_D = 2,5 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$, $\lambda_F = 5 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$. Определить среднюю наработку до отказа T_{0c} и ВБР системы за наработки $t_1 = 100 \text{ ч}$, $t_2 = 1000 \text{ ч}$ и в интервале указанных наработок? Определить плотность распределения отказов системы при наработке $t_2 = 1000 \text{ ч}$.

Ответ: $T_{0c} = 5 \cdot 10^3 \text{ ч}$, $P(t_1) = 0,98$, $P(t_2) = 0,819$, $P_c(t_1, t_2) = 0,836$, $f(t_2) = 1,64 \cdot 10^{-4} \text{ ч}^{-1}$.

35. НАДЕЖНОСТЬ СИСТЕМ С НАГРУЖЕННЫМ РЕЗЕРВИРОВАНИЕМ

Рассматривается система, состоящая из одного основного и $(n - 1)$ резервных элементов (рис. 35.1).

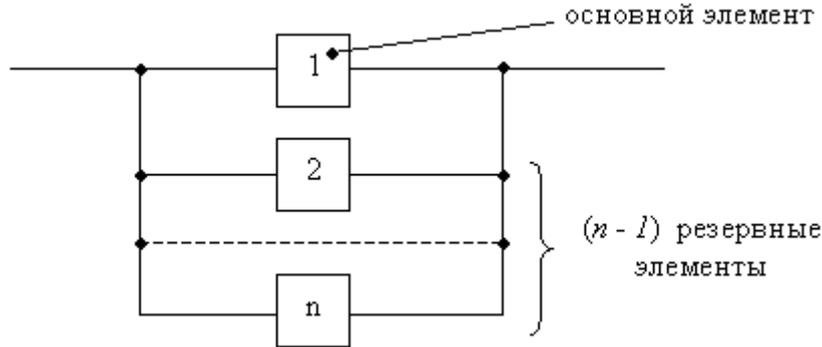


Рис. 35.1. Структура системы

При условии, что отказы элементов независимы, отказ системы происходит только при отказе всех n элементов.

Случайная наработка до отказа

$$T_c = \underset{i}{\text{МАКС}} \{T_1, \dots, T_n\} = \underset{i}{\text{МАКС}} \{T_i\} \quad (35.1)$$

(система работоспособна до тех пор, пока работоспособен хотя бы один элемент).

Поскольку отказ системы – это событие, которое заключается в одновременном появлении событий – отказах всех элементов, то

- вероятность отказа (ВО):

$$Q_c = Q_c(t) = Q_1(t), \dots, Q_n(t) = \prod_{i=1}^n Q_i(t) = \prod_{i=1}^n (1 - P_i(t)); \quad (35.2)$$

- вероятность безотказной работы (ВБР):

$$P_c = P_c(t) = 1 - Q_c(t) = 1 - \prod_{i=1}^n Q_i(t) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_i(t)); \quad (35.3)$$

- математическое ожидание (МО) наработки до отказа:

$$T_{oc} = M\{T_0\} = \int_0^{\infty} P_c(t) dt = \int_0^{\infty} \left\{ 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_i(t)) \right\} dt. \quad (35.4)$$

При идентичных элементах системы, т. е. $P_1(t) = \dots = P_n(t)$

- ВБР:

$$P_c(t) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_i(t)) = 1 - (1 - P_i(t))^n; \quad (35.5)$$

• ВО:

$$Q_c(t) = \prod_{i=1}^n Q_i(t) = Q_i^n(t); \quad (35.6)$$

• МО наработки до отказа:

$$T_{0c} = M\{T_0\} = \int_0^{\infty} \{1 - (1 - P_i(t))^n\} dt. \quad (35.7)$$

Для системы с экспоненциальной наработкой до отказа каждого из n элементов

$$P_i(t) = \exp(-\lambda_i t),$$

где $\lambda_i = \text{const}$ – показатели безотказности (рис. 35.2)

	<i>Неидентичные элементы</i> ($\lambda_1 \neq \lambda_2 \neq \dots \neq \lambda_n$)	<i>Идентичные элементы</i> ($\lambda_1 = \lambda_2 = \dots = \lambda_n = \lambda$)
ВБР:	$P_c(t) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - \exp(-\lambda_i t));$	$P_c(t) = 1 - (1 - \exp(-\lambda t))^n;$
ВО:	$Q_c(t) = \prod_{i=1}^n (1 - \exp(-\lambda_i t));$	$Q_c(t) = (1 - \exp(-\lambda t))^n;$

Рис. 35.2. ВБР и ВО в зависимости от показателей безотказности

Таким образом, при нагруженном резервировании экспоненциальное распределение наработки до отказа не сохраняется.

При идентичных n элементах системы МО наработки до отказа:

$$\begin{aligned} T_{0c} &= M\{T_0\} = \int_0^{\infty} P_c(t) dt = \int_0^{\infty} \{1 - (1 - \exp(-\lambda t))^n\} dt = \\ &= \left| x = 1 - \exp(-\lambda t), t = 1/\lambda \cdot \ln(1/(1-x)), dt = dx/\lambda(1-x) \right| = \\ &= 1/\lambda \cdot \int_0^1 (1+x+\dots+x^{n-1}) dx = 1/\lambda \cdot \sum_{i=1}^n (1/i) = \\ &= 1/\lambda \cdot (1 + 1/2 + \dots + 1/n). \end{aligned}$$

При большом n ($n \rightarrow \infty$), $T_{0c} \approx 1/\lambda (\ln n + c)$, где $c = 0,577\dots$

При неидентичных элементах

$$\begin{aligned} T_{0c} &= (1/\lambda_1 + 1/\lambda_2 + \dots + 1/\lambda_n) - [1/(\lambda_1 + \lambda_2) + \dots + 1/(\lambda_{n-1} + \lambda_n)] + \\ &+ [1/(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3) + \dots + 1/(\lambda_{n-2} + \lambda_{n-1} + \lambda_n)] + (-1)^{n+1} \cdot [1/\sum_{i=1}^n \lambda_i]. \end{aligned}$$

Для системы с n идентичными элементами $P_1(t) = \dots = P_n(t)$ решаются задачи оптимизации (в различных постановках):

1. Определение числа n элементов системы, при котором вероятность отказа (ВО) системы $Q_c(t)$ не будет превосходить заданной Q_c .

Поскольку $Q_c(t) = Q_i^n(t)$, то условие задачи

$$Q_i^n(t) \leq Q_c(t).$$

Из приведенного неравенства определяется минимально необходимое число элементов

$$n \geq \frac{\ln(1/Q_c)}{\ln(1/Q_i(t))}.$$

2. Определение надежности n элементов системы из условия, чтобы ВО не превышала заданную Q_c .

Из условия $Q_i^n(t) \leq Q_c(t)$, находим ВО I и ВБР $P_i(t) \geq 1 - Q_i(t)$.

Надежность систем с ограничением по нагрузке

Для некоторых систем условия работы таковы, что для работоспособности системы необходимо, чтобы по меньшей мере r элементов из n были работоспособны, т. е. число необходимых рабочих элементов – r , резервных – $(n - r)$.

Отказ системы наступает при условии отказа $(n - r + 1)$ элементов.

Если при изменении числа находящихся в работе элементов не наблюдается перегрузки, влияющей на возможность возникновения отказа, то отказы можно считать независимыми.

Вероятность безотказной работы такой системы определяется с помощью биномиального распределения.

Для системы, сохраняющей работоспособность при функционировании r из n элементов, ВБР определяется как сумма $r, (r + 1), \dots, (n - r)$ элементов

$$P_{r|n}(t) = \sum_{i=r}^n C_n^i P_i^i(t) Q_i^{n-i}(t) = \sum_{i=r}^n C_n^i P_i^i(t) (1 - P_i(t))^{n-i}, \quad (35.8)$$

где $C_n^r = \frac{n!}{r!(n-r)!}$

Для идентичных элементов с экспоненциальной наработкой $P_i(t) = \exp(-\lambda_i t)$, $\lambda_i = \text{const}$ ($\lambda_1 = \dots = \lambda_i = \dots = \lambda_n$)

$$\text{ВБР:} \quad \left\| \begin{aligned} P_{r|n}(t) = \sum_{i=r}^n C_n^i \exp(-\lambda t i) \frac{(1 - \exp(-\lambda t))^n}{(1 - \exp(-\lambda t))^r} \end{aligned} \right. \quad (35.9)$$

Зависимость надежности системы от кратности резервирования

При целой кратности k ($r = 1, n = k + 1$) для системы с идентичными элементами и экспоненциальной наработкой до отказа:

- ВБР системы:

$$P_c(t) = 1 - (1 - \exp(-\lambda t))^{k+1}; \quad (35.10)$$

- ПРО системы:

$$f_c(t) = -dP_c(t)/dt = (k+1)\lambda(1 - \exp(-\lambda t))^k \exp(-\lambda t); \quad (35.11)$$

- ИО системы:

$$\lambda_c(t) = f_c(t)/P_c(t) = \frac{(k+1)\lambda(1 - \exp(-\lambda t))^k \exp(-\lambda t)}{1 - (1 - \exp(-\lambda t))^{k+1}}. \quad (35.12)$$

Полагая элементы системы высоконадежными, т.е. $\lambda t \ll 1$ ($P(t) \approx 1 - \lambda t$), получим упрощенные выражения:

- ВБР системы:

$$P_c(t) \approx (1 - (\lambda t))^{k+1};$$

- ПРО системы:

$$f_c(t) \approx (k+1)\lambda^{k+1} t^k;$$

- ИО системы:

$$\lambda_c(t) \approx \frac{(k+1)\lambda^{k+1} t^k}{1 - (\lambda t)^{k+1}}.$$

Но поскольку $\lambda t \ll 1$, то $(\lambda t)^{k+1} \rightarrow 0$, поэтому ИО системы

$$\lambda_c(t) \approx (k+1)\lambda^{k+1} t^k = n \cdot \lambda^n \cdot t^{n-1},$$

где $n = k + 1$.

Полученное выражение $\lambda_c(t)$ свидетельствует о том, что при $\lambda = \text{const}$ элементов, ИО системы зависит от наработки, т. е. распределение наработки до отказа системы не подчиняется экспоненциальному распределению.

На рис. 35.2 приведены зависимости изменения $P_c(\lambda, t)$ и $\lambda_c(\lambda, t)$ из которых следует, что:

- увеличение кратности резервирования k повышает надежность (P_c возрастает, $\lambda_c/\lambda \rightarrow 0$);
- резервирование наиболее эффективно на начальном участке работы системы (при $t \leq T_0$), т. е.

$$\lim_{t \rightarrow 0} \lambda_c(t) = 0;$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \lambda_c(t) = \lambda = 1/T_0;$$

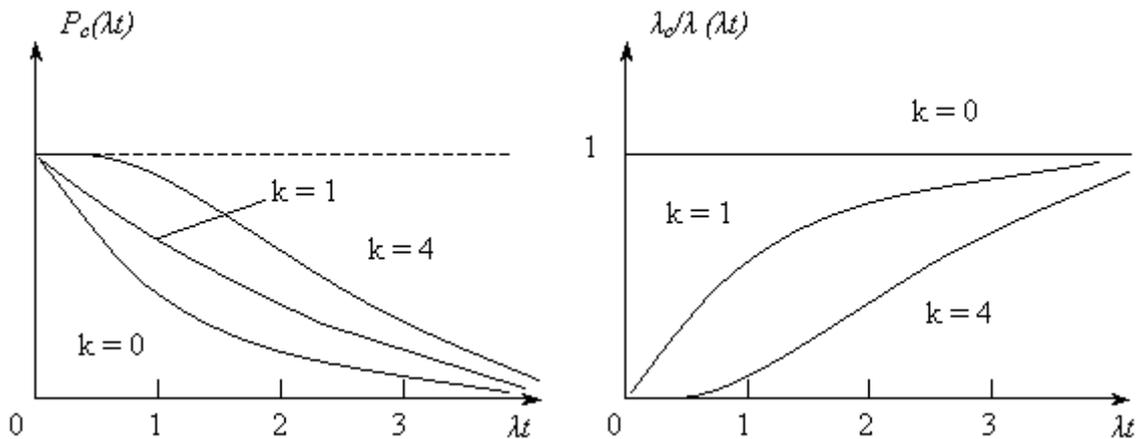


Рис. 35.2. Зависимости изменения $P_c(\lambda t)$ и $\lambda_c/\lambda(\lambda t)$

Из графика $\lambda_c/\lambda(\lambda t)$ видно, что при $t = (3 \div 4)T_0 = (3 \div 4) 1/\lambda$, λ_c приближается к λ .

Поскольку средняя наработка до отказа системы при идентичных элементах ($\lambda = \text{const}$):

$$T_{oc} = 1/\lambda \cdot \sum_{i=1}^n (1/i) = 1/\lambda \cdot \sum_{i=1}^{k+1} (1/i) = 1/\lambda \cdot (1 + 1/2 + \dots + 1/(k+1)),$$

то выигрыш в средней наработке T_{oc} снижается по мере увеличения кратности резервирования.

Например,

– при $k = 1$:

$$T_{oc} = T_0 \cdot (1 + 1/2) = 3/2T_0, \text{ (увеличение } T_{oc} \text{ на } 50\%);$$

– при $k = 2$

$$T_{oc} = T_0 \cdot (1 + 1/2 + 1/3) = 11/6T_0, \text{ (увеличение } T_{oc} \text{ на } 83\%);$$

– при $k = 3$

$$T_{oc} = 25/12T_0, \text{ (увеличение } T_{oc} \text{ на } 108\%).$$

Таким образом, динамика роста T_{oc} составляет: 50, 33 и 25%, т. е. уменьшается.

Контрольные вопросы:

4. Чем отличаются системы с нагруженным резервированием с целой и дробной кратностью? Привести расчетные выражения показателей безотказности?

5. Какой закон распределения наработки до отказа будет у системы с нагруженным резервированием, если законы распределения наработки до отказа составляющих ее элементов – экспоненциальные?

6. Какие задачи оптимизации решаются и в чем они состоят для систем с нагруженным резервом?
7. Как определяется вероятность безотказной работы системы с нагруженным резервированием и дробной кратностью?
8. При каких условиях наиболее эффективно применение нагруженного резервирования?

36. НАДЕЖНОСТЬ СИСТЕМЫ С НЕНАГРУЖЕННЫМ РЕЗЕРВИРОВАНИЕМ

Общий анализ надежности приведен для системы, состоящей из одного основного (рабочего) и $(n - 1)$ резервных элементов.

Допущения:

1. Время замены отказавшего элемента резервным равно 0 ($t_3 \rightarrow 0$).
2. Переключающее устройство подключения резервного элемента вместо отказавшего основного – абсолютно надежно.

При ненагруженном резервировании резервный элемент не может отказать, находясь в отключенном состоянии, и его показатели надежности не изменяются.

Исходные данные для расчета надежности:

- вероятность безотказной работы (ВБР) i -того элемента $P_i(t)$.
- интенсивность отказов (ИО) i -того элемента $\lambda_i(t)$.
- математическое ожидание (МО) наработки до отказа i -того элемента T_{0i} .

Анализ случайной наработки до отказа системы с ненагруженным резервом (рис. 36.1).

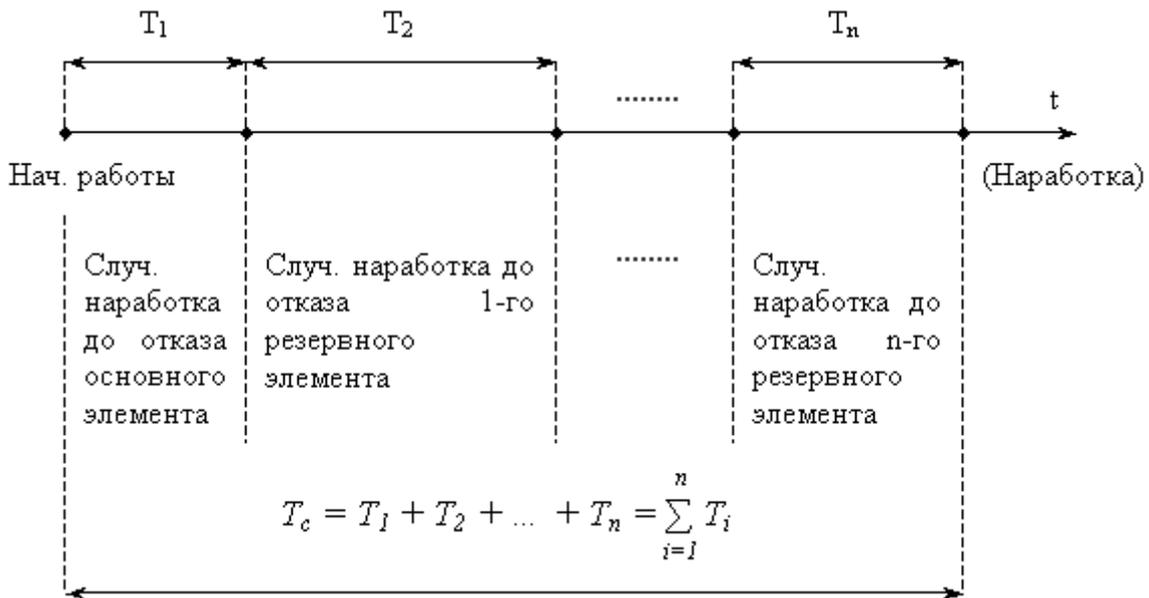


Рис. 36.1. Случайная наработка до отказа системы с ненагруженным резервом

Математическое ожидание наработки до отказа системы

$$T_{0c} = M(T_c) = \sum_{i=1}^n T_{0i} = \sum_{i=1}^n M(T_i),$$

где $T_{0i} = M(T_i)$ – МО наработки до отказа i -того элемента системы.

Рассмотрим систему, состоящую из основного элемента (ОЭ) и одного резервного (РЭ), которые являются невосстанавливаемыми объектами (рис. 36.2).

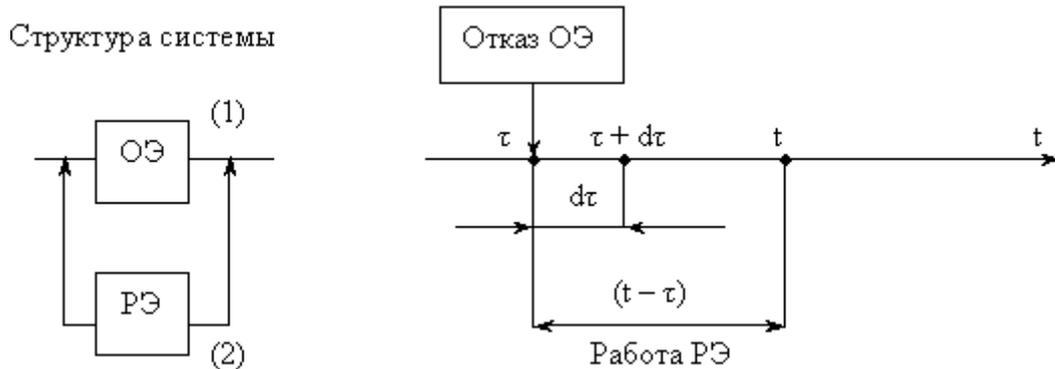


Рис. 36.2. Система с невосстанавливаемыми объектами

События, соответствующие работоспособности системы за наработку $(0, t)$:

$A = \{\text{безотказная работа (БР) системы за наработку } (0, t)\};$

$A_1 = \{\text{БР ОЭ за наработку } (0, t)\};$

$A_2 = \{\text{отказ ОЭ в момент } t > \tau, \text{ включение } (t_3 = 0) \text{ РЭ и БР РЭ на интервале } (t - \tau)\}.$

Событие $A = A_1 \vee A_2$, поэтому ВБР системы к наработке t (за наработку $(0, t)$), определяется

$$P(A) = P(A_1) + P(A_2),$$

где $P(A) = P_c(t)$;

$P(A_1)$ – ВБР ОЭ к наработке t , $P(A_1) = P_1(t)$;

$P(A_2) = P_p(t)$ – вероятность отказа ОЭ и БР РЭ после отказа ОЭ.

При известном законе распределения наработка до отказа ОЭ вычисление $P_1(t)$ не представляет сложности.

Событие A_2 является «сложным» событием, включающим в себя простые:

$A_{21} = \{\text{отказ ОЭ при } \tau < t \text{ (вблизи рассматриваемого момента } \tau)\};$

$A_{22} = \{\text{БР РЭ с момента } \tau \text{ до } t, \text{ т. е. в интервале } (t - \tau)\}.$

Событие A_2 осуществляется при одновременном выполнении событий A_{21} и A_{22}

$$A_2 = A_{21} \wedge A_{22}.$$

События A_{21} и A_{22} являются зависимыми, поэтому вероятность события A_2

$$P(A_2) = P(A_{21}) \cdot P(A_{22} | A_{21}).$$

Соответствующие вероятности:

1. $P(A_{22}|A_{21}) = P_2(t - \tau)$ – ВБР РЭ в интервале $(t - \tau)$, где $P_2(t)$ – ВБР РЭ к наработке t .

2. Для определения $P(A_{21})$ рассмотрен малый интервал $(\tau, \tau + d\tau)$, для которого вероятность отказа ОЭ равна

$$f_1(\tau) d\tau$$

Для получения ВО ОЭ к моменту t интегрируем полученное выражение по τ от 0 до t .

Поскольку ВО как функция распределения случайной наработки до отказа равна

$$Q(t) = \int_0^t f(t) dt,$$

то

$$P(A_{21}) = \int_0^t f_1(\tau) d\tau,$$

$$f_1(\tau) = -dP_1(\tau)/d\tau \quad \text{где} \quad P_1(\tau) - \text{ВБР ОЭ к наработке } \tau;$$

$$f_1(\tau) - \text{ПРО ОЭ к наработке}$$

Вероятность события A_2

$$P(A_2) = P_p(t) = P(A_{21}) \cdot P(A_{22}|A_{21}) = \int_0^t P_2(t - \tau) f_1(\tau) d\tau.$$

Тогда ВБР рассмотренной системы с ненагруженным резервом равна

$$P_c(t) = P_1(t) + \int_0^t P_2(t - \tau) f_1(\tau) d\tau \quad (36.1)$$

Аналогично для системы с одним ОЭ и $(n - 1)$ РЭ получается рекуррентное выражение

$$P_c(t) = P_{(n-1)}(t) + \int_0^t P_n(t - \tau) f_{(n-1)}(\tau) d\tau, \quad (36.2)$$

где индекс $(n - 1)$ означает, что соответствующие характеристики (ВБР и ПРО) относятся к системе, в которой включается в работу последний n -й элемент.

Выражение (36.2) приведено для состояния, когда к моменту τ отказал предпоследний $(n - 1)$ элемент системы и остался лишь один (последний) работоспособный элемент.

Принимая для рассматриваемой системы, что наработки до отказа ОЭ и РЭ подчиняются экспоненциальному распределению с параметрами λ_1 и λ_2

$$P_1(t) = \exp(-\lambda_1 t); \quad P_2(t) = \exp(-\lambda_2 t),$$

Выражение (36.1) после интегрирования имеет вид

$$P_c(t) = \exp(-\lambda_1 t) + \frac{\lambda_1}{\lambda_1 - \lambda_2} (\exp(-\lambda_1 t) - \exp(-\lambda_2 t)). \quad (36.3)$$

Плотность распределения наработки до отказа системы равна

$$f_c(t) = -\frac{dP_c(t)}{dt} = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} (\exp(-\lambda_1 t) - \exp(-\lambda_2 t)). \quad (36.4)$$

При кратностях резервирования $k > 5$ распределение наработки до отказа системы с ненагруженным резервом становится близким к нормальному независимо от законов распределения наработки, составляющих систему элементов.

При идентичных ОЭ и $(n - 1)$ РЭ и экспоненциальном распределении наработки элементов для ВБР системы с ненагруженным резервом и целой кратностью резервирования $k = (n - m)/m$, где $m = 1$

$$P_c(t) = \exp(-\lambda t) \sum_{j=0}^{n-1} \frac{(\lambda t)^j}{j!} = \exp(-\lambda t) \sum_{j=0}^k \frac{(\lambda t)^j}{j!}, \quad (36.5)$$

где n – число элементов системы;

$k = (n - 1)/1 = (n - 1)$ – кратность резервирования при $m = 1$.

ВО системы:

$$Q_c(t) = 1 - P_c(t) = \exp(-\lambda t) \sum_{j=k+1}^{\infty} \frac{(\lambda t)^j}{j!}. \quad (36.6)$$

ПРО системы:

$$f_c(t) = \frac{(\lambda t)^{n-1}}{(n-1)!} \exp(-\lambda t) \quad (36.7)$$

ИО системы:

$$\lambda_c(t) = \frac{\lambda \cdot (\lambda t)^{n-1}}{(n-1)! \sum_{j=0}^{n-1} (\lambda t)^j / j!} \exp(-\lambda t) = \frac{f_c(t)}{P_c(t)}. \quad (36.8)$$

Таким образом, распределение наработки до отказа таких систем подчиняется распределению Эрланга (гамма-распределение при целых n).

Согласно выражению (36.5) проанализируем, как изменяется ВБР системы при различной кратности резервирования:

$$k = 0; n = 1; \quad P_c(t) = e^{-\lambda t} \sum_{j=0}^0 (\lambda t)^j / j! = |0! = 1| = \exp(-\lambda t);$$

$$k = 1; n = 2; \quad P_c(t) = e^{-\lambda t} \sum_{j=0}^1 (\lambda t)^j / j! = e^{-\lambda t} [1 + \lambda t / 1!] = \exp(-\lambda t) [1 + \lambda t];$$

$$k = 2; n = 3; \quad P_c(t) = e^{-\lambda t} [1 + \lambda t + \lambda^2 t^2 / 2!];$$

Сравнение ненагруженного и нагруженного резервирования проведено по графику $P_c(\lambda t)$ для системы с идентичными элементами (λ) и кратностью резервирования $k = 2$ (рис. 36.3).

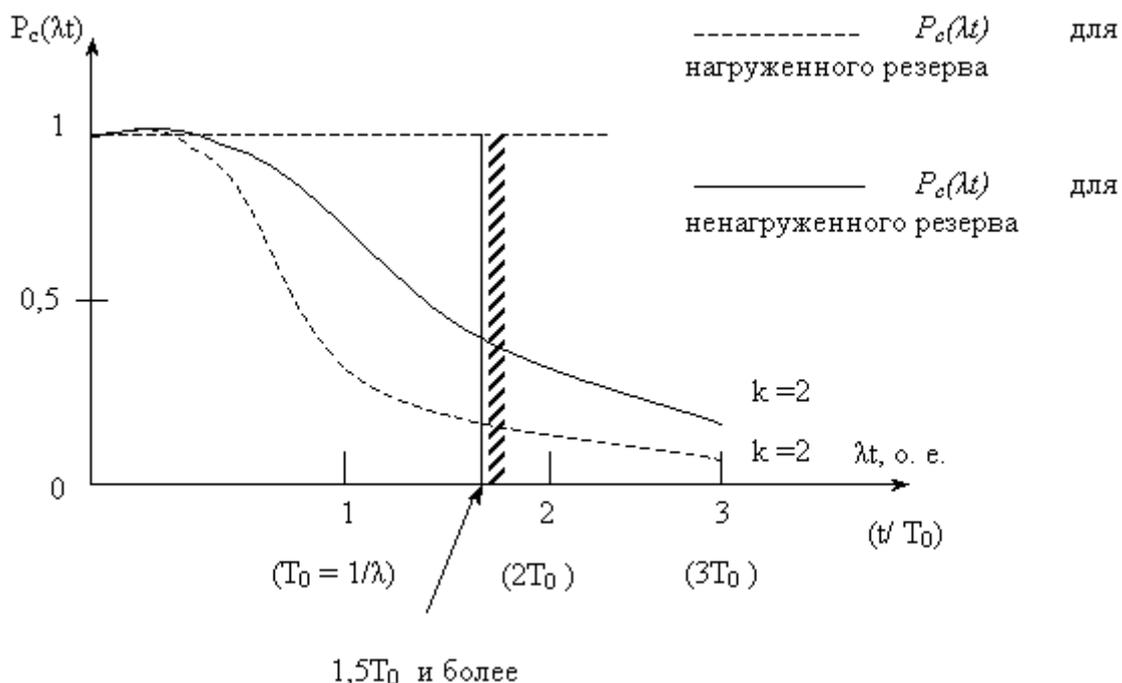


Рис. 36.3. График сравнения ненагруженного и нагруженного резервирования

Наибольшей эффективностью от использования системы с ненагруженным резервом будет при продолжительности работы РЭ не менее $1,5 T_0$.

При ненагруженном резерве с дробной кратностью (при $m > 1$) и экспоненциальном распределении наработки до отказа идентичных элементов (ИО λ) расчетное выражение для $P_c(t)$

$$P_c(t) = \exp(-m\lambda t) \sum_{j=0}^{k^*} \frac{(m\lambda t)^j}{j!}, \quad (36.9)$$

где $k^* = n - m$.

Ниже рассмотрены показатели безотказности системы с ненагруженным резервированием, когда случайная наработка до отказа элементов системы подчиняется нормальному распределению с ПРО

$$f_i(t) = \frac{1}{S_i \sqrt{2\pi}} \exp[-(t - T_{0i})^2 / 2S_i^2] \quad (36.10)$$

Поскольку случайная наработка до отказа системы $T_c = \sum_{i=1}^n T_i$ и T_i являются независимыми случайными величинами наработки, то сумма (композиция) независимых случайных величин, каждая из которых распределена нормально, также имеет нормальное распределение с параметрами:

– математическое ожидание наработки до отказа

$$T_{0c} = \sum_{i=1}^n T_{0i}; \quad T_{0i} = M\{T_i\}, i = \overline{1, n};$$

– дисперсия наработки до отказа

$$S_c^2 = \sum_{i=1}^n S_i^2; \quad S_i = S\{T_i\}, i = \overline{1, n}$$

Среднее квадратичное отклонение наработки до отказа системы определяется

$$S_c = \sqrt{S_c^2}.$$

Плотность распределения случайной наработки до отказа системы при целой кратности резервирования

$$f_c(t) = \frac{1}{S_c \sqrt{2\pi}} \exp[-(t - T_{0c})^2 / 2S_c^2].$$

Показатели безотказности определяются с использованием функций $f(x)$ и $\Phi(x)$ для

$$x = \frac{t - T_{0c}}{S_c}$$

и имеют вид

$$P_c(t) = 0,5 - \Phi(x); \quad Q_c(t) = 0,5 + \Phi(x).$$

$$\lambda_c(t) = \frac{f(x)}{S_c [0,5 - \Phi(x)]}; \quad f_c(t) = \frac{f(x)}{S_c}.$$

Для системы с элементами, наработка на отказ которых подчиняется экспоненциальному распределению $P_i(t) = \exp(-\lambda_i t)$, можно принять $P_i(t) \approx 1 - \lambda_i t$, поэтому выражения ВО и ВБР

$$Q_c(t) \approx \frac{\prod_{i=1}^n \lambda_i t}{n!} = \frac{t^n \prod_{i=1}^n \lambda_i}{n!};$$

$$P_c(t) \approx 1 - \frac{t^n \prod_{i=1}^n \lambda_i}{n!}.$$

При ненагруженном резерве ВО системы в $n!$ раз меньше, чем при нагруженном.

Контрольные вопросы:

1. Что представляет собой ненагруженное резервирование и как случайная наработка до отказа системы связана со случайными наработками составляющих систему элементов?
2. Основные допущения, принятые при расчете системы с ненагруженным резервированием.
3. К какому закону распределения стремится наработка до отказа системы при больших значениях кратности резервирования?
4. Проанализируйте, как изменяется вероятность безотказной работы системы с увеличением кратности резервирования?
5. При каких условиях ненагруженное резервирование становится значительно эффективнее нагруженного?
6. Какой закон распределения наработки до отказа будет у системы с ненагруженным резервированием, если законы распределения наработки до отказа элементов являются нормальными?
7. Приведите расчетные формулы показателей безотказности для системы с нормальным распределением наработки элементов?

РАЗДЕЛ 4. ПРАКТИЧЕСКИЕ РАБОТЫ

Практическая работа № 1 Составление функций распределения

Проведение параметрической диагностики насосных станций рассмотрим на примерах.

Пример 1. Определение вероятностей состояния

Пусть при наблюдении за газотурбинным двигателем проверяются два признака:

k_1 – повышение температуры газа за турбиной более чем на 50 °С;

k_2 – увеличение времени выхода на максимальную частоту вращения более чем на 5 с. Предположим, что для данного типа двигателей появление этих признаков связано либо с неисправностью топливного регулятора (состояние D_1), либо с увеличением радиального зазора в турбине (состояние D_2).

При нормальном состоянии двигателя (состояние D_3) признак k_1 не наблюдается, а признак k_2 наблюдается в 5 % случаев. На основании статистических данных известно, что 80 % двигателей вырабатывают ресурс в нормальном состоянии, 5 % двигателей имеют состояние D_1 и 15 % – состояние D_2 . Известно также, что признак k_1 встречается при состоянии D_1 в 20 %, а при состоянии D_2 – в 40 % случаев; признак k_2 при состоянии D_3 встречается в 30 %, а при состоянии D_2 – в 50 % случаев. Сведем эти данные в диагностическую таблицу (табл. 1.1).

Таблица 1.1

Вероятности признаков и априорные вероятности состояний

D_i	$P(k_1/D_i)$	$P(k_2/D_i)$	$P(D_i)$
D_1	0,2	0,3	0,05
D_2	0,4	0,5	0,15
D_3	0,0	0,05	0,80

Найдем сначала вероятности состояний двигателя, когда обнаружены оба признака k_1 и k_2 .

Вероятность состояния

$$P(D_1/k_1 \cdot k_2) = \frac{0,05 \cdot 0,2 \cdot 0,3}{0,05 \cdot 0,2 \cdot 0,3 + 0,15 \cdot 0,4 \cdot 0,5 + 0,8 \cdot 0 \cdot 0,05} = 0,09.$$

Аналогично получим $P(D_2/k_1 \cdot k_2) = 0,91$; $P(D_3/k_1 \cdot k_2) = 0$.

Определим вероятность состояний двигателя, если обследование показало, что повышение температуры не наблюдается (признак k_1 отсутствует), но увеличивается время выхода на максимальную частоту вращения (признак k_2 наблюдается).

Отсутствие признака k_1 есть признак наличия \bar{k}_1 , причем $P(\bar{k}_1/D_i) = 1 - P(k_1/D_i)$. Для расчета значение $P(k_1/D_i)$ в диагностической таблице заменяют на $P(\bar{k}_1/D_i)$. В этом случае

$$P(D_1/\bar{k}_1 \cdot k_2) = \frac{0,05 \cdot 0,8 \cdot 0,3}{0,05 \cdot 0,8 \cdot 0,3 + 0,15 \cdot 0,6 \cdot 0,5 + 0,8 \cdot 1 \cdot 0,05} = 0,12.$$

Аналогично $P(D_2/\bar{k}_1 \cdot k_2) = 0,46$; $P(D_3/\bar{k}_1 \cdot k_2) = 0,41$. Вычислим вероятности состояний в том случае, когда оба признака отсутствуют. Аналогично предыдущему получим

$$P(D_1/\bar{k}_1 \cdot \bar{k}_2) = \frac{0,05 \cdot 0,8 \cdot 0,7}{0,05 \cdot 0,8 \cdot 0,7 + 0,15 \cdot 0,6 \cdot 0,5 + 0,8 \cdot 1 \cdot 0,15} = 0,03;$$

$$P(D_2/\bar{k}_1 \cdot \bar{k}_2) = 0,05; \quad P(D_3/\bar{k}_1 \cdot \bar{k}_2) = 0,92.$$

Отметим, что вероятности состояний D_1 и D_2 отличны от нуля, так как рассматриваемые признаки не являются для них детерминирующими. Из проведенных расчетов можно установить, что при наличии признаков k_1 и k_2 в двигателе с вероятностью 0,91 имеется состояние D_1 , т.е. увеличение радиального зазора. При отсутствии обоих наиболее вероятно нормальное состояние (вероятность 0,92). При отсутствии признака k_1 и наличии признака k_2 вероятности состояний D_2 и D_3 примерно одинаковы (0,46 и 0,41) и для уточнения состояния двигателя требуется проведение дополнительных обследований.

Пример 2. Составление булевой функции

Составим булевскую функцию распределения для ряда технических сведений о признаках и состояниях системы.

1. При диагнозе D_2 появляется признак k_1 .
2. Если имеется диагноз D_1 и отсутствует диагноз D_2 , то должен обнаружиться признак k_2 .
3. Если появляется признак k_1 или k_2 или оба вместе, то может быть диагноз D_1 или D_2 или оба вместе.

Первое условие записывается в виде $D_2 \rightarrow k_1$, второе – $D_1 \wedge \bar{D}_2 \rightarrow k_2$, третье – $k_1 \vee k_2 \rightarrow D_1 \vee D_2$.

Так как эти условия справедливы одновременно, то булевская функция высказываний $F = (D_2 \rightarrow k_1) \wedge (D_1 \wedge \bar{D}_2 \rightarrow k_2) \wedge (k_1 \vee k_2 \rightarrow D_1 \vee D_2)$.

Пример 3. Определение диагностических интервалов

Пусть измеряется параметр x , возможные значения которого лежат в пределах $0 \leq x \leq 1$. Обследование большого числа объектов показало, что все значения x в указанном диапазоне равновероятны, но для объектов с диагнозом D_1 они лежат в пределах от 0,5 до 0,75. Требуется найти целесообразное разбиение диапазона x на равные диагностические интервалы, причем результаты обследования должны обладать наибольшей диагностической ценностью для установления диагноза.

Рассмотрим несколько способов. Пусть диапазон x разбивается на два интервала: $0 - 0,5$ и $0,5 - 1$. Если обследование по параметру x образует признак k_1 , то наличие x в первом интервале составляет признак k_{11} , во втором интервале k_{12} . Видно, что $P(k_{11}) = 0,5$; $P(k_{11}/D_1) = 0$; $P(k_{12}) = 0,5$; $P(k_{12}/D_1) = 1$. По формуле

$$Z_{D_i}(k_j) = \sum_{s=1}^m p(k_{js}/D_i) \log_2 \left[P(k_{js}/D_i) / P(k_{js}) \right]$$

находим

$$Z_{D_1}(k_1) = \sum_{s=1}^2 P(k_{1s}/D_1) \log_2 \left[P(k_{1s}/D_1) / P(k_{1s}) \right] = 0 + 1 \log_2 \left(\frac{1}{0,5} \right) = 1$$

При разбиении на четыре диагностических интервала ($0 - 0,25$; $0,25 - 0,5$; $0,5 - 0,75$; $0,75 - 1$) получаем

$$Z_{D_1}(k_1) = \sum_{s=1}^4 P(k_{1s}/D_1) \log_2 \left[P(k_{1s}/D_1) / P(k_{1s}) \right] = 0 + 0 + 1 \log_2 \left(\frac{1}{0,25} \right) + 0 = 2$$

При разбиении на восемь интервалов ($0 - 0,125$, $0,125 - 0,25$ и т.д.) найдем

$$Z_{D_1}(k_1) = \sum_{s=1}^8 P(k_{1s}/D_1) \log_2 \left[P(k_{1s}/D_1) / P(k_{1s}) \right] = 0 + 0 + 0 + 0 + 0 + 0,5 \log_2(0,5/0,125) + 0,5 \log_2(0,5/0,125) + 0 + 0 = 2$$

Практическая работа № 2

Определение расчетной и отбраковочной толщины стенок труб

Исходные данные:

В 2002 г. проведено техническое диагностирование трубопровода, транспортирующего продукты, не содержащие сероводорода, с наружным диаметром 273 мм, номинальной толщиной стенки 10 мм и рабочим давлением 10,0 МПа. Магистральная часть трубопровода смонтирована из труб из стали 20 по ГОСТ 1050. Трубопровод находится в эксплуатации с 1990 г. Механические свойства стали труб, определенные через твердость, имеют значения не ниже требований ГОСТ 8731.

Определить расчетную и отбраковочную толщины стенок труб в соответствии с ОСТ 153-39.4-010-2002.

Проверочный расчет толщины стенки t_r осуществляется согласно формуле (2.1)

$$t_R = \frac{\gamma_f k P D_n}{2(R + 0,6\gamma_f P)}, \quad (2.1)$$

где значения R определяются:

– для трубопроводов, транспортирующих продукты, не содержащие сероводород,

$$R = \min \left\{ \frac{R_1^H m_2}{\gamma_m \gamma_n}, \frac{R_2^H m_2}{0,9\gamma_n} \right\}.$$

Здесь k – коэффициент несущей способности труб и соединительных деталей, значение которого принимается согласно СП 34-116-97 для труб, заглушек и переходов равным 1.

Значения коэффициентов: надежности по назначению трубопроводов $\gamma_n = 1$, условий работы трубопровода III категории $m_2 = 0,9$, надежности по материалу $\gamma_m = 1,55$, надежности по нагрузке $\gamma_f = 1,15$ принимаются согласно СП 34-116-97 по таблицам, приводимым в приложении Б.

Для стали 20 $R_1^H = 420$ МПа, $R_2^H = 250$ МПа, следовательно,

$$R = \min \left\{ \frac{R_1^H m_2}{\gamma_m \gamma_n}, \frac{R_2^H m_2}{0,9\gamma_n} \right\} = \min \left\{ \frac{420 \cdot 0,9}{1,55 \cdot 1}, \frac{250 \cdot 0,9}{0,9 \cdot 1} \right\} = \min \{244, 250\} = 244.$$

$$t_R = \frac{\gamma_f k P D_n}{2(R + 0,6\gamma_f P)} = \frac{1,15 \cdot 1 \cdot 10 \cdot 0,273}{2(244 + 0,6 \cdot 1,15 \cdot 10)} = 0,00626 \text{ м.}$$

Номинальная толщина стенки определяется по формуле

$$T_n = t_r + s_m + s_{\kappa},$$

где s_m – технологический припуск;
 s_k – припуск на коррозию.

Примем $s_m + s_k = 3,74$ мм. Тогда

$$T_n = 6,26 + 3,74 = 10 \text{ мм.}$$

Отбраковочная толщина стенок труб определяется по формулам (2.2) или (2.3)

$$\frac{R_2^H \cdot m_3}{R_1^H \cdot m_2} = \frac{250 \cdot 1}{420 \cdot 0,75} = 0,79. \quad (2.2)$$

$$\frac{R_2^H \cdot m_3}{R_1^H \cdot m_2} = 0,79 \geq 0,75, \quad (2.3)$$

Т.к. условие выполнено расчет ведем по формуле (2.2)

$$R_1 = R_1^H \cdot m_1 \cdot m_2 \cdot k_1 = 420 \cdot 0,8 \cdot 0,75 \cdot 0,8 = 304,42.$$

$$t_{омб} = \frac{nP\alpha D_n}{2(R_1 + nP)} = \frac{1,2 \cdot 10 \cdot 1 \cdot 0,273}{2 \cdot (304,42 + 1,2 \cdot 10)} = 0,0052 \text{ м.}$$

Практическая работа № 3

Расчет остаточного ресурса трубопровода по минимальной вероятной толщине стенок труб

Исходные данные – по практической работе № 2.

Замеры толщин стенок труб по результатам диагностики представлены в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Номер замеряемого места по схеме	Толщина стенки, мм				Номинальная t_{nk}	Диаметр трубы, мм
	Фактическая (t_k)					
	1	2	3	4	5	6
1	7,5	7,5	7,6	7,7	10	273
2	7,3	7,3	7,4	7,4	10	273
3	7,3	7,2	7,4	7,3	10	273
4	7,4	7,4	7,5	7,4	10	273
5	9,3	9,3	9,4	9,4	10	273
6	9,1	9,0	9,0	9,0	10	273
7	7,8	7,7	7,8	7,7	10	273
8	8,8	8,7	8,7	8,8	10	273
9	7,9	7,9	8,0	8,0	10	273
10	7,3	7,3	7,4	7,4	10	273

Расположение мест замеров толщины стенки по сечению трубы для таблицы 3.1 приведены на рис. ПЗ.1.

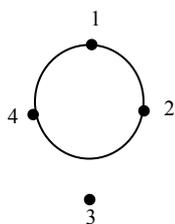


Рис. ПЗ.1. Расположение мест замеров толщины стенки по сечению трубы

Проведем расчет остаточного ресурса трубопровода по минимальной вероятной толщине стенок труб.

Расчет

Расчет минимальной вероятной толщины стенок труб $\varnothing 273$ мм.

Среднеквадратичное отклонение замеряемой толщины

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum (t_k - t_{cp})^2} = \sqrt{\frac{19,7310}{39}} = 0,7113,$$

где $t_{cp} = \frac{\sum_{k=1}^N t_k}{N} = \frac{322,6}{40} = 8,065$; N – число замеров; t_k – значение замеренной толщины; t_{cp} – среднее значение замеренной толщины.

Вероятная минимальная толщина стенки трубопровода

$$t_{\min} = t_{cp} - 2\sigma = 8,065 - 2 \cdot 0,7113 = 6,6424 \text{ мм.}$$

$$t_{\min} > t_{\text{омб}} \text{ (по примеру 1)}$$

$$6,64 > 5,20.$$

Следовательно, допускается дальнейшая эксплуатация трубопровода.

Средняя скорость коррозии

$$V_{cp} = \frac{t_n - t_{\min}}{\tau} = \frac{10 - 6,64}{12} = 0,28 \text{ мм/год.}$$

Остаточный ресурс трубопровода

$$\tau_{\text{ост}} = \frac{t_{\min} - t_{\text{омб}}}{V_{cp}} = \frac{6,64 - 5,20}{0,28} = 5,14 \text{ лет.}$$

Практическая работа № 4
Расчет остаточного ресурса трубопровода с учетом общего
коррозионно-эрозионного износа стенок

Исходные данные – по практическим работам № 2, 3.

Требуется рассчитать остаточный ресурс трубопровода с вероятностью прогноза 95 %. Принимаем значение регламентированной надежности $\gamma = 0,95$ % и односторонней доверительной вероятности, равной 0,95. Принимается линейная модель износа, т. е. $m = 1$.

Определим расчетную толщину :

$$t_R = \frac{\gamma_f k P D_n}{2(R + 0,6\gamma_f P)} = \frac{1,15 \cdot 1 \cdot 10 \cdot 0,273}{2(244 + 0,6 \cdot 1,15 \cdot 10)} = 0,00626 \text{ м.}$$

По приведенным в таблице практической работы № 3 данным подсчитывается значение относительного износа для каждого замера

$$\delta_k = \frac{t_{нк} - t_k}{t_{нк}}.$$

Затем подсчитываются:

1. Средний относительный износ по формуле

$$\delta_{cp} = \frac{1}{N} \sum_1^N \left(1 - \frac{t_k}{t_{нк}} \right) = \frac{7,74}{40} = 0,1935.$$

2. Среднее квадратическое отклонение относительного утонения

$$S_\delta = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum (\delta_k - \delta_{cp})^2} = \sqrt{\frac{0,1922}{39}} = 0,0702.$$

3. Полагая среднее квадратическое отклонение технологического допуска $S_0 = 0,05$, находим среднее квадратическое отклонение относительного износа

$$S_d = \sqrt{S_\delta^2 - S_0^2} = \sqrt{0,0702^2 - 0,05^2} = 0,0493.$$

4. Верхнее интервальное значение среднего относительного износа

$$\delta_{cp*} = \delta_{cp} + U_d \frac{S_d}{\sqrt{N-2}} = 0,1935 + 1,65 \cdot \frac{0,0493}{\sqrt{38}} = 0,2067.$$

5. Верхнее интервальное значение среднеквадратического отклонения относительного износа

$$S_{d*} = S_d \left(1 + \frac{Ud}{\sqrt{2N-8}}\right) = 0,0493 \cdot \left(1 + \frac{1,65}{\sqrt{72}}\right) = 0,0589.$$

6. Средний допустимый относительный износ

$$[\delta_{cp}] = \frac{1}{k} \sum_1^k \left(1 - \frac{t_R}{t_n}\right) = \left[1 - \frac{6,26}{10}\right] = 0,374.$$

7. Квантиль функции Лапласа

$$\frac{[\delta_{cp}] - \delta_{cp*}}{\sqrt{S_{d*}^2 + S_0^2}} = \frac{0,374 - 0,2067}{\sqrt{0,0589^2 + 0,05^2}} = 2,165.$$

8. При величине квантиля 2,165, значение функции Лапласа будет равно 0,984 (см. табл. П4.1).

Таблица П4.1. Значения функции Лапласа

β	0,75	0,76	0,77	0,78	0,79	0,80	0,81	0,82	0,83	0,84
U_β	0,67	0,71	0,74	0,77	0,81	0,84	0,88	0,92	0,95	0,99
β	0,85	0,86	0,87	0,88	0,89	0,90	0,91	0,92	0,93	0,94
U_β	1,04	1,08	1,13	1,18	1,23	1,28	1,34	1,41	1,48	1,56
β	0,95	0,96	0,97	0,98	0,99	0,993	0,995	0,997	0,998	0,999
U_β	1,65	1,75	1,88	2,05	2,33	2,46	2,58	2,75	2,88	3,09

Примечание: для промежуточных значений β величина квантиля U_β определяется интерполированием.

9. Находим значение гамма-процентного остаточного ресурса:

$$G = \frac{\gamma}{100} \cdot \Phi \left(\frac{[\delta]_{cp} - \delta_{cp}}{\sqrt{S_{[\delta]}^2 + S_d^2}} \right)$$

Подставив значения, получим $G = 0,935$.

10. По таблице П4.1 вероятности 0,935 соответствует U_2 – квантиль, равный 1,52.

Параметр

$$Q = \frac{[\delta_{cp}] \cdot \delta_{cp*} - U_r \sqrt{S_{d*}^2 [\delta_{cp}]^2 + S_{[\delta]} (\delta_{cp*}^2 - U_r^2 \cdot S_{d*}^2)}}{\delta_{cp*}^2 - U_r^2 \cdot S_{d*}^2},$$

$$Q = \frac{0,374 \cdot 0,2067 - 1,52 \sqrt{0,0589^2 \cdot 0,374^2 + 0,05^2 (0,2067^2 - 1,52^2 \cdot 0,0589^2)}}{0,2067^2 - 1,52^2 \cdot 0,0589^2} = 1,18.$$

Остаточный ресурс трубопровода при вероятности прогноза 95 %

$$T = (Q - 1) \cdot \tau = (1,18 - 1) \cdot 12 = 2,1 \text{ года.}$$

Практическая работа № 5

Оценка технического состояния газопроводов

А. Произведем оценку малоциклового долговечности по критерию зарождения трещины.

Задача

Определить число циклов перепада давления до зарождения трещины в нефтепроводе для трубопровода диаметром 273 мм при наличии риски шириной 1 мм и глубиной 0,5 мм. Толщина стенки 9,2 мм, материал стенки трубы – сталь 13ГФА по ТУ 14-3-1701-89. Давление в трубопроводе: рабочее – 2,5 МПа, гидростатическое при остановке перекачки – 0,1 МПа.

Исходные данные:

- рабочее давление в трубопроводе: в режиме перекачки $p = 2,5$ МПа; при остановках перекачки $p = 0,1$ МПа;
- диаметр наружный — 377 мм;
- установленная диагностикой минимальная номинальная толщина стенки в зоне дефекта $t = 9,2$ мм;
- установленный внутритрубной диагностикой дефект – риска с закругленными краями глубиной $b = 1$ мм и шириной $d = 0,5$ мм, радиус закругления $\rho = 0,5$ мм;
- механическими испытаниями установлены следующие характеристики стали 13ГФА:
 - предел прочности $\sigma_b = 556,9$ МПа;
 - предел текучести $\sigma_t = 395$ МПа;
 - истинные деформации при разрыве $a_k = 0,323$;
 - истинные напряжения при разрыве $\sigma_k = 623,4$ МПа;
 - относительное равномерное сужение $\psi_b = 12,48$ %;
 - диаграмма истинных напряжений и деформаций растяжения $\sigma_i = f(e_i)$;
 - режим нагружения – мягкий, асимметричный с коэффициентом асимметрии $r = 0,04$;
 - модуль упругости стали $E = 2,1 \cdot 10^5$ МПа;
 - число циклов нагружения за 1 год $N_2 = 160$.

Последовательность расчета:

1. Рассчитывается предел усталости для сталей, применяемых на нефтепроводах:

$$\sigma_{-1} = 0,4 \cdot \sigma_e = 0,4 \cdot 556,9 = 222,76 \text{ МПа.} \quad (5.1)$$

2. Определяется показатель мягкого циклического нагружения

$$\chi_2 = 1,2 \cdot \frac{\sigma_{0,2}}{\sigma_e} - 0,35 = 1,2 \cdot \frac{395}{556,9} - 0,35 = 0,501. \quad (5.2)$$

3. Вычисляются максимальные кольцевые напряжения в стенке трубы без учета концентрации напряжений

$$\sigma_{\kappa\mu\max} = n \frac{pD_{вн}}{2t} = 1,1 \frac{2,5 \cdot (0,273 - 2 \cdot 0,0092)}{2 \cdot 0,0092} = 38,05 \text{ МПа.} \quad (5.3)$$

4. Вычисляются минимальные кольцевые напряжения без учета концентрации напряжений

$$\sigma_{\kappa\mu\min} = \frac{1,1 \cdot 0,1 \cdot (0,273 - 2 \cdot 0,0092)}{2 \cdot 0,0082} = 1,52 \text{ МПа.} \quad (5.4)$$

5. Вычисляется коэффициент концентрации напряжений для риски

$$\alpha_\sigma = 1 + 2 \sqrt{\frac{b}{\rho}} \cdot \frac{t}{t-b} = 1 + 2 \sqrt{\frac{1,0}{0,5}} \cdot \frac{9,2}{(9,2-1)} = 4,17. \quad (5.5)$$

6. Рассчитываются максимальные и минимальные напряжения в концентраторе (риске)

$$\sigma_{\max} = \alpha_\sigma \cdot \sigma_{\kappa\mu\max} = 4,17 \cdot 38,05 = 158,7 \text{ МПа;} \quad (5.6)$$

$$\sigma_{\min} = \alpha_\sigma \cdot \sigma_{\kappa\mu\min} = 4,17 \cdot 1,52 = 6,34 \text{ МПа.} \quad (5.7)$$

7. С использованием графика зависимости истинных напряжений от деформаций $\sigma_i = f(e_i)$ определяем истинные деформации при максимальных и минимальных напряжениях

$$e_{\max} = 0,016;$$

$$e_{\min} = 0.$$

8. Вычисляются амплитуда деформации в вершине дефекта (e_a) и средняя деформация цикла (e_{cp})

$$e_a = \frac{e_{\max} - e_{\min}}{2} = \frac{0,016 - 0}{2} = 0,008; \quad (5.8)$$

$$e_a = \frac{e_{\max} + e_{\min}}{2} = \frac{0,016 + 0}{2} = 0,008. \quad (5.9)$$

9. Вычисляется истинная деформация в вершине дефекта с учетом асимметрии циклов нагружения

$$\tilde{e}_a = \frac{e_a}{1 - \frac{e_{cp}}{e_k}} = \frac{0,0135}{1 - \frac{0,0135}{0,323}} = 0,0082. \quad (5.10)$$

10. Из уравнения Менсона – Коффина для данного случая определяется число циклов до зарождения трещины

$$N = 0,501 \sqrt{\frac{\ln \frac{1}{1 - \psi_{\varepsilon}}}{e_a - \frac{\sigma_{-1}}{E}}} = 0,501 \sqrt{\frac{\ln \frac{1}{1 - 0,1248}}{0,0082 - \frac{222,76}{2,1 \cdot 10^5}}} = 344,5 \text{ циклов. (5.11)}$$

11. Определяем долговечность по зарождению трещины

$$T = \frac{N}{N_2} = \frac{344,5}{160} = 2,15 \text{ года. (5.12)}$$

Б. Произведем оценку технического состояния по статистике отказов трубопроводов.

При прогнозировании остаточного ресурса трубопровода возможна ситуация, когда данные об износе его элементов имеются не в полном объеме. Но имеются данные по отказам и информация о величине общего (среднего) износа на момент диагностирования. Величина общего износа равна произведению средней скорости износа на величину наработки к моменту диагностирования:

$$\Delta_{cp} = V_{cp} \cdot \tau_d. \quad (5.13)$$

Процесс износа стенки можно описать степенной функцией

$$\delta = a \cdot \tau^m, \quad (5.14)$$

где a – случайный параметр; m – детерминированный параметр.

В дальнейшем будем полагать, что параметр a имеет нормальное распределение. При $m = 1$ износ осуществляется с постоянной скоростью a , при $m > 1$ процесс износа ускоряется при эксплуатации, при $m < 1$ – замедляется. У диагностируемых трубопроводов наиболее реальна ситуация, когда толщинометрия проводилась только один раз или предыдущие измерения были непредставительными. В этом случае показатель степени m рекомендуется принимать равным единице. Как правило, такое допущение идет в запас прочности. Если диагностирование проводилось не один раз ($n \geq 2$), то параметр m может быть определен по результатам статистической обработки замеров толщины стенки.

Рассмотрим только линейную модель износа, которой в формуле (5.14) соответствует показатель $m = 1$.

В обозначениях относительного износа

$$\Delta_{cp} = \delta_{cp} \cdot t_n \quad \text{и} \quad V_{cp} = a_{cp} \cdot t_n. \quad (5.15)$$

Следует отметить, что в нефтехимической и нефтеперерабатывающей промышленности существуют примеры банков данных по скорости общей коррозии [11], которые используются при проектировании трубопроводов для назначения прибавки на коррозию. Этими данными можно воспользоваться и при диагностировании, принимая в пределах разброса опытных данных верхнее значение V_{cp} , учитывая при этом очевидное ограничение

$$V_{cp} < \frac{0,85 \cdot t_n - t_R}{\tau_d}. \quad (5.16)$$

Кроме этого, общий (средний) износ достаточно надежно определяется на прямых участках трубопровода и не требует большого числа точек измерения. Однако для удовлетворительной оценки вариации износа необходимо провести измерение толщины стенки во всех потенциально опасных участках.

Предположим, что для условия прочности трубопровода рассеиванием $[\delta]$ можно пренебречь, тогда формула для определения $[\delta]$

$$[\delta] = 1 - \frac{t_R}{t_n}. \quad (5.17)$$

Можно доказать, что такое допущение приводит к некоторому занижению значения расчетного остаточного ресурса и идет в запас расчета.

Допустим, что доля отказавших элементов на момент диагностирования τ_d составляет $\alpha = \frac{r+1}{z}$, где r – число отказавших элементов; z – полное число элементов в трубопроводе (фасонных деталей и отдельных труб). При этом точечная оценка вероятности безотказной работы на момент диагностирования

$$P(\tau_d) = 1 - \alpha. \quad (5.18)$$

В данном случае полагается, что на момент диагностирования возможно дополнительное, не зафиксированное в паспорте, разрушение. Таким образом, в качестве расчетного числа разрушений принимается действительное значение, увеличенное на единицу. Очевидно, что такое допущение идет в запас.

Число элементов z , включая отрезки труб и фасонные детали, можно определить по паспорту трубопровода или для ориентировочных оценок по формуле

$$z = \frac{L}{\lambda}, \quad (5.19)$$

где L – длина трубопровода в метрах; λ – среднее расстояние между элементами.

При детерминированном параметре $[\delta]$ формула для вероятности безотказной работы на момент диагностирования τ_d имеет вид

$$P(\tau_d) = \Phi\left(\frac{[\delta] - a_{cp} \cdot \tau_d}{S_a \cdot \tau_d}\right). \quad (5.20)$$

С другой стороны, вероятность безотказной работы на момент диагностирования определена по формуле (5.18). Приравнивая правые части выражений (5.19) и (5.20), получим соотношение

$$\tau_d = \frac{[\delta]}{S_a \cdot U_{1-\alpha} + a_{cp}}. \quad (5.21)$$

где S_a – статистическая оценка среднего квадратического отклонения параметра a ; $U_{1-\alpha}$ – квантиль нормального распределения.

Статистическая оценка среднего квадратического отклонения параметра a определяется по формуле

$$S_a = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{k=1}^N \left(\frac{\delta_k^2 - S_0^2}{\tau_i^{2m}} - a_{cp}^2 \right)}, \quad (5.22)$$

где $\delta_k = \frac{t_n - t_k}{t_n}$; S_0 – начальное среднеквадратическое отклонение толщины

стенки; τ_i – время диагностирования, когда проводился данный k -тый замер толщины стенки. В расчетах величину S_0 можно принимать равной 0,05.

В начальный момент времени $a_{cp} = S_a = 0$. Если диагностирование

проводилось в момент времени τ_d , то $S_a = \sqrt{\frac{S_\delta^2 - S_0^2}{\tau_d^m}}$, где S_δ – среднее квадратическое отклонение относительной толщины стенки в момент времени τ_d .

Для подсчета остаточного ресурса при линейной модели износа получаем формулу

$$\tau_{ост} = \frac{[\delta]}{S_a \cdot U_{\gamma(1-\alpha)} + a_{cp}} - \tau_d. \quad (5.23)$$

Исключив из последних двух уравнений S_a , получим следующее выражение для расчета остаточного ресурса

$$\tau_{ост} = \tau_d \cdot \frac{[\delta] - \delta_{cp}^*}{\frac{[\delta]}{U_{1-\alpha} / U_{\gamma(1-\alpha)} - 1} + \delta_{cp}^*}. \quad (5.24)$$

В данном выражении $[\delta]$ вычисляется по формуле (5.17), а

$$\delta_{cp} = a_{cp} \cdot \tau_d = \frac{V_{cp}}{t_n} \cdot \tau_d. \quad (5.25)$$

Задавая величину V_{cp} , по формуле (5.25) можно определить остаточный ресурс. Отметим, что в расчете по данной методике не используется понятие доверительной вероятности, так как задается априорное значение скорости износа.

Если данные об износе элементов трубопровода имеются не в полном объеме, но имеются данные по отказам и информация о величине общего (среднего) износа на момент диагностирования, то можно провести приближенный расчет остаточного ресурса трубопровода по отказам его элементов.

Описанный в данном разделе метод расчета может быть применен только для ориентировочных оценок, если отсутствуют измерения толщины стенки элементов трубопровода, но в их паспортах имеется достоверная информация об имевших место разрушениях. В расчете следует учитывать лишь те отказы, которые связаны с износом трубопровода и возникшей течью. Также необходимо располагать данными по скорости общей коррозии.

Данный метод может быть использован в дополнение к традиционному расчету. При этом в формулу (5.25) следует подставлять верхнюю оценку средней скорости коррозии a_{cp}^* . После проведения двух расчетов в качестве действительного значения остаточного ресурса следует принимать минимальную из полученных оценок. Результаты расчетов по обоим методам становятся вполне сопоставимыми, если они выполнены по линейной модели и скорость износа стенки в обоих случаях принималась постоянной. Линейная модель износа достаточно широко используется на практике при расчете ресурса трубопроводов.

Достоинством предлагаемого метода оценки остаточного ресурса является то, что рассеивание параметров износа определяется по относительному числу отказов. Физическая природа этих отказов не имеет значения, поэтому метод может быть распространен и на другие типы разрушения.

Практическая работа № 6

Расчет остаточного ресурса трубопровода по характеристикам трещиностойкости

Расчет параметров циклического нагружения и характеристик производится по формулам (6.1) – (6.8). По формулам (6.9) – (6.14) из совместного решения уравнений (6.13) и (6.15) с учетом (6.11) определяются допустимая и критическая глубина трещин. Далее по формулам (6.15) – (6.22) рассчитываются остаточный ресурс и предельное разрешенное давление.

Остаточный ресурс по характеристикам статической трещиностойкости определяется при наличии установленных диагностикой острых трещиноподобных дефектов.

Расчет остаточного ресурса выполняется по характеристикам статической трещиностойкости при статическом нагружении, определяемым в соответствии с ГОСТ 25.506-85*, ГОСТ 1497-84*.

Предварительно по данным механических испытаний на одноосное растяжение вычисляются параметры малоциклового трещиностойкости

$$\psi_B = \frac{F - F_B}{F} \quad (6.1)$$

$$m = -\ln(1 - \psi_B) \quad (6.2)$$

$$n = 1 + m \quad (6.3)$$

$$\varepsilon_{i\text{ кр}} = \frac{\ln(1 + \psi_k)}{\varepsilon_{0,2}} \quad (6.4)$$

$$C = \frac{1}{2\pi \cdot \varepsilon_{i\text{ кр}}^n}, \quad (6.5)$$

где ψ_B – коэффициент равномерного сужения сечения при растяжении; ψ_k – коэффициент относительного сужения при разрыве; F – исходная рабочая площадь сечения образца; F_B – площадь сечения образца в зоне равномерного сужения; $\varepsilon_{0,2} = 0,002$ – относительная остаточная деформация, равная 0,2 %.

Характеристики статической трещиностойкости определяются по результатам циклических испытаний образцов в соответствии с ГОСТ 25.506-85*:

1) разрушающее напряжение по максимальной разрушающей силе P_c для образца с трещиной

$$\sigma_c = \frac{P_c}{b \cdot t}, \quad (6.6)$$

где b – ширина образца; t – толщина образца «брутто»;

2) степень снижения разрушающих напряжений от наличия трещин в образце при относительной глубине трещины, равной $\eta = h/t = 0,5$

$$\alpha_{mp}^{(0,5)} = \frac{2\sigma_c}{\sigma_{вр}}, \quad (6.7)$$

где $\sigma_{вр}$ – временное сопротивление растяжению;

3) предел трещиностойкости для относительной глубины, равной $\eta = 0,5$

$$I_c^{(0,5)} = 5\sigma_c \cdot \sqrt{h}, \quad (6.8)$$

где h – полная глубина трещины на образце;

4) разрушающие кольцевые напряжения для бездефектной трубы с учетом характеристик циклической трещиностойкости

$$\sigma_{\theta b} = \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{\sigma_{0,2}}{\varepsilon_{0,2}^m} \left(\frac{m}{\sqrt{3}} \right)^m, \quad (6.9)$$

где $\sigma_{0,2}$ – условный предел текучести.

Допускаемая глубина трещины определяется по максимальному усредненному давлению из совместного решения двух функций, образующих равенство

$$K_I = I_c / m_I, \quad (6.10)$$

где K_I – коэффициент интенсивности напряжений при максимальном усредненном давлении, МПа $\cdot \sqrt{м}$; I_c – предел трещиностойкости для допускаемой глубины трещины, МПа $\cdot \sqrt{м}$; m_I – коэффициент запаса по пределу трещиностойкости, определяемый по формуле

$$m_I = \frac{\sigma_{0,2}}{\sigma_p} \left(\frac{1 - (\sigma_p / \sigma_{BP})^2}{1 - (\sigma_{0,2} / \sigma_{BP})^2} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (6.11)$$

где σ_p – уровень рабочих напряжений, в данном случае равен кольцевым напряжениям при максимальном давлении

$$\sigma_p = \frac{P_{\max} \cdot D_{вн}}{2t_n}, \quad (6.12)$$

где $D_{вн}$ – внутренний диаметр трубы, м; t_n – толщина стенки, м.

Коэффициент интенсивности напряжений определяется по формуле

$$K_I = \sigma_p \sqrt{h} \cdot Y(\eta), \quad (6.13)$$

где $Y(\eta)$ – полином, зависящий от текущего значения относительной глубины трещины η . По ГОСТ 25.506-85* :

$$Y(\eta) = 1,99 - 0,41 \eta + 18,7 \eta^2 - 38,48 \eta^3 + 53,85 \eta^4. \quad (6.14)$$

Предел трещиностойкости определяется по формуле

$$I_c = 0,4 \cdot I_c^{(0,5)} \cdot \frac{\alpha_{mp}}{\alpha_{mp}^{(0,5)}} (1 - \eta) Y(\eta), \quad (6.15)$$

где α_{mp} – степень разрушающих напряжений при текущем значении

$$\alpha_{mp} = 1 - 4\eta(1 - \eta) \cdot (1 - \alpha_{mp}^{(0,5)}). \quad (6.16)$$

Из совместного решения уравнений (6.13) и (6.15) с учетом коэффициента m_I в соответствии с равенством (6.10) получается допускаемая относительная глубина трещины η_{mp} .

Критическая глубина трещины определяется для среднего рабочего давления за исследуемый период.

Для этого из совместного решения уравнений (6.13) и (6.15) при коэффициенте запаса по пределу трещиностойкости m_I , равном единице ($m_I = 1$), определяется относительное значение критической глубины трещины $\eta_{кр}$.

Остаточный ресурс определяется по времени роста трещины от допускаемой глубины до критической при усредненном максимальном давлении перекачки по формуле

$$T_o = \frac{N_{mp}}{N_p}, \quad (6.17)$$

где N_p – расчетное число циклов перепада рабочего давления за 1 год; N_{mp} – долговечность труб при циклическом нагружении (в числах циклов), определяемая по формуле

$$N_{mp} = \frac{h_0}{h_{кр}} N_0, \quad (6.18)$$

где h_0 – начальная глубина трещины, определяемая из данных диагностики. В случае отсутствия острых трещиноподобных дефектов по данным диагностики начальная глубина трещины h_0 принимается равной допускаемой глубине трещины; N_0 – предельное число циклов нагружения

$$N_0 = \frac{h_{кр} - h_0}{c \left[K_{I\varepsilon}^{(0)} \right]^n}, \quad (6.19)$$

где коэффициент интенсивности упругопластических деформаций

$$K_{I\varepsilon}^{(0)} = \left(\frac{K_I^{(0)}}{\sigma_{0,2}} \right)^{\frac{2}{m+1}}. \quad (6.20)$$

В формулах (9.19) и (9.20): c , m – параметры; $K_{I\varepsilon}^{(0)}$ – коэффициент интенсивности напряжений, определяемый по формуле (9.13) для максимального усредненного рабочего давления и начальной глубины трещины.

Предельное разрешенное давление определяется по характеристикам трещиностойкости, определенным при испытаниях на малоцикловую трещиностойкость по формуле

$$\bar{p}_c = \frac{2t}{D_{вн}} \cdot \sigma_{\theta c}, \quad (6.21)$$

где $\sigma_{\theta c}$ – разрушающее окружное напряжение для трубы с трещиной

$$\sigma_{\theta c} = \alpha_{mp} \cdot \sigma_{\theta b} (1 - \eta), \quad (6.22)$$

где η – относительная глубина трещины, вычисляемая по начальной глубине трещины, принимаемой равной допускаемой глубине; α_{mp} – степень снижения разрушающих напряжений; $\sigma_{\theta b}$ – разрушающее кольцевое напряжение для бездефектной трубы, определяемое по формуле (6.9).

Пример расчета выполнен для нефтепровода диаметром 219 мм с рабочим давлением 10 МПа, трубы – из стали 20СП.

Исходные данные:

– временное сопротивление растяжению	440 МПа;
– условный предел текучести	305 МПа;
– относительное сужение после разрыва	64.3 %;
– толщина образца	6.1 мм;
– ширина образца	30 мм;
– глубина усталостной трещины	3.1 мм;
– максимальное усилие при циклическом разрушении	0,0483 МН;
– относительное равномерное сужение	15.36 %;
– максимальное рабочее давление	10 МПа;
– среднее рабочее давление	8 МПа;
– толщина стенки трубы	12 мм;
– диаметр трубы	219 мм;
– число циклов перепада давления за год	579

Результаты расчетов:

- разрушающее напряжение по максимальной разрушающей силе для образцов с трещиной 263.934426 МПа;
- степень снижения разрушающих напряжений от

наличия трещин в образце для относительной глубины трещины 0,5	1.199702;
– предел трещиностойкости для относительной глубины трещины 0,5	73.476235 МПа·м ^{1/2} ;
– разрушающие кольцевые напряжения для бездефектной трубы с учетом характеристик циклической трещиностойкости	671.970070 МПа;
– кольцевые напряжения от максимального рабочего давления в стенке трубы	81.250000 МПа;
– коэффициент запаса прочности при максимальном рабочем давлении	5.118591;
– относительная допускаемая глубина трещины	0.225510;
– допускаемая глубина трещины	2.706120 мм;
– относительная критическая глубина трещины	0.730510;
– критическая глубина трещины	8.766120 мм;
– коэффициент интенсивности	10.382679 МПа/м ² ;
– коэффициент интенсивности упруго-пластических деформаций	0.003045;
– число циклов нагружения	20460.976916;
– долговечность труб	6316 циклов;
– срок безаварийной работы	10 лет (год/года);
– предельное давление в трубе	5.054878 МПа.

Графики определения глубины трещины представлены на рис. Пб.1.

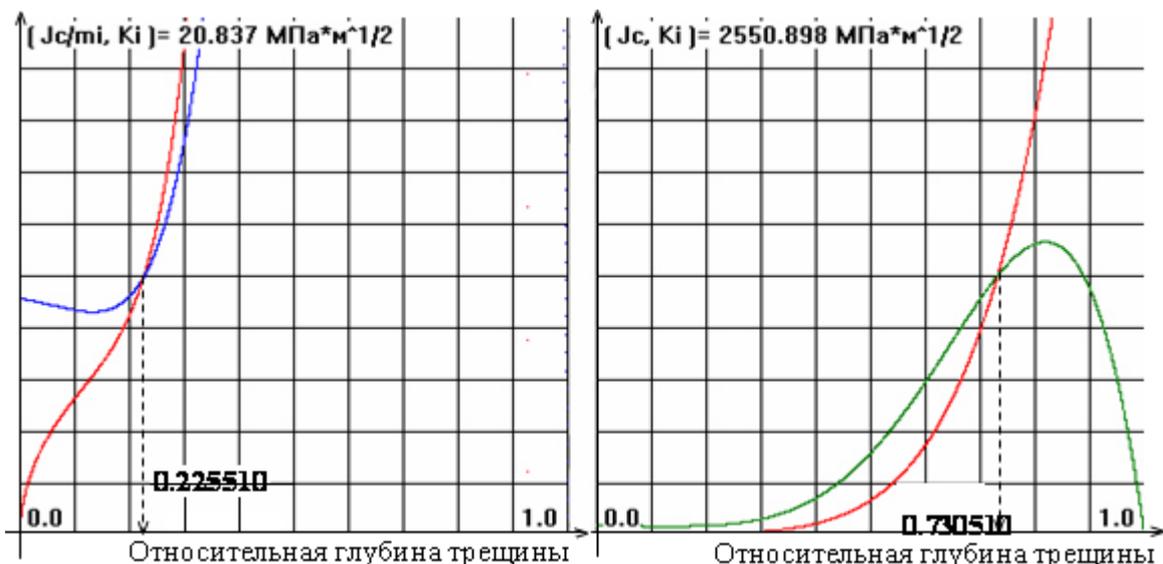


Рис. Пб.1. График определения глубины трещины.
а - относительной допускаемой, б - относительной критической.

Практическая работа № 7

Расчет прогнозирования остаточного ресурса трубопровода по отказам его элементов

Ресурс всего трубопровода зависит от ресурса его элементов.

Если данные об износе элементов трубопровода имеются не в полном объеме, но имеются данные по отказам и информация о величине общего (среднего) износа на момент диагностирования, то можно провести приближенный расчет остаточного ресурса трубопровода по отказам его элементов.

Проведем показательный расчет. Исходные данные – по практической работе № 2.

Пусть длина трубопровода равна 1200 м, среднее расстояние между элементами трубопровода – 6 м. За время эксплуатации трубопровода ни одной течи, связанной с износом стенок труб, не было. Число элементов трубопровода равно 200. Требуется рассчитать остаточный ресурс трубопровода с вероятностью прогноза 95 %.

Расчет вспомогательных данных

$$1-\alpha = 1 - \frac{1}{200} = 0,995;$$

величина $0,01\gamma = 0,95$

$$0,01\gamma \cdot (1 - \alpha) = 0,995 \cdot 0,95 = 0,945.$$

Квантили нормального распределения, соответствующие вероятностям 0,995 и 0,945, берем из таблицы 7.1.

Таблица 7.1

β	0,75	0,76	0,77	0,78	0,79	0,80	0,81	0,82	0,83	0,84
U_β	0,67	0,71	0,74	0,77	0,81	0,84	0,88	0,92	0,95	0,99
β	0,85	0,86	0,87	0,88	0,89	0,90	0,91	0,92	0,93	0,94
U_β	1,04	1,08	1,13	1,18	1,23	1,28	1,34	1,41	1,48	1,56
β	0,95	0,96	0,97	0,98	0,99	0,993	0,995	0,997	0,998	0,999
U_β	1,65	1,75	1,88	2,05	2,33	2,46	2,58	2,75	2,88	3,09

Примечания:

1. Необходимые для расчета остаточного ресурса значения квантилей нормального распределения U_β , соответствующие вероятности β , приведены в таблице 7.1. Если в расчетах необходимо определить квантиль U_q , то β заменяется на q , а если нужно значение U_γ , то вместо β подставляется $0,01\gamma$ и т. д.

2. Для промежуточных значений β величина квантиля U_β определяется интерполированием.

Получаем: $U_{1-\alpha} = 2,58$ $U_{\gamma(1-\alpha)} = 1,60$.

Значения среднего допустимого относительного износа и значения верхнего интервального значения среднего относительного износа берем из практической работы № 3.

$$[\delta] = 0,374; \quad \delta_{cp*} = 0,2067.$$

Остаточный ресурс подсчитываем по формуле

$$\tau_{ост} = \tau_d \cdot \frac{[\delta] - \delta_{cp*}}{\frac{[\delta]}{U_{1-\alpha} / U_{\gamma(1-\alpha)} - 1} + \delta_{cp*}},$$

$$\tau = 12 \cdot \frac{0,374 - 0,2067}{\frac{0,374}{2,58/1,60 - 1} + 0,2067} = 2,4 \text{ года.}$$

Остаточный ресурс трубопровода при вероятности прогноза 95 % равен 2,4 года.

Практическая работа № 8

Оценка малоцикловой долговечности по критерию зарождения трещин.

Оценка малоцикловой долговечности выполняется при наличии выявленных диагностикой нетрещиноподобных дефектов (вмятин, задиров, рисок) с учетом теоретических коэффициентов концентрации напряжений α_σ (приложение Д) [5].

Общее число циклов до разрушения N состоит из двух слагаемых: N_z – число циклов до зарождения трещины в вершине дефекта; N_p – число циклов на этапе развития (роста) трещины

$$N = N_z + N_p. \quad (8.1)$$

Число циклов до зарождения трещины определяется уравнениями Коффина – Менсона, которые устанавливают взаимосвязь между амплитудой изменения истинных деформаций в вершине дефекта, механическими характеристиками металла и числом циклов N_p .

Существуют два режима нагружения: жесткий – при постоянном размахе деформаций, мягкий – при постоянном размахе напряжений.

Зона дефекта в трубопроводе обычно испытывает некоторый промежуточный режим нагружения, находящийся между крайними случаями. Поэтому целесообразно выбрать меньшее (или среднее) число циклов N_z из двух крайних ситуаций.

Режимы циклического нагружения различаются также симметричностью (коэффициентом асимметрии). Коэффициентом асимметрии по напряжениям R_σ и деформациям R_e называются отношения соответствующих величин (напряжений и деформаций) в вершине дефекта в моменты минимальной и максимальной нагрузок в цикле

$$R_\sigma = \sigma_{\min}/\sigma_{\max}; \quad R_e = e_{\min}/e_{\max}. \quad (8.2)$$

Максимальные и минимальные значения истинных напряжений в циклах нагружения определяются по кольцевым напряжениям для максимальных и минимальных давлений с учетом теоретических коэффициентов концентрации напряжений α_σ .

Если коэффициент асимметрии $R = -1$, то нагружение симметричное. При этом растяжение чередуется со сжатием. Для труб с дефектами характерны циклические нагружения с положительным коэффициентом асимметрии, когда $\sigma_{\min} > 0$. При этом металл всегда находится в состоянии

растяжения. Но могут встретиться случаи с отрицательными значениями R_σ и R_e (переходы под дорогами, подводные переходы и др.).

Для жесткого симметричного режима нагружения число циклов до зарождения трещины N_3 определяется из уравнения

$$e_a = \frac{1}{4} \ln \frac{1}{1-\psi_\kappa} N_3^{-\aleph_1} + \frac{\sigma_{-1}}{E}, \quad (8.3)$$

где e_a – амплитуда истинных деформаций в вершине дефекта;

σ_{-1} – предел усталости металла при симметричном нагружении;

E – модуль упругости;

\aleph_1 — показатель жесткого циклического нагружения.

Параметр \aleph_1 определяется по приближенным формулам

$\aleph_1 = 0,5$ при $\sigma_\sigma \leq 700$ МПа; $\aleph_1 = 0,5 + 0,0002(\sigma_\sigma - 700)$ при $\sigma_\sigma > 700$ МПа.

Предел усталости для сталей, применяемых на нефтепроводах

$$\sigma_{-1} = 0,4 \sigma_\sigma. \quad (8.4)$$

Для мягкого симметричного режима нагружения число циклов определяется из следующего уравнения

$$e_a = \ln \frac{1}{1-\psi_\sigma} N_3^{-\aleph_2} + \frac{\sigma_{-1}}{E}, \quad (8.5)$$

где e_a , E , σ_{-1} – те же величины, что и ранее;

ψ_σ – известная величина;

\aleph_2 – показатель мягкого циклического нагружения.

Параметр \aleph_2 определяется по приближенной формуле

$$\aleph_2 = 1,2 \frac{\sigma_{0,2}}{\sigma_\sigma} - 0,35. \quad (8.6)$$

Число циклов N_3 при несимметричном нагружении можно найти исходя из следующих соображений.

Циклы нагрузки характеризуются следующими параметрами: e_a – амплитудой деформаций в вершине дефекта; e_{cp} – средней деформацией. С увеличением каждого из этих параметров значение N_3 уменьшается. Чтобы сохранить постоянным значение N_3 при увеличении параметра e_{cp} , надо эквивалентно снизить амплитуду деформаций e_a .

Можно построить зависимости типа $e_a = f(e_{cp})$ при условии, что $N_3 = \text{const}$. Эти зависимости имеют монотонно убывающий характер. Приближенно эти зависимости принимаются линейными. Погрешность такого приближения идет в запас долговечности.

Таким образом, по заданному несимметричному циклическому нагружению можно приближенно найти эквивалентное симметричное нагружение, соответствующее одинаковому числу циклов N_{cp} .

Исходя из предыдущих рассуждений, для определения N_z при несимметричном нагружении необходимо выполнить следующие операции:

1) найти параметры эквивалентного нагружения

$$\begin{aligned} e_{cp}' &= 0; \\ e_a' &= \frac{e_a}{1 - e_{cp}/e_k}; \end{aligned} \quad (8.7)$$

2) по значению e_a найти числа циклов N_z из формул (8.3) и (8.5), соответствующие жесткому и мягкому нагружениям;

3) в качестве искомого числа циклов для трубы на этапе зарождения трещины выбрать меньшее (или среднее) из полученных значений.

Значения e_{cp} и e_a для использования формул (8.7) определяются следующим образом

$$e_{cp} = (e_{\max} + e_{\min})/2; \quad e_a = (e_{\max} - e_{\min})/2,$$

где e_{\max} , e_{\min} – соответственно наименьшая и наибольшая деформации в вершине дефекта в процессе циклического изменения давления (нагрузки).



Рис. ПА.1. Тепловой контроль лопаток турбин

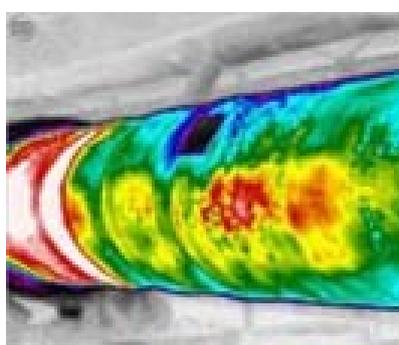


Рис. ПА.2. Нарушение теплоизоляции трубы

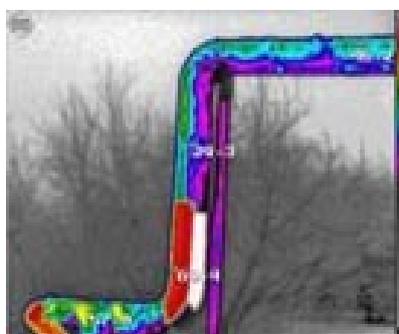


Рис. ПА.3. Нарушенная теплоизоляция надземного трубопровода

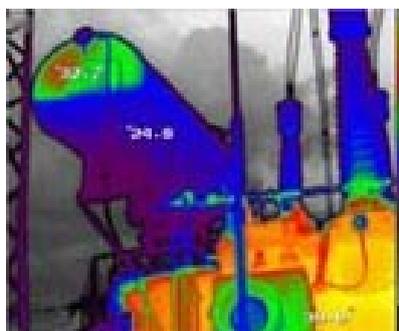


Рис. ПА.4. Теплотери в газоперекачивающем агрегате

Приложение Б

Значения коэффициентов, принимаемые согласно СП 34-116-97

Таблица ПБ.1

Значения коэффициентов надежности по назначению трубопровода

Диаметр трубопровода условный, мм	Давление, МПа				
	$P < 7,5$	$7,5 < P \leq 10$	$10 < P \leq 15$	$15 < P \leq 20$	$20 < P \leq 32$
300 и менее	1,00	1,00	1,00	1,00	1,05
400 – 500	1,00	1,00	1,00	1,05	1,10
600 – 700	1,00	1,00	1,05	1,10	1,15
800 – 1000	1,00	1,05	1,10	1,15	–
1200	1,05	1,10	1,15	–	–
1400	1,10*	1,15*	–	–	–

* Только для газопроводов

Таблица ПБ.2

Значения коэффициентов условий работы трубопровода

Категория трубопровода и его участка	Коэффициент условий работы трубопровода, m_2
I	0,6
II	0,75
III	0,90

Таблица ПБ.3

Значения коэффициентов γ_s условий работы трубопроводов, транспортирующих сероводородсодержащие продукты

Категория трубопровода и его участка	Содержание сероводорода	
	среднее	низкое
I	0,4	0,5
II	0,5	0,6
III	0,6	0,65

Таблица ПБ.4

Значения коэффициентов надежности по материалу

Характеристика труб	Коэффициент надежности по материалу γ_m
1. Сварные, изготовленные из низколегированных сталей двухсторонней электродуговой сваркой под флюсом по сплошному технологическому шву и прошедшие 100 %-ный контроль на сплошность основного металла и сварных соединений неразрушающими методами Сварные, изготовленные из спокойных сталей с содержанием в химсоставе углерода не более 0,10 % и серы не более 0,006 % сваркой токами высокой частоты с автоматическим контролем параметров нагрева и сварки кромок, термической обработкой сварного соединения, основной металл и сварные соединения которых прошли 100 %-ный контроль неразрушающими методами	1,34

Бесшовные, изготовленные из катаной или кованой заготовки, прошедшие 100 %-ный контроль на сплошность металла неразрушающими методами	
2. Сварные, изготовленные из низколегированной стали двухсторонней электродуговой сваркой под флюсом по сплошному технологическому шву и прошедшие 100 %-ный контроль сварных соединений неразрушающими методами Сварные, изготовленные из спокойных сталей с содержанием углерода не более 0,10 % и серы не более 0,010 % электроконтактной сваркой токами высокой частоты с автоматическим контролем параметров нагрева и сварки кромок, сварные соединения которых термически обработаны и прошли 100 %-ный контроль неразрушающими методами Бесшовные, изготовленные из непрерывнолитой заготовки, прошедшие 100 %-ный контроль металла неразрушающими методами	1,40
3. Сварные, изготовленные из низколегированной или углеродистой стали двухсторонней электродуговой сваркой и прошедшие 100 %-ный контроль сварных соединений неразрушающими методами Сварные, изготовленные из спокойных и полуспокойных сталей электроконтактной сваркой токами высокой частоты, сварные соединения которых термически обработаны и прошли 100 %-ный контроль неразрушающими методами Бесшовные, изготовленные из слитка и прошедшие 100 %-ный контроль металла неразрушающими методами	1,47
4. Сварные, изготовленные из спокойных и полуспокойных сталей двухсторонней электродуговой сваркой и прошедшие контроль сварных соединений неразрушающими методами Сварные, изготовленные из спокойных и полуспокойных сталей электроконтактной сваркой, сварные соединения которых термообработаны Бесшовные, прошедшие выборочный контроль металла неразрушающими методами	1,55

Примечания:

1. Минусовой допуск по толщине стенки для всех труб по п. 1 и сварных труб по п. 2 не должен превышать 5 % от номинальной толщины стенки.

2. Допускается применять коэффициенты 1,34 вместо 1,40; 1,40 вместо 1,47 и 1,47 вместо 1,55 для труб, изготовленных двусторонней электродуговой или высокочастотной сваркой, до 12 мм при использовании специальных технологий производства, позволяющих получить качество труб, соответствующее данному коэффициенту γ_m .

Таблица ПБ.5

Значения коэффициентов надежности по нагрузке

Нагрузки и воздействия		Способ прокладки трубопроводов		Коэффициент надежности по нагрузке, γ_f
вид	характеристика	подземный	надземный	
Постоянные	Собственный вес трубопровода, арматуры и устройств	+	+	1,1 (0,95)
	Вес изоляции	+	+	1,2
	Вес давления грунта (засыпки, насыпи)	+	-	1,2 (0,8)
	Предварительное напряжение трубопровода (упругий изгиб по заданному профилю, предварительная растяжка компенсаторов и др.) и гидростатическое давление воды	+	+	1,0
Временные длительные	Внутреннее давление транспортируемой среды: газообразной	+	+	1,1
	жидкой	+	+	1,15
	Вес транспортируемой среды: газообразной	+	+	1,1 (1,0)
	жидкой	+	+	1,0 (0,95)
	Температурный перепад металла стенок трубопровода	+	+	1,1
	Неравномерные деформации грунта, не сопровождающиеся изменением его структуры (осадки, пучения и др.)	+	+	1,5
Кратковременные	Снеговая	-	+	1,4
	Гололедная	-	+	1,3
	Ветровая	-	+	1,2
	Транспортирование отдельных секций, сооружение трубопроводов, испытание и пропуск очистных устройств	+	+	1,0
Особые	Сейсмические воздействия	+	+	1,0
	Нарушения технологического процесса, временные неисправности или поломки оборудования	+	+	1,0

	Неравномерные деформации грунта, сопровождающиеся изменением его структуры (селевые потоки и оползни; деформации земной поверхности в районах горных выработок и карстовых районах; деформации просадочных грунтов при замачивании или вечномерзлых при оттаивании и др.)	+	+	1,0
--	---	---	---	-----

Примечания:

1. Знак «+» означает, что нагрузки и воздействия следует учитывать, знак «-» – не учитывать.
2. Значения коэффициентов надежности по нагрузке, указанные в скобках, должны приниматься в тех случаях, когда уменьшение нагрузки ухудшает условия работы трубопровода.

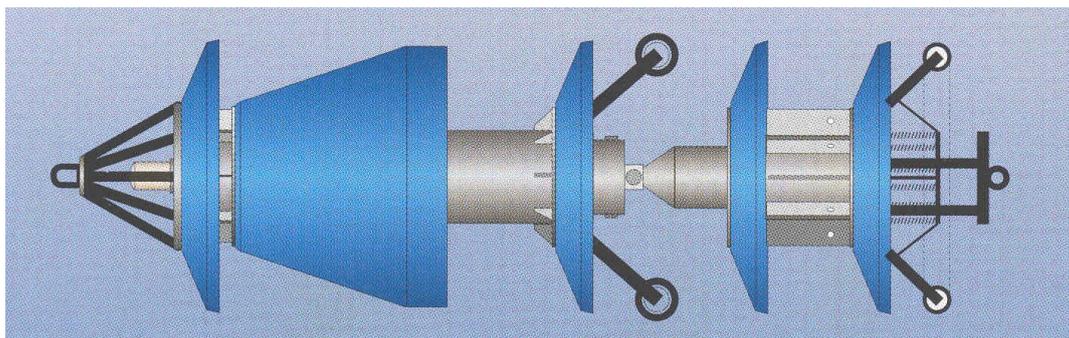
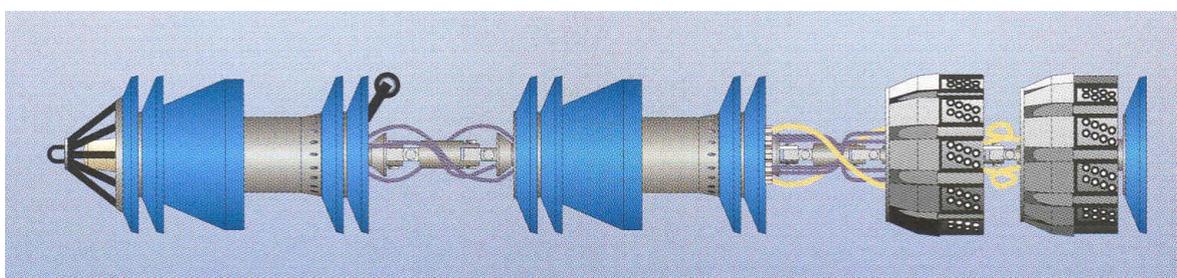


Рис. ПВ.1. Снаряд-профилемер для определения вмятин, гофров, овалностей поперечного сечения (I уровень контроля)



а)



б)

Рис. ПВ.2. Ультразвуковой снаряд-дефектоскоп «Ультраскан-УМ» для определения потерь металла, расслоений, включений (II уровень контроля):
а – фото, б – схема

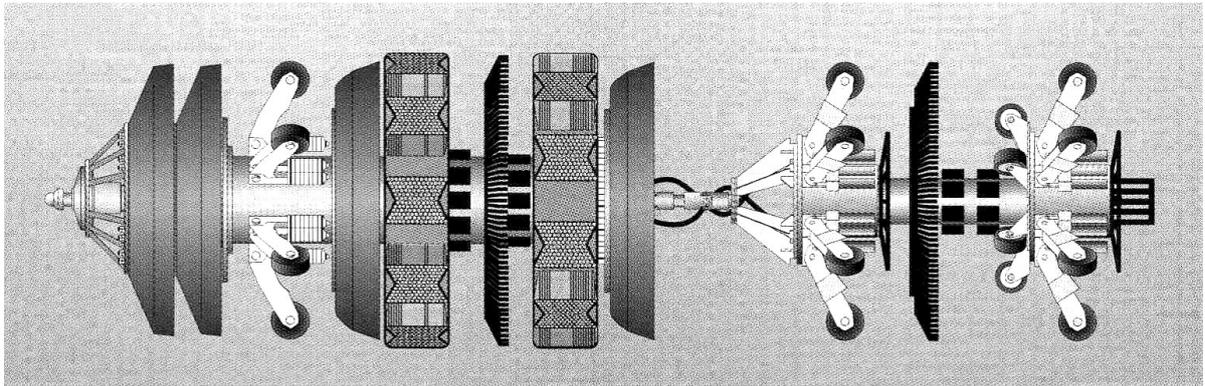


Рис. ПВ.3. Магнитный дефектоскоп высокого разрешения для определения дефектов поперечных сварных швов (III уровень контроля)

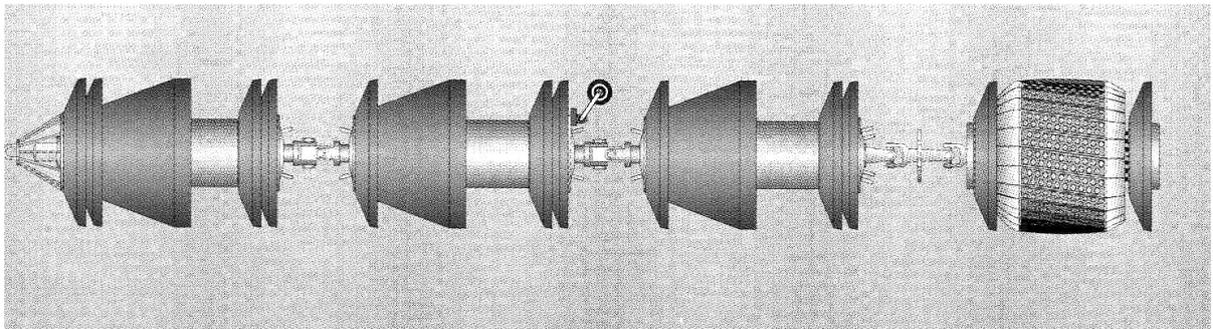


Рис. ПВ.4. Ультразвуковой дефектоскоп CD для определения продольных и поперечных трещин в трубопроводах (IV уровень контроля)

Теоретические коэффициенты концентрации напряжений на дефектах строительного и эксплуатационного происхождения

1. Дефекты сварного шва стыкового соединения

$$\alpha_{\sigma} = \alpha_{\phi} \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_n,$$

- где α_{ϕ} – коэффициент формы шва;
 α_2 – коэффициент геометрических отклонений;
 α_n – коэффициент подреза сварного стыка;

$$\alpha_{\phi} = 1 + \left[\frac{\rho}{\delta} \left(14 \frac{\delta}{b} + 1,7 \frac{\delta}{\Delta} + 5 \right) \right]^{-0,5},$$

- где ρ – радиус перехода от сварного шва к трубе;
 δ – толщина стенки трубы;
 b – ширина сварного шва;
 Δ – высота усиления сварного шва;

$$\alpha_2 = 1 + \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3;$$

$$\alpha_1 = 3 \frac{s}{\delta};$$

$$\alpha_2 = \frac{6 \cdot b}{\delta} \cdot \operatorname{tg} \beta;$$

$$\alpha_3 = 3\gamma \frac{\delta}{R} \left[1 + 4(1 - \mu^2) \frac{\rho}{E} \left(\frac{R}{\delta} \right)^3 \right]^{-0,5},$$

- где s – радиальное смещение кромок сварного соединения;
 β – угловатость сварного шва, град;
 $\gamma = (D_{\max} - D_{\min})/D$ – параметр, учитывающий овальность трубы;
 D, D_{\max}, D_{\min} – номинальный, максимальный и минимальный значения наружного диаметра трубы;
 μ, E – коэффициент Пуассона и модуль упругости стали;
 P – рабочее давление в трубопроводе;

$$\alpha_n = 1 + 0,58 \sqrt{\frac{a}{\rho}},$$

- где a – глубина подреза; ρ – радиус в вершине подреза.

2. Коррозионные язвы

$$\alpha_{\sigma} = 1 + 3,57 \frac{b}{d} \cdot \frac{1,12 - 0,96(b/d)}{1 - (b/d)(1 - 1,5b/d)},$$

где d – диаметр язвы; b – глубина язвы; δ – толщина стенки трубы.

3. Механические риски, царапины, надрезы и задиры, характеризующиеся длиной l , шириной d , глубиной b и радиусом закругления в вершине ρ для трубы с толщиной стенки δ .

3.1. Длинные дефекты ($l > 10 d$):

– при $b \leq \delta/2$

$$\alpha_{\sigma} = 1 + 2 \sqrt{\frac{b}{\rho} \cdot \frac{\delta}{\delta - b}}$$

$$\text{или } \alpha_{\sigma} = 1 + 4 \frac{b}{d} \cdot \frac{\delta}{\delta - b};$$

– при $b > \delta/2$

$$\alpha_{\sigma} = 1 + 4 \frac{b}{d} \cdot \frac{\delta}{\delta - b} \left[1 + \frac{3(2b - \delta)}{\delta - b} \right].$$

3.2. Короткие дефекты ($d < l < 10 d$):

$$\alpha_{\sigma} = 1 + 3,57 \frac{b}{d} \cdot \frac{1,12 - 0,96b/l}{1 - b/\delta(1 - 1,5b/l)}.$$

4. Вмятины стенки трубы

$$\alpha_{\sigma} = 1 + 2,1 \frac{b}{\delta} + 0,475 \left(\frac{b}{\delta} \right)^2 - \frac{d}{D} \left[5 \frac{b}{\delta} - 0,75 \left(\frac{b}{\delta} \right)^2 \right],$$

где b – глубина вмятины; δ – толщина стенки трубы; d – диаметр вмятины; D – наружный диаметр трубы.

Область применения формулы

$$0,1 \leq \frac{d}{D} \leq 0,3; \quad 0 < \frac{b}{\delta} < 2.$$

ЛИТЕРАТУРА

1. Биргер, И.А. Техническая диагностика / И.А. Биргер. – М.: Машиностроение, 1978. – 240 с.
2. Болотин, В.В. Ресурс машин и конструкций / В.В. Болотин. – М.: Машиностроение, 1990. – 448 с.
3. Визуальный и измерительный контроль / В.В. Клюев [и др.]; под ред. В.В. Клюева. – М.: РОНКТД, 1998.
4. ГОСТ 20911-80. Надежность в технике. Термины и определения.
5. Дефектность труб и методы их ремонта / А.Г. Гумеров [и др.]; под ред. А.Г. Гумерова. – М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 1998.
6. Дефекты стали: справ. / под ред. С.М. Новокщеновой, М.Н. Виноградова. – М.: Metallurgy, 1984.
7. Елизаветин, М.А. Повышение надежности машин. 2-е изд., перераб. и доп. / М.А. Елизаветин. – М.: Машиностроение, 1973.
8. Зайдель, А.Н. Основы спектрального анализа / А.Н. Зайдель. – М.: Наука, 1965.
9. Ионин, Д.А. Современные методы диагностики магистральных газопроводов / Д.А. Ионин, Е.И. Яковлев. – Л.: Недра, 1987. – 232 с.
10. Конструкционные материалы: справ. – М.: Машиностроение, 1990.
11. Коррозия и защита химической аппаратуры. Нефтеперерабатывающая и нефтехимическая промышленность / под ред. А.М. Сухотина, А.В. Шрейдера и Ю.И. Арчакова. Т. 9. – М.: Химия, 1974.
12. Кузяков, Ю.Я. Методы спектрального анализа / Ю.Я. Кузяков, К.А. Семенов, Н.Б. Зоров. – М.: Изд-во Мос. ун-та, 1999.
13. Кустанович, И.М. Спектральный анализ / И.М. Кустанович. – М.: Высшая школа, 1967.
14. Международный транслятор современных сталей и сплавов: справ. Т. I – IV / под ред. В.С. Кереленбаума. – М.: СНИОцентр «Наука и техника», 1991.
15. РД 34.10.130-96. Инструкция по визуальному и измерительному контролю. – М.: Минтопэнерго РФ, 1996.
16. Руководство по спектральному анализу строительных материалов. – М., 1972.
17. Свентицкий, Н.С. Визуальные методы эмиссионного спектрального анализа / Н.С. Свентицкий. – М.: Изд-во ФМ литературы, 1961.
18. Тарасов, К.И. Спектральные приборы / К.И. Тарасов. – Л.: Машиностроение, 1977.

19. ТУ 14-1-1921-76. Сталь листовая низколегированная для прямошовных магистральных газонефтепроводных труб диаметром 530 – 820 мм.
20. ТУ 14-3-341-75. Трубы плавниковые холоднокатаные для паровых котлов.
21. ТУ 14-3-420-75. Трубы стальные бесшовные горячекатаные толсто-стенные для паровых котлов и трубопроводов.
22. ТУ 14-3-796-79. Трубы бесшовные холоднодеформированные для паровых котлов и трубопроводов с гарантированными свойствами из коррозионностойкой стали.
23. ТУ 3-923-75. Трубы котельные бесшовные механически обработанные из конструкционной марки стали.
24. Харионовский, В.В. Надежность и ресурс конструкций газопроводов / В.В. Харионовский. – М.: ОАО «Издательство «Недра», 2000. – 467 с.
25. Харионовский, В.В. Надежность трубопроводных конструкций: теория и технические решения / В.В. Харионовский, И.Н. Курганова // ИНЭИ РАН, Энергоцентр. – 1995. – 125 с.
26. Шаевич, А.Б. Промышленные методы спектрального анализа / А.Б. Шаевич, С.Б. Шубина. – М.: Металлургия, 1965.

Учебное издание

КУЛЬБЕЙ Андрей Геннадьевич

ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА ОБЪЕКТОВ
ТРУБОПРОВОДНОГО ТРАНСПОРТА

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС
для студентов специальности 1-70 05 01
«Проектирование, сооружение и эксплуатация
газонефтепроводов и газонефтехранилищ»

Редактор *Г.А. Тарасова*

Дизайн обложки *И.С. Васильевой*

Подписано в печать **30.05.08**. Формат 60x84 1/16. Гарнитура Таймс. Бумага офсетная.
Ризография. Усл. печ. л. **9,52**. Уч.-изд. л. **8,95**. Тираж **120**. Заказ **1267**.

Издатель и полиграфическое исполнение:
учреждение образования «Полоцкий государственный университет»

ЛИ № 02330/0133020 от 30.04.2004 ЛП № 02330/0133128 от 27.05.2004

211440 г. Новополоцк, ул. Блохина, 29