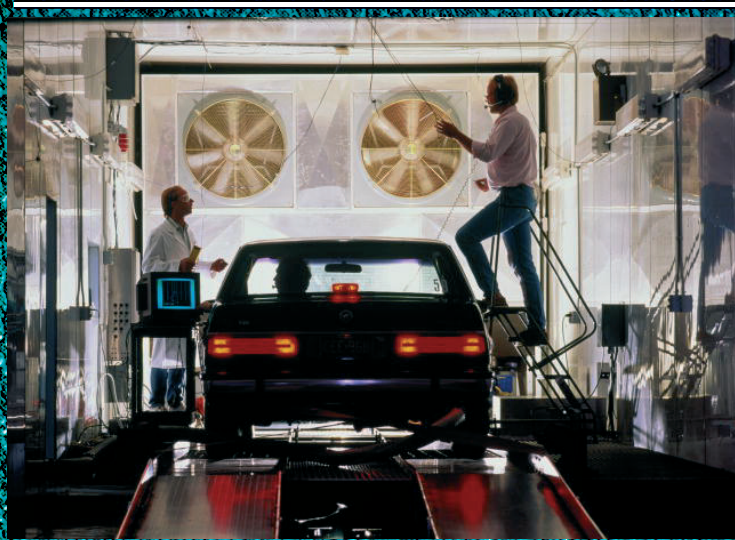


А.М. Царёв

НАДЁЖНОСТЬ И ДИАГНОСТИКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ



Тольятти
Издательство ТГУ
2013

Министерство образования и науки
Российской Федерации
Тольяттинский государственный университет
Институт машиностроения
Кафедра «Оборудование и технологии
машиностроительного производства»

А.М. Царёв

НАДЁЖНОСТЬ И ДИАГНОСТИКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Учебное пособие

Тольятти
Издательство ТГУ
2013

УДК 621.81-192:614.84(075.8)

ББК 34.44я73

Ц181

Рецензенты:

доктор техн. наук, профессор Поволжского
государственного университета сервиса *Б.М. Горшков*;

канд. техн. наук, доцент Тольяттинского
государственного университета *А.В. Щипанов*.

Ц181 Царёв, А.М. Надежность и диагностика технологического оборудования : учеб. пособие / А.М. Царёв. – Тольятти : Изд-во ТГУ, 2013. – 128 с. : обл.

Учебное пособие включает разделы для изучения дисциплины «Надёжность и диагностика технологического оборудования». Тематика и содержание разделов направлены на изучение вопросов обеспечения надежности, работоспособности и долговечности, диагностирования и прогнозирования технического состояния технологического оборудования машиностроительного производства.

Предназначено для студентов, обучающихся по направлению подготовки магистра 151900.68 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств» (магистерские программы «Технология автоматизированного машиностроения» и «Автоматизированные станочные системы и мехатронные технологии»).

УДК 621.81-192:614.84(075.8)

ББК 34.44я73

Рекомендовано к изданию научно-методическим советом Тольяттинского государственного университета.

© ФГБОУ ВПО «Тольяттинский
государственный университет», 2013

ВВЕДЕНИЕ

Обеспечение надежности технологического оборудования является главным фактором подготовленности техники и обслуживающего персонала к выполнению заявленных производственных программ, отвечающих требованиям как высокой производительности промышленного оборудования, так и увеличения уровня многономенклатурного производства выпускаемых изделий на основе организации эффективной системы технического обслуживания и ремонта. Данная постановка характеризует: 1) стратегическую направленность развития современных технологий машиностроительного производства; 2) методы и способы достижения высокого качества изделий, обеспечения надежности и работоспособности оборудования.

Целью изучения дисциплины «Надежность и диагностика технологического оборудования» является получение знаний для обеспечения высокого уровня надежности технологического оборудования в процессе его эксплуатации.

Надежность относится к числу основных показателей качества машины, она проявляется во времени и отражает изменения, происходящие в процессе использования машины, на протяжении всего жизненного цикла — от создания до утилизации. Надежность — это свойство машины сохранять требуемые показатели качества в течение всего периода ее эксплуатации.

Методология изучения построена таким образом, что прежде всего рассматривается решение единого комплекса проблем обеспечения надежности, работоспособности и долговечности. Достижение высокого уровня надежности требует проведения сопутствующего диагностирования и прогнозирования технического состояния оборудования [16; 20; 21]. Освоение основ знаний по данному учебному пособию позволит специалисту обеспечивать непрерывно высокий уровень технического состояния оборудования, поддерживать его в надежном, работоспособном состоянии.

В пособии раскрывается основное содержание определений и положений теории надежности в области машин, систем машин, в том числе: 1) даются основные понятия и положения теории надежности, работоспособности, долговечности; 2) рассматриваются вопросы изменения технического состояния машины в процессе эксплуатации; 3) приводится и объясняется модель изменения работоспособности машины в процессе эксплуатации; 4) раскрывается содержание основных видов состояний машины; 5) рассматривается классификация машин по возможности восстановления работоспособности; 6) уделяется значительное внимание вопросам выявления и влияния отказов и причин отказов у машины, причин потери работоспособности в процессе эксплуатации; 7) приводится классификация отказов; 8) выявляются физические процессы и показатели износа; 9) рассматриваются категории и виды физического старения механизмов и машин.

При разработке учебного пособия автор руководствовался научными трудами известных российских ученых А.С. Проникова [17; 18], Г.А. Шаумяна [27], Л.И. Волчкевича [1; 2], Б.Ф. Хазова [23; 24] и др. Александр Сергеевич Проников – основоположник теории и научной школы научного направления параметрической и технологической надежности, Григор Арутюнович Шаумян и Леонид Иванович Волчкевич внесли большой вклад в развитие теории эксплуатационной надежности. В своих трудах профессора А.С. Проников [17; 18], Г.А. Шаумян [28], Л.И. Волчкевич [2] развивали теоретические основы обеспечения высокого уровня надежности при создании и в процессе эксплуатации станков-автоматов, автоматических линий, промышленного оборудования агрегато- и станкостроения. Профессор Б.Ф. Хазов [24; 25] основывался на развитии теории структурирования операционно-сборочных процессов при выполнении расчетов и решении задач определения надежности.

Ещё в 1972 году в сборнике научных трудов [12] известных российских учёных А.С. Проников отмечал, что наука о

надёжности изучает изменение показателей работоспособности технологического оборудования с течением времени в процессе эксплуатации и разрабатывает методы, обеспечивающие наибольшую эффективность, продолжительность и безопасность работы оборудования. Потеря работоспособности во время функционирования есть естественное свойство реальной системы машин. Различные виды энергии, которые вырабатывает сама машина и которые влияют на машину извне, выражают обратимые и необратимые процессы изменения её состояния, приводящие к ухудшению первоначальных значений технико-эксплуатационных параметров машины.

К числу основных направлений повышения надёжности системы машин [12] следует отнести следующие три направления.

1. Повышение сопротивляемости системы машин внешним воздействующим условиям эксплуатации. Это должно достигаться за счет разработки методов создания высокопрочных, жестких, износостойких конструкций узлов и механизмов, а также применения конструкционных материалов высокой прочности, износостойкости, антикоррозионной стойкости и др.

2. Изоляция машин от вредных колебательных процессов и воздействий за счет установки машины на фундамент для виброизоляции, создания специальных температурных условий и влажности.

3. Применение методов саморегулирования, когда машина способна автоматически восстанавливать утраченные функции и реагировать на внешние возмущения. Для данного направления существуют неограниченные возможности решения проблем повышения надёжности, работоспособности и долговечности машины.

В учебном пособии систематизирован и обобщён существующий опыт в отечественной практике по направлениям диагностики и прогнозирования надёжности автоматизированного оборудования в машиностроении для

целенаправленного процесса обучения и подготовки специалистов [13; 16; 20; 29].

При подготовке пособия прежде всего учтена практическая направленность процессов обучения для последующего применения знаний и выполнения повседневных задач повышения уровня надежности технологического оборудования и качества выпускаемых изделий.

Учебное пособие подготовлено на основе разработанных материалов и первоисточников в процессе проведения учебных занятий по дисциплине «Надежность и диагностика машиностроительного оборудования» в Тольяттинском государственном университете. Содержание материалов пособия соответствует тематическому плану дисциплины.

При изучении дисциплины основными видами занятий, формирующими базовые знания, являются лекции, групповые и практические занятия. Лекции позволяют сформировать систему знаний основных программных положений. Групповые и практические занятия направлены на закрепление учебного материала, изучение и решение практических задач, развитие аналитического мышления и качество принимаемых решений. Текущий контроль успеваемости осуществляется преподавателем на лекциях, групповых и практических занятиях путем устного опроса или с использованием аттестационных педагогических тестовых материалов. Важное место в изучении материала дисциплины отводится самостоятельной подготовке студента.

В конце пособия приводится библиографический список, включающий руководящие и нормативные документы, охватывающий содержание разделов учебного пособия.

Изучение основ надежности технологического оборудования построено на развитии у обучающегося аналитического мышления, компетентности, способности принятия на себя ответственности за решение поставленных задач.

1. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ

1.1. Постановочные вопросы изучения надежности, диагностики и прогнозирования надежности технологического оборудования

Технологическое оборудование автоматизированного производства представляет собой систему машин автоматического действия [11; 28; 29]. В машиностроении к системам машин автоматического действия прежде всего относятся станки-автоматы, станки с числовым программным управлением, автоматические линии, гибкие производственные системы, обрабатывающие центры, перекомпоуемые и реконфигурируемые производственные системы [1; 28; 29]. Рассматривая технологическое оборудование как систему машин, в свою очередь, следует иметь в виду, что машина есть система механизмов и узлов, выполняющая механические движения и различные операционные функции в процессе непосредственного преобразования энергии, материалов, информации для осуществления технологических операций и изготовления изделий.

При решении задач обеспечения надежности необходимо учитывать выполнение функций оборудования во взаимосвязи с окружающей средой, выявлять причины постепенного изменения технических характеристик в результате эксплуатации.

При непрерывном выполнении движений механизмов и узлов функционирование машины носит прерывистый, дискретный характер. Происходит чередование периодов непрерывной работы и периодов, связанных с простоями машины по различным причинам. С одной стороны, при обеспечении высокого уровня надежности необходимо выдержать заданные режимы функционирования, с другой – максимально сократить длительность и число простоев машины в процессе ее эксплуатации в течение рабочих смен.

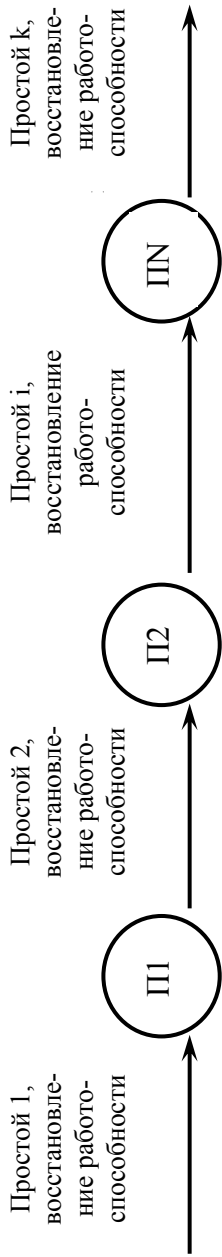


Рис. 1.1. Схема последовательности чередования периодов функционирования машины и периодов простоев с необходимостью восстановления работоспособности и обеспечения надежности

Следовательно, события, относящиеся к непосредственному выполнению процессов функционирования машины (П1, П2,...ПN), будут представлять цепь состояний с последовательным чередованием простоев и восстановлением работоспособности машины (рис. 1.1).

Между событиями непрерывной работы, т. е. наработкой до возникновения отказа, требуется оперативное вмешательство, когда возник простой и для поддержания машины в работоспособном состоянии необходимо выполнять важные задачи обеспечения надежности машины и в целом поддерживать работоспособность машины с сокращением времени и числа простоев.

Следствием потери работоспособности являются отказы узлов, механизмов, что приводит к простоям машины [2; 17; 18]. Основные простои появляются по техническим причинам, в связи с некачественным техническим обслуживанием, по организационным причинам [28]. Простои характеризуют ненадежность машины с появлением отказов ее функционирования. Отказ функционирования рассматривается как внецикловые потери и как событие, заключающееся в нарушении работоспособности машины. При этом отказ машины имеет объективные причины возникновения, но носит случайный характер, и вероятность его появления может быть описана различными законами вероятностного распределения параметров надежности в процессе эксплуатации.

Изучение надежности построено на системном получении знаний [23; 24]. Это означает, что как сам процесс обучения, так и применение знаний на практике для обеспечения надежности промышленного оборудования представляют собой систему знаний и навыков, которая строится в соответствии с блок-схемой (рис. 1.2).

В условиях производства всегда существует проблема обеспечения надежности, следовательно, должны ставиться задачи, осуществляться анализ проблемы, условий и действующего состояния машины, определяться пути решения поставленных задач. На основе рассматриваемой блок-схе-

мы (рис. 1.2) выполняются планирование, разработка технических и организационных методов обеспечения высокого уровня надежности и долговечности техники [27]. На этапе разработки методов обеспечения надежности проводятся моделирование, расчеты, технико-экономическое обоснование, разрабатывается документация. В результате чего осуществляется выполнение принятых решений и поставленных задач с получением результата обеспечения и повышения надежности машины.



Рис. 1.2. Блок-схема системы получения знаний для решения задач обеспечения надежности техники

При выявлении надежности технологического оборудования важной представляется начальная стадия глубокого

изучения характера и причин простоев, источников потери работоспособности. Большое значение имеют изучение и постановка вопросов диагностирования, мониторинга и прогнозирования состояния технологического оборудования на период проведения диагностики, а с проведением диагностирования – обеспечение сохранения и увеличение технического ресурса, продление срока службы [13; 14; 24; 26].

1.2. Системный подход к обеспечению работоспособности и надежности технологического оборудования

Системный подход является методом научного познания, в основе которого лежит исследование технического объекта как системы. То есть системный подход рассматривается как методология научного познания, в основе которого лежит исследование технических объектов как целостной системы. При этом рассматривается понимание системы во взаимосвязи «человек – технический объект – среда».

Техника, машины являются сложными механическими системами (ремонтируемого класса).

Технической системой в соответствии с ГОСТ 27.310–95 [37] называется совокупность элементов, объединенных конструктивно и функционально для выполнения требуемых функций. К техническим системам мы относим технический объект, машины.

Техническая система в отличие от замкнутой физической системы является открытой и реагирующей, изменяющейся в зависимости от внешних условий, условий эксплуатации, технического обслуживания и ремонта.

Основные принципы, определяющие объект как сложную систему: иерархичность, объект как множество элементов и межэлементных связей, структурность, единство и целостность, возможность построения математических моделей и моделирования систем.

При системном подходе решение проблемы надежности техники связано со следующими целями:

- 1) достижение наилучших показателей надежности машин по функциональным, экологическим критериям и критериям безопасности с минимальными затратами времени, труда и материальных средств;
- 2) сохранение в заданных пределах показателей надежности, работоспособности в эксплуатации, а также при хранении, транспортировке, техническом обслуживании (ТО) и ремонте;
- 3) совершенствование и модернизация технологического оборудования.

1.3. Свойства систем машин, являющихся сложными техническими системами

Назовем ряд свойств, относящихся к сложным системам.

1. Сложным системам свойственны самоорганизация, саморегулирование, самоприспосабливаемость.
2. Возможность восстановления работоспособности по частям без нарушения работоспособности и функционирования всей системы.
3. Иерархичность.

Анализ надежности сложных систем имеет свои особенности. Специфика оценки надежности сложной системы заключается в том, что большую роль играют связи между ее элементами.

Построение модели надежной системы осуществляется с учетом свойств, параметров и характеристик. При этом учитываются состояния технологического оборудования:

S_1 – работоспособное состояние в режиме ожидания;

S_2 – работоспособное состояние в режиме выполнения функций, работы, боевой задачи;

S_3 – неработоспособное состояние, период восстановления работоспособности.

При расчете надежности используют структурные схемы с возможностью расчленения сложной системы на отдельные элементы, для каждого из которых можно определить вероятность безотказной работы ($P_i(t)$ – вероятность безотказной работы i -го элемента во время заданного периода). Тогда можно определить вероятность безотказной работы $P_i(t)$ всей системы. Такие расчеты называем расчетом системной надежности. Рассматривая вышеперечисленные параметры механизмов и узлов, можно прийти к заключению, что наиболее характерными являются случаи, когда простой одного механизма или узла выводят из строя всю систему.

Например, большинство приводов машин и механизмов, передач подчиняются этому условию. Так, если в приводе машины выйдет из строя любая шестерня, подшипник, муфта, рычаг управления, электродвигатель, насос смазки и т. п., то вся машина с приводом перестанет функционировать. Тогда вероятность безотказной работы такой системы будет равна произведению вероятностей безотказной работы ее механизмов и узлов

$$P(t) = P_1(t) P_2(t) P_3(t) \dots P_n(t) = \prod_{i=1}^n P_i(t). \quad (1.1)$$

Если узел состоит из 50 деталей, а вероятность безотказной работы каждой детали за рассмотренный промежуток времени составляет $P_i(t) = 0,99$, то вероятность безотказной работы узла составит $P(t) = (0,99)^{50} = 0,55$. Если же узел из 400 деталей с такой же вероятностью, то $P(t) = (0,99)^{400} = 0,018$, что говорит о неработоспособности узла.

Проблемы обеспечения надежности техники решаются при комплексном и системном подходах с решением задач в организационном, методическом и кадровом направлениях. Технические объекты, например машины, являются сложными механическими системами.

При комплексном подходе решаются задачи обеспечения надежности на всех этапах жизненного цикла машины. Системный подход предполагает рассмотрение машины и обеспечение ее надежности как системы причинно-следственных

связей. Организационное направление работ предусматривает разработку программы обеспечения надежности и снижения риска для всех этапов жизненного цикла машины, нормативных документов и стандартов, устанавливающих положения и требования к обеспечению надежности техники.

Изучение физических процессов, которые приводят к изменению показателей надежности объекта и его механизмов, наиболее полно можно провести в условиях системного анализа состояния «изменяющаяся среда – функционирующий технический объект – деятельность человека».

1.4. Определение надежности, работоспособности, долговечности

Изучение дисциплины будет наиболее эффективным, если студенты усвоят основополагающие вопросы теории надежности и работоспособности технологического оборудования [2; 17; 18; 23; 32; 35]. Следует учитывать, что технологическое оборудование будет отнесено к сложным техническим системам машин. В области понятий теории надежности машина, система машин отнесены к техническим объектам проведения исследований. Все они являются предметом обеспечения и поддержания высокого уровня надежности.

Надежность – это один из основных показателей качества технического объекта, проявляющийся во времени и отражающий изменения, происходящие на протяжении всего времени его эксплуатации, включая весь жизненный цикл – от создания до утилизации. Надежность будем рассматривать как свойство машины сохранять требуемые технико-эксплуатационные параметры, характеризующие надежность в течение всего периода ее эксплуатации [32; 35]. При исследовании надежности отслеживается изменение качественных показателей машины во времени, что позволяет изучать надежность через выполнение процессов диагностирования и прогнозирования непосредственно в период ее работы.

Рассматривая динамику изменения состояния машины как технического объекта, можно прийти к выводу, что надежность есть многостадийная форма изменения состояния машины. Известно [17; 26] высказывание академика А.И. Берга: «Надежность изделия закладывается при проектировании, обеспечивается при изготовлении и поддерживается в эксплуатации», т. е. проблему обеспечения надежности машины следует решать на протяжении всего жизненного цикла – от проектирования до утилизации машины. При проектировании машины обосновываются и закладываются все основные и необходимые требования к обеспечению надежности машины после ее изготовления. При изготовлении машины с учетом предусмотренных режимов функционирования реализуется качество создания машины и контролируется качество изготовления механизмов, узлов, где каждый из них будет наделен характеристиками надежности, включая жесткость конструкции, геометрическую точность элементов конструкции и другие параметры. В процессе эксплуатации машины реализуется ее надежность, при этом она зависит от методов и условий эксплуатации машины, принятой системы ее ремонта, методов технического обслуживания, применяемых режимов функционирования узлов и механизмов и других эксплуатационных факторов [13; 17; 25; 28; 37]. Игнорирование обеспечения надежности технического объекта есть самый ненадежный путь её создания, приводящий к уменьшению технического ресурса применения. Любые отказы машины приведут к значительным материальным и финансовым убыткам. Статистика отказов и их причин дает большой объем информации о состоянии надежности механизмов и узлов машин и является основным источником получения информации и выявления фактических значений параметров надежности и причин потери работоспособности и долговечности [2; 8; 10; 14; 17; 36; 38]. Статистические данные о процессах функционирования машины позволяют получить реальное представление о том, насколько конструкция, производство и условия применения, эксплуатации

соответствуют заложенному проектом уровню надежности и безопасности в эксплуатации. Статистические данные, полученные во время диагностирования, позволяют проводить прогнозирование будущего состояния машины и совершенствования процесса функционирования в условиях эксплуатации. Таким образом, будет заложен комплексный подход к изучению и исследованию фактического состояния надежности технологического оборудования.

В процессе эксплуатации техническое состояние машины постоянно изменяется с различными скоростями потери работоспособности. Если машина, её механизмы и узлы ненадежны, то произойдет частичная или полная потеря работоспособности, что вынуждает восстанавливать её до заданного уровня за счет организации и проведения технического обслуживания и ремонта.

Ненадежная машина — это основной признак потери эффективности ее применения, так как каждая ее остановка из-за повреждения механизмов или снижения технических характеристик узлов с потерей технико-эксплуатационных параметров приведет не только к большим материальным убыткам, но и повлияет на ухудшение состояния производственной и техносферной безопасности. Общеизвестно, что за весь период эксплуатации затраты на ремонт, техническое обслуживание машин в связи с их износом порой в несколько раз превышают стоимость новой машины. Так, для автомобилей — в 6 раз, самолетов — до 5 раз, технологического промышленного оборудования — до 8 раз, электротехнической аппаратуры — до 12 раз.

Большое влияние на надежность машины оказывают, с одной стороны, внешние условия эксплуатации, с другой — внутренние физико-химические разрушающие процессы, такие как старение, коррозия, повышенный износ, изменения свойств материалов, из которых изготовлены узлы и механизмы.

Необходимым фактором в работе специалиста является исследование и применение руководящих и нормативных документов в области надежности, к которым относятся

ГОСТ 27.002–89 [32] и ГОСТ 27.001–95 [35] и др. Последствия снижения надежности приводят к снижению уровня экологической и пожарной безопасности, нарушению условий труда. Надежное технологическое оборудование – основа достижения и обеспечения промышленной и экологической безопасности. Безопасность рассматривается как свойство машины в процессе эксплуатации не создавать угрозу жизни и здоровью людей, окружающей среде.

Эксплуатация есть период применения машины по назначению для выполнения её функций, включая техническое обслуживание, ремонт, хранение, транспортировку. Оценочными характеристиками состояния и свойств машины в период эксплуатации является ряд показателей, характеризующих надежность машины. К числу основных показателей относится работоспособность.

Работоспособность технического объекта есть состояние, при котором технический объект способен выполнять заданные функции, сохраняя значение технико-эксплуатационных параметров в пределах, установленных нормативно-технической документацией [32; 35]. Возможны работоспособное и неработоспособное состояния. Работоспособное состояние характеризуется способностью технического объекта выполнять свои функции. Общее время непрерывной работы машины в процессе эксплуатации называется наработкой, а продолжительность непрерывной работы машины от начала работы или предшествующего отказа до возникновения следующего отказа – наработкой до отказа. Продолжительность перевода машины из неработоспособного состояния до восстановления работоспособного состояния называется временем восстановления работоспособности. Общий срок службы есть продолжительность эксплуатации машины от начала ее эксплуатации или очередного капитального (среднего) ремонта до перехода в предельное состояние или до возобновления эксплуатации после проведения среднего или капитального ремонта.

Работоспособность как качественное состояние машины, рассматриваемое во времени, будет определять понятие «надежность машины». Из чего следует, что **надежность** машины есть свойство выполнять заданные функции в течение рассматриваемого времени эксплуатации, сохраняя технико-эксплуатационные параметры в заданных пределах, установленных нормативно-технической документацией при существующей системе технического обслуживания и ремонта.

Надежность является комплексным свойством, основные её технико-эксплуатационные параметры – безотказность, долговечность, ремонтпригодность, сохраняемость. Для машин, которые представляют собой потенциальные источники появления опасности их эксплуатации или вредного влияния на окружающую природную среду, к числу важных показателей относятся характеристики производительности, пожарной и экологической безопасности.

Долговечность технического объекта есть свойство сохранять работоспособность до предельного состояния при существующей системе технического обслуживания и ремонта. Технический ресурс и срок службы являются параметрами определения долговечности машины [32; 35].

Машина может достичь предельного состояния, оставаясь работоспособной. Это означает, что дальнейшая эксплуатация по назначению становится невозможной и в связи с невозможностью в дальнейшем выполнять требования экономичности, эффективности, промышленной и экологической безопасности.

Переход машины в предельное состояние влечёт за собой временное или окончательное прекращение эксплуатации машины [32; 35]. В этом случае машина снимается с эксплуатации и может быть направлена на средний или капитальный ремонт для восстановления технического ресурса, списана, утилизирована или передана для перепрофилирования.

Если предельное состояние машины рассматривается из условий безопасности хранения и транспортных перемеще-

ний, перевозок, то при наступлении предельного состояния в условиях хранения, транспортирования дальнейшее применение машины не допускается (потеря работоспособности в процессе нарушений требований хранения, консервации, выполнения транспортных перевозок и операций).

1.5. Модель изменения технического состояния и работоспособности машины в процессе эксплуатации. Термины, определения, характеризующие техническое состояние машины

Техническое состояние машины и её работоспособность постепенно меняются в процессе эксплуатации (рис. 1.3). Техническое состояние машины есть состояние, которое характеризуется в определенный момент времени при определенных условиях внешней среды значениями параметров, установленных технической и нормативной документацией.

На рис. 1.3 обозначено: $R(t)$ – технический ресурс, изменяемый в процессе эксплуатации t машины; t_{n1}, t_{n2} – время простоя машины до начала восстановления; t_{e1}, t_{e2} – время длительности восстановления работоспособности; t_{p1}, t_{p2}, t_{p3} – время непрерывной работы до появления отказа, наработка до отказа [27].

В точках a, b, c происходят отказы и потери работоспособности машины в процессе эксплуатации, в точках A, B – восстановление работоспособности. В результате эксплуатации уменьшается технический ресурс машины и происходит постепенная потеря работоспособности до значения $R(t)_{min}$.

Потери работоспособности, вызванные отказами машины, её узлов и механизмов, характеризуют несовершенство конструкции, технологического процесса при создании машины, нарушение условий эксплуатации, невысокое качество технического обслуживания.

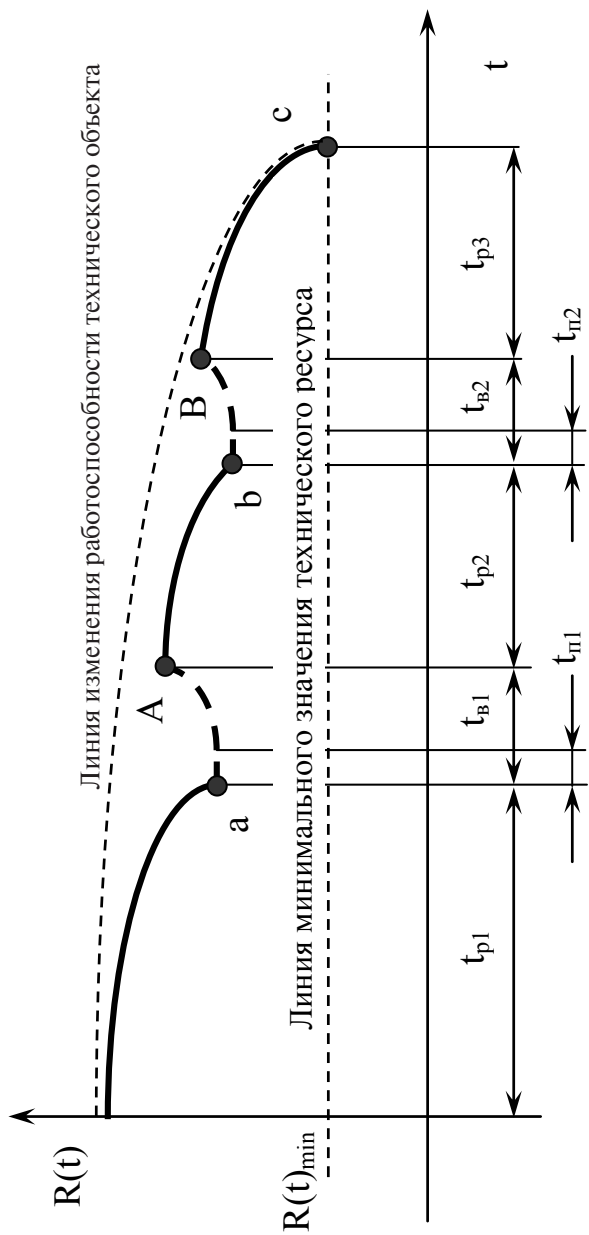


Рис. 1.3. Схема изменения работоспособности машины в процессе эксплуатации

Изменение технического состояния определяется потерей работоспособности и факторами появления отказа, старения, физического износа механизмов и узлов, которые раскрывают физическую сущность необратимых изменений, происходящих в материалах деталей и механизмов. Большинство отказов машин связано с процессами, протекающими в поверхностных слоях. Законы старения и износа позволяют выявить степень повреждения материала в функции времени. Характерным примером процессов старения является выявление закономерностей износа материалов, которые определяют методы расчета интенсивности изнашивания, величины износа в функции времени, позволяют выявить параметры процессов коррозии, оценить характер распространения, концентрации, скорость развития усталостных трещин, протекание процессов ползучести. Определяется качество и изменение свойств масел в процессе эксплуатации машин, контролируется изменение коэффициента трения в местах подвижных соединений механизмов, учитывается коробление литых и сварных корпусов от остаточных напряжений.

В процессе эксплуатации машина может принимать следующие виды технического состояния [32; 35; 37].

Исправное (*good state*) – состояние, при котором машина полностью соответствует требованиям нормативно-технической документации (НТД).

Неисправное (*fault, faulty state*) – состояние машины, при котором она не соответствует хотя бы одному из требований НТД.

Работоспособное (*up state*) – состояние машины, при котором значения всех параметров, характеризующих способность выполнять заданные функции, соответствуют требованиям НТД.

Неработоспособное (*down state*) – состояние машины, при котором значение хотя бы одного параметра, характеризующего способность выполнять заданные функции, не соответствует требованиям НТД.

Предельное состояние (*limiting state*) – состояние машины, при котором наступает техническая невозможность или нецелесообразность дальнейшей её эксплуатации, а также машина не соответствует требованиям безопасности или не обеспечиваются требования повышения эффективности. Предельное состояние может быть назначено при условии достижения нормированного срока службы или суммарной наработки до отказа.

В процессе эксплуатации машины могут произойти события, характеризующие её техническое состояние. К числу основных относятся следующие события [32; 35; 37].

Повреждение (*damage*) – событие, заключающееся в нарушении исправного состояния машины при сохранении работоспособного состояния.

Отказ (*failure*) – событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния и приведшее к простоя машины. При отказе машина полностью или частично теряет работоспособность. Отказ как событие будет характеризоваться переходом машины из работоспособного состояния в неработоспособное вследствие возможной неполадки.

Функциональный отказ – отказ машины, в результате которого наступает невозможность и прекращение ее функционирования.

Параметрический отказ – отказ машины, при котором сохраняется ее функционирование, но происходит выход значений одного или нескольких параметров машины за пределы, установленные нормативно-технической, конструкторской или эксплуатационной документацией.

К свойствам, характеризующим техническое состояние машины, относятся сохраняемость и исправность.

Сохраняемость – свойство машины непрерывно сохранять значения установленных показателей надежности, её качества в заданных пределах в течение времени хранения, транспортировки. При определении сохраняемости учитываются параметры сохранения безотказности, ремонтпригодности, долговечности.

Исправность — свойство, при котором машина соответствует всем требованиям, установленным нормативной и эксплуатационной документацией.

По возможности восстановления работоспособности машины как технические объекты подразделяются на несколько классов: восстанавливаемые, невосстанавливаемые, ремонтируемые, неремонтируемые.

Восстанавливаемый объект (*restorable item*) — проведение восстановления работоспособного состояния предусмотрено нормативно-технической документацией (НТД).

Невосстанавливаемый объект (*nonrestorable item*) — проведение восстановления работоспособного состояния не предусмотрено НТД.

Технический объект ремонтируемого класса (*repairable item*) — ремонт возможен и предусмотрен НТД.

Технический объект неремонтируемого класса (*nonrepairable item*) — ремонт невозможен или не предусмотрен НТД.

В соответствии с ГОСТ 27.310–95 [37] существуют определения, характеризующие последствия отказов.

Вид отказа — совокупность возможных или наблюдаемых отказов машины, объединенных в классификационную группу по общности одного или нескольких признаков.

Тяжесть последствий отказов — характеризуется качественной и количественной оценкой вероятного ущерба в связи с отказом машины или системы.

Категория тяжести последствий отказов — классификационная группа отказов по тяжести их последствий, характеризуется сочетанием качественных и количественных признаков нанесенного отказом ущерба.

Критический отказ — отказ, тяжесть последствий которого в пределах анализа признана недопустимой и требует принятия специальных мер по снижению вероятности возникновения отказа и возможного ущерба, связанного с его возникновением.

1.6. Режимы эксплуатации и их влияние на изменение технического состояния машины

В период эксплуатации основную часть времени машина выполняет свои технологические функции. Период эксплуатации состоит из двух основных режимов её выполнения: 1) ожидания (нерабочее состояние – дежурный режим); 2) рабочего состояния – использования по назначению. В режиме ожидания машина находится в состоянии покоя или технического обслуживания [27]. Обеспечение готовности машины в режиме ожидания поддерживается ежедневной профилактикой и техническим обслуживанием в соответствии с установленными регламентами и инструкциями. Условия эксплуатации требуют индивидуального подхода в вопросах эксплуатации, обслуживания и ремонта.

Режимы эксплуатации во многом зависят от скорости протекания процессов функционирования и условий эксплуатации. Процессы изменения технического состояния по времени протекания классифицируются [17; 18]:

- 1) быстропротекающие процессы, к ним относятся вибрации, колебательные процессы, изменение нагрузок и сил в процессе обработки и др.;
- 2) процессы средней скорости, длительности изменения в минутах и часах, это прежде всего тепловые деформации, нагрев, загрязнения и др.;
- 3) медленные процессы – это продолжительные по времени процессы, которые длятся днями, месяцами, годами, к ним относятся износ, коррозия, усталость, старение, необратимое изменение свойств или состояния материала.

На техническое состояние машины существенное влияние оказывают нагрузочные режимы. Пиковые нагрузки приводят к ускорению усталостного разрушения деталей. При длительном воздействии переменных нагрузок наблюдается постепенное изменение состояния материала деталей. Во вращающихся деталях, например на шестернях, происходит нарушение рабочих поверхностей зубьев, на валах – по-

вышенный износ подшипников. Вначале беговая дорожка наружного кольца подшипника становится матовой, а затем усиливается процесс разрушения поверхностного слоя. Увеличивается биение – люфт подшипника.

1.7. Влияние видов энергии на изменение технического состояния машины в процессе эксплуатации

Проявление энергии и влияние на машину приводит к процессу изменения состояния и свойств машины, что, в свою очередь, влечет повреждения и отказы машины и, соответственно, потерю работоспособности в процессе эксплуатации [17; 18].

В процессе эксплуатации на машину действуют различные виды энергии. К числу типовых видов энергии относятся следующие.

1. Действие энергии окружающей среды, включая человека.

2. Влияние на машину как внутренних источников энергии, так и внешних, связанных с функционированием и приведением в действие механизмов и узлов, влияние кинетической энергии в рабочем состоянии.

3. Проявление потенциальной энергии, накапливаемой в машине по мере увеличения времени наработки (длительности непрерывной работы).

Названные виды энергии подразделяются по источникам и природе возникновения.

1. Механическая энергия, действие статических и динамических нагрузок. Силы, возникающие в машине при работе, определяются характером рабочего процесса и режимами функционирования, инерцией перемещающихся частей, трением в кинематических парах. Природа возникновения этих сил связана со сложными физическими явлениями в зависимости от переменных режимов работы машины. Выделение механической энергии особенно наглядно наблюдается

в результате действия сил резания при обработке на станках, в результате усилий, действующих в узлах и механизмах машины. Возникновение механической энергии приводит к проявлению потенциальной накапливаемой энергии, появлению упругих и остаточных деформаций, перераспределению внутренних напряжений не только в процессе резания, но и после термической обработки деталей, в процессе сборки узлов и механизмов машины.

2. Тепловая энергия накапливается в результате повышения температуры движущихся механизмов и узлов, аккумуляции её внутри машины, при колебаниях и изменениях температуры окружающей среды, работе электроприводов, гидро- и пневмоприводов, вследствие тепловыделения при обработке деталей режущим инструментом. При этом необходимо учитывать теплораспределение тепловой энергии с учетом необходимости ее рассеивания и охлаждения зон концентрации тепла и тепловыделения. Используются смазочно-охлаждающие жидкости, подача воздуха и распыленных масел в зону обработки деталей. Значительный интерес стал проявляться к разработке специальных конструкций корпусов, оснований с применением рассеивателей, радиаторных конструкций.

3. Химическая энергия проявляется в появлении коррозии деталей и механизмов, в результате химического воздействия паров, газов, агрессивной химически активной окружающей среды в условиях эксплуатации.

4. Электромагнитная энергия проявляется в виде возникновения электромагнитных колебаний и появления переменных электромагнитных полей, что может привести к нарушению работы систем и устройств управления. Намагничивание, статическое электричество, действие электромагнитных полей влияют на работу электронной аппаратуры и в целом на механизмы и узлы машины.

5. Влияние и проявление сил природы, работа машины в условиях резко континентальных перепадов температуры, жарких тропиков, северных широт.

1.8. Причины потери работоспособности машины в процессе эксплуатации

К числу причин потери работоспособности машин относятся [2; 5; 8; 13; 17; 25; 28]:

- 1) нарушение условий и режимов эксплуатации, возможное несоблюдение установленных правил, нормативных документов эксплуатации и обслуживания;
- 2) изменение физического состояния деталей, механизмов, узлов прежде всего по причинам износа и физического старения.

Изнашивание (износ) представляет собой процесс постепенного изменения размеров, формы и состояния поверхностей и внутреннего состояния материалов, деталей при наличии процессов трения [17; 18]. На интенсивность изнашивания существенно влияют состояние смазки, температура, влажность, запыленность и загрязненность воздуха и среды. Износ в значительной мере влияет на долговечность и эксплуатационную надежность.

Изменение свойств и состояния материалов является причиной, по которой машина и её механизмы утрачивают работоспособность. Изменение начальных свойств и состояния материалов, из которых выполнены детали и механизмы машины, является первопричиной потери ею работоспособности, так как эти изменения могут привести к повреждению объекта и опасности возникновения отказа.

Существуют три уровня изучения появления износа, поведения материалов в процессе изнашивания.

1. Субмикроскопический уровень — на основании рассмотрения строения атомов и молекул, образования из них кристаллических решеток твердых тел выявляются закономерности проявления свойств и поведения материалов в условиях работы механизмов. Изучение осуществляется на использовании положений физики твердого тела. На основе исследований разрабатываются фундаментальные представления о закономерностях построения кристаллических решеток,

особенно о дислокациях, их взаимодействиях и движении, о силах упругости с позиций квантовой механики, о диффузии атомов в твердых телах, которые являются физической основой для решения многих современных задач по увеличению прочности и долговечности материалов.

2. Микроскопический уровень — основывается на анализе и исследовании процессов состояния материала для отдельно взятой детали, например, изучаются напряженное состояние, поверхностные и внутренние напряжения.

3. Макроскопический уровень — рассматривает изменение начальных свойств или состояния материала всего тела детали. Например, исследуют деформации и напряжения в детали, работающей на растяжение, кручение, изгиб.

По видам протекания процессов изнашивания существуют механический, коррозионно-механический, эрозионный, кавитационный виды износа. Каждому виду износа соответствует вид изнашивания.

Механическое изнашивание возникает прежде всего по причине абразивного изнашивания с последствиями пластической деформации, хрупкого поверхностного разрушения деталей.

Молекулярно-механическое изнашивание прежде всего происходит при нарушении смазки, масляной пленки между трущимися поверхностями с переносом частиц металла с одной детали на другую.

Коррозионно-механическое изнашивание возникает в процессе трения при наличии химического взаимодействия газов, паров, кислот, щелочей с материалами трущихся деталей.

Эрозионное и кавитационное изнашивание обусловлены влиянием высокого давления потоков жидкостей и газов (агрессивных) на поверхности деталей. Процесс эрозии характеризуется вымыванием и отрывом отдельных частиц материала. Кавитация сопровождается гидравлическими ударами, воздействующими на поверхность детали с разрушением кавитационных пузырьков, например, в насосах, трубопроводах, гидроагрегатах, гидроаппаратуре.

К показателям износа относятся скорость изнашивания, линейный износ, интенсивность изнашивания.

Скорость изнашивания, обозначенная как

$$\gamma = \frac{du}{dt} \left(\frac{\text{мм}}{\text{ч}} \right), \quad (1.2)$$

является отношением величины износа ко времени, в течение которого он возникает, где u – степень повреждения, например, износ детали линейный u_n (мм), износ по массе u_m (мг), износ по объему u_v (мм³). Для линейного износа рассматривается изменение размера детали при ее изнашивании в направлении, перпендикулярном к поверхности трения. Зная временную характеристику изменения скорости $\gamma(t)$, можно определить степень повреждения как функцию времени t :

$$u(t) = \int_0^t \gamma(t) dt. \quad (1.3)$$

Интенсивность изнашивания

$$j = \frac{du}{ds} \quad (1.4)$$

характеризуется отношением величины износа к относительному пути трения s , на котором происходило изнашивание.

Скорость и интенсивность изнашивания связаны соотношением

$$\gamma = jv, \quad (1.5)$$

где v – скорость относительного скольжения поверхностей трения.

Физическое старение представляет собой процесс постепенного и непрерывного изменения эксплуатационных свойств под влиянием различного вида нагрузок, изменения режимов работы. К числу наиболее важных источников и причин возникновения физического старения относятся усталость, коррозия, динамические знакопеременные нагрузки, вибрационные и колебательные процессы.

Усталость рассматривается как процесс постепенного разрушения деталей и узлов машины под влиянием воздействия многократно повторяющихся динамических нагрузок. Усталостное разрушение связано с возникновением усталос-

тных трещин, с усталостным выкрашиванием, изменением структуры поверхности изношенного слоя.

Коррозия приводит к постепенному разрушению материалов, вызванному химическим и электрохимическим взаимодействием с водой, газами, парами, с внешней средой.

1.9. Анализ причин, классификация видов отказов

Анализ возможных видов отказов дает основание выявлять причины их возникновения и предотвращать появление отказов и простоев, а соответственно, обеспечивать работоспособность машины в процессе ее эксплуатации [2; 5; 10; 17; 18; 23].

При работе машины отказ может возникнуть в результате поломки, деформации, износа, пластической деформации поверхностных слоев, тепловых трещин, коррозии и т. д. Виды повреждений машины, её узлов и механизмов можно разбить на две группы: допустимые и недопустимые, которые носят случайный характер. К допустимым повреждениям относятся коробление детали, некоторые виды износа, усталость, дефекты внешнего оформления объекта, не влияющие на его функции и работу. Как правило, недопустимы поломки деталей в результате недостаточной статической, динамической или усталостной прочности, недопустима коррозия на работающих узлах и механизмах, тепловые и полученные в процессе износа виды трещин. Виды повреждений определяют содержание ремонтов технического объекта.

При анализе надежности машины как системы все её элементы (узлы, механизмы, детали) по признаку отказов можно разделить на следующие группы.

1. Элементы машины, отказ которых практически не влияет на работоспособность объекта, например, деформация обшивки, изменение окраски, царапины и ссадины и др. В этом случае говорят о неисправном состоянии этих элементов, а не о потере работоспособности машины.

2. Элементы, работоспособность которых за рассматриваемый промежуток времени практически не изменяется.

К таким элементам можно отнести корпусные детали, узлы с большим запасом прочности и др.

3. Элементы, ремонт и регулировка которых возможны без нарушения работоспособности. Проводятся регламентные работы с заменой элементов, текущий ремонт в период состояния ожидания к применению.

4. Элементы, отказ которых приводит к отказам машины.

В результате влияния на техническое состояние машины режимов эксплуатации, проявления и влияния различных видов энергии, процессов физического старения представляется возможным провести классификацию видов отказов работы машины.

К числу отказов по характеру изменения во времени можно отнести следующие [2; 17; 18; 28].

1. *Постепенные отказы* — возникают в результате протекания процессов старения, ухудшения начальных параметров машины. Основным признаком постепенного отказа является то, что вероятность его возникновения $P(t)$ в течение заданного периода времени от t_1 до t_2 зависит от длительности предыдущей работы. Чем больше эксплуатировалась машина, чем больше её общая наработка, тем выше вероятность возникновения отказа. Постепенные отказы связаны с процессами износа, коррозии, усталости и ползучести материалов.

2. *Внезапные отказы* — возникают в результате сочетания неблагоприятных факторов и случайных внешних воздействий. Основным признаком внезапного отказа является независимость его появления от длительности предыдущей работы. Примерами таких отказов являются поломки деталей из-за непрерывной эксплуатации технического объекта, машины или возникновения перегрузок, деформации и поломок деталей, когда каждый параметр принимает экстремальное значение. Выход из строя машины происходит внезапно.

По связи с другими отказами и причинами подразделяются на *независимые* и *зависимые*.

По характеру устранения возникают *устойчивые* и *переключающиеся* отказы.

По последствиям и признакам аварийности классифицируют отказы *аварийные* и *неаварийные*.

По характеру проявления существуют отказы *функциональные* и *параметрические*. *Отказ функционирования* приводит к тому, что машина не может выполнять свои функции. Такой отказ связан с отказами механизмов и узлов. Например, в результате отказа нарушена работа электродвигателя, привод не работает и не передает движения, насос не подает жидкую смазку. *Параметрический отказ* приводит к выходу параметров и характеристик машины за допустимые пределы, когда не выполняются технические требования и технические условия, установленные при создании машин. К данной группе отказов можно отнести нарушение точности, не выдерживаются режимы функционирования: величина подачи, частота вращения электродвигателя. Параметрические отказы могут привести к отказам функционирования. Потеря мощности двигателя может привести к невозможности выполнения процесса обработки, утечка в гидросистеме — к падению давления и несрабатыванию гидроаппаратуры управления.

Отказы, появившиеся по факту возникновения, являются *фактическими* или *свершившимися*.

В процессе эксплуатации по каждому виду промышленного оборудования устанавливаются *допустимые* и *недопустимые* отказы на основе оценки и выявления допустимых и недопустимых повреждений машины.

Контрольные вопросы

1. Дайте определение системного подхода по обеспечению надежности и работоспособности технического объекта. Назовите основные принципы разработки сложной системы.
2. Какими свойствами обладает сложная система обеспечения работоспособности и надежности?
3. Дайте определение надежности. Для какой цели необходимо обеспечивать высокую надежность современных станков и станочных систем?

4. Приведите определение работоспособности. Ваши предложения по сохранению работоспособности станков, систем машин.
5. Поясните понятие «долговечность». Какое принципиальное отличие долговечность имеет по отношению к понятиям «работоспособность» и «надежность»?
6. Приведите модель изменения работоспособности машины в процессе эксплуатации. Поясните на графике.
7. Какие виды технических состояний машины вам известны? Раскройте содержание этих понятий.
8. Какие технические события будут характеризовать машину в процессе эксплуатации?
9. Приведите классификацию технических объектов по возможности восстановления работоспособности.
10. Назовите режимы эксплуатации машины и объясните влияние режимов на изменение технического состояния машины.
11. Приведите классификацию процессов по времени изменения технического состояния машины.
12. Какие виды энергии влияют на изменение технического состояния машины в процессе эксплуатации?
13. Назовите причины потери работоспособности машин в процессе эксплуатации.
14. Дайте определение понятия «старение машины». Поясните, что относится к физическому старению машин.
15. Какими показателями характеризуется износ?
16. Какие виды износа (изнашивания) механизмов и машин вам известны?
17. Назовите виды и причины отказов машин.
18. Приведите классификацию отказов, их видов.
19. Какие существуют уровни появления износа и изменения свойств изнашиваемых материалов?
20. Назовите методы и основные пути повышения надежности машин.

Выводы

При подготовке учебного пособия учтена практическая направленность процесса обучения студентов для последующего применения полученных знаний и навыков для обеспечения высокого уровня надежности технологического оборудования.

В целом изучение материалов пособия построено на системном получении знаний. Это означает, что как сам процесс обучения, так и применение знаний на практике представляют собой систему знаний и навыков, необходимых в реальной последующей деятельности специалиста.

Системный подход к обеспечению работоспособности и надежности технологического оборудования является методом научного познания, в основе которого лежит исследование технического объекта как целостной системы во взаимосвязи с условиями эксплуатации и деятельностью человека. Основные принципы создания и применения сложных систем – структурность, определяемая множеством элементов и межэлементных связей, иерархичность, единство и целостность системы.

Сложные системы характеризуются самоорганизацией, саморегулированием, самоприспосабливаемостью. Сложная система может находиться в одном из трех состояний: работоспособном в режиме ожидания, работоспособном в режиме работы, в неработоспособном.

Расчеты надежности осуществляют с возможностью расчленения сложной системы на отдельные элементы, т. е. машины на механизмы и узлы, определяют сначала вероятность безотказной работы каждого механизма или узла, а затем надежность в целом всей машины как произведение вероятностей безотказной работы. Для увеличения вероятности безотказной работы машины определены методы и пути повышения ее надежности.

Раскрывается основное содержание определений и положений теории надежности в области машин, систем машин. В пособии даются основные понятия надежности, работоспособности, долговечности, рассматриваются вопросы измене-

ния технического состояния машины в процессе эксплуатации. Приводится и объясняется модель изменения работоспособности машины в процессе эксплуатации. Раскрывается содержание основных видов состояний машины. Рассматривается классификация машин по возможности восстановления работоспособности. Уделяется значительное внимание вопросам выявления и влияния отказов и причин отказов у машины, причин потери работоспособности в процессе эксплуатации. Приводится классификация отказов. Выявляются физические процессы и показатели износа, рассматриваются категории и виды физического старения механизмов и машин.

При определении надежности технологического оборудования важной является начальная стадия глубокого изучения характера и случаев причин, источников потери работоспособности. Изучение дисциплины будет наиболее эффективным, если будут усвоены и поняты основополагающие вопросы теории надежности и работоспособности технологического оборудования. Большое значение имеет изучение вопросов диагностики, мониторинга и прогнозирования состояния технологического оборудования. Прогнозирование надежности осуществляется с применением статистических моделей, которые отражают не только текущее состояние работоспособности, но и закономерности изменения надежности машины на будущем промежутке времени эксплуатации.

Режимы эксплуатации, нагрузочные режимы, проявление энергии, их влияние на машину приводят к процессу изменения состояния и свойств машины и её работоспособности. Рассмотрены причины потери работоспособности машины в процессе эксплуатации. Проведен анализ причин, дана классификация видов отказов.

Надежное технологическое оборудование не только основа поддержания работоспособного его состояния, но и обеспечения промышленной и экологической безопасности.

2. РАСЧЕТ ОСНОВНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ

2.1. Основные оценочные характеристики работоспособности машин

Проведение расчетов показателей надежности относится к наиболее ответственному и трудоёмким этапам повышения надежности машин. Существует проблема проведения качественных расчетов по определению надежности и долговечности машин и особенно систем машин автоматического действия. Сложность проведения расчетов объясняется сложностью существующих или разрабатываемых методов расчета. В этом случае надежность рассматривается на уровне существующих причин и физики отказов работы машины, когда сложность расчётов не позволяет с достоверной точностью провести первоначальный этап определения надежности, выявить закономерности протекания процессов износа и разрушения материалов, из которых изготовлены машина, её механизмы и детали. В этой связи физика протекающих процессов потери работоспособности становится первостепенной задачей определения причин отказов и выявления закономерностей на математическом уровне протекания во времени процессов износа [9] и разрушения материалов. Исследование законов износа и разрушения является базой для проектирования и проведения инженерных расчетов на надежность и долговечность. Для металлообрабатывающего оборудования основным критерием износа является точность обработки изделий на данном оборудовании, так как точность обработки адекватно отражает состояние износа и потери работоспособности машины.

При определении надежности машин необходимо получать статистические данные, с помощью которых описываются случайные величины и вероятностные значения параметров надежности. Задают величину выборки случайных значений во времени, например, время непрерывной работы машины до отказа — наработка до отказа, время восстановления работоспособности или длительность отказа. На осно-

ве результатов статистических данных моделируется кривая функции изменения параметра надежности в соответствии с законами вероятностного распределения функции надежности [7; 17; 18; 22; 41].

При эксплуатации машин ремонтируемого класса допускаются многократно повторяющиеся отказы и восстановление работоспособности. После отказа происходит восстановление работоспособности и машина вновь работает до следующего отказа с последующим проведением технического обслуживания или технического ремонта. В этой связи машину будет характеризовать наличие потоков отказов с потоками восстановления работоспособного состояния.

Принимаем во внимание, что работоспособность есть состояние, при котором машина как технический объект способна выполнять заданные функции, сохраняя значения параметров в пределах, установленных нормативно-технической документацией [32]. При этом машина может находиться в работоспособном и неработоспособном состоянии. Происходят события, которые будут характеризоваться чередованием переходов машины, её узлов и механизмов из работоспособного состояния в неработоспособное вследствие возникшей неполадки и затем из неработоспособного состояния в работоспособное. Если машину невозможно вернуть в работоспособное состояние и с помощью технического ремонта, то её технический ресурс исчерпан и жизненный цикл завершается утилизацией.

К основным показателям работоспособности и технического состояния машины в период эксплуатации относятся нижеследующие: *наработка до отказа* – T_o ; *время восстановления работоспособного состояния* – T_v .

Средняя наработка до отказа есть математическое ожидание наработки (работы) машины до возникновения отказа. Понятие «наработка до отказа» определяет длительность непрерывной работы объекта до возникновения отказа, после которого следует восстановление работоспособного состояния. Средняя наработка до отказа определяется

$$T_o = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_{pi}, \quad (2.1)$$

где $\sum_{i=1}^n t_{pi} = \theta_p$ – суммарное время безотказной работы (наработка) за рассматриваемый период времени эксплуатации; t_{pi} – наработка до i -го отказа (время работы между двумя отказами или между двумя периодами времени восстановления работоспособности), рис. 2.1.

Общая наработка, т. е. длительность работы за рассматриваемый период времени эксплуатации, определяется как

$$\theta = \theta_p + \theta_e = \sum t_{pi} + \sum t_{ei}.$$

Среднее время восстановления работоспособного состояния есть математическое ожидание времени восстановления работоспособного состояния машины после появления отказа, по причине которого машина остановилась или не способна выполнять свои функции в пределах заданных параметров:

$$T_B = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_{ei}, \quad (2.2)$$

где $\sum_{i=1}^n t_{ei} = \theta_e$ – суммарное время восстановления работоспособности за рассматриваемый период эксплуатации; n – общее число отказов за период наблюдений; i – порядковый номер отказа; t_{ei} – время восстановления работоспособности машины после i -го отказа.

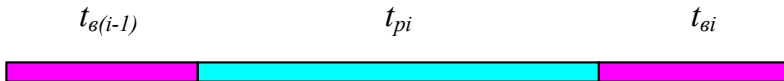


Рис. 2.1. Распределение времени безотказной работы (наработка) и времени восстановления работоспособности за рассматриваемый период времени эксплуатации технического объекта

2.2. Надежность и основные показатели надежности

Работоспособность как качественное состояние технического объекта, рассматриваемого во времени, определяет надежность машины. Надежность как свойство машины будет характеризовать возможность выполнять заданные функции в течение рассматриваемого времени эксплуатации, сохраняя эксплуатационные показатели в заданных пределах, установленных нормативно-технической документацией при существующей системе технического обслуживания и ремонта [32; 35]. Параметры надежности и работоспособности являются вероятностными параметрами. В общем случае вероятность многократного возникновения некоторого события A определяется как

$$P(A) = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{m}{n},$$

где n – общее число событий (выборок); m – число событий A , повторяющихся на множестве n событий.

Надежность машин – свойство, которое включает такие важные понятия, как безотказность и долговечность.

Безотказность – это свойство машины непрерывно сохранять работоспособность в течение рассматриваемого или наперед заданного периода времени, что вытекает из понятия «наработка до отказа». Основным показателем безотказности является вероятность безотказной работы машины. При этом безотказностью считается свойство машины непрерывно сохранять работоспособность в течение некоторого времени без вынужденных перерывов в работе, т. е. без отказов при заданных условиях эксплуатации, системы технического обслуживания и ремонта.

Для обеспечения и поддержания в процессе эксплуатации требуемой безотказности машин необходимо предпринимать, например, следующие меры:

- применение высоконадежных элементов с гарантированной безопасностью;
- оптимизация нагрузки элементов и стабилизация условий работы аппаратуры;

- применение структурной избыточности (резервирование) устройств и элементов и др.;
- упрощение структурных схем устройств и системы машин в целом.

К числу способов обеспечения заданного уровня надежности и работоспособности машины относится резервирование. Повышается безотказность машины, сохраняется её работоспособность при возникновении отказа одного или нескольких элементов в конструкции машины. Кроме того, существует так называемое функциональное резервирование, когда машина является многофункциональной, и другие виды резервирования [8].

Вероятность безотказной работы машины есть вероятность $P(t)$, являющаяся функцией надежности, при которой отказ машины не возникает в пределах заданной наработки на рассматриваемом интервале времени $t = T$. В соответствии с ГОСТ 27.002–89 [32] вероятность безотказной работы показывает вероятность того, что в пределах заданной наработки отказ машины не возникнет. Значение вероятности $P(t)$ равно не более 1: $0 \leq P(t) \leq 1$. Условие вероятности безотказной работы $P(t) = 1$ (условие идеальной машины по надежности) в процессе эксплуатации не может быть выполнено, это условие может быть отнесено только к начальному моменту времени работы $t = 0$. При $P(t) = 0$ наступает отказ, и машина становится неработоспособной при $t \rightarrow \infty$.

Для оценки опасности возникновения отказа работы машины служит параметр $F(t)$. Функция $F(t)$ есть функция распределения случайной величины, характеризует вероятность отказа машины (функция ненадежности и степени опасности появления отказа). Отображение функций по параметру времени $P(t)$ и $F(t)$ в графическом виде может быть представлено в виде графиков (рис. 2.2).

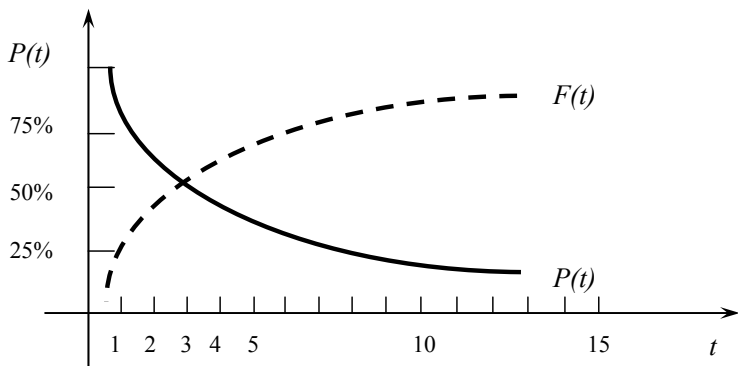


Рис. 2.2. Функция надежности $P(t)$ и функция распределения $F(t)$ случайной величины для экспоненциального распределения

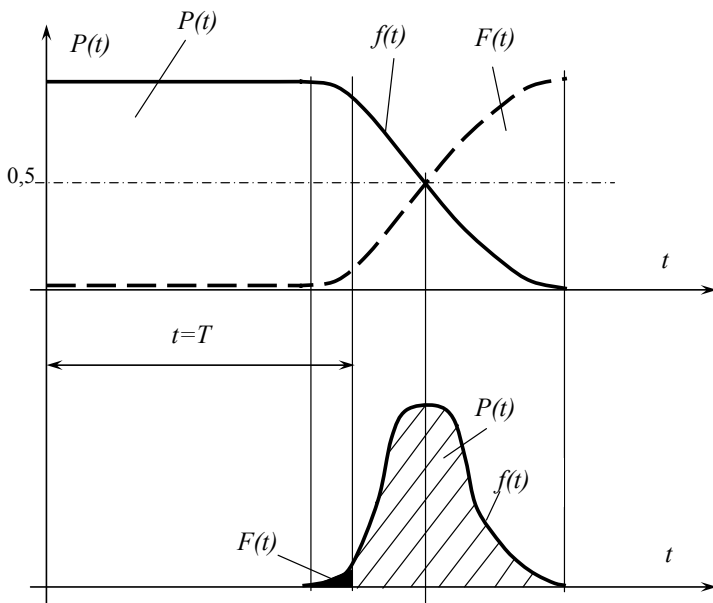


Рис. 2.3. Взаимосвязь функции надежности $P(t)$, функции распределения (ненадежности) $F(t)$ и функции плотности вероятности $f(t)$

Функции $P(t)$ и $F(t)$ связаны между собой соотношениями в виде следующих формул. Общая зависимость двух функций $P(t)$ и $F(t)$ характеризуется формулой

$$P(t) + F(t) = 1, \quad (2.3)$$

где $P(t)$ и $F(t)$ являются интегральными функциональными величинами при выполнении условия

$$F(t) = 1 - P(t) \rightarrow 0; \quad (2.4)$$

$$F(t) = \int_0^t f(t) dt, \quad (2.5)$$

где $f(t)$ есть плотность распределения наработки (рис. 2.3).

Тогда

$$P(t) = 1 - \int_0^t f(t) dt = \int_t^{\infty} f(t) dt. \quad (2.6)$$

В данной формуле выражение $f(t)dt$ будет характеризовать вероятность отказа за интервал времени $t, t + dt$ работы машины и плотность вероятности $f(t)$ связана с функциями $P(t)$ и $F(t)$ в формуле

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = -\frac{dP(t)}{dt}. \quad (2.7)$$

Таким образом, параметр $f(t)$, являющийся дифференциальной величиной, характеризует плотность вероятности. Также

$$P(t) = 1 - F(t) = 1 - \frac{r(t)}{N}, \quad (2.8)$$

где $r(t)$ — число узлов, механизмов в машине, потерявших работоспособность за наработку от 0 до t ; N — общее число узлов, механизмов, находящихся в работоспособном состоянии с начала работы машины за заданный промежуток времени работы.

Для высоконадежных машин вероятность безотказной работы по отношению к критическим отказам должна быть близка к единице. Вероятность наступления хотя бы одного критического отказа на заданном отрезке времени называют показателем риска или риском. Типичное значение риска составляет $P(t) = 10^6$.

При расчетах надежности используется параметр – интенсивность потока отказов $\lambda(t)$, который определяется при условии, что до рассматриваемого или заданного момента времени отказ не возник:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{1-F(t)} = \frac{f(t)}{P(t)} = -\frac{1}{P(t)} \frac{dP(t)}{dt}. \quad (2.9)$$

При определении $\lambda(t)$ рассматриваются только остающиеся работоспособными к моменту t узлы и механизмы машины, а отказавшие исключаются из рассмотрения. Интенсивность потока отказов $\lambda(t)$ – это условная плотность вероятности возникновения отказа машины при условии, что до этого момента времени отказ не возник.

Создание высоконадежных машин возможно за счет большой избыточности, т. е. при наличии запаса надежности, когда $P(t) \rightarrow 1$ [8]. Для высоконадежных машин $P(t) \approx 1$, тогда интенсивность отказов $\lambda(t)$ приближенно равна плотности распределения $f(t)$ наработки до отказа. В случае $P(t) \approx 1$ можно принять для функции надежности формулу

$$P(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt}. \quad (2.10)$$

При $\lambda(t) = \text{const}$ получаем

$$P(t) = e^{-\lambda t}. \quad (2.11)$$

Характеристикой безотказности может служить параметр потока отказов ω , который может быть рассмотрен как среднее число отказов $d\Omega(t)$ в интервале времени от 0 до t

$$\omega = \frac{d\Omega(t)}{dt} = \frac{1}{T_m}, \quad (2.12)$$

где T_m – среднее значение или математическое ожидание наработок до отказа. Параметр потока отказов ω будет характеризовать среднее число отказов машины в единицу времени.

К показателям безотказной работы относят также квантили безотказной наработки – значения наработки из условия заданной вероятности безотказной работы. Значение вероятности безотказной работы $P(t)$ машины можно определить,

если известен закон распределения наработки до отказа, который принимается как основной закон надежности

$$P(t) = \int_{t=T}^{\infty} f(t)dt,$$

где $t = T$ – заданный интервал времени в пределах наработки.

К показателям безотказности относится также параметр гамма-процентная наработка до отказа [23; 24]. В соответствии с ГОСТ 27.002–89 [32] гамма-процентная наработка есть наработка, в течение которой отказ машины не возникает с вероятностью γ , выраженной в процентах.

Назначение показателей надежности машины определяется требованиями заказчика, основывается на современных достижениях и перспективах развития машиностроения. Основные показатели предлагается нормировать [15]. Нормированию подлежат такие параметры, как вероятность безотказной работы $P(t)$ машины, интенсивность потока отказов $\lambda(t)$. Допустимое значение вероятности безотказной работы является мерой для оценки последствий отказа. При расчетах должны учитываться следующие факторы:

- 1) эффективность работы машины;
- 2) сохранение технических и эксплуатационных параметров и характеристик машины в заданных пределах в течение всего периода эксплуатации;
- 3) вредное влияние машины на окружающую среду, решение вопросов обеспечения производственной и техносферной безопасности в период эксплуатации.

2.3. Параметры долговечности машин

Долговечность – это свойство машины сохранять работоспособность до наступления предельного состояния, т. е. в течение всего периода эксплуатации при установленной системе технического обслуживания и ремонта [32; 35]. Важнейшим показателем долговечности является *технический ресурс* $R(t)$, который равен суммарной наработке за весь срок

работы машины от ввода в эксплуатацию до достижения предельного состояния её работоспособности и утилизации.

При оценке долговечности машины необходимо учитывать весь период ее эксплуатации до прекращения использования по назначению [17]. Предельное состояние машины, прекращение ее эксплуатации устанавливается рядом основных требований: экономическая целесообразность, моральное старение, повышенный физический износ. Физический износ машины приводит к возрастанию материальных и финансовых затрат и определяет целесообразность дальнейшей эксплуатации машины. Моральное старение машины вызывается тем, что ее потребительская стоимость становится низкой для данной отрасли промышленности. Замена устаревших машин новыми осуществляется с учетом экономических факторов и перспектив развития машиностроительной отрасли [17; 18; 29].

К числу основных показателей долговечности машины относят срок службы (общая наработка) T . Значение T взаимосвязано с предельно допустимой величиной выходного параметра $X = X_{\max}$ и случайными процессами потери работоспособности, например, износом, коррозией и т. д. Срок службы (наработка) до отказа при $t = T$ является случайной величиной и характеризуется соответствующим законом распределения, плотностью вероятности $f(t)$, математическим ожиданием, дисперсией

$$D = \sigma^2. \quad (2.13)$$

Если задается регламентированное значение вероятности безотказной работы $P(t)$, то соответствующий параметр T может быть принят в качестве неслучайной величины – гамма-процентного ресурса. Срок службы T_p в этом случае становится неслучайной величиной, исходя из условий, например из требований системы технического ремонта и технического обслуживания машины. Тогда после наступления периода работы $t = T_p$ машина должна ремонтироваться или быть принята к утилизации. Это означает, что при достижении предельного состояния или при приближении к нему машина должна быть отремонтирована или заменена новой.

Гамма-процентный ресурс $T_{p\gamma}$ представляет собой суммарную наработку, в течение которой машина не достигнет предельного состояния с заданной вероятностью γ , выраженной в процентах [30; 33]. Таким образом, гамма-процентный ресурс $T_{p\gamma}$ есть суммарная наработка, заданная до наступления предельного состояния машины с вероятностью $\gamma\%$, выраженной в процентах. Параметр $T_{p\gamma}$ измеряется в часах [23; 24].

Для ремонтируемого класса машин считается, что выбор показателей безотказности с регламентированной вероятностью безотказной работы и заданием гамма-процентного ресурса применяется при наложении повышенных требований к обеспечению надежности машины [17; 18]. В этом случае задается допустимое значение вероятности безотказной работы

$$P(t) = \gamma\%, \quad (2.14)$$

которое будет задавать время работы машины – гамма-процентный ресурс $T_{p\gamma}$, соответствующее регламентированной вероятности безотказной работы. При $\gamma\% = 50\%$ получаем значение среднего ресурса $T_{50} = T_m$. Тогда гамма-процентный срок службы будет записан как $T_{сл.\gamma}$.

Если известна функция распределения ресурса, записанная как $F(T_{p\gamma})$, или срока службы $F(T_{p\gamma})$, то гамма-процентный ресурс $T_{p\gamma}$ или гамма-процентный срок службы $T_{p\gamma}$ можно определить по квантилю этого распределения, соответствующему заданной вероятности $\gamma\%$, по формулам

$$F(T_{p\gamma}) = 1 - \frac{\gamma}{100}, \quad (2.15)$$

$$F(T_{сл.\gamma}) = 1 - \frac{\gamma}{100},$$

а с учетом $P(t) = 1 - F(t)$ записывается

$$P(T_{p\gamma}) = \frac{\gamma}{100}, \quad (2.16)$$

$$P(T_{сл.\gamma}) = \frac{\gamma}{100}.$$

Функция $P(T_{p'})$ является обратной функции распределения ресурса $F(T_{p'})$ и ее тогда можно назвать кривой убыли ресурса (сроков службы).

При обычных требованиях к надежности, если отказ не приводит к тяжелым последствиям, связанным с ремонтом, можно задаваться ресурсом машины $t = T_p$ или сроком службы $t = T_{cl}$, например, исходя из условия проведения технического обслуживания или проведения плановых ремонтов. В этом случае ресурс T_p называется установленным ресурсом. Средний ресурс $T_{p,cp}$ определяется как математическое ожидание ресурса и измеряется в часах. Средний срок службы $T_{cl,cp}$ рассматривается как математическое ожидание и задается в единицах измерения — количество лет.

2.4. Основные законы вероятностного распределения

К числу основных характеристик изменения состояния надежности машины относятся законы вероятностного распределения [7; 17; 23; 36]. Закон вероятностного распределения определяет взаимосвязь между значениями случайных величин параметров надежности и изменениями их вероятностей. Основными признаками потери работоспособности являются отказы машины, которые носят случайный характер при закономерно имеющихся причинах, и, соответственно, вероятность появления отказов может быть описана различными законами вероятностного распределения. Функции распределения как времени непрерывной работы машины, так и длительности простоев в связи с отказом могут выражаться в дифференциальной форме в виде плотности вероятности $f(t)$ или в интегральной форме в виде функции распределения $F(t)$. Законы распределения будут являться полной характеристикой надежности машины, её механизмов и узлов. На основе законов распределения рассматривается вероятность безотказной работы как $P(t) = 1 - F(t)$ и средний срок службы

$$T_{cl,cp} = \int_0^{\infty} f(t)tdt = \int_0^{\infty} P(t)dt.$$

Для некоторой непрерывной случайной величины X параметр плотности вероятностного распределения $f(x)$ считается теоретическим дифференциальным законом распределения. Плотность вероятности $f(x)$ представляет собой предел отношения вероятности изменения величины параметра x в интервале $(x, x + \Delta x)$ к величине интервала Δx , который стремится к 0

$$f(x) = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{P(x < X < x + \Delta x)}{\Delta x}. \quad (2.17)$$

По формуле (2.17) параметр X будет характеризоваться некоторой областью возможных значений указанного интервала. Кривая, графически отображающая изображение плотности вероятности $f(x)$, будет называться теоретической кривой распределения. Площадь, ограниченная кривой распределения и осью абсцисс, равна единице для всей области возможных значений X : $\int_{-\infty}^{+\infty} f(x) dx = 1$. Единица измерения плотности вероятности $f(x)$ является обратной величиной единицы измерения величины параметра X .

Функция распределения $F(x)$ для непрерывных случайных величин x называется теоретическим интегральным законом распределения и связана с плотностью вероятности $f(x)$:

$$F(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) dx, \quad f(x) = \frac{dF(x)}{d(x)}. \quad (2.18)$$

Для решения задачи определения надежности требуется обосновать выбор закона распределения, который должен отражать действительную картину закономерности изменения параметров надежности. Существует большое разнообразие действующих законов распределения случайных величин, которые могут быть применены для решения задач надежности различных технических объектов, для проведения исследований.

К основным законам вероятностного распределения могут быть отнесены следующие: закон экспоненциального распределения, нормального распределения (Гаусса), законы распределения Вейбулла, Пуассона и др. [17].

Закон нормального распределения с симметричной схемой вероятностного распределения в ряде случаев рекомен-

дуются применять при выявлении параметров износа, в случаях появления постепенных отказов. Но чаще имеет место описание случайных процессов, соответствующих действию асимметричных законов распределения. Тогда могут быть применены логарифмически нормальное распределение, закон Вейбулла, гамма-распределение, распределение Релея. Данным законам соответствует, например, получение результатов испытаний механизмов и деталей машин на усталостную прочность [18]. В случаях возникновения внезапных отказов при действии на машину внешних факторов, приводящих к отказам независимо от состояния и длительности проведенной работы, применяются экспоненциальный и нормальный законы распределения.

2.5. Экспоненциальный закон распределения

Экспоненциальное распределение является статистической математической моделью (рис. 2.2), может быть рекомендовано для определения вероятности безотказной работы машины. Так, экспоненциальное распределение применяют для описания изменения таких параметров, как длительность непрерывной работы машины и её механизмов, наработка до отказа и время восстановления работоспособности, длительность устранения неполадок и др. При экспоненциальном распределении плотность вероятности $f(t)$ значений случайной величины описывается как

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad (2.19)$$

при $t > 0$, а вероятность безотказной работы формулой

$$P(t) = e^{-\lambda t}, \quad (2.20)$$

где t — значение случайной величины контролируемого временного параметра; e — основание натурального логарифма; λ — интенсивность (плотность) потока отказов, которая равна

$$\lambda = \frac{1}{T_m}, \quad (2.21)$$

где T_m — средняя наработка до отказа или время непрерывной

работы. Параметр потока отказов λ показывает вероятность возникновения отказа в единицу времени, т. е. среднее число отказов в единицу времени. Изменение параметра λ при этом будет соответствовать закону экспоненциального распределения.

Для случайного распределения параметров времени наработки до отказа или времени восстановления работоспособности функция распределения надежности запишется как $F(t) = 1 - e^{-\lambda t}$ при $x > 0$. Кривая функции распределения надежности $F(t)$ будет зеркально отображена на графике, тогда как $P(t) + F(t) = 1$, где вероятность безотказной работы $P(t) = e^{-\lambda t}$ и в интегральном выражении $P(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt}$. Применение закона экспоненциального распределения наиболее предпочтительно для описания возникновения внезапных отказов.

2.6. Нормальный закон распределения (распределение Гаусса)

Такие параметры, как контролируемые линейные размеры узлов и обрабатываемых деталей с заданными допусками и ограничениями по точности изготовления, параметры температуры, давления, показатели точности линейного или пространственного перемещения механизмов и узлов могут быть отнесены к случайным величинам, подчиняющимся закону нормального распределения (рис. 2.4).

Нормальное распределение является наиболее используемой математической моделью. С увеличением числа выборок наблюдений закон нормального распределения будет более точно отражать закономерности изменения исследуемых параметров.

Нормальному распределению соответствует симметричное распределение изменения исследуемого параметра, которому соответствуют: параметр m_x — математическое ожидание для параметра x ;

$$\sigma = \sqrt{D_x} \tag{2.22}$$

— среднее квадратичное отклонение случайной величины x .

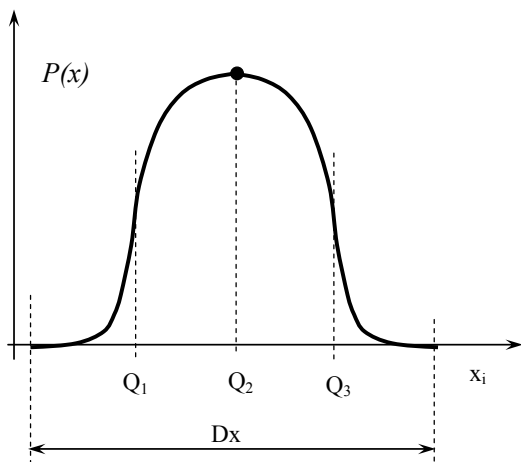


Рис. 2.4. Функция надежности $P(x)$ характеризует вероятность случайного изменения значений исследуемого параметра по закону нормального распределения: \bar{x} – мода; Q_1, Q_2, Q_3 – переходные точки – квантили распределения; D_x – дисперсия случайного распределения параметра x_i

Плотность вероятности по закону нормального распределения для переменного параметра x составит

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-m_x)^2}{2\sigma^2}}, \quad (2.23)$$

где m_x – среднее значение или математическое ожидание параметра x с центром распределения параметра x , $x_{cp} = m_x$; σ – среднее квадратичное отклонение величины x ; $\sigma^2 = D_x$ характеризует дисперсию при условии $0 < x < \infty$, $0 < m_x < \infty$, $\sigma > 0$.

Тогда функция нормального распределения

$$F(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{(x-m_x)^2}{2\sigma^2}} dx. \quad (2.24)$$

Для временного переменного параметра t с математическим ожиданием T_m плотность вероятности $f(t)$ по закону нормального распределения запишется

$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-T_m)^2}{2\sigma^2}}. \quad (2.25)$$

При нахождении плотности вероятности распределения $f(x)$ значений случайной величины x при нормальном распределении воспользуемся формулой

$$f(x) = \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x_i - m_x)^2}{2\sigma_x^2}}, \quad (2.26)$$

где m_x – математическое ожидание случайной величины x ;

$$m_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i; \quad (2.27)$$

σ_x – среднеквадратичное отклонение как мера рассеяния случайной величины;

$$\sigma_x = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - m_x)^2; \quad (2.28)$$

n – общее число проведенных измерений.

Для закона нормального распределения (рис. 2.4) рассеяние (величина разброса) значений параметра при случайном распределении есть дисперсия $D = \sigma_x^2$.

Существует ряд параметров, которые характеризуют закономерности изменения и состояния кривой для закона нормального распределения. К числу наиболее важных параметров относятся мода, медиана. Значение x_m , для которого имеем максимальную повторяемость распределения, будет определяться модой \bar{x} или $Mo(x)$. Мода $Mo(x)$ показывает центр на графике вероятностного распределения.

Относительно центра распределения имеем изменение дисперсии влево и вправо (рис. 2.4). Для дискретных случайных величин мода характеризует наибольшее значение вероятности распределения. В то время как модой $Mo(x)$ для непрерывных случайных величин будет являться число x_m , которому соответствует наибольшее значение плотности вероятности $f(x)$. Распределения с одной модой называются унимодальными, распределения с несколькими модами – мультимодальными. Также можно сказать, что мода будет выявлять наибольшее вероятностное значение величины x .

Медиана $Me(x)$ для параметра x определяет случайную величину, которая показывает, что сумма вероятностей значений параметра x (или интеграл плотности вероятности для непрерывных величин), меньших $Me(x)$, будет равна сумме вероятностей (или интеграл плотности вероятности), больших $Me(x)$, что означает:

$$\int_{-\infty}^{Me(x)} f(x)dx = \int_{Me(x)}^{\infty} f(x)dx = \frac{1}{2}. \quad (2.29)$$

При симметричных законах распределения мода $Mo(x)$ и медиана $Me(x)$ совпадают по своим значениям.

2.7. Ряд важных дополнительных законов вероятностного распределения

Помимо законов экспоненциального и нормального распределений широко распространено применение следующих законов вероятностного распределения: логарифмическое нормальное распределение, распределение Вейбулла, распределение Релея, гамма-распределение и др.

Закон логарифмического нормального распределения. Этому закону следуют распределения случайных величин, логарифм которых распределяется в соответствии с нормальным распределением. Логарифмически нормальное распределение является асимметричным и определяется следующими параметрами: T_0 и σ_0 . Плотность вероятностного распределения для данного закона запишется

$$f(t) = \frac{1}{t\sigma_0\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln t - \ln T_0)^2}{2\sigma_0^2}}. \quad (2.30)$$

Закон распределения Вейбулла определяется параметрами T_0 и m , отличается большой универсальностью, плотность распределения

$$f(t) = \frac{m}{T_0} t^{m-1} e^{-\frac{t^m}{T_0}} \quad (2.31)$$

и вероятность безотказной работы

$$P(t) = e^{-\frac{t^m}{T_0}}. \quad (2.32)$$

Если принять $m = 1$, то данное распределение превращается в экспоненциальное, при $m > 1$ форма функции $f(t)$ изменяется от близкой к нормальному распределению до асимметричного, при $m < 1$ функция $f(t)$ близка к гиперболе.

Распределение Вейбулла может быть применено для определения значений усталостной прочности металла, пределов его упругости [3].

Распределение Пуассона применяется в теории надежности для выявления закономерностей появления внезапных отказов, рассматриваемых в сложных системах. Имеется в виду, что для n независимых испытаний при их большом количестве с малой вероятностью возникновения отклонений получаем

$$P_n(m) \approx \frac{\lambda^m}{m!} e^{-\lambda} \quad \text{при } m = 0, 1, 2, \dots, \quad (2.33)$$

где $\lambda = pn$. Для распределения Пуассона случайная величина контролируемого параметра принимает положительные целочисленные значения. Применение распределения возможно, если имеется большое число испытаний, где каждое испытание характеризуется малой величиной параметра воздействия, но при этом проявление закономерностей воздействия будет определяться не отдельным воздействием, а всей их совокупности [3].

Закон распределения Релея. Данное распределение получено из закона распределения Вейбулла при $m = 2$. Оно является асимметричным и удобно для описания распределения положительных случайных величин. Плотность вероятностного распределения описывается формулой

$$f(t) = \frac{1}{\sigma^2} e^{-\frac{t^2}{2\sigma^2}}, \quad (2.34)$$

вероятность безотказной работы

$$P(t) = e^{-\frac{t^2}{2\sigma^2}}. \quad (2.35)$$

Гамма-распределение имеет два положительных параметра λ и m . Если m – целое число, то такое распределение называ-

ют распределением Эрланга. Плотность вероятностного распределения

$$f(t) = \frac{\lambda^m t^{m-1}}{\Gamma(m)} e^{-\lambda t}, \quad (2.36)$$

где

$$\Gamma(m) = \int_{x=0}^{\infty} x^{m-1} e^{-x} dx. \quad (2.37)$$

2.8. Статистические модели отказов

В процессе прогнозирования надежности машины моделируют закономерности формирования закона вероятностного распределения и определяют показатели надежности. Моделирование проводится на построении модели отказов, которое с получением числовых характеристик позволяет описать вероятность распределения.

Полученные в результате обработки статистической информации параметры вероятностного распределения времени работы машины до отказа, выраженные в дифференциальной форме в виде плотности вероятности $f(t)$ или в интегральной форме в виде функции распределения $F(t)$, являются характеристиками надежности машины. Они позволяют определить вероятность безотказной работы $P(t) = 1 - F(t)$ для соответствующего заданного времени $t = T$, математическое ожидание во временном выражении

$$T_m = \int_0^{\infty} f(t)t dt = \int_0^{\infty} P(t) dt,$$

средний срок службы, среднюю наработку до отказа, дисперсию D , среднее квадратичное отклонение $\sigma = \sqrt{D}$, моду, медиану, характеристики асимметрии и другие числовые характеристики.

2.9. Модели формирования постепенных отказов

Функционирование машины в процессе эксплуатации приводит к изменению во времени параметра x (рис. 2.5) и появлению отказов. Отказ появляется в случае превышения

предельно допустимого значения параметра x_{\max} , что становится следствием потери надежности машиной по причине износа механизмов и узлов, потери точности обработки деталей в процессе функционирования.

По схеме (рис. 2.5) можно проследить основные этапы формирования закона распределения $F(x)$, $f(t)$ [17; 18]. Вначале при $t = 0$ можем получить рассеивание значений параметров x машины $f(x_0)$ с математическим ожиданием m_{x_0} .

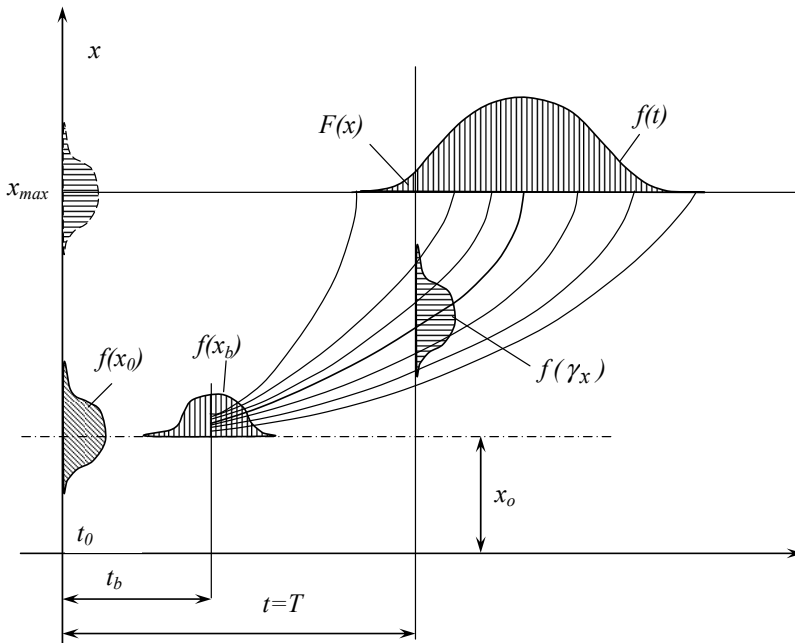


Рис. 2.5. Общая схема формирования отказа

Рассеивание начальных значений показателя x машины объясняется возможностью функционирования машины при различных режимах и в различных условиях эксплуатации, когда присутствуют вибрационные процессы, деформационные и другие, которые начинают проявляться, как только начинает функционировать машина. Затем изменение технического состояния машины в процессе эксплуатации связано с

влиянием медленно протекающих процессов, таких как износ, усталостная прочность, коррозия, нарушение режимов функционирования. Соответственно, возникает и процесс изменения параметра x через некоторый промежуток времени t_b .

Изменение параметра x происходит со скоростью γ_x с последующим изменением технического состояния машины, потерей точности и работоспособности. В результате чего выявляется полная динамика процессов изменения и формирования закона вероятностного распределения, который и будет характеризовать вероятность изменения параметра x и вероятность возникновения отказа с получением функций $f(x)$, $F(x)$, $P(x)$ [17; 18].

Процесс изменения параметра x начинается с первоначального периода эксплуатации $t = 0$, соответственно, получаем схему постепенного возникновения и появления отказа. Если при достижении x_{\max} будет происходить резкое возрастание x , то наблюдаем возникновение отказа функционирования. Если процесс возникновения отказа происходит с большой скоростью и интенсивностью, то получаем модель возникновения внезапного отказа.

2.10. Линейная модель параметрического отказа

Когда закономерность вероятностного рассеивания выходного параметра x описывается по закону нормального распределения, а изменение его во времени – по линейному закону, то получаем линейную модель параметрического отказа (рис. 2.6) [17; 18]. Это означает, что параметр x может иметь линейную зависимость по скорости изменения, т. е. $x = x_0 + \gamma_x t$, где x_0 – начальное значение параметра x ; γ_x – скорость изменения параметра при эксплуатации машины. Из этой формулы следует, что срок службы, наработка до отказа с изменением времени с достижением $t = T$ и значения параметра $x = x_{\max}$ будут записаны

$$T = \frac{x_{\max} - x}{\gamma_x}. \quad (2.38)$$

Значение T является функцией двух случайных параметров x и γ_x , которые при законе нормального распределения характеризуются математическим ожиданием (соответственно $x_0, \gamma_{x,cp}$) и средним квадратичным отклонением σ_0 и σ_x . Для каждого фиксированного значения $t = T$ параметр x будет рассмотрен по закону нормального распределения с такими характеристиками: математическое ожидание $m_x = x_0 + \gamma_{x,cp}t$, среднее квадратичное отклонение

$$\sigma = \sqrt{\sigma_0^2 + (\sigma_x t)^2}. \quad (2.39)$$

В этой модели нормальному распределению подчиняются начальное значение параметра x_0 и скорость изменения γ_x .

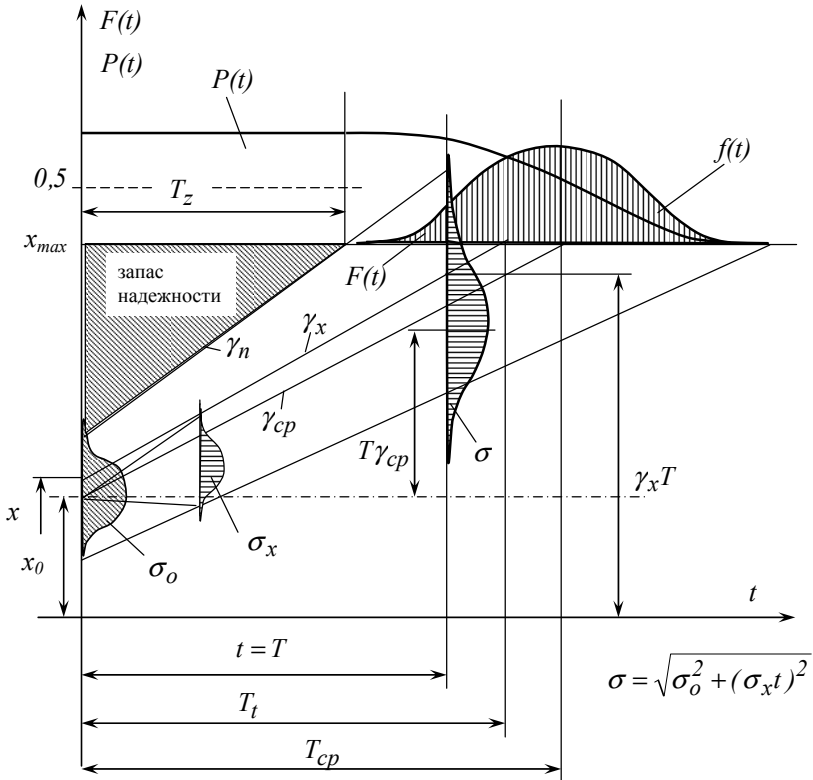


Рис. 2.6. Линейная модель параметрического отказа

Полученные зависимости для x_{cp} и σ представляют собой область линейного изменения параметра x в функции времени t , что позволяет получить характеристики линейной модели параметрической надежности машины.

Функция распределения $F(x)$ определяет вероятность времени выхода параметра x за пределы x_{max} с площадью интегрального распределения, ограниченной сверху кривой $f(x)$, снизу граничной линией x_{max} , а вероятность безотказной работы $P(x)$ показывает, что до значения $t = T$ машина находится в состоянии работоспособности, а после $t = T$ – в области нормального распределения при $f(x)$ и $P(x) \rightarrow 0$.

В случае

$$f(x) = -\frac{dP(x)}{dt} \quad (2.40)$$

изменение кривой $x(t)$ асимметрично, а показатель

$$T_{cp} = \frac{x_{max} - x}{\gamma_{x.cp}} \quad (2.41)$$

становится медианой. Параметр x_{max} характеризует предельно допустимое значение выходного параметра x , который определяется или задаётся техническими требованиями к машине; параметры x_0 и σ_a являются характеристиками распределения начальных параметров машины, которые зависят от качества изготовления машины и от возможного их изменения в процессе последующей эксплуатации.

2.11. Методы повышения надежности

На надежность технического объекта влияют условия эксплуатации, различные внешние факторы.

Технические: контроль технического состояния, анализ состояния узлов и механизмов.

Технологические: качество технического обслуживания и текущего ремонта; состояние технической документации для проведения обслуживания и ремонта; наличие технических регламентов, маршрутной технологии ликвидации неисправностей.

Организационные: состояние снабжения запасными частями, обучение персонала, меры по ликвидации простоев и аварий и др.

Социальные: обеспеченность кадрами, стаж и опыт работы по специальности, квалификация.

Оперативно-тактические: характер методов и принимаемых решений, оперативное планирование и контроль выполнения.

Стратегические: перспективное и стратегическое планирование.

Существуют различные методы повышения надежности технологического оборудования:

- 1) выбор рациональной конструкции механизмов и узлов;
- 2) уменьшение нагрузок на поверхностях трения, уменьшение количества трущихся пар;
- 3) принцип равномерного износа; уменьшение износа;
- 4) регламентация показателей износа из условия надежности (ограничение скорости изнашивания как скорость изменения значения параметра);
- 5) защита технологического оборудования от загрязнений, внешних отрицательных воздействий.

Для повышения надежности широко применяют различные методы резервирования:

- элементное и аппаратное резервирование, при котором в объекте наряду с основными элементами имеются резервные;
- временное резервирование, при котором предусматривается запас (резерв) времени на выполнение операции;
- информационное резервирование, когда при передаче и представлении информации используются добавочные (резервные, избыточные) информационные средства.

Основные пути повышения надежности технологического оборудования

1. Повышение сопротивляемости машин неблагоприятным условиям эксплуатации.

2. Защита машин от вредных воздействий внешней, окружающей производственной среды (загазованность, загрязнение, влияние температурных внешних воздействий).

3. Создание рациональной конструкции машины с ее оптимальными эксплуатационными свойствами.

4. Применение автоматики для повышения надежности (автоматика рассматривается как средство обеспечения качества и надежности).

5. Создание машин с регламентированными и нормированными показателями надежности, обеспечивающими устойчивое сохранение технического ресурса в процессе эксплуатации.

6. Разработка моделей изменения технического состояния и прогнозирование отказов технологического оборудования.

7. Разработка системы информации о надежности в процессе диагностирования и проведения мониторинга технического состояния.

8. Проведение стендовых испытаний на надежность высоконагруженных механизмов и узлов.

9. Организация эффективной системы технического ремонта и обслуживания.

10. Своевременное обеспечение и оснащение запчастями и комплектующими для проведения технического обслуживания и ремонта.

11. Применение резервирования, резервирование значительно повышает надежность системы, но и увеличивает ее стоимость.

12. Применение программных устройств управления, контроллеров и вычислительной техники.

13. Диагностика и прогнозирование работоспособности с применением автоматических средств диагностики.

Контрольные вопросы

1. Что относится к основным показателям работоспособности? Дайте определения и покажите на формулах применение данных показателей для определения работоспособности.

2. Какие параметры необходимо рассчитывать для определения надежности машин?
3. В чём заключается отличие в понятиях «работоспособность», «надежность», «долговечность»? В каких случаях необходимо определить надежность, работоспособность, долговечность машины?
4. Дайте определение долговечности. Какие параметры необходимо рассчитывать, чтобы определить долговечность машины?
5. Для какой цели служит применение законов вероятностного распределения? Назовите известные вам законы вероятностного распределения для решения задач определения надежности машин?
6. Запишите функцию и приведите график закона экспоненциального распределения. В каких случаях применяется экспоненциальное распределение при определении надежности машины?
7. Запишите функцию и приведите график закона нормального распределения. В каких случаях применяется нормальное распределение при решении задач определения параметров надежности?
8. Раскройте содержание понятий функции плотности вероятности $f(x)$, выраженной в дифференциальной форме, функции распределения $F(x)$, функции надежности или вероятности безотказной работы $P(t)$, выраженных в интегральной форме. Почему в первом случае мы говорим о дифференциальной форме, а во втором об интегральной форме функционального описания параметров?
9. Как вы объясните смысл рассеивания значений показателей машины? В каких случаях происходит или появляется рассеивание значений показателей?
10. Раскройте содержание понятий «мода», «медиана» при формировании графиков вероятностного распределения.
11. Дайте определение гамма-процентного ресурса для решения задачи определения надежности.

12. Что означают понятия «дисперсия» и «среднеквадратичное отклонение» при построении функции нормального распределения?
13. Что означает «математическое ожидание» для определения параметров надежности?
14. Покажите, каким образом необходимо осуществлять построение и применение модели формирования постепенных отказов функционирования машины.
15. Как осуществляется построение? Проведите описание линейной модели параметрического отказа машин. Укажите основные принципы формирования линейной модели параметрического отказа.
16. Назовите основные методы повышения надежности технологического оборудования, его механизмов и узлов.

Выводы

В данном разделе учебного пособия изложены основные положения и понятия теории надежности станков, показан расчет надежности машин и станочных систем машин машиностроительного автоматизированного оборудования.

Приведены основные оценочные характеристики и параметры работоспособности машин. На основе результатов статистических данных о полученных простоях и потерях работоспособности моделируется функция вероятностного изменения параметров надежности в соответствии с установленными законами вероятностного распределения функции надежности.

Работоспособность рассматривается как качественное состояние, а надежность как свойство машины выполнять заданные функции в процессе эксплуатации, сохраняя технико-эксплуатационные показатели в заданных пределах в соответствии с нормативно-технической документацией при существующей системе технического обслуживания и технического ремонта.

Основным показателем надежности является вероятность безотказной работы машины, т. е. сохранение работоспособности без вынужденных перерывов в работе и без отказов.

Формирование и назначение показателей надежности машины определяется требованиями, заложенными в технических условиях создаваемой машины, и основывается на современных достижениях и перспективах развития машиностроения.

Описание изменения технического состояния надежности осуществляется с применением законов вероятностного изменения параметров функционирования машины и её надежности. Имеется в виду, что закон вероятностного распределения задает взаимосвязь между значениями случайных величин параметров надежности и изменениями их вероятностей проявления. Соответственно, вероятность появления отказов как признаков потери работоспособности может быть описана заданным законом вероятностного распределения. Вероятностное распределение времени непрерывной работы и длительности простоев в связи с отказами могут выражаться как в дифференциальной форме в виде плотности вероятности $f(t)$, так и в интегральной форме в виде функций $F(t)$, $P(t)$. Таким образом, получаем, что законы вероятностного распределения обеспечивают полную характеристику надежности машины, её механизмов и узлов.

К основным законам вероятностного распределения при определении надежности машины могут быть отнесены следующие: законы экспоненциального и нормального распределения, законы распределения Вейбулла, Пуассона, законы логарифмического нормального распределения, гамма-распределения, Релея и др. В основе своей материалы раздела касаются вопросов надежности машин ремонтируемого класса, а также машин и систем машин автоматического действия. При этом влияние условий эксплуатации и состояния окружающей среды необходимо принимать во внимание при определении надежности и условий работы технологического оборудования.

3. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИАГНОСТИКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ И НАДЕЖНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

3.1. Назначение и цель технической диагностики для решения проблем повышения уровня технического состояния технологического оборудования

Прежде чем обеспечивать высокую надежность технологического оборудования, решаются многие проблемы проведения аналитических и экспериментальных исследований по выявлению и получению информационных данных процессов функционирования оборудования с достижением заданных технико-эксплуатационных характеристик [28; 29]. Техническая диагностика и прогнозирование уровня надежности создаваемого или находящегося в эксплуатации технологического оборудования являются наиболее ответственными этапами для достижения его высокой надежности [13; 14; 15; 19].

Собственно, техническая диагностика предопределяет основу системы получения и обработки информации о состоянии технологического оборудования, процессов его функционирования. В соответствии с принятой терминологией техническая диагностика есть область знаний, охватывающая теорию, методы и средства определения технического состояния машин. В ГОСТ 27518–87 [31] указывается, что целью диагностирования является поддержание установленного уровня надежности, обеспечение требований безопасности и эффективности использования изделий.

Задача диагностики – установление параметров, места их контроля и причин отклонений параметров от установленных значений в целях сохранения в устойчивом работоспособном состоянии автоматически действующей машины. В этой связи должны быть подготовлены программы на выполнение диагностирования, а также существовать программное обеспечение.

Проведение диагностических работ, получение непрерывной информации о контролируемых параметрах с помощью контрольных приборов позволит выявить закономерности проявления отказов и потери работоспособности машины и разработать систему профилактических мер [13; 14; 22]. Диагностика при этом связана с профилактикой машины и её узлов. Как диагностика, так и профилактика должны быть непрерывными.

Диагностирование неотделимо от процессов исследования надежности и работоспособности машин и последующего прогнозирования состояния событий. Этот процесс можно характеризовать как определение состояния машины для данного периода эксплуатации в связи с изменением или нарушением во времени технологических функций и физико-механических свойств, её механизмов и узлов. Диагностирование сопровождается и характеризуется непрерывным контролем параметров, выявлением причин возникновения отказов и потери работоспособности непосредственно в период эксплуатации, прогнозированием последующего состояния машины и выявлением закономерностей изменения параметров во времени [14; 16]. Диагностирование оценивает воздействие протекающих процессов на изменение технического состояния машины в период её эксплуатации; прогнозирует возможные последствия состояния оборудования, выбор путей и средств устранения вредных последствий. В этом случае диагностирование будет направлено на предупреждение и выявление причин потери работоспособности.

Техническая диагностика в условиях эксплуатации машины позволяет исследовать и изучать вопросы работоспособности, формы проявления отказов и методы их локализации, распознавания и прогнозирования скрытых дефектов без разборки технического объекта [13; 14].

Техническая диагностика проводится в следующих случаях:
– машина находится в одном из состояний: работоспособном или неработоспособном (в состоянии отказа);

- в технологическом оборудовании можно выделить узлы, механизмы, которые характеризуют одно из состояний (работоспособное или неработоспособное);
- из числа технико-эксплуатационных параметров машины можно выделить и проконтролировать конкретные параметры $\{p_n\}$ и их значения.

В процессе технического диагностирования осуществляется непрерывный контроль технического состояния и параметров машины. По ГОСТ 20911–89 [33] во время контроля технического состояния выполняется проверка соответствия значений контролируемых параметров машины требованиям технико-эксплуатационной документации. В результате проведения контроля и выполнения диагностирования осуществляется поиск места и определение причин отказа и появления неисправностей. Результаты диагностирования используются для прогнозирования технического состояния машины и её поведения в последующие периоды эксплуатации.

Достоверность диагностирования во многом зависит от технического состояния автоматических контрольных устройств, датчиков, приборов, от возможности использования устройств и приборов не только для диагностирования, но и для мониторинга [22; 31; 32; 38; 39; 40]. В процессе эксплуатации машины возникает возможность осуществления основного объема диагностических операций по замерам, работе и техническому состоянию узлов и механизмов, условиям работы. Основными объектами диагностирования становятся наиболее нагруженные узлы и механизмы, работающие в сложных и тяжёлых условиях применения, при повышенных температурах, химическом и электрическом воздействии, неудовлетворительных условиях доступности к обслуживанию, смазке. К таким узлам могут быть отнесены наиболее подвижные и высокоскоростные механизмы и узлы, установки, пневмо- и гидроаппаратура, автоматическая аппаратура и системы управления.

Диагностирование машины сопровождается совокупностью проверок и снятия тестов взаимосвязанных параметров,

для которых установлены пределы допустимых отклонений. Программное обеспечение предусматривает наличие встроенных диагностических тестов для выявления места отказа. Проведение диагностических тестов с возможностью мониторинга составляет основу получения достоверной информации, необходимой для определения места отказа и отказавшего элемента [35; 38; 39; 40].

Автоматический контроль и диагностирование включают обнаружение и устранение отказов, систематическое наблюдение за работой механизмов и узлов. Выполняется непрерывная фотография работы машины, проводится хронометраж простоев и статистика отказов [14]. В период фотографии времени работы машины учитываются и фиксируются все виды и причины простоев, время простоев и устранения причин простоев и неполадок [2; 14]. Учитывают простои как по техническим, так и не по техническим причинам. Результаты диагностирования или автоматически регистрируются, или заносятся в карту наблюдений. Затем следует статистическая обработка результатов диагностирования и разрабатываются меры по обеспечению надежности и работоспособности машины, выявляются резервы повышения ресурса и её надежности.

Контроль работоспособности объекта осуществляется с выполнением требуемого числа и частоты контрольных проверок [14; 16; 22]. Каждая проверка дает информацию о значении контролируемых параметров машины с получением положительного результата, если значение контролируемого параметра находится в зоне допуска, и отрицательного, если значение контролируемого параметра находится за пределами допуска. Машина будет считаться работоспособной, если в процессе диагностирования полученные значения показателей в заданной последовательности имеют положительные результаты. Необходимая степень детализации и качества диагностирования определяется требованиями, предъявляемыми к технико-эксплуатационным параметрам машины [13; 21].

Диагностирование применяется в практике управления техническим состоянием машины, регистрации и записи из-

менений параметров машины и её узлов, получаемых непрерывно в процессе эксплуатации [26]. Это позволит выявить не только текущее состояние параметров, но и определить тенденции их изменения во времени. Анализируя значения параметров, можно выявлять изменение параметров и времени нахождения их в допустимых пределах. На основе чего принимаются меры, направленные на предотвращение потери работоспособного состояния машины, что, в свою очередь, приведет к предотвращению поломок, возникновения аварий, грубых нарушений эксплуатации техники. В процессе диагностирования можно следить за скоростью изменения и ухудшения значений контролируемых параметров и осуществлять прогнозирование, контролировать остаточный технический ресурс. Прогнозирование работоспособности на основе диагностирования решает задачу диагноза технического состояния машины и дальнейшего изменения надежности узлов и механизмов.

3.2. Организация диагностирования и оценка технического состояния машины

Только правильно организованный процесс диагностирования может обеспечить высокий уровень работоспособности машины. Выполняя диагностирование, формируют область технического состояния и устанавливают фактический уровень надежности машины.

Техническое состояние для каждого выходного параметра формируется как область, в которой находятся все его значения для принятых условий и режимов работы машины. Изменение области состояния происходит с течением времени и зависит от процессов старения, износа, условий и режимов эксплуатации машины. В этой связи закон вероятностного распределения $F(x)$ будет характеризовать вероятность нахождения в заданной точке значений x . Область состояний определяется не только значениями параметров, но и вероятностными характеристиками: математическим ожиданием,

дисперсией, коэффициентом асимметрии, а полной характеристикой становится функция закона распределения $F(x)$.

Для оценки технического состояния машины в период диагностирования определяются значения установленных выходных параметров для различных условий эксплуатации и проведения расчетов на основе показателей существующего уровня надежности машины [33; 41]. При эксплуатации машины показатели будут изменяться, и вторым этапом оценки надежности становится проведение прогнозирования изменения области состояний выходных параметров машины под влиянием ожидаемых процессов старения.

Для проведения диагностирования назначают совокупность контрольно-диагностических операций [22]. Может быть предложена система технического диагностирования, которая включает технические средства – ТСД, алгоритм диагностирования, т. е. совокупность предписаний о проведении диагностирования, выбор метода диагностирования – функциональный или тестовый (ГОСТ 20911–75) [22; 33].

При проведении диагностирования могут быть использованы аналитические и графоаналитические исследования функционирования узлов и механизмов, включая разработку системы дифференциальных уравнений и передаточных функций, связывающих входные и выходные параметры и функционирование [14; 16]. В процессе диагностирования могут решаться следующие задачи: разработка и анализ функциональных и структурных схем, построение математической модели функционирования машины с привлечением программных продуктов, выбор и назначение диагностических параметров и контрольных точек, минимизация тестов и оптимизация процедур поиска и локализации неисправностей, прогнозирование будущего состояния диагностируемых объектов, выявление условий, определяющих целесообразность восстановления работоспособности узлов и механизмов машины путем замены и ремонта узлов и механизмов.

Диагностирование проводится с полным изучением объектов диагностики, уточнением критериев работоспособ-

ности, диагностических параметров и контрольных точек на основе разработанной методики диагностирования и алгоритмов построения программ.

Методики диагностирования должны содержать разработанные методы и алгоритмы проведения исследований, включая документацию. Документация по проведению диагностирования подразделяется на организационную и технологическую [14; 16]. Организационная документация содержит описание методов проведения диагностирования с указанием периодичности, последовательности выполнения работ, а также основные положения организации работ, нормативы, указания по технике безопасности и производственной санитарии, формы планирования и учета выполняемых работ, в том числе диагностические карты.

Технологическая документация включает перечень и описание операции по проведению работ, технических средств диагностирования, очередность выполнения работ, технические условия и требования к выполнению операций.

В заключении о техническом состоянии указывается остаточный технический ресурс состояния машины, определяются этапы проведения последующих работ по техническому обслуживанию и ремонту. Результат диагностирования должен удовлетворять следующему условию: отражать изменения показателей, определяющих надежность, работоспособность и долговечность машины в будущем, т. е. в последующий период эксплуатации.

Автоматический контроль в процессе диагностирования предполагает осуществление совокупности операций контроля и проверок в заданной последовательности выполнения [13; 14].

Диагностирование в зависимости от организации обслуживания и ремонта технических объектов, а также технологического назначения подразделяют на специализированное и совмещенное. В этом случае диагностирование становится частью единой системы технического обслуживания (ТО) и технического ремонта (ТР) и служит средством получения

информации о техническом состоянии для принятия мер планирования ТО и ТР [6].

Метод специализированного диагностирования для решения задач проведения ТО и ТР предусматривает управление технологическими процессами ТО и ТР. Его проводят преимущественно для контроля технического состояния машины и её механизмов по отдельным обобщенным критериям и параметрам.

Метод совмещенного диагностирования предусматривает проведение всестороннего диагностирования, включая углубленный контроль качества состояния машины и узлов [14; 16]. Тогда технические средства и оборудование для диагностирования размещают непосредственно на контрольных участках или в боксах проведения ТО и ТР.

Анализ схем ТО и ТР (рис. 3.1) позволяет выявить следующие закономерности в организации диагностирования с возможностью проведения ТО и ТР.

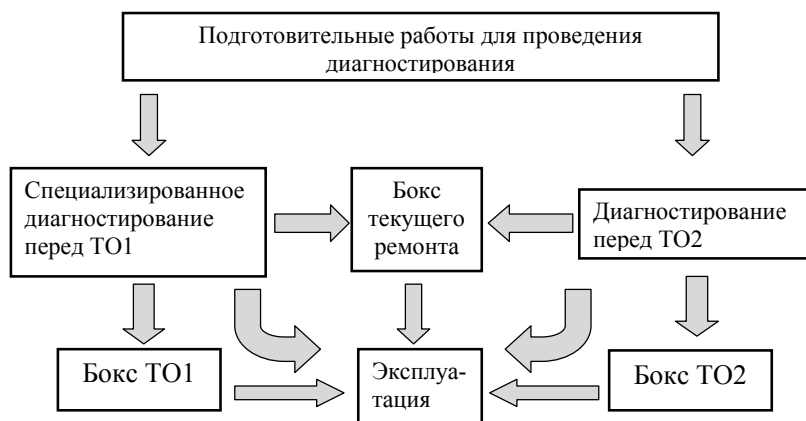


Рис. 3.1. Структурная схема организации диагностирования, технического обслуживания и текущего ремонта

В процессе выполнения диагностических работ помимо выявления значений параметров работоспособности и надежности для достижения и обеспечения высокого уровня качественного состояния и функционирования механизмов и узлов машины предпринимается контроль технико-эксплуатационных параметров. Могут измеряться следующие параметры в процессе контрольных испытаний и диагностирования:

- путь, скорость, ускорение ведомых и ведущих звеньев механизма или привода;
- конечные положения звеньев механизмов, разброс их положения, позиционирования;
- неравномерность вращения или поступательного перемещения звеньев механизмов;
- усилия и моменты, действующие на звенья механизмов и привода;
- давление в гидро- и пневмосистеме;
- мощность, потребляемая электродвигателями;
- момент времени подачи команд включения аппаратов, муфт и приборов;
- время начала и конца работы механизмов (по циклограмме);
- температура и области изменения температурного поля;
- параметры жесткости и упругих деформаций отдельных звеньев механизмов;
- уровень шума и вибраций при работе механизмов;
- срабатывание и плавность перемещения золотников, соленоидов и устройств системы управления;
- узлы поворота и точности кулачковых, цевочных, поворотных-фиксирующих механизмов.

При проведении диагностирования и оценке контролируемых параметров возможен дифференцированный метод определения состояния машин с учетом технических и эксплуатационных данных, режимов функционирования, степени влияния технико-эксплуатационных параметров на работоспособность и надежность. В результате диагностических работ подготавливается информация для проведения экономи-

ческих расчетов о затратах на выполнение профилактических и ремонтных работ, технического обслуживания.

При выполнении экономических расчетов учитываются следующие критерии: производительность, вероятность безотказной работы, суммарная наработка, параметры точности, качественные и технико-эксплуатационные характеристики.

При проведении расчетов параметров в процессе диагностирования надежности доступными становятся методы определения износостойкости и прочности, методы исследования интенсивности изнашивания, изучения формы и микрошлифов изношенных поверхностей, усталостной прочности, условий смазки в подвижных соединениях. Диагностирование позволяет осуществлять с применением приборов хронометрирование времени работы и простоев, затрат времени на восстановление работоспособности, определение причин отказов и другие работы на рассматриваемом промежутке времени проведения исследований.

3.3. Диагностирование технического состояния узлов и механизмов машины. Проведение испытаний

Испытание машин является сложной технической и организационной задачей. Диагностирование можно осуществлять при проведении испытаний [13; 14; 16; 19]. Существует несколько методов проведения испытаний. Основными являются стендовые, полигонные, эксплуатационные методы.

Методы проведения стендовых испытаний обеспечивают непрерывный и постоянный контроль параметров и наблюдение за техническим состоянием машины на специализированных стендах с применением технических средств диагностики [13; 14]. В процессе испытаний оцениваются потери работоспособности и надежности машины, работоспособности её узлов и механизмов, что позволяет получать данные о надежности и долговечности машины. На специальных и специализированных стендах можно испытывать как отдельные узлы и механизмы, так и машину в целом. При

испытаниях на стендах необходимо, чтобы режимы и условия испытаний в наибольшей степени соответствовали эксплуатационным. Стендовые испытания продолжаются до тех пор, пока не возникнет отказ.

Полигонные испытания. При испытаниях стремятся создавать наиболее тяжелые условия эксплуатации, чтобы проверить работоспособность всех узлов и механизмов в критических условиях применения и эксплуатации машины. Для испытания подготавливаются специальные полигонные и производственные площадки, допускающие проведение испытаний машин при экстремальных режимах и условиях нагружения.

Эксплуатационные испытания осуществляются в процессе эксплуатации, проверок функционирования машины.

Проведение диагностирования в процессе эксплуатации представляет, как правило, основной объем работ для решения задач контроля и обеспечения надежности и работоспособности машин. Но для выполнения полных работ по обеспечению надежности предусматриваются стендовые испытания механизмов и узлов машин.

Стендовым испытаниям подвергаются те узлы, механизмы машины, к которым предъявляются наиболее высокие требования по надежности. На стенде должны быть воспроизведены условия, отражающие работу узлов и механизмов в эксплуатации. Поэтому помимо основного силового нагружения узла предусматривается во многих случаях наложение дополнительного влияния температур, высоких давлений, действия вибраций, различных сред.

Предпочтительно, чтобы в испытательных стендах и машинах применялось нагружение, при котором спектр нагрузок мог бы задаваться и контролироваться по установленной программе.

Рассмотрим схемы отдельных стендов для испытания на надежность: стендовые испытания деталей и механизмов с применением валов и подшипников качения (рис. 3.2), испытания зубчатых передач (рис. 3.3).

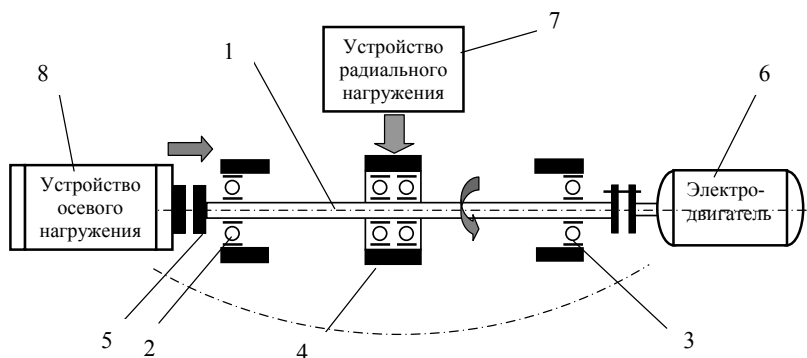


Рис. 3.2. Схема стендового испытания механизмов с применением валов, с радиальным и осевым силовым нагружением: 1 – вал с подшипниковыми опорами, подвергаемый радиальному и осевому силовому нагружению; 2, 3 – подшипниковые опоры с подшипниками качения; 4 – нагрузочная опора радиального нагружения; 5 – нагрузочная опора осевого нагружения; 6 – электродвигатель; 7 – устройство радиального нагружения; 8 – устройство осевого нагружения

На рис. 3.2 вал 1 на подшипниковых опорах 2, 3 получает вращающий момент от электродвигателя 6. При вращении вал 1 нагружается в радиальном направлении с помощью устройства радиального нагружения 7 через нагрузочную опору 4 и в осевом направлении устройством осевого нагружения 8 через нагрузочную опору 5 с противомomentом по отношению к вращающему моменту от электродвигателя 6. Усилия передаются через нагрузочную опору радиального нагружения 4 и опору осевого нагружения 5. При этом происходит упругая деформация вала в виде прогиба с изгибающим моментом относительно подшипниковых опор 2, 3 и скручивание вала 1 относительно его оси.

На стенде (рис. 3.3) происходит проверка прочности на изгиб и срез зубьев шестерен 1, 2, 3, 4 зубчатых передач. Устройство осевого нагружения 8 создает противомoment по отношению к вращающему моменту на валу электродвигателя 9, образуя нагрузочные изгибающие и контактные напряжения в местах зацепления зубьев шестерен.

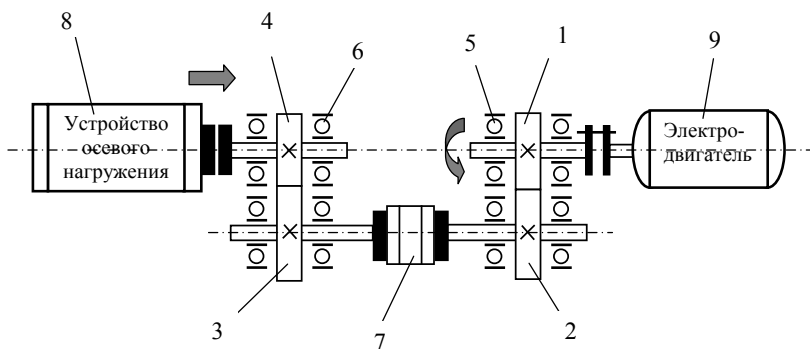


Рис. 3.3. Схема стенового испытания зубчатых передач:

- 1, 2, 3, 4 – зубчатые колеса, подвергаемые испытанию;
 5, 6 – подшипники качения; 7 – фланцевая муфта;
 8 – устройство осевого нагружения; 9 – электродвигатель

Стенды широко применяются для испытания и диагностирования узлов и механизмов промышленного оборудования. Классификация стендов для испытания и диагностирования может включать основные их виды [5; 14; 21; 22].

1. Общий стенд испытания машины по параметрам узлов главного движения и движений подачи.
2. Стенд диагностирования системы смазки.
3. Стенд контроля мощности, усилий и режимов обработки, потери мощности, контроля КПД.
4. Стенд контроля параметров частоты вращения валов, скорости, расхода электроэнергии.
5. Стенд контроля давления и состояния пневмо- и гидроаппаратуры, агрегатов.
6. Стенд диагностирования электроприводов.
7. Стенд контроля геометрической точности механизмов и узлов.
8. Стенд контроля износа и потери точности, контроля усталостной прочности деталей, механизмов и узлов машины.
9. Стенд контроля жесткости конструкции узлов и механизмов, контроля упругих деформаций.
10. Стенд контроля вибрационных и колебательных процессов, влияния динамических нагрузок.

11. Стенд контроля электрооборудования, системы сигнализации и электропитания.
12. Стенд контроля системы электроизоляции, электромонтажа, контроля параметров обеспечения пожаровзрывобезопасности, контроля состояния окружающей среды.

По признакам изготовления и применения стенды подразделяются на следующие виды.

1. Стенды промышленного изготовления для исследования отдельных узлов, механизмов, контроля работы блоков аппаратуры, контроля работы электронных элементов в системе управления. Как правило, такие стенды являются универсальными.

2. Специализированные стенды на основе применения специальных микропроцессорных устройств и систем программного управления.

3. Специально изготавливаемые стенды для контроля выборочных или специальных параметров машины. Чаще такие стенды являются уникальными.

Обычно стендовому контролю, испытанию и проверкам подвергаются наименее надежные и работоспособные блоки, а также наиболее нагруженные и высокоточные. Иногда стенды применяют и для выявления дополнительных резервов повышения работоспособности машины и её узлов для совершенствования и повышения значения качественных характеристик.

При разработке методики диагностирования на основе стендовых испытаний предусматривают опробование и применение различных методов измерения, датчиков и аппаратуры [14; 16; 30]. Наиболее перспективными являются стенды с регистрацией и обработкой результатов с помощью вычислительной техники, с адаптивными системами и автоматическим регулированием и контролем параметров.

Существуют стендовые испытания и исследования на основе применения контроля работы механизмов и узлов с увеличенными нагрузками, контроля теплостойкости и кон-

троля измерений температуры в процессе нагружения узлов с превышением нагрузок.

Для механических передач исследуются интенсивность изнашивания деталей и механизмов, вибрационные и колебательные процессы, упругие деформации на основе увеличения интенсивности и режимов функционирования машины.

Исследуются условия проведения испытаний на стендах с возможностью осуществления автоматической диагностики. В процессе эксплуатации предусматривается выполнение ускоренных испытаний. Кроме того, проводятся испытания на безотказность, ремонтпригодность, сохраняемость и долговечность. Испытания машины на безотказность сводятся к контролю вероятности безотказной работы за заданное время, определяется наработка на отказ. Испытания на ремонтпригодность обычно проводятся для определения среднего времени восстановления или вероятности восстановления работоспособности объекта за заданное время. Испытания на долговечность осуществляются для контроля остаточного технического ресурса. Испытания на сохраняемость предусматриваются для контроля вероятности сохранения показателей машины в течение заданного срока.

3.4. Методы контроля, приборы для диагностирования

Наряду с рассматриваемыми техническими средствами диагностирования существуют средства оценки состояния работоспособности машины [14; 22; 30]. Средства диагностирования, приборы для выполнения технического контроля и диагностирования должны соответствовать используемым методам диагностирования [14].

Технический контроль, применяемый при диагностировании, определяется как проверка соответствия технических объектов или процессов установленным техническим требованиям [30]. Технический контроль и диагностика, как правило, осуществляются в два этапа.

- 1) получение информации о фактическом состоянии технического объекта, его параметров;
- 2) сопоставление этой информации с заранее заданными документально установленными значениями параметров и определение значения рассогласования.

Качество результатов в процессе проведения диагностики прежде всего зависит от результатов контроля и испытаний, от контрольной аппаратуры [6; 13; 16; 22; 30]. Для измерения применяются измерительные приборы и аппаратура. Понимается, что *измерительный прибор* есть средство измерения, которое предназначено для получения измерительной информации на основе контроля входного сигнала и преобразования его в выходной сигнал. По способу выдачи и получения информации измерительные приборы подразделяются на показывающие и регистрирующие, а по своему применению и использованию – на образцовые (эталонные) и рабочие.

К числу нормируемых метрологических характеристик измерительных приборов относятся следующие:

- пределы измерения;
- нормы точности измерения, к ним относятся погрешность измерения, чувствительность, стабильность, динамические характеристики;
- методы контроля и испытаний.

Количественной характеристикой качества диагностики может служить коэффициент достоверности контрольных приборов

$$B = \frac{P_{исп}}{P_{дон}}, \quad (3.1)$$

где $P_{исп}$ – вероятность исправности аппаратуры; $P_{дон}$ – вероятность разрешения аппаратуры (допуск) для тестирования или проведения контроля.

Целесообразность контроля $K_{ук}$ зависит как от качества контроля B , так и достоверности исправного состояния контрольного прибора

$$K_{ук} = \frac{B}{B_{ок}}, \quad (3.2)$$

где $B_{ок}$ – коэффициент, характеризующий достоверность исправного состояния аппаратуры без контроля. При $K_{цк} > 1$ контроль целесообразен, при $K_{цк} < 1$ контроль нецелесообразен.

Для оценки технического состояния машины в процессе диагностирования используют несколько методов проведения контроля.

1. Метод проверки работоспособности машины по внешним признакам.

2. Метод контроля с помощью контрольно-измерительной аппаратуры.

3. Метод прогноза по результатам диагностирования и проведения мониторинга.

4. Метод предсказания по характерным признакам, заключающимся в том, что контроль одного узла или механизма определяется путем сравнения возникшей неисправности со списком неисправностей по технической документации и рекомендациям проверки и контроля отказавшей аппаратуры.

5. Метод последовательной поэлементной проверки. Обнаруживается отказавший элемент и осуществляется проверка элементов машины до полного восстановления или замены изношенных элементов.

3.5. Проведение диагностирования по видам технического контроля, по назначению и применению

Расширение возможностей методов диагностирования может достигаться на основе применения различных видов технического контроля [14; 30].

Классификация видов технического контроля по назначению и применению для проведения диагностирования проводится на основе следующих признаков.

1. По виду решаемой задачи:

- контроль функционирования машины как технического объекта;
- контроль работоспособности машины;

- диагностический контроль для определения мест отказа или потери работоспособности машины;
- контроль процесса прогнозирования технического состояния машины;
- профилактический контроль, осуществляется с целью обнаружения и замены элементов, параметры которых близки к предельно допустимым значениям.

2. По виду оценки результата:

- допускной контроль, контроль параметров в пределах допуска (годен – не годен, меньше – больше);
- количественный контроль, определяет абсолютное и относительное отклонение от номинала.

3. По степени использования внешних воздействий:

- пассивный контроль без внешних воздействий процессов контроля на объект контроля;
- активный контроль.

4. По порядку выполнения контроля и анализа параметров:

- выборочный;
- последовательный, поочередный контроль нескольких контролируемых параметров;
- параллельный;
- параллельно-последовательный.

5. По времени проведения:

- непрерывный контроль параметров в процессе работы машины;
- циклический контроль, выполняемый через интервалы времени в процессе работы машины;
- периодический контроль, повторяющийся через определенные периоды времени в течение заданного контролируемого срока или периода диагностирования.

6. По виду полученной и обрабатываемой информации:

- дискретный, контроль дискретных сигналов;
- непрерывный, контроль аналоговых сигналов;
- непрерывно-дискретный.

7. По уровню автоматизации и управления:

- ручной;

- дистанционный;
- автоматизированный;
- автоматический.

8. По организации проведения:

- программный, с применением специальных программ и тестированием;
- локальный, контроль параметров на месте размещения машины;
- централизованный, осуществляется с центрального пульта управления по заданной программе.

9. По виду режима контроля:

- динамический, контроль параметров машины по переходным режимам изменения, в процессе работы машины и изменения параметров;
- статический, контроль в установившемся, статическом режиме состояния машины.

3.6. Технические средства диагностирования

Для получения необходимой информации о показателях, характеризующих техническое состояние машины, для принятия решения и последующего прогнозирования служат *технические средства диагностирования (ТСД)*. Под ТСД понимаем совокупность аппаратных, технических средств, объединенных единством решения задач технической диагностики с заданной точностью и достоверностью [14; 16; 22; 30].

ТСД предназначены для решения первой группы задач: для проведения измерений, качественной и количественной оценки действительного состояния машины. Входная информация в виде совокупности показателей, по которым определяется состояние объекта, поступает от различного рода приборов и датчиков.

Вторую группу составляют задачи тестирования и поиска неисправных элементов, узлов и механизмов.

По характеру решаемых задач ТСД подразделяются на технические средства:

- проверки только работоспособности;
- поиска только дефектов;
- прогнозирования технического состояния;
- проверки работоспособности, поиска дефектов;
- проверки и прогнозирования работоспособности и надежности;
- проверки работоспособности и надежности, поиска дефектов и прогнозирования состояния.

Третья группа задач предусматривает разработку методов устранения неисправностей и повышения надежности, работоспособности машины и её узлов.

К техническим средствам диагностирования можно отнести стенды, приборы, приспособления, вычислительные устройства, программируемые контроллеры, компьютеризированные устройства моделирования и управления, предназначенные для оценки технического состояния объекта. Средства диагностирования подразделяются на встроенные с системой измерительных датчиков в конструкцию и внешние, не являющиеся составной частью конструкции машины. К числу внешних диагностических средств относятся стационарные, передвижные, переносные ТСД.

3.7. Электронные ТСД для проведения диагностирования технического состояния машин

Наряду со средствами неразрушающего контроля в диагностике применяют приборы, предназначенные для непосредственной оценки остаточного ресурса. Это счетчики ресурса, индикаторы нагруженности, датчики контроля состояния и повреждений узлов и механизмов [14; 22].

Различают приборы, устройства контроля, датчики цифрового и аналогового типа. К первому типу относятся устройства, основу которых составляют микропроцессоры, бортовые ЭВМ, бортовые компьютеры. Они фиксируют в цифровой форме нагружения узла или механизма, например, последовательность экстремумов ускорений или деформаций при цик-

лическом нагружении. Затем эту информацию обрабатывает ЭВМ, чтобы оценить накопленные повреждения и остаточный ресурс [22].

Основу счетчиков ресурса аналогового типа составляют чувствительные датчики с аналоговым преобразованием сигналов. Датчики устанавливаются на машине и ее узлах. Измеряя параметры, определяют значение контролируемых параметров. Часто используются чувствительные элементы – тензодатчики (тензорезисторы, тензодиоды).

Для измерения температуры используются датчики с терморезисторами.

Для оценки состояния вибраций применяется виброакустическая аппаратура (вибродатчики). В качестве вибродатчиков распространение получили пьезокерамические датчики.

Средства оценки состояния работоспособности машины для контроля и диагностирования должны соответствовать применяемым методам диагностирования. Технический контроль и диагностика осуществляются совместно, сначала получают информацию о фактическом состоянии машины и её узлов, а затем сопоставляют ее с заданными значениями контролируемых параметров и определяют рассогласование в виде полученного отклонения, характеризующего потерю работоспособности.

3.8. Классификация методов проведения технической диагностики машин, узлов и механизмов

Информация, поступающая от датчиков и устройств обратной связи и автоматических контрольно-измерительных приборов, может использоваться для диагностики состояния машины, функционирования её узлов и механизмов. Информация также применяется для прогнозирования работы машины и последующего контроля состояния работоспособности. Необходимо уметь определить и оценить состояние машины по контролю технико-эксплуатационных параметров на основе диагностики. Кроме того, необ-

ходимо иметь данные о состоянии управляемости машины, её механизмов, узлов.

Существует взаимосвязь методов диагностирования и технических средств диагностирования и оценки состояния надежности машин [14; 16; 17; 30; 41].

Средства оценки состояния машины, технические средства диагностирования, приборы и аппаратура для контроля и диагностирования находятся в полной взаимосвязи с применяемыми методами диагностирования. Можно выделить отдельные методы диагностирования с проведением контроля состояния машины по эксплуатационным параметрам.

Метод диагностирования по эффективности работы машины. Применяется для проведения диагностирования и выявления общего технического состояния машины по выходным эксплуатационным параметрам, например, таким как измерение и потеря мощности, расход электроэнергии, контроль времени рабочего цикла и цикловой производительности, контроль выполнения технических условий и технических требований, эксплуатационных характеристик, качество выпускаемых изделий. Применяются технические средства диагностики, бортовые компьютеры, приборы.

Метод диагностирования по герметичности рабочих органов и систем. Основан на измерении утечки воздуха, газов и жидкостей в распределительной аппаратуре, системе трубопроводов, в пневмогидроаппаратуре. Метод получил широкое применение для оценки степени изношенности цилиндро-поршневых групп, герметичности соединений, герметичности системы торможения и системы охлаждения, системы смазки, гидро- и пневмопитания и питания двигателя. Оцениваются герметичность и целостность межкорпусных и межузловых уплотнений.

Метод диагностирования по геометрическим параметрам. Применяется для определения зазоров и люфтов, что позволяет оценивать техническое состояние и работу узлов оборудования. Определяются осевые и радиальные биения вращающихся и движущихся механизмов. Особое значение имеет диагностирование биения деталей в подшипниковых узлах,

геометрической точности, контроль направляющих по сопрягаемым поверхностям подвижных соединений механизмов и узлов машины.

Дифференциальный метод. Относится к числу необходимых для диагностирования состояния различных видов передач: зубчатых, ременных, цепных. Диагностируются кинематические пары, передачи, определяются зазоры, биения, люфты в трансмиссиях, осуществляются контроль и соблюдение норм точности изготовления деталей.

Тепловой метод диагностирования. Основан на оценке измерения температуры в характерных точках во время работы механизмов и узлов. Исследуются в процессе эксплуатации закономерности изменения температуры узлов, механизмов, подшипниковых опор в пределах допустимых ограничений.

Метод диагностирования по возникновению колебательных процессов, виброакустический метод. Он основан на исследовании параметров вибрации и акустических шумов при работе узлов. Метод используется для контроля состояния электродвигателей, передач, шпиндельных узлов, коробок и узлов подачи. Контроль появления и распознавания стука рассматривается как следствие повышенной изношенности узлов и механизмов. С применением современных приборов и компьютерной техники виброакустический метод получает большое распространение.

Профилактический метод визуального контроля. Процесс диагностирования предусматривает обследование основных узлов, визуальный контроль и выявление мест нарушения работы машин и возможных причин возникновения отказов. Применяются переносные приборы, электронные датчики, контрольные устройства, проверяется работа пневмогидроаппаратуры, осуществляется контроль состояния силового электропитания и электрических цепей управления.

Метод контроля по нормативным данным. Основан на сравнении фактических или экспериментальных значений параметров (усилия, давление, мощность, температура и др.) с нормативными данными, паспортными значениями, тех-

ническими условиями. Метод предполагает, что для диагностируемого узла назначается совокупность детерминированных контрольных параметров. Каждому входному параметру должно соответствовать строго заданное значение выходного параметра. Каждому выходному параметру могут соответствовать несколько предполагаемых выходных значений, позволяющих задавать допустимые отклонения в зависимости от требований заказчика и качества изготавливаемых изделий.

Метод расчетных зависимостей. Основан на сравнении экспериментально полученных функциональных зависимостей параметров проверяемого узла с заданными нормативными зависимостями, полученными экспериментальным или расчетным путем.

Метод контроля нестационарных значений параметров машины. Является методом контроля неустановившихся значений параметров, описываемых законами вероятностного распределения с учетом изменения параметров во времени.

Метод контроля с применением осциллографов. Основан на анализе и измерении параметров с применением осциллографов и контрольно-регистрающей техники.

Корреляционный метод исследования. Строятся корреляционные зависимости изменения параметров.

Метод спектрального анализа. Диагностирование начинается с анализа хронометрируемых параметров по данным диагностических наблюдений и исследований.

Контрольные вопросы

1. Дайте определение понятий «техническая диагностика», «диагностирование». Какие задачи ставятся при проведении диагностирования машины, технического объекта?
2. Почему проведение диагностирования неотделимо от процессов анализа технического состояния, определения работоспособности и надежности машин?
3. Как взаимосвязаны между собой процессы диагностирования и прогнозирования технического состояния машин?

4. В каких случаях и при каких условиях необходимо проведение диагностирования? Для каких технических объектов применяется диагностирование?
5. В чём состоит организация диагностирования технического состояния машины? Какие задачи решаются в процессе диагностирования?
6. Какие виды документации относятся к методологии проведения диагностирования машин? Чем характеризуется содержание и применение документации для прогнозирования?
7. На какие виды подразделяется диагностирование в зависимости от организации технического обслуживания (ТО) и ремонта (ТР)?
8. Назовите основные методы испытаний и выполнения диагностирования во время проведения испытаний. Чем они отличаются и в каких случаях применяются?
9. Приведите примеры стендовых испытаний и диагностирования для конкретных механизмов и узлов машины. Какие при этом ставятся и решаются задачи?
10. Приведите классификацию стендов для испытаний и диагностирования, основных их видов на примере стендов для испытания механизмов и узлов машин.
11. Какие существуют виды стендов по признакам изготовления и применения?
12. Назовите методы контроля для оценки технического состояния машины в процессе диагностирования.
13. На основе каких классификационных признаков можно задать виды технического контроля по назначению и применению для проведения диагностирования? Приведите классификацию.
14. Для какой цели служат технические средства диагностирования (ТСД)? Какие решаются задачи с применением ТСД?
15. Какие существуют электронные ТСД для проведения диагностирования технического состояния машин?
16. Какие существуют технические средства диагностирования по характеру решаемых задач?

17. Назовите основные методы технической диагностики машин. Отличительные особенности применения методов.

Выводы

Диагностирование является основой получения и обработки информационных данных о техническом состоянии машины и процессов её функционирования. Диагностирование промышленного оборудования служит для поддержания установленного уровня надежности и работоспособности машин, эффективного выполнения технологических процессов.

Задача диагностирования – определение значений контролируемых параметров, причин потери работоспособности и надежности машины, её узлов и механизмов.

Диагностирование позволяет определять не только текущее состояние параметров, но и видеть тенденции их изменения во времени. Процессы диагностирования машин должны включать контрольно-диагностические операции в определенной организационной последовательности их выполнения в соответствии с предписаниями, методиками, алгоритмами диагностирования и управления. При проведении диагностирования могут применяться аналитические и графоаналитические методы исследований, математическое моделирование процессов испытаний.

Основными объектами диагностирования являются наиболее нагруженные узлы и механизмы, работающие в сложных и тяжёлых условиях эксплуатации.

Для выполнения диагностирования применяют технические средства (ТСД) и осуществляют комплекс испытаний. Диагностику можно осуществлять в процессе испытаний машины, её механизмов и узлов. Испытания подразделяются на эксплуатационные, стендовые, полигонные.

Особое значение имеют стендовые испытания, которые позволяют осуществлять постоянное наблюдение, контроль состояния технического объекта в процессе диагностирования. Существуют стенды для проведения испытания отде-

льных узлов, механизмов, машин в целом. При испытаниях на стендах условия максимально приближены к эксплуатационным условиям, в том числе к экстремальным нагрузкам машины и её узлов. Для проведения испытаний применяют различные виды стендов промышленного изготовления – универсальные, специальные, специализированные. Стендовому контролю подвергаются, как правило, наиболее нагруженные и высокоточные узлы и механизмы.

Для проведения диагностирования применяются электронные вычислительные средства, разработанные методы и алгоритмы. Технические средства оценки состояния машины, её работоспособности и надежности находятся во взаимосвязи с применяемыми методами диагностирования.

4. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СОСТОЯНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

4.1. Прогнозирование уровня развития технологического оборудования

Прогнозирование требует проведения исследований и разработку методов прогноза технического состояния и работоспособности технологического оборудования.

При этом проведенные процессы диагностирования и информационного обеспечения состояния машины, наработки за прошедший период эксплуатации служат необходимой информационной базой для прогнозирования и оценки будущего состояния машины с сохранением технического ресурса и обеспечения надежности машины в последующий период эксплуатации.

Данные диагностирования и мониторинга являются основой для прогнозирования событий и технического состояния технологического оборудования. Прогнозирование представляет собой процесс, в результате которого получают вероятностные данные о будущем состоянии прогнозируемого процесса и в целом технологического оборудования.

Для проведения прогноза требуется информация об объекте прогнозирования, раскрывающая его состояние в предшествующий период протекания событий для выявления закономерностей и характера изменения состояния в последующий период развития событий и состояния машины.

Информация в вопросах прогнозирования основывается на текущей (хронологической) информации состояния и поведения узлов и механизмов технологического оборудования, в том числе полученной информации при диагностировании и в процессе мониторинга действующих машин. При наличии хронологической информации, полученной в процессе долговременных наблюдений, выявляются законы поведения и изменения параметров $\{p_n\}$ надежности и работоспособности

во времени текущего периода эксплуатации, законы последующего вероятностного изменения параметров.

Смысл, вкладываемый в понятие «научно-техническое прогнозирование», требует пояснения и большей точности в употреблении. Прогнозирование направлено не только на выявление текущего состояния техники, поддержание ее надежности и работоспособности, но и на нововведения и применение новых технических достижений для повышения технико-эксплуатационных параметров технологического оборудования.

Существует краткосрочное прогнозирование и долгосрочное, что отражает тактику и стратегию планирования и принятия решений. При краткосрочном прогнозировании необходимо принимать во внимание, что полнота выявления тенденций может быть не обеспечена с необходимым уровнем вероятности. Не все отклонения и изменения могут быть учтены. При долгосрочном прогнозировании изменение событий в прошлом дает более полную и точную информацию для стратегического планирования развития событий и предпринимаемых мер, но требуется длительный период для получения хронологической информации.

Изучая прогнозирование технического состояния технологического оборудования, рассмотрим прогнозирование применительно к техническому развитию. Продвижение уровня состояния техники от предыдущего к последующему требует непрерывного развития технологического оборудования в процессе его эксплуатации. Темп развития будет замедляться или ускоряться в зависимости от принимаемых решений, разнообразных внешних событий, условий внешней среды. Прогноз развития технологического оборудования может относиться к любому элементу, узлу, механизму рассматриваемого события, к различным уровням развития события во времени.

В основе прогнозирования технического развития лежит выявление перспективных направлений и поиск технических решений. При этом техническое развитие зависит от изменения технических параметров во времени (рис. 4.1).

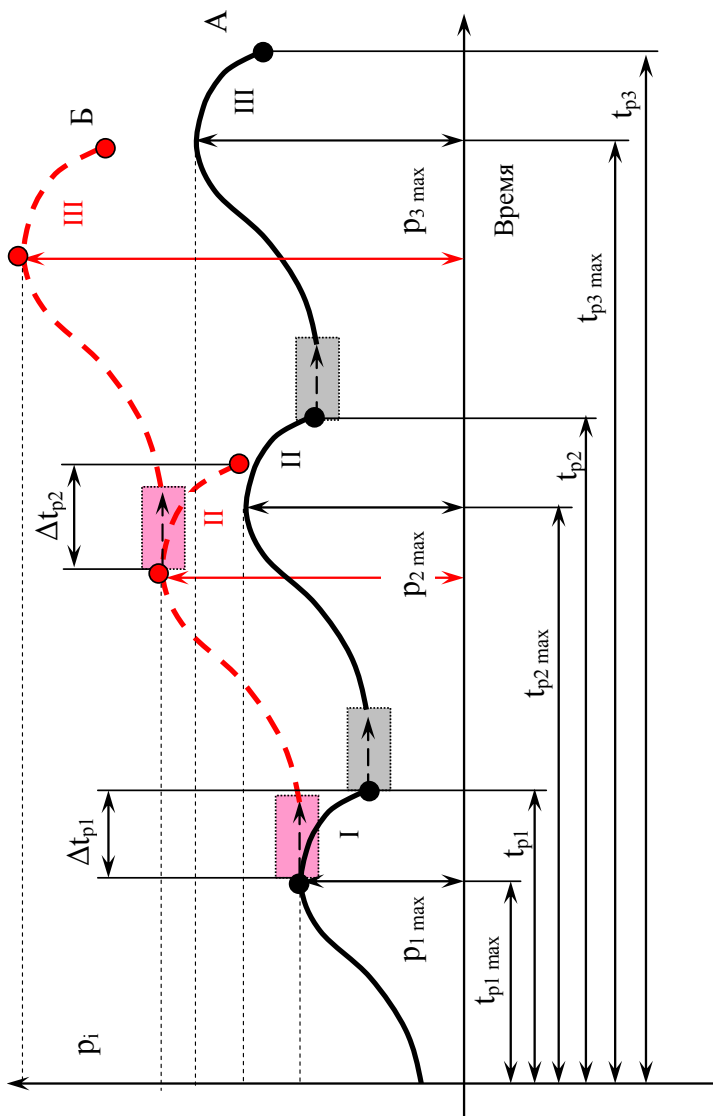



Рис. 4.1. График изменения технического развития техники

На рис. 4.1 обозначено: А – текущий вариант развития техники; Б – прогрессирующий вариант развития техники; I, II, III – этапы изменения технического состояния техники и ее совершенствования; p_1, p_2, p_3 – достигнутые уровни развития техники для различных этапов технического состояния; $\Delta t_{p_1}, \Delta t_{p_2}$ – смещение начала очередного этапа развития техники.

Зона графического изображения  на рис. 4.1 показывает темп развития и перехода с одного уровня на другой.

Техническими параметрами $\{p_i\}$ могут быть в зависимости от объекта скорость, производительность, удельное потребление топлива, расход электроэнергии, мощность, показатели качества, затраты на техническое обслуживание и ремонт.

За счет чего достигается техническое развитие? За счет модернизации и усовершенствования конструкции, реализации новых патентов, использования новых материалов и т. д.

Функции технического развития показывают, что существует множество причин или факторов, приводящих к необходимости проведения прогнозов. Основные факторы – износ, моральное и физическое старение техники, необходимость непрерывного совершенствования конструкции, совершенствование обслуживания и ремонта технологического оборудования, разработка более эффективной системы снабжения запчастями, недостаточная квалификация, опыт и знания обслуживающего персонала и др.

Тогда функция технического развития технического объекта запишется

$$T_i = a(p_i)^{bc}, \quad (4.1)$$

где p_i – текущее значение параметра технического объекта; a – константа изменения текущего технического состояния (параметра p_i) по отношению к будущему образцу технического объекта с лучшими параметрами p_6 ,

$$a = \frac{p_6}{p_i},$$

где p_6 – значения прогнозируемого параметра для будущего образца технического объекта; b – коэффициент влияния внешней среды; c – коэффициент темпа развития,

$$c = \frac{t_{p\bar{b}}}{t_{pi}},$$

где t_{pi} , $t_{p\bar{b}}$ — темп или время перехода с одного уровня развития на следующий. Параметры a , p , b являются прогнозируемыми.

На темп развития (параметр c) техники влияют:

L — количество эффективно работающего обслуживающего персонала;

α — показатель среднего уровня образования;

β — показатель технической подготовки, среднего уровня опытности;

I — уровень капиталовложений;

I — темп изменения уровня капиталовложений;

δ — ожидаемый темп изменения рыночного спроса, наклона кривой сбыта;

τ — темп распространения и внедрения усовершенствований.

Известно, что «грядущая техника и события появления аварий и катастроф отбрасывают свою тень и становятся видимыми и предсказуемыми обществу задолго до того, как ее воздействие сделается значительным. И должны быть в состоянии обнаружить признаки грядущего технического изменения и систематически следить за ним и принимать новые решения». Это означает, что прогнозировать нужно исходя из существующих событий.

По вышеизложенным определениям осуществляются слежение, диагностирование и при необходимости мониторинг, которые основываются на оценке событий и фактов. Мониторинг основан на диагностике параметров состояния технологического оборудования и непрерывном контроле его работоспособности. Основные положения по мониторингу изложены в ГОСТ Р 22.1.01—95 [38], ГОСТ Р 22.1.02—95 [39]. Мониторинг, включая диагностирование, представляет собой систему наблюдений и непрерывного контроля, осуществляемых регулярно и циклично по заданной программе и разработанной методике.

Мониторинг должен включать:

1) выбор таких параметров, вариантов планируемых шагов, действий и решений, которые можно проследить, установить значения этих параметров, скорость и направления развития, а также эффект применения;

2) поиск признаков в окружающей обстановке, которые могут быть начальными параметрами совершенствования и развития технологического оборудования и предстоящих событий эксплуатации и применения машины, что позволит предвосхищать надвигающиеся события и изменения;

3) своевременное отслеживание и контроль данных, представление данных, полученных на предыдущих этапах, для принятия решений с применением вычислительной техники;

4) обеспечение восприимчивости системы прогнозирования к возникновению и возможному изменению (устойчивость) событий;

5) выявление тенденций направления развития технологического оборудования;

6) выявление возможных последствий, если эти признаки справедливы (не ложны) и если развиваются тенденции, на которые они указывают.

При проведении мониторинга предоставляется возможность осуществлять оценку технического состояния машины и непрерывный сбор информации с рассмотрением фактов по результатам мониторинга для принятия решений. В результате мониторинга ведется поиск, рассмотрение альтернативных вариантов, направлений принятия решений, выбор для наблюдения и оценки наиболее важных параметров состояния работоспособности технологического оборудования.

4.2. Прогнозирование технического состояния.

Прогнозирование технического ресурса

Теоретической основой для прогнозирования ресурса технологического оборудования в условиях накопления повреждений и появления поломок, трещин служит механика раз-

рушений, износа. Физический процесс разрушения состоит из накопления рассеянных повреждений, может составлять значительную часть общего ресурса. Процесс накопления повреждений непрерывно продолжается, выявляются их закономерности изменения, что влияет на изменение контролируемых параметров $\{p_n\}$.

Задача прогнозирования технического ресурса включает также расчет на эксплуатационную надежность, безотказность техники. Особое место занимает расчет на безопасность. В процессе эксплуатации техники ведется постоянный поиск и контроль дефектов. В этой связи необходим сбор информации об узлах, состоянии деталей и механизмов, нагрузках, скоростях и других технико-эксплуатационных параметрах технологического оборудования.

Прогнозирование осуществляют по изменению технических параметров $\{p_n\}$. Проверяют работоспособность технологического оборудования, его узлов, выявляют дефекты, получают исходные данные для оценки текущего состояния технического объекта.

График (рис. 4.2) включает два периода модели: I – период диагностирования, контроля изменения фактического состояния технического объекта; II – период прогнозирования будущего состояния технического объекта. В процессе моделирования состояния определяется приращение скорости изменения технического параметра p_n как $dV_p = \frac{dp}{dt}$.

В первом периоде определяются изменение параметра $p_n(t)$ во времени и скорость изменения параметра

$$V_p(t) = \int_0^t p(t) dt. \quad (4.2)$$

Во втором периоде решается обратная задача – прогнозируется изменение параметра как

$$p(t) = \int_0^t V_p(t) dt. \quad (4.3)$$

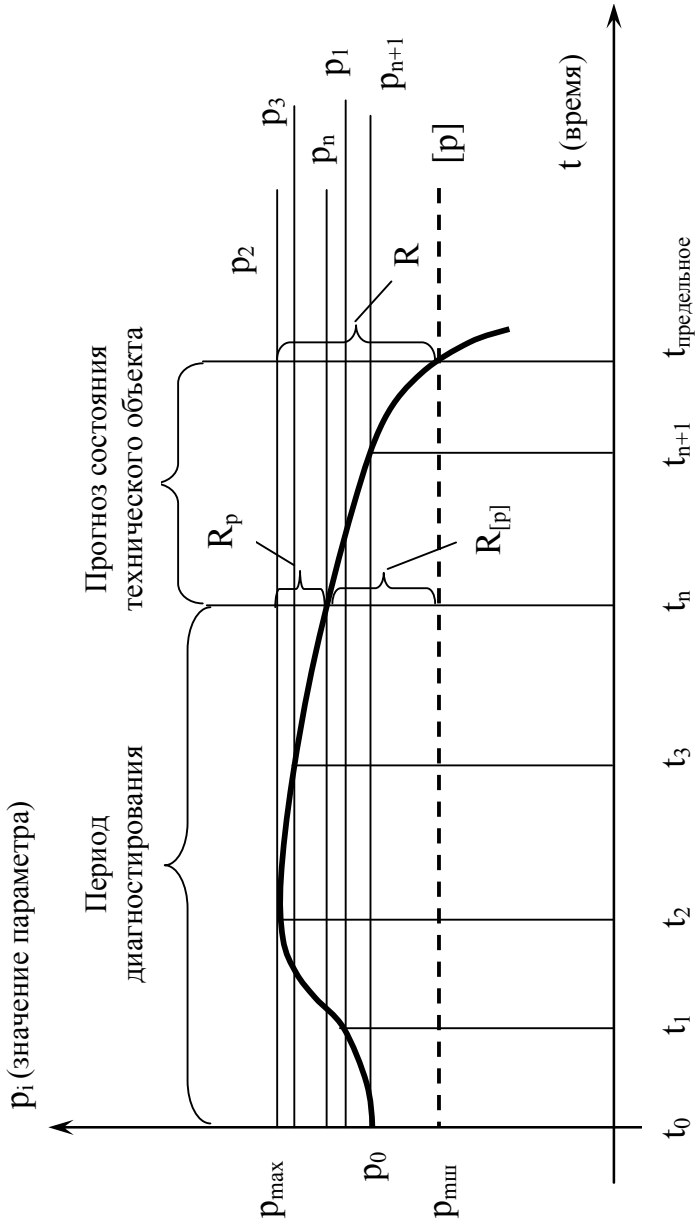


Рис. 4.2. Графическая модель текущего технического состояния объекта и прогнозирования его будущего состояния

На рис. 4.2 обозначено: R – значение общего технического ресурса объекта, R_p указывает на израсходованный ресурс для текущего периода и времени диагностирования, $R_{[p]}$ – на остаточный ресурс; p_o – начальное значение параметра; p_t – текущее значение параметра; $[p]$ – предельно допустимое значение параметра. Общий ресурс параметра определяется $R = p_o - [p]$; израсходованный ресурс $R_p = p_o - p_n$; остаточный ресурс $R_{ост} = p_n - [p]$.

Прогноз ресурсов и технического состояния технологического оборудования позволяет содержать машину, зная, что в течение планируемого срока она будет безотказно функционировать в оперативном режиме. В процессе диагностирования можно следить за скоростью изменения падения значений контролируемых параметров и спрогнозировать, когда тот или иной параметр может выйти за пределы предельного значения $[p]$ или допуска. Соответственно, можно спрогнозировать время начала потери работоспособности технологического оборудования.

Прогнозируя, можно поставить «диагноз» состояния технологического оборудования, его работоспособности, состояния механизмов и нагруженных деталей. Прогнозирование применяется в практике управления техническим состоянием технологического оборудования, когда осуществляется контроль изменения параметров непрерывно в процессе эксплуатации. Это позволяет видеть не только текущее значение параметров, но и выявлять тенденции их изменения во времени, когда анализируются значения параметров.

Методы определения допустимого отклонения параметров технического состояния при прогнозировании остаточного ресурса техники устанавливает ГОСТ 27.302–86.

Прогнозирование имеет определенную организацию его проведения, которое включает следующие этапы:

- 1) предположение, гипотезу, осмысленное высказывание, умозаключение, появляющиеся в процессе анализа проблемы или проводимого исследования; это означает, что, прогнозируя, можно предсказать, построить прогноз наиболее вероятного проявления события, явления в будущем;

2) выдвижение теории или метода, определяющих возможность проведения прогнозирования с получением достоверного результата с максимально достижимой точностью, определения достоверности предположения, гипотезы;

3) применение метода или несколько объединенных методов с получением результата с возможно допустимой степенью вероятности; проверка теории на проведении исследований.

Прогнозирование надежности характеризуется тем, что решается вероятностная задача, в которой поведение технического объекта или события в будущем определяется с той или иной степенью достоверности и оценивается вероятность его нахождения в определенном состоянии при рассматриваемых условиях эксплуатации.

Существуют различные методы прогнозирования:

- прогнозирование надежности;
- работоспособности;
- технического ресурса.

Применительно к надежности прогнозирование сводится в основном к расчету вероятности безотказной работы объекта $P(t)$ в зависимости от возможных условий эксплуатации.

В основе прогнозирования надежности лежит оценка изменения выходных параметров технологического оборудования во времени при различных входных данных, на основании чего можно сделать вывод о показателях надежности при различных условиях и методах эксплуатации.

Прогнозирование надежности технологического оборудования сводится к прогнозированию работоспособности, вероятности безотказной работы, прогнозированию остаточного технического ресурса. Расширяя область познания вопросов прогнозирования на основе диагностирования, можно решать вопросы прогнозирования применительно к техническому состоянию и надежности различных видов техники.

Контрольные вопросы

1. Какие существуют виды прогнозирования по длительности, тактике и стратегии планирования?
2. Раскройте смысл функции технического развития технологического оборудования.
3. За счет чего достигается развитие техники в процессе эксплуатации?
4. Чем различаются между собой период диагностирования и период прогнозирования? Что выполняется в эти периоды?
5. Что включает в себя и как решается задача прогнозирования технического ресурса технологического оборудования в процессе эксплуатации?
6. На оценке каких событий, фактов осуществляется мониторинг?
7. Как определяется остаточный ресурс $R_{[P]}$ в процессе управления техническим состоянием технологического оборудования?

Выводы

Прогнозирование основывается на текущей информации об изменении технологического оборудования в хронологическом порядке. При наличии хронологической информации выявляются законы изменения состояния событий, явлений, технических объектов.

Прогнозирование направлено не только на выявление текущего состояния технологического оборудования, но и на поддержание надежности и работоспособности, применение новых технических решений, совершенствование машин. Прогнозирование технического развития позволяет выявить перспективные краткосрочные и долгосрочные направления и вести поиск технических решений.

Для решения задач прогнозирования осуществляются диагностирование и мониторинг объекта, процесса, явлений технического, техногенного и природного характера.

Прогнозирование и управление процессами обеспечения технического состояния технологического оборудования являются определяющими процедурами обеспечения высокого уровня его надежности и долговечности. Эффективность эксплуатации машины напрямую зависит от ее технического состояния и управления обеспечением технического состояния.

В основе методов прогнозирования надежности технического объекта лежит оценка изменения выходных параметров объекта во времени при различных входных данных, на основании которых делается вывод о показателях надежности в последующий период эксплуатации.

5. УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКИМ СОСТОЯНИЕМ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩЕЕ НАДЕЖНОСТЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

5.1. Основные положения управления техническим состоянием технологического оборудования

Управление техническим состоянием технологического оборудования в процессе эксплуатации включает управление надежностью, управление обслуживанием, управление диагностированием и прогнозированием.

При рассмотрении основных положений управления исходим из того, что техническое состояние машин постоянно изменяется и, как правило, в худшую сторону. Придерживаемся следующей схемы изменения работоспособности технологического оборудования (рис. 5.1).

В точках a , b , c происходит отказ работы технологического оборудования. На рис. 5.1 обозначено: $R(t)$ – технический ресурс объекта; t_{n1} , t_{n2} – время простоя объекта до начала восстановления; t_{e1} , t_{e2} – общее время восстановления работоспособности; t_{p1} , t_{p2} , t_{p3} – время непрерывной работы.

Если не управлять техническим состоянием, то в точках a , b произойдет потеря работоспособности. Наша задача в этом случае – довести технический ресурс до возможно дальнего на рис. 5.1 предельного состояния в точку c , где восстановление работоспособности становится невозможным, когда технический ресурс работы объекта исчерпан.

Поэтому работоспособность технологического оборудования будет определяться, с одной стороны, системой технического обслуживания, с другой – системой управления поддержанием, восстановлением работоспособности и техническим состоянием машины (рис. 5.2).

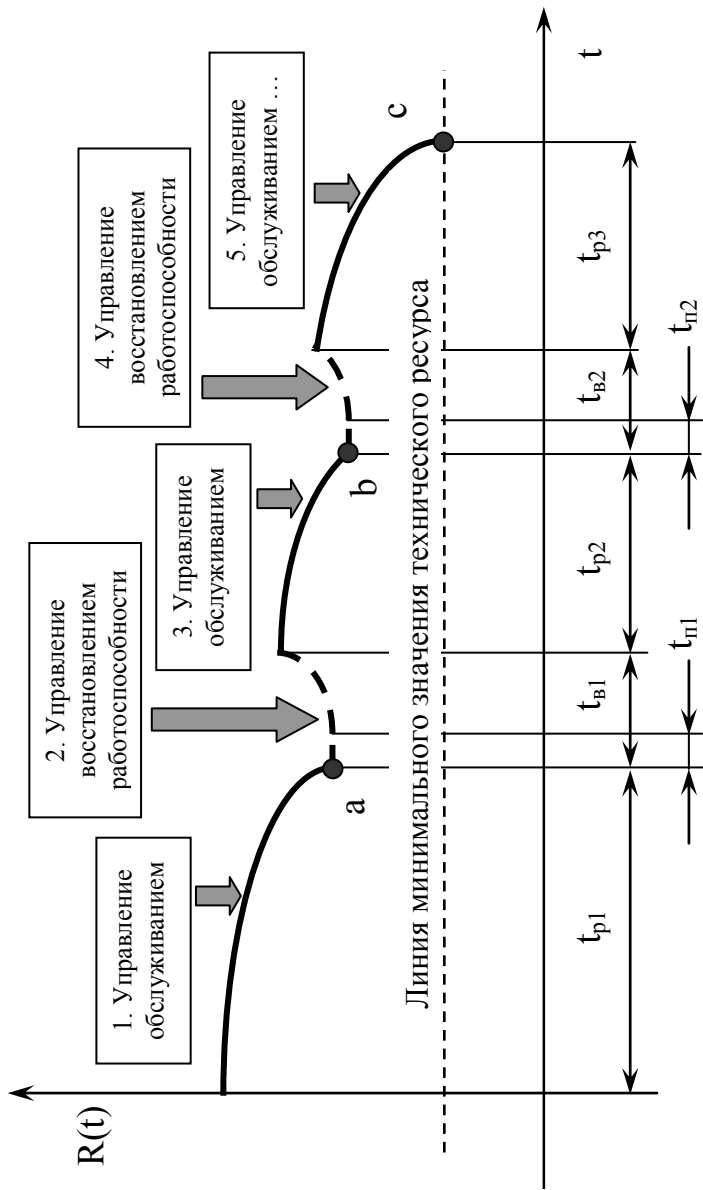


Рис. 5.1. Схема управления техническим состоянием технологического оборудования в процессе эксплуатации



Рис. 5.2. Общая схема системы управления техническим состоянием технологического оборудования в процессе эксплуатации

Управление надежностью составляет совокупность организационных и научно-технических мер, а также методов управления, направленных на обеспечение, поддержание и повышение надежности технических объектов, выполняемых на всех стадиях их жизненного цикла.

Жизненный цикл — это промежуток времени технологического оборудования от его создания до утилизации. При этом управление надежностью рассматривается как система практических мероприятий, необходимых для обеспечения надежности технологического оборудования. Понятие «жизненный цикл» было впервые предложено А.Ф. Бёрнсом в 1934 году. А.Ф. Бёрнс показал, что прогрессирующее замедление развития продукции или события является результатом неизбежного постепенного вытеснения устаревшей продукции более совершенной, что определяет последующий рост новой продукции с последующим ее старением и завершением жизненного цикла и т. д.

Управление надежностью представляет собой единую комплексную систему управления техническим состоянием, требует получения знаний в области надежности и включает:

- проведение и организацию работ по обеспечению надежности;
- способы обеспечения надежности на стадиях жизненного цикла;
- проведение анализа и расчета надежности;
- проведение испытаний, контроль, оценку надежности.

Согласно ГОСТ 27.301–95 [36] система мероприятий состоит из следующих разделов, которые раскрывают содержание процессов управления надежностью.

1. Основные положения и получение знаний в области надежности.

1.1. Основные принципы стандартизации в области надежности. Так, система стандартов «Надежность в технике» (ССНТ) представляет собой совокупность взаимосвязанных основополагающих государственных и межгосударственных стандартов, устанавливающих общие для всех видов технических объектов положения, принципы, правила и методы управления их надежностью. В ГОСТ сказано, что технический объект есть любое материально существующее изделие (устройство, узел, блок, машина, техническая система и т. д.), которое можно рассматривать в отдельности для выполнения соответствующих функций его применения, использования, эксплуатации.

1.2. Основные понятия, термины и определения.

1.3. Общие правила и методы установления требований по надежности.

1.4. Классификация отказов и предельных состояний.

2. Как осуществлять анализ и расчет надежности.

2.1. Порядок и общие требования к методам анализа и расчета надежности.

2.2. Методы расчета показателей надежности.

2.3. Методы расчета надежности с учетом качества программных средств и программного обеспечения.

2.4. Методы расчета надежности с учетом человеческого фактора.

2.5. Анализ возможных видов, последствий и критичности отказов.

3. Испытания, контроль, оценка надежности.

3.1. Порядок оценки и контроля надежности.

3.2. Правила проведения и общие требования к методам испытаний.

3.3. Выбор условий и режимов испытаний.

3.4. Предварительная обработка статистических данных о надежности.

3.5. Оценка показателей надежности по экспериментальным данным.

3.6. Планы контрольных испытаний на надежность.

3.7. Оценка показателей надежности объектов по данным о надежности их составных частей.

3.8. Методы сокращения объемов испытаний, контроль и оценка текущего состояния надежности.

4. Организация работ по обеспечению надежности включает следующее.

4.1. Общий порядок обеспечения надежности на стадиях жизненного цикла, организационные структуры.

4.2. Разработка программы обеспечения надежности, планирование работ.

4.3. Управление применением комплектующих изделий.

4.4. Информационное обеспечение надежности.

4.5. Экспертиза технического состояния.

5. Способы обеспечения надежности.

5.1. Разработка общих требований и рекомендаций по конструктивным и технологическим способам обеспечения надежности.

5.2. Экспериментальная отработка на надежность, моделирование роста надежности.

5.3. Ориентированные на обеспечение надежности способы контроля качества и отбраковка потенциально ненадежных объектов.

5.4. Назначение и продление срока службы, срока хранения и ресурса.

5.5. Обеспечение и поддержание надежности в эксплуатации.

5.2. Информация и математические модели эффективности оперативной информации в системах управления надежностью технологического оборудования

Под информацией понимаем совокупность сведений о некотором событии, явлении или объекте для принятия решения. Информация содержит сведения, которыми обмениваются управляющая компьютерная система и управляемый объект.

В общем случае источники информации могут быть стационарными и подвижными, по виду сосредоточения – рассредоточенными и распределенными в пространстве и во времени, по степени определенности – детерминированными и случайными (вероятностными).

Рассмотрим стадии подготовки и передачи информации и информационного процесса.

1. Отбор и подготовка информации, ее передача.
2. Формирование сообщений, подготовка информации для передачи.
3. Подготовка технического устройства для передачи информации, ввод информации в техническое устройство.
4. Обработка информации, хранение и поиск.
5. Передача и прием информации.

Технические устройства, соединенные между собой в единую сеть, составляют информационную систему управления. Вопросы получения, передачи и обработки информации относятся к области знаний, называемой теорией информации. Она рассматривает образование сообщений как некоторый вероятностный процесс с упорядоченными связями передачи информации в виде управляющих сигналов.

Процесс управления основывается на поступающей в систему управления информации о состоянии объекта управления. От полноты и качества информации зависит эффективность управления. Технологическое оборудование имеет постоянно изменяющееся состояние по контролируемым и диагностируемым параметрам. Если в некоторый первона-

чальный момент времени параметр x_i машины имел значение $x_i(t_0)$, то в момент времени $t_1 > t_0$ параметр будет иметь значение $x_i(t_1)$, тогда $x_i(t_1) = x_i(t_0) + \Delta x_i(t_1)$, где $\Delta x_i(t_1)$ – приращение значения параметра $x_i(t_0)$ за период t_1 . Определив вероятность $P(x_i(t_1))$, можно прогнозировать вероятностное последующее состояние технологического оборудования.

С применением вычислительной техники при диагностировании и прогнозировании осуществляются:

- автоматизация сбора измерительной информации;
- автоматизированная передача и обработка измерительной информации;
- автоматизация регистрации и выполнения документооборота.

Вычислительная техника может с применением специальных программ задать объекту определенный режим диагностирования, получить и обработать показания датчиков, сравнить полученные значения контролируемых параметров с заданными или эталонными, хранящимися в СУБД (системе управления базами данных).

Применение ЭВМ позволяет достигнуть высокого уровня проведения диагностирования, включая выполнение моделирования процессов функционирования технического объекта, решение оптимизационных задач с учетом вероятностных характеристик получаемых диагностируемых параметров. Особую проблему составляют методы диагностирования, относящиеся к выявлению состояния процессов изнашивания, которые являются основной причиной отказов техники и потери работоспособности.

5.3. Применение программно-технических средств – программируемых контроллеров (ПК) в системах управления и диагностирования технологического оборудования

Программируемый контроллер есть управляющая электронная машина, которая по программе регистрирует и вво-

дит в память значения контролируемых параметров, оценивает состояние, вырабатывает управляющие воздействия для обеспечения оптимальных режимов функционирования технического объекта. Программируемый контроллер может быть применен для выполнения функций автоматической диагностики и регулирования работы технического объекта. Архитектура и состав ПК позволяют создавать системы управления различной сложности – от простого циклового программного управления до сложных распределенных систем управления.

Для изучения программируемых контроллеров рассматриваются следующие основные вопросы.

1. Назначение, области применения.
2. Состав ПК. Архитектура ПК. Элементная база, модули. Применение микроконтроллеров, интегральных микросхем.
3. Схемы подключения к техническому объекту.
4. Программирование, подготовка управляющих программ на ПК. Модули памяти.
5. Аппаратное совмещение применения программируемых контроллеров и ЭВМ.

Основу применения и использования ПК, вычислительной техники составляют аппаратные средства, математическое обеспечение, информационное обеспечение, программное обеспечение.

Программируемый контроллер относится к микропроцессорным системам управления. Современный ПК позволяет создавать любой сложности и интеграции управляющие системы и комплексы.

Модули и блок питания установлены в корпусе ПК и соединены между собой внутриблочным центральным интерфейсом. Через внешний интерфейс ввода-вывода датчики и исполнительные механизмы на управляемом техническом объекте подключены к программируемому контроллеру. Центральный интерфейс предназначен для обмена информацией между модулями контроллера, производящими обработку информации (модули центрального процессора, модули

функционального процессора, модули контроля и управления) с модулями ввода-вывода информации.

Для проведения диагностирования может быть рекомендован программируемый контроллер, который имеет постоянное и оперативное запоминающие устройства – ПЗУ и ОЗУ в модуле памяти. С помощью программатора (в качестве которого может быть принят ПЭВМ) разрабатывается рабочая программа управления, которая через интерфейс программатор – ПК переносится в модуль памяти ПК.

Математическое обеспечение (МО) для программных средств представляет собой совокупность математических методов, моделей и алгоритмов для решения задач и обработки информации с применением вычислительной техники и для разработки программного обеспечения. Применяя математические методы, алгоритмические модели, формализуют решение задач управления с помощью вычислительной техники.

С точки зрения сложности используемого математического аппарата выделяют различные уровни математических моделей. Самые простые математические модели описываются алгебраическими уравнениями, применяется аппарат теорий множеств, алгебры логики, теории матриц, графов. Более сложные модели требуют применения дифференциальных уравнений, широко используются методы дифференциального и интегрального исчисления.

Существуют методы статистического и имитационного моделирования, методы компьютерного моделирования и управления с применением программных продуктов Matlab, Simulink и др. Для построения оптимизационных моделей применяются различные теории математического программирования, такие как линейное и нелинейное программирование, динамическое, геометрическое и др. В оптимизационных задачах программирования задаются целевые функции и критерии эффективности, которым должны удовлетворять математические модели.

5.4. Алгоритмы и схемы управления техническим состоянием технологического оборудования

Полный цикл процессов автоматического диагностирования позволяет ЭВМ выработать диагноз и предлагать алгоритм принятия решения и восстановления работоспособности технологического оборудования. В процессе диагностирования разрабатываются инструкции и задания в зависимости от состояния технического объекта:

- технический объект работоспособен;
- технический объект работоспособен, но требует выполнить регулировки и наладку;
- технический объект не работоспособен и требует ремонта.

Потеря работоспособности, процессы функционирования сопровождаются износом узлов и механизмов технического объекта различной скорости протекания. Соответственно, и управление состоянием объекта будет определяться контролем состояния и управлением процессами износа, различными по времени протекания. Процессы потери работоспособности технического объекта подразделяются на следующие типы:

- 1) быстро протекающие процессы (вибрации, трение, упругие деформации и др.);
- 2) процессы средней скорости протекания (температурные деформации, поверхностный износ, абразивный износ и др.);
- 3) медленно протекающие процессы (коррозия, усталостный износ, структурные изменения материала и др.).

Общая структурная схема управления техническим состоянием технологического оборудования в зависимости от протекающих процессов потери работоспособности учитывает основные законы системы автоматического управления (САУ) и системы автоматического контроля (САК) (рис. 5.3).

Следовательно, можно сказать, что организация управления техническим состоянием есть комплекс технических и организационных мероприятий по выработке управляющих воздействий $w_i(t)$, $u_i(t)$, направленных на предупреждение

отказов, сохранение и восстановление работоспособности и технических характеристик технологического оборудования.

Выработка управляющих воздействий и управление техническим состоянием включают измерение параметров состояния технологического оборудования и протекающих процессов, сравнение действующих значений с допустимыми или предельными величинами параметров, определение остаточного ресурса узлов и механизмов, назначение и выполнение работ по поддержанию и восстановлению работоспособности. Управление строится по известной схеме управления при наличии прямой и обратной связи (рис. 5.4).

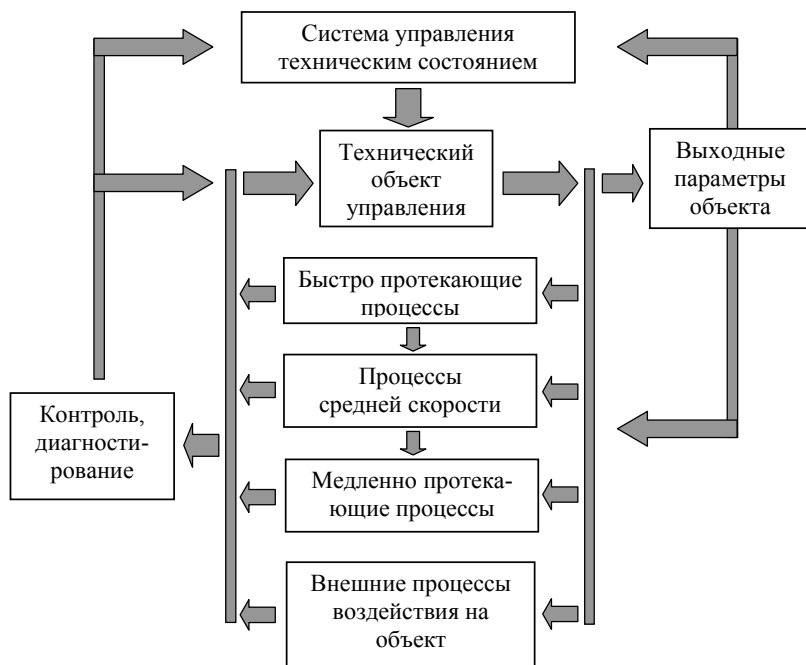


Рис. 5.3. Общая структурная схема управления техническим состоянием технологического оборудования в зависимости от протекающих процессов потери работоспособности

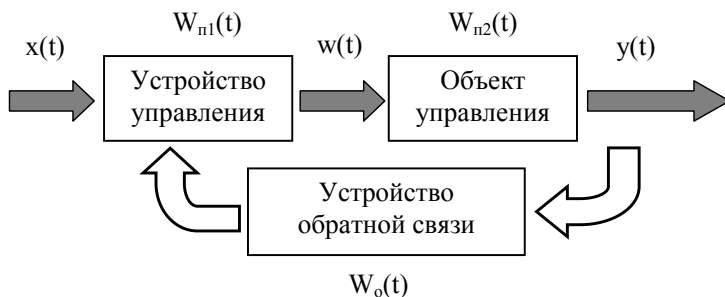


Рис. 5.4. Структурная схема автоматического управления

Обратная связь при управлении техническим состоянием требуется для получения фактической информации в процессе контроля и диагностирования по всем параметрам функционирующего технологического оборудования. Проводят сравнение полученной информации с входными заданными данными для выработки мер, методов для принятия управляющего воздействия. Это относится как к автоматическим управляемым машинам, так и к машинам ручного управления.

Для управления техническим состоянием технологического оборудования и организации работ может быть принята следующая схема алгоритма выработки управляющих воздействий (рис. 5.5).

К техническим критериям при управлении состоянием технологического оборудования относятся показатели надежности, работоспособности и долговечности, ремонтнопригодности, технический ресурс, коэффициент готовности, вероятность безотказной работы, коэффициент использования, наработка на отказ, длительность восстановления работоспособного состояния.

К технико-экономическим критериям для управления техническим состоянием технологического оборудования относятся текущие и капитальные затраты на техническое обслуживание и ремонт, трудоемкость обслуживания и ремонта, затраты на поддержание работоспособности.



Рис. 5.5. Алгоритм выработки управляющего воздействия для управления техническим состоянием технологического оборудования

5.5. Перспективы развития методов и средств управления техническим состоянием технологического оборудования

В процессе управления могут применяться прогрессивные методы и пути повышения надежности и работоспособности технологического оборудования.

Одним из перспективных направлений является применение технической диагностики, что позволяет перейти от принятой планово-предупредительной системы технического обслуживания (ТО) по наработке к прогрессивной системе планово-предупредительного ТО по техническому состоянию. Все большее внимание уделяется автоматизации процессов диагностирования, применению вычислительной

техники. Особое значение имеет мониторинг. Мониторинг есть система непрерывного контроля и фиксации состояния технологического оборудования, его параметров. Проведение мониторинга требует прогрессивных методов получения и обработки информации, проведения расчетов с применением вычислительной техники.

Контрольные вопросы

1. Какие виды управления предусматриваются при управлении техническим состоянием технологического оборудования в процессе его эксплуатации?
2. Назовите систему мероприятий в соответствии с ГОСТ 27.310–95, направленных на управление надежностью техники.
3. Раскройте организацию структуры управления техническим состоянием технологического оборудования в зависимости от протекающих процессов, потери работоспособности.
4. Как строится и реализуется алгоритм выработки управляющего воздействия для управления техническим состоянием технологического оборудования?
5. Какие существуют перспективы развития методов и средств управления техническим состоянием технологического оборудования?
6. Какие программные технические средства могут быть рекомендованы для проведения диагностирования и прогнозирования?
7. Дайте определение, назовите состав и принципы работы программируемого контроллера. Для каких целей применяется ПК?
8. Какое математическое и программное обеспечение может быть рекомендовано для решения задач управления диагностированием и прогнозированием?
9. Что составляет основу информационного обеспечения для задач управления?

Выводы

Стратегию управления техническим состоянием определяют снижение и устранение отказов и их причин; проведение планово-предупредительных работ; организация оперативного непрерывного контроля. Оптимальная стратегия управления обеспечивается при достижении экстремума по рассматриваемым параметрам экономического эффекта. В процессе управления техническим состоянием рассчитывается остаточный ресурс технологического оборудования.

Управление надежностью, обслуживанием, диагностированием, прогнозированием составляет основу управления техническим состоянием технологического оборудования. Работоспособность технологического оборудования поддерживается, с одной стороны, системой технического обслуживания, с другой – системой управления поддержанием, восстановлением работоспособности и техническим состоянием машины.

Управление надежностью включает комплекс организационных и научно-технических мероприятий, методов управления, направленных на обеспечение надежности технологического оборудования на всех стадиях его жизненного цикла.

Система управления, алгоритмы управления техническим состоянием учитывают основные законы системы автоматического управления и регулирования. Критериями управления состоянием технологического оборудования остаются в первую очередь показатели надежности, работоспособности и долговечности с минимизацией текущих и капитальных затрат на техническое обслуживание и ремонт технологического оборудования.

Применение программных технических средств, ЭВМ способствует повышению эффективности диагностирования и прогнозирования, включая выполнение моделирования процессов функционирования технологического оборудования, решение оптимизационных задач в вопросах управления.

Для управления проведением диагностирования могут

быть рекомендованы управляющие машины микропроцессорного управления – программируемые контроллеры (ПК). Технические возможности ПК позволяют разрабатывать и применять системы управления различной сложности, с распределенными схемами управления. Перспективное развитие получают компьютерные системы управления и моделирования, принимающие на себя функции управляющих машин с использованием программных продуктов Matlab, Simulink, пакетов прикладных программ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

«Надёжность и диагностика технологических систем» – одна из основных дисциплин профессионального цикла учебного плана для профессиональной подготовки магистров по специальности 151900.68 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств». Дисциплина предназначена для изучения надёжности и диагностирования автоматизированного оборудования, решения проблем развития машиностроения, а также следующих задач:

- изучение основ надёжности и диагностирования для решения проблемы повышения надёжности и работоспособности автоматизированных систем на уровне современных требований развития машиностроительного производства;
- достижение наилучших показателей надёжности техники по функциональным критериям, критериям повышения технико-эксплуатационных характеристик; обеспечение безопасности с минимальными затратами времени, труда и материальных средств при создании и в процессе эксплуатации автоматизированного оборудования;
- сохранение в заданных пределах показателей надёжности, работоспособности в эксплуатации, а также при хранении, транспортировке, техническом обслуживании (ТО) и ремонте;
- совершенствование и развитие автоматизированных систем оборудования современного машиностроительного производства;
- обеспечение надёжности как комплексного свойства автоматизированного оборудования во взаимосвязи со снижением аварийности техники.

В результате изучения дисциплины обучающийся должен *знать*:

- основы математической и физической теории надёжности технологического оборудования;

- методологический подход и процедуры, необходимые для разработки систем диагностики технологического оборудования;
 - технико-экономические показатели, критерии работоспособности современного технологического оборудования, тенденции его развития;
- уметь:*
- рассчитывать основные количественные показатели надежности технологических систем и их элементов;
 - выполнять исследования, необходимые для разработки систем диагностики, составлять алгоритмы диагностирования состояния элементов технологического оборудования;
 - определять в условиях производства слабые места и недостатки технологических процессов автоматизированных станочных систем для повышения их работоспособности, надежности и безопасного применения.

Библиографический список

1. Волчкевич, Л.И. Автоматы и автоматические линии : в 2 ч. Ч. 1. Основы проектирования : учеб. пособие для вузов / Л.И. Волчкевич ; под ред. Г.А. Шаумяна. — М. : Высш. шк., 1976. — 230 с.
2. Волчкевич, Л.И. Надежность автоматических линий / Л.И. Волчкевич. — М. : Машиностроение, 1969. — 308 с.
3. Гнеденко, Б.В. Математические методы в теории надежности (Серия «Физико-математическая библиотека инженера») / Б.В. Гнеденко, Ю.К. Беляев, А.Д. Соловьев. — М. : Наука, 1965. — 524 с.
4. Гусенков, А.П. Методы и средства обеспечения надежности машин. Прочность, долговечность, диагностика / А.П. Гусенков, Е.Г. Нахапетян ; отв. ред. А.Н. Романов ; РАН, Ин-т машиноведения им. А.А. Благонравова ; МНТК «Надежность машин». — М. : Наука, 1993. — 237 с.
5. Дальский, А.М. Технологическое обеспечение надежности высокоточных деталей машин / А.М. Дальский. — М. : Машиностроение, 1975. — 223 с.
6. Дианов, В.Н. Диагностика и надежность автоматических систем : учеб. пособие / В.Н. Дианов. — 3-е изд. ; стер. — М. : МГИУ, 2007. — 160 с.
7. Дружинин, Г.В. Надежность автоматизированных производственных систем / Г.В. Дружинин. — 4-е изд., перераб. и доп. — М. : Энергоатомиздат, 1986. — 480 с.
8. Козлов, Б.А. Справочник по расчету надежности аппаратуры радиоэлектроники и автоматики / Б.А. Козлов, И.А. Ушаков. — М. : Советское радио, 1975. — 472 с.
9. Крагельский, И.В. Трение и износ / И.В. Крагельский. — 2-е изд., перераб. и доп. — М. : Машиностроение, 1968. — 480 с.
10. Кубарев, А.И. Надежность в машиностроении / А.И. Кубарев. — М. : Изд-во стандартов, 1977. — 264 с.
11. Кугель, Р.В. Надежность машин массового производства / Р.В. Кугель. — М. : Машиностроение, 1981. — 224 с.
12. Надёжность и долговечность машин и оборудования. Опыт и теоретические исследования. — М. : Изд-во стандартов, 1972. — 314 с.
13. Нахапетян, Е.Г. Определение критериев качества и диагностирования механизмов / Е.Г. Нахапетян ; АН СССР, Ин-т машиноведения им. А.А. Благонравова. — М. : Наука, 1977. — 140 с.
14. Нахапетян, Е.Г. Контроль и диагностирование автоматического оборудования / Е.Г. Нахапетян ; АН СССР, Ин-т машиноведения им. А.А. Благонравова. — М. : Наука, 1990. — 271 с.

15. Нормирование надежности технических объектов : метод. указания. – М. : МНТК «Надежность машин» ; Ин-т машиноведения АН СССР, 1988. – 17 с.
16. Пархоменко, П.П. Основы технической диагностики: оптимизация алгоритмов диагностирования, аппаратурные средства / П.П. Пархоменко, Е.С. Согомаян ; под ред. П.П. Пархоменко. – М. : Энергия1981. – 320 с.
17. Проников, А.С. Надежность машин / А.С. Проников. – М. : Машиностроение, 1978. – 592 с.
18. Проников, А.С. Параметрическая надежность машин / А.С. Проников. – М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 560 с.
19. Пуш, А.В. Шпиндельные узлы : качество и надежность / А.В. Пуш. – М. : Машиностроение, 1992. – 288 с.
20. Сидоров, В.И. Техническая диагностика : учеб. пособие / В.И. Сидоров. – 3-е изд. – М. : МАДИ, 1993. – 113 с.
21. Синопальников, В.А. Надежность и диагностика технологических систем : учеб. / В.А. Синопальников, С.Н. Григорьев. – М. : Высш. шк., 2005. – 343 с.
22. Технические средства диагностирования : справочник / В.В. Клюев [и др.] ; под ред. В.В. Клюева. – М. : Машиностроение, 1989. – 671 с.
23. Хазов, Б.Ф. Справочник по расчету надежности машин на стадии проектирования / Б.Ф. Хазов, Б.А. Дидусев. – М. : Машиностроение, 1986. – 224 с.
24. Хазов, Б.Ф. Надежность технологических систем и машин : учеб. пособие / Б.Ф. Хазов. – Тольятти : ТолПИ, 1995. – 110 с.
25. Хазов, Б.Ф. Надежность системы: изготавливаемое изделие – технологическое оборудование : учеб. пособие / Б.Ф. Хазов, Ж.Ю. Мойсеенко. – Тольятти : ТолПИ, 1996. – 28 с.
26. Хазов, Б.Ф. Управление надежностью машин и технологических систем на этапах их жизненного цикла : в 2 ч. Ч. 1. Этапы разработки технического задания, технического предложения, технического проекта : учеб. пособие / Б.Ф. Хазов. – М. : Машиностроение-1, 2007. – 182 с.
27. Царев, А.М. Надежность технических систем. Техногенный риск : курс лекций / авт.-сост. А.М. Царев. – Тольятти : ТВТИ, 2008. – 298 с.
28. Шаумян, Г.А. Комплексная автоматизация производственных процессов / Г.А. Шаумян. – М. : Машиностроение, 1973. – 640 с.

29. Эрпшер, Ю.Б. Надежность и структура автоматических станочных систем / Ю.Б. Эрпшер. — М. : Машгиз, 1962. — 152 с.
30. ГОСТ 27.410—87. Надежность в технике. Методы контроля показателей надежности и планы контрольных испытаний на надежность. — М. : Изд-во стандартов, 1988. — 79 с.
31. ГОСТ 27518—87. Диагностирование изделий. Общие требования. — М. : Изд-во стандартов, 1989. — 7 с.
32. ГОСТ 27.002—89. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения. — М. : Изд-во стандартов, 1990. — 37 с.
33. ГОСТ 20911—89. Техническая диагностика. Термины и определения. — М. : Изд-во стандартов, 1989. — 11 с.
34. ГОСТ 27.003—90. Надежность в технике. Состав и общие правила задания требований по надежности. — М. : Изд-во стандартов, 1991. — 27 с.
35. ГОСТ 27.001—95. Надежность в технике. Основные положения. — М. : Изд-во стандартов, 1995. — 7 с.
36. ГОСТ 27.301—95. Надежность в технике. Расчет надежности. Основные положения. — М. : Изд-во стандартов, 1995. — 12 с.
37. ГОСТ 27.310—95. Надежность в технике. Анализ видов, последствий и критичности отказов. Основные положения. — М. : Изд-во стандартов, 1995. — 14 с.
38. ГОСТ Р 22.1.01—95. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Мониторинг и прогнозирование. Основные положения. — М. : Изд-во стандартов, 1995. — 10 с.
39. ГОСТ Р 22.1.02—95. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Мониторинг и прогнозирование. Термины и определения. — М. : Изд-во стандартов, 1995. — 10 с.
40. ГОСТ Р 22.1.05—95. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Средства технические мониторинга. Общие технические требования. — М. : Изд-во стандартов, 1999. — 16 с.
41. РД 50-204—87. Надежность в технике. Сбор и обработка информации о надежности изделий в эксплуатации. Основные положения : метод. указания. — М. : Изд-во стандартов, 1987. — 14 с.

Содержание

Введение.....	3
1. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ	
ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ	7
1.1. Постановочные вопросы изучения надежности, диагностики и прогнозирования надежности технологического оборудования.....	7
1.2. Системный подход к обеспечению работоспособности и надежности технологического оборудования.....	11
1.3. Свойства систем машин, являющихся сложными техническими системами.....	12
1.4. Определение надежности, работоспособности, долговечности.....	14
1.5. Модель изменения технического состояния и работоспособности машины в процессе эксплуатации. Термины, определения, характеризующие техническое состояние машины.....	19
1.6. Режимы эксплуатации и их влияние на изменение технического состояния машины.....	24
1.7. Влияние видов энергии на изменение технического состояния машины в процессе эксплуатации.....	25
1.8. Причины потери работоспособности машины в процессе эксплуатации.....	27
1.9. Анализ причин, классификация видов отказов.....	30
Контрольные вопросы	32
Выводы.....	34
2. РАСЧЕТ ОСНОВНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ.....	36
2.1. Основные оценочные характеристики работоспособности машин.....	36
2.2. Надежность и основные показатели надежности.....	39
2.3. Параметры долговечности машин.....	44
2.4. Основные законы вероятностного распределения...	47
2.5. Экспоненциальный закон распределения.....	49

2.6. Нормальный закон распределения (распределение Гаусса).....	50
2.7. Ряд важных дополнительных законов вероятностного распределения.....	53
2.8. Статистические модели отказов.....	55
2.9. Модели формирования постепенных отказов.....	55
2.10. Линейная модель параметрического отказа.....	57
2.11. Методы повышения надежности.....	59
Контрольные вопросы	61
Выводы.....	63
3. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИАГНОСТИКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ И НАДЕЖНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ.....	65
3.1. Назначение и цель технической диагностики для решения проблем повышения уровня технического состояния технологического оборудования.....	65
3.2. Организация диагностирования и оценка технического состояния машины.....	69
3.3. Диагностирование технического состояния узлов и механизмов машины. Проведение испытаний.....	74
3.4. Методы контроля, приборы для диагностирования.....	79
3.5. Проведение диагностирования по видам технического контроля, по назначению и применению.....	81
3.6. Технические средства диагностирования.....	83
3.7. Электронные ТСД для проведения диагностирования технического состояния машин.....	84
3.8. Классификация методов проведения технической диагностики машин, узлов и механизмов.....	85
Контрольные вопросы.....	88
Выводы.....	90

4. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СОСТОЯНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ.....	92
4.1. Прогнозирование уровня развития технологического оборудования.....	92
4.2. Прогнозирование технического состояния. Прогнозирование технического ресурса.....	97
Контрольные вопросы.....	102
Выводы.....	102
5. УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКИМ СОСТОЯНИЕМ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩЕЕ НАДЕЖНОСТЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ.....	104
5.1. Основные положения управления техническим состоянием технологического оборудования.....	104
5.2. Информация и математические модели эффективности оперативной информации в системах управления надежностью технологического оборудования.....	109
5.3. Применение программно-технических средств – программируемых контроллеров (ПК) в системах управления и диагностирования технологического оборудования.....	110
5.4. Алгоритмы и схемы управления техническим состоянием технологического оборудования.....	113
5.5. Перспективы развития методов и средств управления техническим состоянием технологического оборудования.....	116
Контрольные вопросы	117
Выводы.....	118
Заключение.....	120
Библиографический список.....	122

Учебное издание

Царев Анатолий Михайлович

НАДЁЖНОСТЬ И ДИАГНОСТИКА
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Учебное пособие

Редактор *Г.В. Данилова*
Технический редактор *З.М. Малявина*
Вёрстка: *Л.В. Сызганцева*
Дизайн обложки: *Г.В. Карасева*

Подписано в печать 05.09.2013. Формат 60×84/16.

Печать оперативная. Усл. п. л. 7,44.

Тираж 100 экз. Заказ № 1-32-13.

Издательство Тольяттинского государственного университета
445667, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14

