**Содержание**

Введение……………………………………………………………………...4

1. Роль технической диагностики в стратегиях использования,

технического обслуживания и ремонта оборудования…………………5

2. Термины, понятия и задачи технической диагностики………………..9

1. Подходы к моделированию технического состояния

при эксплуатации………………………………………………………...14

3.1 Модели отказов при прогнозировании технического состояния…..16

4. Взаимосвязь процессов технической эксплуатации и изменения

технического состояния………………………………………………….23

5. Показатели процесса технической эксплуатации………………………26

5.1 Функция готовности…………………………………………………..32

6. Теория восстановления и экономические критерии эксплуатации….36

7. Техническое обслуживание и диагностирование посредством

контроля уровня надежности…………………………………………..40

7.1 Анализ видов и последствий отказов………………………………..42

8. Обоснование эффективности обслуживания

по техническому состоянию……………………………………………..49

8.1. Возможность индивидуального прогнозирования

технического состояния…………………………………………………51

8.2 Идентификация моделей и интервалы восстановления…………….52

9. Выбор диагностических параметров…………………………………..65

9.1 Информационный критерий при выборе признаков технического

состояния………………………………………………………………...66

10. Диагностирование технического состояния посредством контроля

параметров……………………………………………………………….71

10.1 Моделирование деградационных процессов……………………….73

Литература…………………………………………………………………..77

**Введение**

Появление технической диагностики (ТД) как научного направления приходится на II половину XX столетия, когда создавались сложные технические системы (главным образом, радиоэлектронные) с огромным количеством элементов и необходимо было отыскивать в них неисправности, а также и распознавать техническое состояние. Собственно, термин диагностика и переводится, как распознавание. В этот же период начинает развиваться, как наука надежность технических систем, призванная решать, в принципе, те же задачи, включая прогнозирование. Впитав в себя методы теории надежности совместно с разработанной теорией распознавания [1], идентифицирующей технические состояния, техническая диагностика стала средством повышения надежности и безопасности устройств, машин и сооружений.

Автоматизация производств потребовала от технологического оборудования особого уровня надежности. Его недостаточно было заложить при проектировании, необходимо стало поддерживать надежность при эксплуатации. Появилась теротехнология – наука об эффективной эксплуатации оборудования, в которой ТД играет существенную роль. Кроме указанных задач, на производстве ТД стала решать задачи улучшения качества выпускаемой продукции путем применения ее неразрушающего контроля, который относится к методам ТД. Этому же способствует исправно работающее оборудование, что во многом достигается средствами ТД. В этом аспекте ТД тесно сближается с параметрической надежностью, новым направлением общей проблемы надежности.

Особую актуальность ТД приобретает в настоящее время, когда повсеместно осуществляется переход к стратегии обслуживания и ремонта оборудования по фактическому техническому состоянию. Решение задачи оценки и прогнозирования технического состояния, автоматизированного, безразборного обнаружения дефектов позволяют существенно сэкономить затраты на обслуживание оборудование. При этом изменяется характер работы ремонтной службы. Вместо принципа «обнаружил – устранил» в обслуживании начинает главенствовать принцип «прогнозирование – предупреждение». Это требует от ремонтника овладения новым инструментарием, опирающимся на специфическую теоретическую базу. Его труд становится более квалифицированным, приобретает инженерно – исследовательские черты. В 2009 году ВАК Украины ввел новую специальность 05.02.10-«Диагностика материалов и конструкций».

В настоящее время ТД является отдельной дисциплиной, отличающейся своей комплексностью. В нее вошли теория и методы надежности, кибернетики, информатики, теротехнологии, автоматики и мехатроники. Применительно к механическими системами важна связь ТД с механикой повреждений и ресурсной механикой. Отказ от комплексного рассмотрения сузит ее до известных ранее дисциплин.

Учитывая это, преподавание ТД в ВУЗах целесообразно производить на старших курсах, когда студенты овладели не только фундаментальными, но и профессиональными знаниями.

Настоящее пособие призвано оказать помощь студентам специальности 8.090218; 8.05050311 «Металлургическое оборудование» в овладении методами диагностирования механических систем в металлургии применительно к обслуживанию их по фактическому техническому состоянию. Поэтому 1часть пособия посвящена теории технического обслуживания и диагностирования механических систем. В результате освоения дисциплины студент должен уметь оценивать показатели технического состояния по результатам диагностирования, а также определять сроки и объемы ремонтно – обслуживающих воздействий.

**1. Роль технической диагностики в стратегиях использования,**

**технического обслуживания и ремонта оборудования**

Система технического обслуживания и ремонта технологического оборудования регламентируется стратегией его использования. Известны три принципиально разные стратегии, позволяющие использовать оборудование: 1) до нормативного ресурса; 2) до предотказного состояния; 3) до отказа. В их развитии лежит конфликт между такими показателями надежности, как коэффициент готовности оборудования и степенью выработки его ресурса. Если в первой из приведенных стратегий гарантируется поддержание высокого коэффициента готовности *кГ*, то в остальных обеспечивается полная или практически полная выработка ресурса, оцениваемая степенью выработки *r*. Данные противоречия решаются путем применения методов технической диагностики. Без нее обходятся только в двух крайних проявлениях стратегий использования и технического обслуживания (ТО): аварийного восстановления либо профилактической замены. Хотя выбор в пользу той или иной стратегии осуществляется на основании критерия минимизации затрат на ТО [2], на самом деле, обе стратегии выгодны для весьма ограниченного круга ситуаций. Аварийное восстановление как система эффективна лишь для недорогих узлов с коротким временем замены. Профилактическая замена узлов целесообразна в особо опасных производствах, где ущерб от аварий значительно выше стоимости узла. Стремление повышать эффективность ТО за счет снижения складских запасов сменных деталей заставляет шире использовать диагностирование технического состояния (ТС) оборудования. Такая тенденция в металлургии ведет к внедрению различных вариантов системы обслуживания по техническому состоянию (табл.1.1)[3-5].

В соответствии с ГОСТ 24212-80 стратегия технического обслуживания (ремонта) представляет собой систему правил управления техническим состоянием изделия в процессе технического обслуживания (ремонта). Существуют следующие стратегии:

техническое обслуживание по регламенту, при которой перечень и периодичность выполнения операций определяются значением наработки (она измеряется либо временным интервалом Δ*t* , либо числом циклов Δ*n*) изделия с начала эксплуатации или после капитального (среднего) ремонта;

технического обслуживание по состоянию, при котором перечень и периодичность выполнения операций определяются фактическим техническим состоянием изделия в момент начала технического обслуживания;

ремонт по наработке, при которой объем разборки изделия и дефектации его составных частей назначается единым для парка однотипных изделий в зависимости от наработки с начала эксплуатации и (или) после капитального (среднего) ремонта, а перечень операций восстановления z определяется с учетом результатов дефектации составных частей изделия;

ремонта по техническому состоянию, при котором перечень операций z, в том числе разборки, определяется по результатам диагностирования изделия в момент начала ремонта при контроле параметра xi, а также по данным о надежности Pi этого изделия и однотипных изделий или по уровню безопасности Ri для уникальных объектов.

Соответствие эксплуатационных стратегий Таблица 1.1

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | Стратегии  ТОиР | Стратегии использования  оборудования | | | Показатели  надежности | |
| До  нормативного ресурса | До  предотказного состояния | До  отказа | *кГ* | *r* |
| Обслуживание | Регламент по сроку службы (Δt=const) | + | - | - | + | - |
| Регламент по наработке (Δn=const) | + | - | - | + | 0 |
| По техническому состоянию с контролем параметров (xi<[x]) | - | + | - | + | 0 |
| По техническому состоянию с контролем надежности (Pi<[P]) | - | - | + | 0 | + |
| По техническому состоянию с контролем безопасности (Ri<[R]) | - | + | - | + | 0 |
| Ремонт | Регламентная (Δtр=const, z=const) | + | - | + | + | - |
| Смешанная (Δtр=const, z=var) | - | + | - | 0 | 0 |
| По техническому состоянию (Δtр=var, z=var) | + | + | + | + | 0 |
| По потребности (Δtр=var, z=var) | - | - | + | - | + |

«+», «0», «-» - соответственно, полная, удовлетворительная и плохая мера адекватности стратегий и обеспеченности показателями.

Стратегия эксплуатации по состоянию предполагает обеспечение высокого уровня эксплуатационно-ремонтной технологичности конструкций, создание в достаточных объемах эффективных средств диагностирования и неразрушающего контроля, развитие производственно-технической и экспериментальной базы эксплуатационных и ремонтных предприятий. Стратегия же по наработке предполагает развитие экспериментальной базы предприятий промышленности и обеспечение по этой основе обоснованных ресурсов до ремонта для каждой совокупности однотипных объектов. Другими словами, стратегия по состоянию направлена на совершенствование эксплуатационных свойств конструкций, мощное развитие производственно-технической базы предприятий, творческий исследовательский подход специалистов к решению задач технической эксплуатации. Стратегия же по наработке нацеливает на преобладающее развитие экспериментальной базы предприятий промышленности и не способствует обеспечению требуемого уровня эксплуатационно-ремонтной технологичности конструкций и развитию экспериметально - технической базы предприятий. От своевременного выбора соответствующей стратегии в решающей мере зависят своевременность и правильность выбора требуемой технической политики развития инженерно-механической службы отрасли на многие годы.

Ремонт оборудования может осуществляться с применением следующих стратегий ремонта;

регламентная (I);

смешанная (II);

по техническому состоянию (III);

по потребности (IV);

Сущность стратегии регламентированного ремонта заключается в том, что ремонт выполняется с периодичностью и в объеме, установленном в эксплуатационной документации независимо от технического состояния составных частей оборудования в момент начала ремонта.

Сущность стратегии ремонта по техническому состоянию заключается в том, что контроль технического состояния выполняется с периодичностью и в объеме, установленном в нормативно-технической документации, а момент начала ремонта и объем восстановления определяется техническим состоянием составных частей оборудования.

Сущность стратегии ремонта по потребности заключается в том, что ремонт оборудования производится только в случае отказа или повреждения составных частей оборудования.

Стратегия I применяется для обеспечения ремонта оборудования, эксплуатация которого связана с повышенной опасностью для обслуживания персонала, в том числе оборудования, подконтрольного органам Госпромнадзора.

На основании стратегии II обеспечивается ремонт всего остального основного и неосновного оборудования предприятия.

По решению руководства предприятия часть оборудования может быть переведена на ремонт по техническому состоянию (стратегия III). Перечень такого оборудования составляется руководителем подразделения, согласовывается главным механиком предприятия и утверждается главным инженером.

Стратегия IV рекомендуется к применению для оборудования первой и второй амортизационной групп. Она частично реализуется в форме внеплановых ремонтов после отказов.

**2. Термины, понятия и задачи технической диагностики**

Указанные сведения регламентированы межгосударственным стандартом ГОСТ 20911-89 «Техническая диагностика. Термины и определения», а также стандартом Украины ДСТУ 2389-94 «Технічне діагностування та контроль технічного стану. Терміни та визначення"

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

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

**Техническая диагностика** – область знаний, исследующая технические сотояния объектов диагностирования и проявления технических состояний, разрабатывающая методы их определения, а также принципы построения и организацию использования систем диагностирования.

**Задачами** технического диагностирования являются:

- контроль технического состояния, контроль параметров функционирования, т. е. хода технологического процесса, с целью его оптимизации;

- поиск места и определение причин отказа (неисправности), контроль изменяющихся в процессе эксплуатации параметров технического состояния оборудования, сравнение их фактических значений с предельными значениями и oпределение необходимости проведения ТО и ремонта;

- прогнозирование технического состояния, прогнозирование ресурса (срок службы) оборудования, агрегатов и узлов с целью их замены или вывода в ремонт.

**Техническое диагностирование** – определение технического состояния объекта с определенной точностью.

Термин «Техническое диагностирование» применяют в наименованиях и определениях понятий, когда решаемые задачи технического диагностирования равнозначны или основной задачей является поиск места и определение причин отказа (неисправности).

**Контроль технического состояния** - проверка соответствия значений параметров объекта требованиям технической документации и определение на этой основе одного из заданных видов технического состояния в данный момент времени.

Видами технического состояния являются, например, исправное, работоспособное, неисправное, неработоспособное и т. п. в зависимости от значений параметров в данный момент времени.

Термин «Контроль технического состояния» применяется, когда основной задачей технического диагностирования является определение вида технического состояния.

**Прогнозироавание технического состояния** – определение технического состояния объекта с заданной вероятностью на предстоящий интервал времени.

Целью прогнозирования технического состояния может быть определение с заданной вероятностью интервала времени (ресурса), в течение которого сохранится работоспособное (исправное) состояние объекта или вероятности сохранения работоспособного (исправного) состояния объекта на заданный интервал времени.

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

**Приспособленность объекта к диагностированию (контролепригодность)** – свойство объекта, характеризующее его пригодность к проведению диагностирования (контроля) заданными средствами диагностирования (контроля).

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

**Автоматизированная система технического диагностирования (контроля технического сотояния)** – система диагностирования (контроля), обеспечивающая проведение диагностирования (контроля) с применением средств автоматизации и участием человека.

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

**Техническое состояние** – это совокупность, подверженных изменению в процессах проектирования, производства доводки, модернизации, эксплуатации, технического обслуживания и ремонта, свойств объекта, характеризуемая в определенный момент времени показателями, прогнозируемыми на начальной стадии проектирования и установленными нормативно – технической документацией на объект, формирующей номенклатуру и допустимыеределы количественных и качественных характеристик, определяющих исправность, работоспособность и правильное функционирование объекта.

**Виды технического состояния -** исправность (неисправность), работоспособность (неработоспособность).

**а) Неисправность** – состояние, при котором параметры объекта не соответствуют хотя бы одному из требований технической документации.

**б) Работоспособность –** состояние, при котором объект правильно функционирует на всех режимах при любых допустимых условиях работы в течение всего установленного времени. Работоспособный объект может быть неисправным.

**Постепенный отказ** – отказ вызываемый неисправностями, интенсивность развития которых позволяет своевременно распознать их зарождение и обеспечить контроль за их развитием.

**Внезапный отказ** – отказ вызываемый неисправностями, интенсивность развития которых и возможность распознания не позволяют своевременно предотвратить его наступление.

**Прямая задача диагностирования** – по изменяемым параметрам определяется неисправность (характерно для функционального диагностирования).

**Обратная задача диагностирования** – вводя неисправность (состояние) оценивается изменение измеряемых параметров (характерна для тестового диагностирования).

**Система диагностики** – совокупность средств, объекта диагностирования и алгоритма диагностирования.

**Система диагностирования** – совокупность объекта диагностирования, технических средств по сбору, накоплению, передаче и обработке информации и математического обеспечения, обеспечивающего циркуляцию информации, обработку, хранение, использование и представление диагностической информации.

**Результат диагностирования** – заключение о техническом состоянии объекта с указанием при необходимости места, вида и причины дефекта (дефектов).

**Комплексная система диагностики** – объединяет комплекс взаимосвязанных подсистем, направленных на распознавание разнородных, классов состояний объекта, объединенных единым сводным алгоритмом диагностирования.

**Автоматическая система диагностики** – все процессы сбора, передачи и обработка протекают автоматически.

**Полуавтоматизированная система диагностики** – предусматривает регистрацию необходимой информации вручную, запись на специальных бланках и обработка на ЭВМ.

**Алгоритм диагностирования** – совокупность преобразований и логических условий, действующих в определенном порядке и направленных на отыскание несправностей и прогнозирование технического состояния с использованием диагностических моделей. Представляют совокупность элементарных проверок, последовательность их реализации и правила обработки результатов элементарных проверок.

**Диагностическая модель** – формальное описание основних свойств объекта (в аналитической, табличной, векторной, графической и т.д. формах), отражающее связь измеряемых параметров с диагностическими признаками неисправностей.

**Диагностический признак** – показатель, однозначно идентифицирующий дефект или группу дефектов в зависимости от глубины диагностирования и используемый для определения технического состояния объекта.

**Контролируемый параметр** – параметр, определяющий функционирование объекта и подвергающийся контролю встроенными или внешними аппаратными средствами.

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

**Дискретный контроль** – контроль, производимый в заданные моменты времени.

**Тренд диагностических признаков (параметров)** – аппроксимирующая кривая, отражающая изменение диагностического признака (параметра) во времени.

**Поиск дефекта** – диагностирование, цель которого является определение места и по необходимости причины вида дефекта.

**Поиск места отказа** – определение части объекта, отказ которой вызвал, неработоспособность объекта.

**Процесс преобразования математической модели в диагностическую** – предусматривает упорядочение системы уравнений к виду, в котором в каждом уравнении диагностический признак выражен в виде функции измеряемых параметров, представленных в приведенном виде (исключается влияние внешних условий).

**3. Подходы к моделированию технического состояния**

**при эксплуатации**

Изменением технического состояния объекта называется объективный процесс, который образуется под воздействием широкого спектра эксплуатационных факторов и представляет собой последовательную во времени смену исправных, неисправных, но работоспособных и неработоспособных состояний.

Для множества однотипных объектов реализации *X(t)* изменения параметра *X* во времени образуют случайную функцию *X(t)*.

Отказ объекта происходит в момент *T* пересечения реализацией процесса *X(t)* предельного уровня *[X]* (рис.1). Тогда вероятность отказа *Q(t)* за время *t* будет равна вероятности того, что *X(T)>[X]*:



а вероятность безотказной работы за время



Для плотности распределения времени безотказной работы *f(t)*, допустимой вероятности отказа *QД* ресурс до ремонта *Tp* определяется из выражения (рис. 3.1):



Тогда средняя наработка *М* до замены объекта после отработки ресурса с учетом замены отказавших объектов



При замене после отказа всех объектов средняя наработка (средний ресурс)



Y(t)

[Y]

t

Tp

ΔT

Tcp

f(t)

Qз(t)

Рис. 3.1 Долговечность объекта при случайном процессе изменения параметра *Y(T)*

Следовательно, абсолютная величина среднего времени недоиспользования ресурсов при замене объекта после отработки ресурсов



При этом относительная величина среднего времени недоиспользования ресурсов



Воспользовавшись известными из теории вероятностей характеристиками случайных величин,



где *σ* – среднее квадратическое отклонение;

*V=σ/Tcp* – коэффициент вариации;

*up* – квантиль распределения.

Например, для нормального распределения времени безотказной работы при *QД*=0,00135:



Диапазон изменения коэффициента вариации для нормального распределения *V*=0,1 – 0,3, поэтому *β*=3∙(0,1 – 0,3)=0,3 – 0,9; *ΔT*=*Tcp∙β*=(0,3…0,9)∙*Tcp*, т. е. (0,3…0,9)∙*Tcp* недоиспользуется.

Для шлицевого соединения шарового шпинделя прокатного стана, например, *Tcp*=18000 ч, *Тр*=6000 ч, тогда *ΔТ*=18000 - 6000=12000 ч; *β*=12000/18000=0,67; *V*=*β*/3=0,67/3=0,22; *σ*=(18000 - 6000)/3=4000 ч.

Таким образом, применение метода замены объектов после отработки ресурса при наличии высоких требований к их безотказности приводит к значительному недоиспользованию индивидуальных ресурсов. Выявить потребность конкретных объектов в техническом обслуживании и ремонте можно с помощью их технического диагностирования.

Следует также принимать во внимание негатив необоснованных ремонтов и принудительных замен, состоящий в увеличении риска появления дефектов при монтаже, а также снижения ресурса оборудования из-за возобновления процесса приработки, при котором интенсивно накапливаются повреждения.

**3.1 Модели отказов при прогнозировании технического состояния**

Модели, отображающие условия взаимодействия, протекающие во времени, приобретают наглядную форму, если до формализованного описания представлять их в графической форме. Формализованная схема, представлення в графической форме, позволяет установить зависимости между факторами, оказывающими влияние на протекание процесса, приводящего к отказу (аварии, катастрофе) между параметрами объекта и действующими загрузками, соотношение между внутренними характеристиками объекта и внешней среды.

Для простоты геометрической интерпретации моделей воспользуемся методом главной компоненты и будем изображать на графиках лишь одно определяющее свойство объекта –внешнюю нагрузку *y*, воплощающую в себе факторы условий эксплуатации, ведущие к отказу и его внутреннюю сопротивляемость *σ* относительно рассматриваемых факторов.

Простейшими случаями графических изображений моделей отказа (или моделей оценивания надежности) являются модели, когда сопротивляемость объекта не зависит от времени. В таких случаях говорят, что объект не стареет.

1. На рисунке 3.2, *a* зображена графическая модель для случая, когда сопротивляемость *σ(t) = σ0 =* const – неслучайная величина, не изменяющаяся во времени, а нагрузка *y* – случайная величина не зависящая от времени.

Рассматриваемый случай представляет собой нагружение объекта случайной статической нагрузкой. Критерием отказа является неравенство *y0>σ0.*. Исход подобного взаимодействия является неопределенным лишь в момент приложения нагрузки, а длительность ее действия не влияет на исход нагружения.

2. Сопротивляемость неслучайная величина *σ(t) = σ0,*а нагрузка *y(t)* – случайная величина, зависящая от времени, т.е. случайный процесс (рис. 3.2, *б*).

Характер зависимости случайной величины *y(t)* от времени функциональный: нагрузка независимо от ее начальной величины линейно возрастает со временем. Условием (критерием) отказа является привышение нагрузкой величины сопротивляемости: *y(t)>σ0*. Неопределенность момента времени появления отказа связана с неопределенностью исходного значения нагрузки.

3. Сопротивляемость – случайная величина *σ0,* не зависящая от времени, а нагрузка *y(t)* – случайная величина, линейно зависящая от времени (возрастающая или убывающая). Условие отказа *y(t)>σ0*. Неопределенность момента наступления отказа (времени безотказной работы) зависит как от случайности сопротивляемости, так и от неопределенности величины нагрузки (рис. 3.2, *в*).

4. Сопротивляемость – неслучайная величина *σ0,* а нагрузка - случайный стационарный процесс *y(t)*. Условие отказа *y(t)*>*σ0*. Такую модель отказа называют иногда моделью «параметр – поле допуска», что соответствует выходу случайной изменяющейся во времени нагрузки *y(t)* за пределы установленного

*σ(t), y(t)*

*φy(y)*

*t*

*φy(t)(y)*

*S*

*t*

*σ(t), y(t)*

*σ*

*S*

*φy(t)(y)*

а б

*σ(t), y(t)*

*σ*

*t*

*φy(t)(y)*

*φσ(y)*

*σ(t), y(t)*

*σ*

*t*

*y(t)*

в г

*σ(t), y(t)*

*σ*

*t*

*y(t)*

*φy(y)*

*σ(t), y(t)*

*t*

*φσ(y)*

*t*

*y(t)*

д е

Рис. 3.2 Графические модели отказов без учета старения сопротивляемости: а, б, в, - нагрузка - случайная величина; г, д, е – нагрузка - случайная функция времени

одностороннего (или двустороннего) поля допуска. Подобный отказ может являться как физическим, так и условным, поскольку условие относительно границы поля допуска *σ0* может быть сформировано субъектом, использующим объект по назначению.

Эта модель соответствует расчетной схеме, так называемой параметрической надежности, когда под нагрузкой понимается некоторый изменяющийся параметр объекта, а под сопротивляемостью – граница поля допуска.

Существо модели не изменится, если понятия «нагрузки» и «сопротивляемости» поменять местами. Графическое изображение нагрузки и сопротивляемости для этого случая показано на рис. 3.2, г.

5. Нагрузка – стационарный случайный процесс *y(t)*, а сопротивляемость *σ0* – случайная величина, не зависящая от времени. Этот случай является типичным для моделей расчета надежности механических конструкций, когда предельное состояние объекта проявляется в его «разрушении». Неопределенность значения нагрузки, приводящей объект к предельному состоянию - характерная черта технических объектов, измерение сопротивляемости которых сопряжено с их разрушением. Графическая модель зависимости нагрузки и сопротивляемости от времени показана на рис. 3.2, д.

6. Нагрузка - стационарный случайный процесс *y(t)*, сопротивляемость – также стационарный случайный процесс *σ0(t)*. Сопротивляемость в процессе работы (во времени) под воздействием переменных во времени факторов приобретает случайные, но обратимые изменения.

К такому случаю можно отнести изменение прочности обшивки самолета при небольших изменениях температуры, не приводящих к пластическим деформациям и усталостному разрушению. Графическая модель отказа приведена на рис. 3.2, е.

Теперь рассмотрим возможные модели отказов с учетом старения свойств объектов, т. е. с учетом необратимых изменений их сопротивляемости.

1. Нагрузка – случайная величина, не зависящая от времени, заданная плотностью распределения *φ(у)*, а сопротивляемость *σ0(t)* – неслучайная функция времени. Величина изменения сопротивляемости обусловлена величиной действующей нагрузки и длительностью работы объекта. Зависимость сопротивляемости объекта от времени – это медленный процесс накопления необратимых изменений. Поэтому изменение сопротивляемости нередко представляет собой монотонно убывающую функцию времени.

Пусть *σ0(t)* – неслучайная монотонно убывающая функция времени, характеризующая предельные (допустимые) нагрузки (по условиям обеспечения прочности, т. е. неразрушимости объекта). Случайная величина *y(t)*=*у0*, являющаяся характеристикой, действующей на объект нагрузки, не зависит от времени. Условие отказа *σ0(t)<y0.*

Возможность появления отказа (разрушения) является функцией времени, зависящей от скорости «старения» объекта и характера функции распределения нагрузки (рис. 3.3, а).

2. Нагрузка – случайная величина *y0*, не зависящая от времени, а сопротивляемость *σ0(t)* – случайный сингулярный процесс («равномерная» функция старения) (рис. 3.3, б).

Иногда их называют функциями, зависящими от случайных параметров, или полуслучайными функциями: *σ0(t)= σ(t, a, b)*. Рассматриваемый в этом случае процесс старения описывается линейной зависимостью сопротивляемости от времени. Скорость старения сопротивляемости не зависит ни от величины сопротивляемости, ни от времени.

Это более общий случай модели отказа, чем рассмотренная графическая модель на рис. 3.3, а. Условие отказа записывается так: *σ(t)<y0*.

Неопределенность времени безотказной работы в этом случае связана как с неопределенностью статической нагрузки, действующей на объект, так и со случайностью исходного значения сопротивляемости. Графическая модель этого случая взаимодействия, приводящего к отказу, показана на рис. 3.3, б.

3. Нагрузка – случайная величина *y0*, не зависящая от времени, а сопротивляемость – сингулярный случайны процесс старения веерного типа *σ(t)*. Веерный сингулярный случайный процесс отличается от равномерного тем, что скорости старения отдельных его реализаций, будучи независимыми от времени, случайны и распределены по известному закону. Вследствие случайности скорости старения неопределенность величины сопротивляемости (ее рассеивание) зависит от времени, что и определяет веерный характер реализаций этого процесса. Условие отказа: *σ(t)<y0*.

Графическое изображение модели отказа для этого случая приведено на рис. 3.3, в.

*σ(t), y(t)*

*S*

*t*

*φy(y)*

*φσ(σ)*

*σ(t), y(t)*

*σ*

*S*

*t*

*σ(t), y(t)*

*S*

*t*

*φy(y)*

*φσ(σ)*

*σ(t), y(t)*

*t*

*y(t)*

*φσ(σ)*

*σ(t), y(t)*

*t*

*y(t)*

*φσ(σ)*

*σ(t), y(t)*

*t*

*y(t)*

*φσ(σ)*

а б

в г

д е

Рис. 3.3 Графические модели отказов с учетом старения сопротивляемости: а, б, в, - нагрузка - случайная величина; г, д, е – нагрузка - случайная функция времени

4. Нагрузка задана стационарным случайным процессом , а сопротивляемость - сингулярным случайным процессом веерного типа.

Такой пример характерен для объектов, сопротивляемость которых зависит от условий работы. Условие отказа записывается в форме неравенства: > (рис. 3.3, *г*).

5. Нагрузка представляет собой стационарный случайный процесс , а сопротивляемость  задана «равномерным» сингулярным нестационарным процессом (рис. 3.3, *д*)

Это типичная для механических объектов модель отказа, отображающая взаимодействие объекта, подверженного «старению», с внешней средой. Формы функций старения  могут быть различными – линейными и нелинейными. Смысловое содержание этой модели таково: отказ наступает тогда, когда случайная величина сопротивляемости, являющейся функцией времени, превышена нагрузкой, являющейся также случайной функцией времени с неизменными вероятными характеристиками.

Условие отказа в этом случае выражают двухместным дважды неопределенным предикатом: >.

6. Наиболее общей формой модели взаимодействия объекта с окружающей средой является модель, отражающая зависимость характера реализаций сопротивляемости как от ее начального значения, так и от изменяющейся во времени скорости старения. Одна из возможных форм такого взаимодействия приведена на рис. 3.3, *е*. В данном случае рассматривается модель прогрессивно возрастающей во времени скорости старения объекта. Эта модель характерна для работы объектов в сильно агрессивных средах. Возможен и другой вариант этой модели, когда образующие окисные пленки снижают (тормозят) скорость старения сопротивляемости. Условие отказа в этом случае также записывается в форме двухместного дважды неопределенного предиката: >.

Случай, когда нагрузка и сопротивляемость нестационарные, случайные функции времени, не представляет принципиальных трудностей для описания самих факторов, приводящих к отказу, однако построение математической модели отказа при этом усложняется.

**4. Взаимосвязь процессов технической эксплуатации и изменения**

**технического состояния**

Функционирование металлургического оборудования характеризуется объективным процессом изменения его технического состояния и субъективным процессом технической эксплуатации, представляющего собой последовательную во времени смену различных состояний эксплуатации. К ним относятся: использование оборудования по назначению, техническое обслуживание, технический контроль, ремонт, готовность, ожидание попадание в каждое состояние и т.п. Состояния процесса технической эксплуатации назначаются, исходя из возникшего у объекта технического состояния. Взаимосвязь между рассматриваемыми процессами осуществляется посредством стратегий технического обслуживания и ремонта.

Сложный объект эксплуатации характеризуется конечным множеством технических состояний *ωt*, изменение которых во времени образует стохастический процесс *ω(t)*. Объединения соответствующих состояний ωt образуют

подмножества исправных, неисправных, работоспособных и неработоспособных состояний.

В свою очередь, процесс эксплуатации характеризуется конечным множеством своих состояний *δj*, объединения которых образуют подмножества состояний эксплуатации. Состояния *δj* назначаются в некотором соответствии с возникающими состояниями объекта *ωt* и процесс технической эксплуатации *δ(t)* является некоторым отображением процесса *ω(t)*. Таким образом, объект индуцирует состояния эксплуатации. Состояния объекта возникают за счет воздействия на него внешних условий, определяемых выбранными состояниями эксплуатации. С помощью матриц переходов из состояний объекта к состояниям эксплуатации и обратно могут быть установлены необходимые соответствия между процессами *ω(t)* и *δ(t)*.

Первоначально процесс находится в определенном состоянии эксплуатации δj  в течение какого-то случайного по продолжительности отрезка времени, распределенного по закону *Fj(t).* Затем с вероятностью *Pjk* мгновенно переходит в состояние δк. Так как состояния эксплуатации определены через состояния объекта и заданы своими функциями распределения, то изучение законов распределения времени *Fj(t)* пребывания объектов в состоянии технического обслуживания и ремонта позволяет оценить эффективность режимов ТОиР. Предложенная модель позволяет принять в качестве метода исследования статистический анализ состояний и переходов реального процесса технической эксплуатации.

Переходы по состояниям, определяемые стратегией эксплуатации, образуют процесс «моментов переходов», который принято называть вложенным процессом или вложенной цепью. Статистический анализ технической эксплуатации рекомендуется выполнять по этапам: на первом этапе исследуются состояния процесса, а на втором – вложенная цепь. Если окажется, что вложенная цепь обладает марковскими свойствами, а на состояниях развиваются временные процессы, близкие по структуре к процессам восстановления, то можно констатировать факт полумарковости процесса технической эксплуатации объектов.

Система управления может быть реализована по разомкнутой и замкнутой схемам (рис. 4.1). Разомкнутая схема управления реализует принцип управления по возмущению (входного параметра) *X(t)*, возникающему под действие внешней среды. Она применяется в тех случаях, когда внешние возмущения могут быть измерены и установлена их связь с выходными параметрами *Y(t)*, характеризующими техническое состояние объекта. Например, число теплосмен в холодильнике стенок доменной печи влияет на его техническое состояние, изменяющееся вследствие термоусталостного нагружения. К разомкнутой схеме управления могут быть отнесены традиционные техническое обслуживание и ремонт, основанные на выполнении постоянных объемов профилактических работ через заранее запланированные интервалы календарного времени или наработки. В качестве параметра внешних воздействий здесь используется календарное время или наработка *t*. взаимодействие между двумя процессами осуществляется незначительно.

Замкнутая схема реализует принцип управления по отклонению регулируемой величины (выходного параметра) *Y(t)*, которая сравнивается с задающим воздействием . В зависимости от наблюдаемого отклонения *ε(t)* формируется соответствующее управляющее воздействие *εy(t)* на процесс технической эксплуатации, а через него и регулирующее *µy(t)* на объект, которое уменьшает это отклонение. В качестве регулируемой величины могут использоваться показатели надежности, например параметр потока отказов *Y(t)*=*ω(t*). При этом устанавливается ощутимая взаимосвязь процессов технической эксплуатации объекта и изменения его технического состояния.

Цель

БУП



μx(t)

εx(t)

V(Z,X)

Z(t)

X(t)

X(t)

Цель

ОЭ

ПТЭ

УУ

БП

Y(t)

Цель

БУП

X(t)

V(Z,Y)

Z(t)



μy(t)

εy(t)

Цель

ОЭ

ПТЭ

УУ

БП

Y(t)

Рис. 4.1 Схема управления процессом технической эксплуатации и техническим состоянием объекта (а – разомкнутая схема, б – замкнутая схема)

ОЭ – объект эксплуатации; ПТЭ – процесс технической эксплуатации; УУ – устройство управления; БП – блок программы технического обслуживания и ремонта объекта.

Наиболее тесное взаимодействие между ними обеспечивает стратегия технического обслуживания и ремонта по состоянию с контролем параметров объекта, определяющих его техническое состояние *Y(t)*=*η(t*). Она соответствует замкнутой схеме управления. При заданной программе управления функционирует первый контур схемы, отмеченный штриховыми линиями на рис. 4.1. Для изменения (корректировки) программы используется второй контур, включающий блок управления программой, который по изменяемым значениям выходных параметров объекта *Y(t)* или входных параметров *X(t)* и показателей процесса технической эксплуатации *Z(t)* формирует оператор *V(Z,Y)* или *V(Z,X)*, обеспечивающий изменение алгоритмов управления.

**5. Показатели процесса технической эксплуатации**

Функция распределения времени безусловного пребывания процесса в состоянии *i*

 (5.1)

Здесь k – номер состояния.

Если *µij* – среднее время, соответствующее распределению Fij(t), то из выражения (5.1) можно получить среднее время *µi* безусловного пребывания процесса в состоянии *i*, т.е.



Если обозначить через *lij* среднее время до первого попадания процесса из состояния *i* в состояние *j* можно получить

 (5.2)

где *М* – матрица, элементами которой служат безусловные средние *µi*;

*Ldq* – диагональная матрица, полученная из L заменой недиагональных элементов нулями.

Соответственно для среднего времени возвращения в состояние *i*:

 (5.3)

Для средней наработки изделия в состоянии *j* процесса технической эксплуатации между двумя очередными входами в состояние *i*:



где *πj/πi* – число попаданий в состояние *j*.

Отсюда следует, что 

Теорема Смита для конечных процессов с сообщающимися состояниями утверждает, что

 (5.4)

Для любых µi < ∞ и произвольных функций 

Выражение (5.4) представляет собой коэффициент использования в состоянии *j*. В частности, если *j* целевое состояние процесса эксплуатации, то *µi/lii* можно определить как целевую функцию процесса технической эксплуатации. Она может рассматриваться как коэффициент готовности, а его максимум может служить критерием оптимальности процесса технической эксплуатации.

Обозначая и используя выражение (5.3),

 (5.5)

Или через наработку *t*0 и время ремонта *tв*: 

Отсюда следует, что *Kj* > 0 и . Следовательно, величина *Kj* (*КГ*) имеет вероятностный характер. Так как *Kj* – функция вероятности *Pik*, то она является характеристикой процесса технической эксплуатации и поэтому может служить целевой функцией. Формально этот означает, что максимум *Kj*  может быть принят в качестве одного из критериев оптимальности процесса технической эксплуатации.

Из выражения (5.5) путем несложных алгебраических преобразований можно получить серию широко распространенных на практике удельных критериев эффективности процесса технической эксплуатации, в частности удельные затраты на техническую эксплуатацию. Из выражения (5.5) можно, например, получить

 (5.6)

Выражение, стоящее в знаменателе (5.6), часто называют коэффициентом средних удельных потерь и обозначают

 (5.7)

Для максимизации *Kj* в (5.6) достаточно выполнить минимизацию *τj*. Снижение значения *τj* возможно прежде всего за счет перераспределения вероятностей *πj* и *πk*, а также сокращения *µk*.

В том случае, когда вместо средних времен *µk* введены средние стоимости Ck пребывания в состояниях *k*=1, 2, …., *N*, из выражения (5.6) можно получить экономический критерий оптимальности процесса технической эксплуатации и ремонта:

 (5.8)

Если положить, что производительность в целевом состоянии дает средний удельный доход *dj*, то можно считать, что доходы в целевом состоянии . Подставляя это выражение в (5.8),



Выражение, определяемое сомножителем при *1/dj*, носит название средних удельных затрат *Cj* на техническую эксплуатацию и ремонт объекта. Если *dj=const*, то максимум *Kjc* достигается минимизацией выражения:

 (5.9)

Итак, получены целевые функции (5.5) или (5.7) и (5.9). критериями оптимальности процесса технической эксплуатации, следовательно, будут: *max Kj* (*min τj)* и (или) *min Cj*. В соответствии с данными критериями ведется поиск оптимальных стратегий технического обслуживания и ремонта применительно к конкретному металлургическому оборудованию.

С помощью диагностирования можно: различить неисправные изделия и подвергнуть их обслуживанию и ремонту; в неисправных изделиях локализовать неисправные узлы и подвергать их обслуживанию и ремонту; в блоках выявлять неисправные элементы и только их ремонтировать и т. д. Чем глубже оценивается техническое состояние, тем более эффективна стратегия. Однако на практике внедрение более эффективной стратегии сопряжено с дополнительными затратами на техническое диагностирование. С учетом этих затрат распределение стратегий по степени их эффективности может существенно измениться. Оптимальной в этом случае будет стратегия обслуживания и ремонта, при которой суммарные приведенные затраты окажутся наименьшими.

**Удельная стоимость эксплуатации** характеризует совокупность всех затрат на деталь за время ее эксплуатации отнесенную к продолжительности эксплуатации *Т* определяется из выражения [6]:

*Сэ=(Д+Р+П)/Тр,* (5.10)

где *Д* – стоимость запасной части, используемой во время ремонта;

*Р* – затраты на замену объекта (ремонтное воздействие);

*П* – стоимость прогнозирования срока отказа;

*Тр* – прогнозный ресурс детали, определяемый с учетом заданного значения *Р(t)*.

Для определения значений всех компонент данного показателя используется заданное значение вероятности безотказной работы детали *Р(t)*, а при расчете затрат на деталь и ремонтное воздействие *Р(t)* обеспечивает учет возрастания этих затрат в случае аварийного ремонта.

При прогнозировании срока отказа могут использоваться различные прогнозные модели. Использование каждой из них требует некоторых затрат, которые могут сильно отличаться для одной и той же детали. Кроме этого, каждая прогнозная модель обеспечивает собственное значение расчетного ресурса для заданного значения *Р(t)*.

Стоимость запасной части складывается из затрат на изготовление, доставку и хранение. Известно, что основное количество запасных частей изготавливается на территории предприятия и сразу же используется во время ремонта. В связи с этим можно считать, что в черной металлургии затраты на доставку и хранение отсутствуют. При определении стоимости запасной части также учтено ее увеличение в случае аварийного ремонта. Это вызывается необходимостью срочного изготовления детали. Стоимость детали составит:

*Д=СИ∙[Р(t)+АД∙(1- Р(t))]*, (5.11)

где *СИ* – стоимость изготовления запасной части;

*АД* – коэффициент увеличения стоимости запасной части (затрат на ее изготовление) в случае аварийного ремонта.

Стоимость ремонтного воздействия зависит от его продолжительности и характеристики используемой ремонтной бригады. Ее состав и квалификация определяется деталью и характером выполняемого ремонтного воздействия. При этом необходимо учесть, что продолжительность ремонтного воздействия увеличивается в случае аварийного ремонта по сравнению с плановым. Затраты на выполнение ремонта составляют:

*Р=ТРЕМ∙NБР∙SБР∙[Р(t)+АР∙(1- Р(t))],* (5.12)

где *ТРЕМ* – продолжительность планового ремонта по замене объекта;

*NБР* – количественный состав ремонтной бригады;

*SБР* – средняя тарифная ставка по бригаде;

*АР* – коэффициент, характеризующий возрастание продолжительности ремонта при аварийном отказе детали.

Стоимость прогнозирования находят для среднего объекта генеральной совокупности. Она зависит от вида прогнозной модели и в случае использования диагностической модели определяется из выражения [6]:

*П=ЗН+ЗП,* (5.13)

где ЗН – затраты по определению начальных параметров модели;

ЗП – затраты на прогнозирование срока отказа детали.

Определение начальных параметров прогнозной модели предполагает проведение ряда экспериментов, при этом затраты, приведенные к одной детали, составят:

*ЗН=ЗЕ/Z,* (5.14)

где *ЗЕ* – затраты, необходимые для проведения экспериментов;

*Z* – количество деталей, для которых прогнозируются сроки отказов.

В общем случае прогнозной модели предполагается, что срок отказа определяется не из одной попытки, а методом последовательного приближения. На каждом шаге приближения оценивается текущее состояние детали и выполняется собственно прогнозирование. Можно считать, что общему случаю прогнозной модели соответствует диагностическая прогнозная модель. При этом стоимость прогнозирования определяется из выражения:

*ЗП=(ТД∙SД+ ТП∙SП)∙N,* (5.15)

где *ТД* – продолжительность операции по оценке текущего технического состояния объекта (диагностики);

*SД* – удельная стоимость выполнения диагностики;

*ТП* – продолжительность обработки результатов диагностики и выполнения прогнозирования;

*SП* – удельная стоимость обработки результатов диагностики и выполнения прогнозирования;

N – количество контролей при прогнозировании отказа.

**5.1. Функция готовности**

Если время до отказа и время ремонта представляют независимые случайные величины, распределенные каждая по экспоненциальному закону, то подобный подход приводит к марковскому процессу, называемому процессом «гибели и размножения» [7].

Для *необслуживаемых систем* важны два критерия качества:

- функция надежности, которая определялась вероятностью безотказной работы к некоторому моменту времени *t* (то есть переход в поглощающее состояние не происходит до момента *t*);

- среднее время, которое необходимо до первого попадания в поглощающее состояние (состояние отказа), или, как его называют, среднее время до первого отказа.

Для *обслуживаемых систем* обычно представляют интерес два других критерия. Первым является время, в течение которого система находится в исправном состоянии, или состоянии готовности. Как будет показано ниже, процесс гибели и размножения описывает готовность системы в переходном и установившемся режимах. Для систем, которые должны работать длительное время непрерывно, изучение установившегося режима является достаточным.

Другим критерием качества, относящимся к обслуживаемым системам, является среднее время возвращения. В этом случае нас интересует время до возвращения системы в исправное состояние из состояния отказа. Иногда его называют средним временем одного вынужденного простоя. Важность среднего времени возвращения ясна, так как готовность учитывает только общее время, проведенное системой в исправном состоянии, и не указывает, как это время распределено.

Метод определения вероятности того, что система находится в некотором состоянии в момент времени *t+Δt*, остается тем же, что и для необслуживаемых систем. Единственное отличие состоит в том, что в связи с возможностью ремонта система может осуществлять прямые и обратные переходы вместо односторонних переходов в случае необслуживаемых систем. Так, для системы из одного образца оборудования можно ввести два состояния: состояние 0, когда система работает, и состояние 1, когда система неисправна и ремонтируется. Далее, так как условная вероятность отказа в интервале *t*, *t+Δt* равна *λΔt*, а условная вероятность завершения ремонта в интервале [*t*, *t+Δt*] равна *µΔt*, получаем следующую матрицу переходов:

 (5.16)

Конечно, разностные уравнения, описывающие стохастическое поведение этой системы, можно составить из следующих соображений: вероятность того, что система находится в состоянии 0 к моменту *t+Δt*, выводится из вероятности того, что эта система была в состоянии 0 в момент времени *t* и не отказала в течение отрезка времени [*t*, *t+Δt*], или что она находилась в состоянии 1 в момент *t* и возвратилась в состояние 0 за интервал *t*, *t+Δt*. Поэтому получаем

 (5.17)

Подобным образом, вероятность пребывания систем в состоянии 1 в момент времени *t+Δt* выводится из вероятности того, что данная система была в состоянии 1 в момент *t* и ремонт за время [*t*, *t+Δt*] не был закончен. Поэтому

 (5.18)

Член *0(Δt)* в обоих уравнениях представляет собой вероятность осуществления двух событий за [*t*, *t+Δt*], то есть является бесконечно малой величиной более высокого порядка, чем остальные величины.

Заметим, что коэффициенты этих уравнений являются элементами одних и тех же строк матрицы переходов. Как и ранее, дифференциальные уравнения получаем, используя предельный переход при *Δt*→0, также определения

**** (5.19)

В результате имеем  (5.20)

Если система при *t*=0 находилась в работе, то начальными условиями будут *Р(0)*=1, *Р1(0)*=0.

Интересно также рассмотреть случай, когда при *t*=0 система находится в ремонте. Тогда начальными условиями будут *Р(0)*=0, *Р1(0)*=1. Применяя преобразование Лапласа и учитывая начальные условия *Р(0)*=1, *Р1(0)*=0, получаем

 (5.21)

После приведения подобных членов имеем:

 (5.22)

Хотя *P0(s)* и *P1(s)* для этого случая можно легко найти подстановкой, используем правило Крамера, так как это окажется полезным для дальнейшего изложения [7]. Для решения данной системы уравнений введем определитель *D*, элементами которого являются коэффициенты при *Pi(s)*. Кроме того, введем определитель *Di*, который образуется в результате замены *i*-го столбца столбцом коэффициентов правой части уравнений системы. Тогда  и

 или  (5.23)

Функция готовности, которую обозначим через *A(t)*, является обратным преобразованием Лапласа для *P0(s)*, то есть

 или 

 (5.24)

Если система в начальный момент *t*=0 находилась в ремонте, то есть *Р0(0)*=0 и *Р1(0)*=1, то

 и  (5.25)

Заметим, что при больших значениях *t* выражения (5.24) и (5.25) становятся равными. Это означает, что после того, как система проработает некоторое время, ее поведение становится независимым от начального состояния.

Функцию готовности *A(t)* можно понимать как вероятность того, что система находится в рабочем состоянии в произвольный момент времени *t*. Во многих случаях нас интересует среднее время исправного для некоторого конечного интервала времени. Тогда можно просуммировать *A(t)* по всему интервалу и разделить на него, то есть

 (5.26)

В данном случае  (5.27)

Если нас интересует коэффициент готовности системы при длительной эксплуатации, то, полагая *T→∞*, имеем

 (5.28)

причем  обычно называют *коэффициентом готовности в установившемся режиме*. Этим предполагается, что для большой совокупности (ансамбля) одинаковых образцов оборудования процесс будет поддерживаться в состоянии статического равновесия.

В литературе по вопросам надежности можно часто встретить определение коэффициента готовности как отношения среднего времени до отказа к сумме среднего времени до отказа и среднего времени ремонта. Для рассматриваемой системы такое определение приводит к результату, аналогичному выражению (5.28). Однако, как далее будет видно, для резервированных систем эта эквивалентность не сохраняется. Для системы из одного образца оборудования среднее время до отказа равно , среднее время ремонта  и коэффициент готовности .

Для всех случаев, когда оказывается возможным перейти из одного состояния в другое в течение длительного периода времени, легко показать, что  всегда существует. Это означает, что решение для установившегося режима можно получить, полагая производные  равными нулю. Тогда система дифференциальных уравнений сводится к системе алгебраических уравнений. Для решения этих уравнений нужно использовать тот факт, что *Pi* (*i*=0, 1, 2, ….., *n*) составляют распределение вероятностей, то есть . Так, рассматриваемая система уравнений приобретает следующий вид:

 (5.29)

Откуда 

**6. Теория восстановления и экономические критерии эксплуатации**

Под восстановлением подразумевается процесс возвращения технической системы в функциональное состояние. Теория восстановления связана с простейшей моделью ремонта, когда после каждого отказа система приводится в исправное состояние за пренебрежимо малый отрезок времени. Несмотря на это, полученные при такой постановке выводы и вычислительные методы имеют большое практическое значение для планирования ремонтов.

В предыдущем разделе было показано, что максимизация функции готовности достигается посредством минимизации функции удельных затрат на эксплуатацию. Получение технического результата посредством регулирования экономических показателей (а не наоборот) выглядит несколько необычно. Однако, такое возможно, поскольку обе функции имеют одинаковую структуру и, следовательно, эквивалентные оптимизационные задачи.

В теории восстановления доказано, что с возрастанием времени эксплуатации происходит [2]:

1) монотонное возрастание среднего числа аварийных восстановлений *Ih(τ)=1/ τh* ,

2) монотонное убывание среднего числа профилактик *Ip(τ)=1/ τp* .

При этом *τh* и *τp*- соответственно, математическое ожидание времени между двумя аварийными восстановлениями и профилактическими. Удельное (на единицу времени) число ремонтов складывается из двух слагаемых: *I (τ)= Ih(τ)+ Iр(τ).*

Обозначим через *ch* и *cp*- средние, соответственно, аварийные и профилактические затраты на восстановление. Если интервал восстановления равен *τ* , то интенсивность эксплуатационных затрат будет:

*R (τ)= ch* *Ih(τ)+ cp Ih(τ).*

Из указанных положений следуют два вывода.

1. Поскольку функция интенсивности эксплуатационных затрат имеет ниспадающую и возрастающую ветвь, то ее график имеет вогнутую форму с наличием минимума. Соответствующий ему интервал восстановления (межремонтный период) τ\* является оптимальным.

2.Функция коэффициента готовности *КГ(τ)* монотонно возрастает при убывании *τ* , поэтому для его (*КГ*) поддерживания на наибольшем уровне выгодно производить профилактики возможно чаще. Однако при этом возрастают затраты на восстановление, что препятствует значительному снижению времени *τp*.

Таким образом, оптимальный интервал восстановления τ\* является решением уравнения *dR/dτ=0.* Его вид обусловлен типом отказов и альтернативными стратегиями восстановления.

При **внезапных** отказах распространена стратегия строго периодического восстановления. Система восстанавливается после отказа (аварийно). Если она отработала без отказов заданный интервал времени, то производится профилактическая замена (рис. 6.1). В этом случае величина τ\* определится из выражения:

, (6.1)

где *λ(τ)*- интенсивность отказов,

*F(τ)-*функция распределения наработки на отказ,

*c=cp/ch*.  

Например, для равномерно распределенной на интервале от *0* до *Т* наработки на отказ решение данного уравнения имеет вид (рис. 6.1):

. (6.2)

Отсюда видно, что оптимальный интервал профилактического восстановления резко уменьшается с ростом ущерба при авариях.

В общем случае решение уравнения (6.1) не выражается явно. Поэтому в специальной литературе имеются таблицы, номограммы для выбора оптимальных интервалов восстановления в зависимости от параметров распределения наработки и коэффициента затрат.

При **постепенных** отказах затраты за один цикл восстановления можно представить как сумму постоянных затрат *С* и переменных затрат *А(τ)* . Тогда по интенсивности последних *a(t)=dA(t)/dt* можно оценивать экономичное время эксплуатации.

В данной ситуации оптимальное время эксплуатации, соответствующее минимуму удельных затрат, является решением уравнения:

. (6.3)

*0*

*τ*

*х*

*2τ*

*х+τ*

Профилактическая замена

Профилактическая замена

Аварийное

восстановление

Рис. 6.1 Строго периодическое восстановление

*0*

*0,2*

*0,4*

*0,6*

*0,8*

*Сp/Ch*

*0,2*

*0,4*

*0,6*

*0,8*

*τ\*/Т*

Рис. 6.2 Оптимальные интервалы восстановления при строго

периодическом восстановлении

При линейной функции *a(t)=at* получаем:

 . (6.4)

Соответствующая ей минимальная интенсивность эксплуатационных затрат будет [2]:

. (6.5)

С помощью экономических критериев возможно также установить периодичность **контролей** технической системы. Дело в том, что зачастую неизвестно в исправном или неисправном состоянии находится оборудование. Это можно установить только после его контроля, диагностирования, ревизии, затраты на которые составляют величину *с1*. Возможна ситуация, когда параметрический отказ уже совершен, но система какое-то время работает с затратами на ее обслуживание (потерянной выгодой) равными *с2*, после чего отказ обнаруживается в момент контроля. Возникает задача оптимального с точки зрения общих затрат планирования проверок. Если приоритет отдается коэффициенту готовности системы, то возникает задача его максимизации при заданных затратах.

Обычно функция затрат *с2* линейна во времени. Для экспоненциального распределения наработки *F(t)=1-exp(t/T)* достаточно точно можно определять оптимальный интервал контроля как [ 2]:

. (6.6)

То есть периодичность контроля устанавливается меньше, чем среднеожидаемая наработка на отказ. Если же известно только математическое ожидание наработки *Т*, то периодичность контролей учащается:

. (6.7)

**7. Техническое обслуживание и диагностирование посредством**

**контроля уровня надежности**

Стратегия технического обслуживания с контролем надежности соответствует стратегии использования элементов технических систем до отказа. При этом межремонтных периодов на них не устанавливается, но контроль и диагностирование выполняются регламентировано. Применительно ко всему парку однотипных изделий осуществляется контроль уровня надежности. В случае, когда фактический уровень надежности становится ниже нормативного, проводится тщательный анализ причин отклонения и осуществляются мероприятия по его повышению. Такими мероприятиями могут являться: дополнительные работы по обслуживанию и ремонту; изменение периодичности контроля надежности; изменение условий и режимов эксплуатации; конструкторские доработки и модернизация оборудования; переход на стратегию обслуживания и ремонта по наработке.

Данная стратегия применяется там, где есть совокупность однотипных узлов или машин, для которой приемлемы математико-статистические методы. Ее использование целесообразно для объектов, отказы которых не влияют на безопасность производства; для которых имеет место экспоненциальное распределение вероятности безотказной работы; которые обладают высокой эксплуатационной технологичностью (легкосъемностью, доступностью, взаимозаменяемостью); затраты на эксплуатацию которых до отказа не превышают затрат на эксплуатацию по профилактике.

Важной особенностью стратегии обслуживания с контролем надежности является ее исследовательская направленность, открывающая перспективы полного перехода к обслуживанию по техническому состоянию.

Уровень надежности совокупности однотипных изделий контролируется путем сравнения наблюдаемого числа отказов *nf* с верхней границей регулирования (ВГР), представляющей собой допустимое число отказов *n=ВГР*. Это значение устанавливается для заданной вероятности *[P]* с помощью распределения Пуассона:

 (7.1)

где *[λ] -*допустимая интенсивность отказов,

z - число однотипных элементов.

*t* – наработка на отказ.

Как правило, *[P]=0,95…0,98*. Следовательно, с такой вероятностью в течение наработки *t*  не будет превышен порог допустимого числа отказов при наличии одних лишь случайных причин, что удовлетворяет условию *nf ≤ n*.

**7.1. Анализ видов и последствий отказов**

***Метод «дерева отказов»***

В рамках вероятностного подхода к анализу безотказности и безопасности сложных технических систем не ограничиваются принципом единичного отказа, а рассматривают всевозможные пути развития отказов. Чтобы последовательно проводить перебор путей развития отказов, используют графический метод «дерева отказов» [7]. За основу «дерева отказов» берется исходное событие и в зависимости состояния подсистем, влияющих на протекание режима, анализируются различные пути развития отказа («ветви дерева отказов») и последствия этого (рис. 7.1).

Исходное событие А

Р(А)

Подсистема

В

Подсистема

С

Подсистема

D

П

П

П

П

П

П

П

П

q

q

q

q

Последствия отказа

Вероятность отказа

системы

Р(А)

Р(А)q

Р(А)q

Р(А)qq

Р(А)q

Р(А)qq

Р(А)qq

Р(А)qqq

Рис. 7.1 Вид «дерева отказов»

Верхние ветви после разветвления соответствуют работоспособному состоянию подсистемы, а нижние – неработоспособному; q – вероятность отказа подсистемы; 1 – q ~ 1, поскольку q <<1; Р(А) – вероятность (или интенсивность) исходного события.

В общем случае может быть 2*n* путей развития отказа, если на его протекание влияют *n* независимых подсистем, каждая из которых может находиться в одном из двух состояний: работо- и неработоспособном. При наличии связей между подсистемами отдельные пути могут быть опущены как нелогичные, что позволяет упростить «дерево отказов».

Вероятность различных последствий определяется частотой исходного события и вероятностью отказа подсистем, необходимых для обеспечения безотказности.

В процессе вероятностного анализа безотказности могут быть допущены просчеты, если все отказы оборудования и подсистем рассматривать как независимые события. Поэтому значительные усилия затрачиваются на выявление потенциально возможных отказов по общей причине. Это многочисленные отказы в одной или разных подсистемах, возникающие в результате единого исходного события, или отказа. Для рассматриваемых подсистем или устройств они могут происходить вследствие общности места расположения, условий работы, вспомогательных подсистем (управляющих и обеспечивающих), способа технического обслуживания, проверок и ремонтов, конструкции, технологии изготовления, материалов и др. Для отказов по общей причине на разных этапах «жизненного» цикла установки характерны следующие признаки.

Анализ методом «дерева отказов» требует глубокого знания процесса проектирования, создания и эксплуатации соответствующего компонента или системы. Данным методом достигаются положительные или отрицательные результаты на каждом уровне или в логическом звене; его применение особенно целесообразно при анализе механических отказов. В процессе рассмотрения человеческих ошибок выявляется столь много промежуточных уровней между успешным выполнением задачи и неспособностью ее решения, что метод теряет свое значение.

При анализе более ясной картины причинно-следственных связей, ведущих к аварии или инциденту, легче определить уровни и области наиболее рационального применения процедур их предотвращения. Применительно к существующим техническим системам упомянутый метод анализа отказов способствует выявлению областей, в которых требуется принять более активные меры по предотвращению аварийных ситуаций.

***Процедура FMEA***

FMEA (Failure Mode and Effects Analysis) — означает анализ видов и последствий отказов. FMEA — это методология проведения анализа и выявления наиболее критических шагов, с целью управления надежностью и безопасностью технических систем.

Следует заметить, что это не единственное определение FMEA. Согласно военного стандарта [США](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D0%A8%D0%90) MIL-STD-1629 «Procedures for Performing a Failure Mode, Effects and Criticality Analysis», FMEA — это процедура, с помощью которой проводится анализ всех возможных ошибок системы и определения результатов или эффектов на систему с целью классификации всех ошибок относительно их критичности для работы системы.

Область применения FMEA не ограничивается технической сферой. Метод FMEA также используется для непроизводственных отраслей, таких как: [маркетинг](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9C%D0%B0%D1%80%D0%BA%D0%B5%D1%82%D0%B8%D0%BD%D0%B3), продажи, [менеджмент](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9C%D0%B5%D0%BD%D0%B5%D0%B4%D0%B6%D0%BC%D0%B5%D0%BD%D1%82), обслуживание и т. д. Таким образом,FMEA применимо для анализа видов и последствий отказов продукта, процесса, системы, услуги и т. д. на протяжении всего времени существования последнего.

FMEA был разработан для военной промышленности США как стандарт подхода к определению, анализу и категоризации потенциально-возможных отказов. Стандарт MIL-STD-1629 «Procedures for Performing a Failure Mode, Effects and Criticality Analysis» введён в действие в [1949 году](http://ru.wikipedia.org/wiki/1949_%D0%B3%D0%BE%D0%B4). Указанный документ действует в США и по сегодняшний день.

Позже, в 1950-60-х годах стандарт был применен в аэрокосмической промышленности для предотвращения дефектов дорогих и несерийных ракетных технологий. Разработку проекта по высадке человека на луну — «Apollo», [NASA](http://ru.wikipedia.org/wiki/NASA) проводило с применением данного подхода.

В 70х годах ХХ века методология FMEA была применена в автомобильной промышленности компанией Ford для повышения надежности и безопасности автомобилей. Компания также использовала FMEA для улучшения дизайна и производственного процесса. А с 1988 года метод начал использоваться членами «Большой Тройки». С 1993 года FMEA стал одним из требований стандартов AIAG иAmerican Society for Quality Control.

Суть методики FMEA состоит в идентификации всех потенциально возможных ошибок или отказов системы (процесса или продукта). Этот процесс основан на составлении списка всех возможных отказов с последующим его анализом и последующей числовой оценкой (рис.7.2). Составив список всех возможных ошибок, а также последствий их возникновения FMEA-команда оценивает каждый отказ по трем критериям: значимости или критичности отказа (S); частоте возникновения данного дефекта (О); и возможности обнаружения на предприятии-изготовителе (D) (рис.7.3).

В руководстве «Анализ видов и последствий потенциальных отказов. FMEA: Справочное руководство. «Крайслер Корпорэйшн», «Форд Мотор Компани», «Дженерал Моторс Корпорэйшн» приведены рекомендуемые 10-балльные шкалы оценок для указанных трех критериев. Однако чаще всего организация актуализирует эти шкалы в соответствии со спецификой производства. К примеру, может указываться частота возникновения в штуках из определенного количества изготовленной продукции или частота повторов во времени.

Впоследствии высчитывается обобщенный показатель — приоритетное число риска (ПЧР), равное произведению трех упомянутых балльных оценок (ПЧР = S∙O∙D).

ПЧР может принимать значения от 0 до 1000 и обычно сравнивается с установленным критическим значением. Если полученное ПЧР больше критического ПЧРгр, то система или процесс требуют доработки. Чаще всего принятые меры помогают снизить частоту появления (О) и/или повысить частоту обнаружения (то есть снизить значение D).

Для упрощения анализа предложены количественные оценки частоты появления отказов:

*Ожидаемое наступление отказа Ассоциируемая вероятность*

*наступления отказа Р*

Частое *Р > 0,2*

Вероятное 0,1 < *P < 0,2*

Редкое 0,01 < *P < 0,1*

Очень редкое 0,001 < *P < 0,01*

Невероятное *P < 0,001*

Стратегия обслуживания с контролем надежности нуждается в использовании в определенной мере средств ТД. Ее можно рассматривать как этап к переходу к полноценному обслуживанию по техническому состоянию. Рекомендуется следующая последовательность и методика проведения работ по оснащению оборудования средствами ТД.

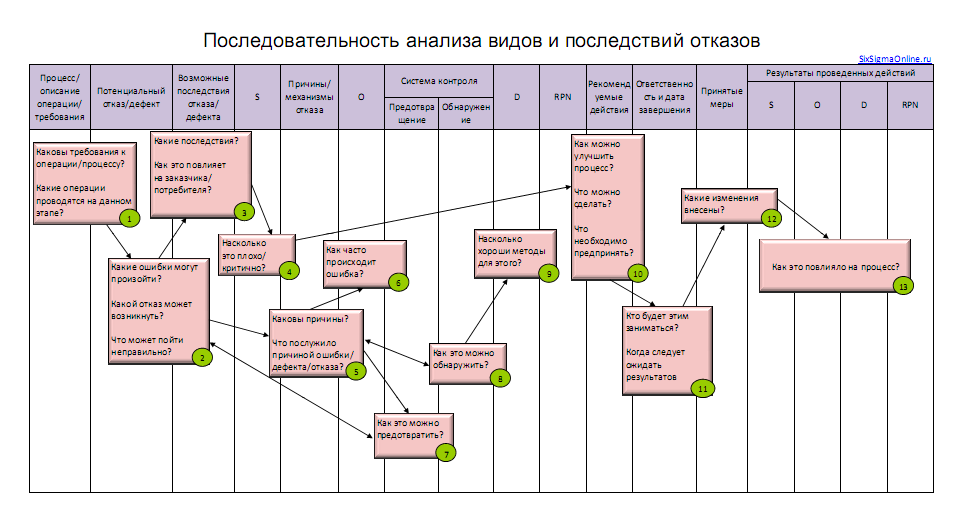
**

Рис. 7.2 Последовательность анализа видов и последствий отказа

**

**

Рис. 7.3 Критерии расчета числа приоритетности риска

Определяются параметры, подлежащие постоянному или периодическому контролю для проверки алгоритма функционирования и обеспечения оптимальных режимов работы (технического состояния) оборудования.

По всем агрегатам и узлам оборудования составляется перечень возможных отказов. Предварительно проводится сбор данных об отказах оборудования, оснащаемого средствами ТД, или его аналогов. Анализируется механизм возникновения и развития каждого отказа, и намечаются диагностические параметры, контроль которых, плановое техническое обслуживание и текущий ремонт могут предотвратить отказ. Анализ отказов рекомендуется проводить по форме, представленной в табл. 7.1.

Таблица 7.1

Форма для анализа отказов и выбора диагностических параметров,

методов и средств технического диагностирования

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

(наименование оборудования)

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Прогнозируемый характер отказа | Возможные  причины отказов | Физическая сущность отказа | Неисправность,  предшествующая отказу | Диагностический  параметр и  метод  диагностирования | Средства ТД | Встроенное или внешнее устройство ТД |
|  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |

Определяется номенклатура деталей, износ которых приводит к отказу.

Определяются параметры, контроль которых необходим для прогнозирования ресурса или срока службы деталей и соединений.

Составляется сводный перечень диагностируемых отказов, возможные причины отказов, предшествующие отказу неисправности и т. д.

**8. Обоснование эффективности обслуживания**

**по техническому состоянию**

В разделе 3 было продемонстрировано, как обслуживание «по нормативу» ведет к недоиспользованию индивидуальных ресурсов элементов механических систем. Здесь же будет показано, за счет чего можно повысить степень выработки ресурса, используя обслуживание по техническому состоянию.

**Предпосылки перехода к системе обслуживания по техническомусостоянию.** В вопросах технического обслуживания и ремонта оборудования (ТОиР) в настоящее время прослеживается ряд негативных тенденций:

* недостаточное финансирование ремонтных работ не даёт возможности модернизировать оборудование (как это принято при ремонтах в ГМК), а лишь восстанавливать его по факту отказа;
* устаревшие нормы на сроки, запчасти и материалы для ремонта не обеспечивают полное использование ресурса оборудования, ведут к росту складских остатков;
* недостаточное развитие информационных технологий не позволяет отслеживать историю эксплуатации оборудования, при этом сложно планировать ремонты с учетом предстоящей производственной программы, невозможно определить, какова доля брака продукции связана с неисправностью оборудования.

Сейчас рядом нормативных документов предусмотрено действие двух систем ТОиР – традиционной для ГМК планово-предупредительной (ППР) и перспективной системы обслуживания по техническому состоянию (ОТС). Указанные тенденции обусловлены в значительной мере несостоятельностью системы ППР в современных условиях. Укажем следующие достоинства ОТС:

* 1. Возможность сокращения ремонтного персонала.
  2. Повышение коэффициентов готовности и использования дорогостоящего оборудования, сокращение срока его окупаемости, а также расходов на ТОиР.

3. Предотвращение «замораживания» финансовых средств на складах. Ответственные узлы, подлежащие замене, должны быть планово установлены на оборудование, а не приобретаться впрок, теряя свою годность при хранении.

4. Улучшение качества продукции, поскольку этому способствует исправно работающее оборудование.

Современное технологическое оборудование, в особенности зарубежное, уже при поставке оснащено штатными системами контроля его функционирования. Это повышает уровень качества оборудования, снижая материало- и энергоемкость, повышая надежность и безопасность эксплуатации. Оно приспособлено под ОТС. Действующее оборудование, имея в целом значительную степень износа в экономическом аспекте, может еще эксплуатироваться (полностью или по узлам), поскольку не выработан технический ресурс. Это необходимо обосновывать, применяя методы, характерные для ОТС.

Количественные показатели эффективности системы ОТС для технологического оборудования имеют широкую вариацию, иногда противоречивы. Например, сообщается, что применение систем диагностики и мониторинга сокращает почти в 10 раз затраты на текущий ремонт, незначительно снижая затраты на текущее обслуживание и капитальные ремонты [3]. Также имеется аналитический вывод, что при ОТС происходит реструктуризация видов ремонтов – необходимость в строгом графике капитальных ремонтов отпадает, но растет доля затрат на текущее обслуживание и ремонты [4].

**8.1. Возможность индивидуального прогнозирования**

**технического состояния**

Для определения возможности индивидуального прогнозирования параметров необходимо установить, насколько быстро они изменяются и насколько сильно перемешиваются реализации случайного процесса.

Изменение структурных параметров механических систем часто связано с износом деталей или усталостными разрушениями. Эти процессы, как правило , протекают монотонно. Если перемешивание реализаций сильнее, то для каждого конкретного экземпляра объекта прогнозирование должно осуществляться по наихудшему из практически возможных вариантов. В этом случае допускается, что из любого состояния возможен почти мгновенный переход реализации на верхнюю доверительную границу изменения параметра совокупности однотипных объектов. При этом для более удачного экземпляра объекта дается такой же прогноз, как и для менее удачного.

Если перемешивание реализаций относительно слабое, то для каждой отдельной реализации можно определить доверительные границы, отличительные от доверительных границ всей совокупности. В этом случае является возможность более рационального использования информации о состоянии объекта, полученной при диагностировании.

Для количественной оценки степени перемешивания реализаций случайного процесса применяют числовую характеристику *R (t1 t),* называемую нормированной корреляционной функцией, которая является коэффициентом корреляции между значениями рассматриваемой функции в двух сечениях процесса.

 (8.1)

где *yi* и *y1i* параметр каждого *i*-го экземпляра объекта при наработках *t* и *t1;*

средний износ при наработке** *t1;*

*-* среднее квадратическое отклонение.

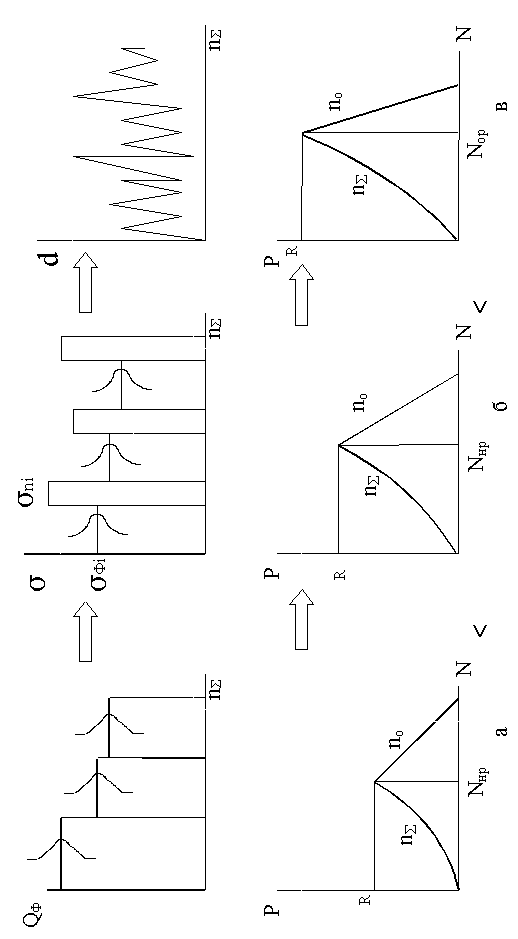
Остальные аналогичные символы относятся к текущей наработке.

Когда нормированная корреляционная функция близка единице, перемешивание реализаций слабое; когда она близка к нулю, перемешивание сильное. Значение нормированной корреляционной функции, например, для процессов изнашивания шлицевых соединений в реальных условиях эксплуатации остается достаточно высоким на протяжении большого периода работы узлов трения. Во всех видах исследования нормированная корреляционная функция была выше 0,6 , что свидетельствует о слабом перемешивании реализаций и позволяет сделать вывод о принципиальной возможности индивидуального прогнозирования.

**8.2. Идентификация моделей и интервалы восстановления**

**Теоретическое обоснование системы ОТС.** За счет чего могут приносить эффект автоматизированные системы контроля функционирования оборудования и средства технической диагностики? Повышение информированности обслуживающего персонала, безусловно, расширяет маневренность производства, но это сложно связать с экономией затрат. На наш взгляд, в первую очередь эффект связан с автоматизацией. Меньше становится трудозатрат по ревизии оборудования, когда разборка – сборка узлов производится с целью выявления возможных дефектов. Система диагностики становится эффективной, когда средства диагностики сочетаются с диагностическими моделями, для которых строятся деградационные модели по выбранным диагностическим признакам и показателям. Эти модели должны создаваться механиками, обслуживающими оборудование для конкретных условий его эксплуатации. Разработчикам

Рис. 8.1. Укрупненная схема реализации концепции поэтапного установления назначенного *Nнр* (а), исходного *Nир*(б), и остаточного *Noр*ресурса для вероятности *Р*, ведущей к росту безопасности *R*, определяемой при сравнении функции распределения числа циклов наработки *n* и долговечности *no*, путем замены спектра общей нагруженности *Qф*(а) многорежимным макроблоком напряжений *σф*и *σп* (б), который трансформируется в процесс накопления повреждений *d*.



средств диагностики решение таких вопросов не свойственно.

Сущность преимущества ОТС заключается в более полном использовании ресурсов элементами конструкций. Чтобы обосновать это, рассмотрим деградационную модель старения во времени эксплуатации *t* линейного типа (1, рис. 8.2, а):

 (8.2)

где *Dt* и *D0* – соответственно, текущее и начальное значение диагностического параметра,

*v* – скорость (интенсивность) деградационного процесса.

Последний параметр функции (8.2) – нормально распределенная случайная величина, медианное значение которой *vм* и её среднеквадратическое отклонение (СКО) *Svm* обычно устанавливаются косвенно по времени до выхода из строя элемента механической системы по допускаемому значению *[D]*:

  (8.3)

где *SD* – СКО величины [D].

Учитывая нормальность распределения параметра *D*, гарантированное время наработки на отказ для допускаемой вероятности безотказной работы (ВБР) будет:

 (8.4)

где *UР = UВБР* – нормированный квантиль нормального распределения, соответствующий [ВБР].

arctg VM

6 • S VM

**1**

**2**

UP

O

UВБР

t max

t

D0

t

[ t ]M

[D]

D

а

arctg VФ

6 • S VФ

**1**

**2**

UP

O

UВБР

t max

t

D0

ti

[t]Ф

[D]

D

arctg VФ

[t]'Ф

S‘D

Δti

ti-1

t

Di-1

Di

б

Рис. 8.2 Прогнозирование функций распределения сроков службы 2 по моделям старения 1 при системе обслуживания «по нормативу» (ППР,а) и системе обслуживания по техническому состоянию (ОТС,б).

Величина *[t]м* определяется по функции распределения наработки на отказ (2, рис. 8.2). Такая схема обслуживания «по нормативу», основанная на статистических данных о наработке на отказ, принята в системе ППР. При ОТС оценка скорости деградационного процесса  рассчитывается по результатам измерений величины *Di* через интервалы времени *Δti* в i-ый раз контроля [7]:

 (8.5)

СКО величины *VФ* в этом случае определяется так [4]:

 (8.6)

Величина фактического СКО скорости *Svф* значительно ниже своего модельного (априорного) значения *Svm*, поскольку второй сомножитель (иногда называемый коэффициентом перемешивания реализаций) меньше единицы. Вдобавок, здесь значение *SD* определяется погрешностью измерительных устройств, которая на порядок меньше разброса измеряемого параметра. Поэтому после подстановки в (8.4) вместо модельных параметров фактических значений гарантированная наработка на отказ *[t]ф*, увеличивается относительно исходного *[t]м*. На практике это дает рост межремонтных периодов и сроков службы. Поскольку поведение технологических машин нельзя прогнозировать со 100% - ой уверенностью, то приближение к этой вероятности путем выявления в случайных факторах детерминированной составляющей заставляет полнее раскрываться потенциалу конструкции. При мониторинге происходит идентификация деградационной модели, в которую первоначально входят статистические характеристики *Vм* и *Svм*, отражающие свойства генеральной совокупности идентичных систем, а затем эти характеристики замещаются оценками *VФ* и *Svф*. Именно такова каноническая точка зрения на принцип ОТС [7].

Из изложенного вытекают два следствия.

1. Для технологического оборудования важно знать не только его состояние на момент контроля, но и иметь надежный прогноз на период работы, исключающий ремонтные воздействия. После контроля в момент времени *ti*прогнозирование осуществляется по средней оценке *VФ*. Но не обязательно дальнейший процесс будет происходить с той же скоростью. Чем короче время экстраполяции процесса (шаг), тем надежнее прогноз работоспособности. Увеличить шаг, можно используя более достоверные и сложные модели, нуждающиеся в длительном экспериментальном обосновании. Поэтому процесс мониторинга заключается в пошаговом переназначении сроков службы - от проектного ресурса к исходному и далее - к остаточному ресурсу (рис.8.1) [8].
2. Увеличить точность прогноза остаточного ресурса можно путем увеличения числа измерений *i*. При периодическом контроле практически сузить разброс величины наработки на отказ можно в 2-3 раза, переходя от нескольких контролей к нескольким десяткам. При сплошном контроле модель становится детерминированной и рассеяние долговечности будет определяться точностью измерения диагностического параметра *D*. Соответствующая этому величина *S´D* существенно меньше оценки *SD*, что дает дополнительное увеличение межремонтного периода *[t]´ф> [t]ф* (рис. 8.2, б). Таким образом, предпочтительнее сплошной контроль диагностических параметров с пошаговой оценкой остаточного ресурса.

В качестве функции отклика *D* в деградационных моделях кинетического типа могут использоваться различные диагностические параметры, но наиболее успешно осуществляется мониторинг для коррозионных и износных явлений, когда величина *D* непосредственно измеряется (прямой метод). Кроме слабых прогностических возможностей, что присуще многим современным средствам диагностики (например, увеличение виброскорости в 2-3 раза до предельной происходит за короткий период катастрофического роста трещины, а до этого тренд сигнала не прослеживается), прямые методы в подавляющем большинстве указывают на неисправности машины. Они не дают информации об остаточном ресурсе конструкций, поскольку используемые диагностические параметры весьма отдаленно связаны с природой разрушения материалов. Персоналу сложно определить приближение конструкции к предельному состоянию, чтобы принять компенсирующие мероприятия. В этом отношении интересны физические способы контроля, тесно связанные с усталостным повреждением материалов (например, магнитный и акустикоэмиссионный способы контроля кожухов доменных печей и воздухонагревателей [9]), но о широком их применении в ГМК говорить еще рано.

Для иллюстрации принципиального различия двух подходов к техническому обслуживанию «по нормативу» и «по состоянию» рассмотрим распространенную ситуацию.

Пусть динамика определяющего параметра задается в виде

 (8.7)

где *Y0* – известная величина;

*V* – нормально распределенная случайная величина с математическим

определением  и дисперсией *Sv2*, то есть , а

распределение *φ(х)* задано выражением

 (8.8)

Таким образом, параметр Yt распределен нормально с математическим ожиданием  и дисперсией .

Рассмотрим одностороннюю допустимую область и монотонно возрастающие реализации стохастического процесса *{Yt}t≥0* для *P(V≥0)*=1. Вероятность безотказной работы:

 (8.9)

Интервал восстановления *τв* рассчитывается из условия  где *[R]* – заданное значение вероятности безотказной работы.

Из (8.9) следует равенство:

 (8.10)

Отсюда находим

 (8.11)

где *u[R]* – квантиль стандартного нормального распределения.

Для примера рассмотрим кривошипно-шатунный механизм, управляющий положением рабочего органа. В его шарнирных соединениях происходит износ, ведущий к зазорам и образованию мертвого хода *Y*, который является диагностическим параметром с линейной моделью изменения. При этом среднее значение зазоров *3мм*, его коэффициент вариации *v0=0,1*, допустимое значение *[Y]=13мм*. Через 50 часов эксплуатации (*t50)* среднее значение зазора составило *Y50=* *5мм*, а его СКО *SY50=1мм*. Тогда средняя скорость износа и ее СКО будут:  , 

Эти данные годятся для оценки исходного ресурса, если закон распределения параметров модели (в данном случае нормальный) исследован. На стадии проектирования следует также учитывать вариацию начального параметра. Это ведет к росту СКО скорости (интенсивности) изнашивания: 

В табл. 8.1 приведены значения интервалов восстановления, обеспечивающих различные значения вероятностей безотказной работы.

При обслуживании по фактическому состоянию в модели (8.7) скорость рассчитывается по результатам измерений *Yt*.

Будем считать, что систематическая погрешность измерений отсутствует, а случайная нормально распределенная погрешность характеризуется дисперсией *S02*. в качестве неизвестной величины *V* принимаем ее оценку, полученную, например, методом наименьших квадратов:

 (8.12)

где *Yj* – измерение параметра *Yt* в дискретный момент времени *jΔt*;

*i* – число измерений.

Оценка  имеет нормальное распределение с математическим ожиданием  и дисперсией 

Интервалы восстановления *τв* исполнительного механизма в часах Таблица 8.1

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| № | Этап оценки ресурса и  характер  определения параметра | Глубина  идентификации модели | *Sv*,  мм/ч | *[R]* | 0,9 | 0,95 | 0,99 | 0,999 |
| *u[R]* | 1,282 | 1,645 | 2,324 | 3,092 |
| *k* | 3,066 | 4,513 | 10,104 | 140,7 |
| 1 | Назначенный ресурс,  априорные значения  параметра | Принятое  распределение *V* и *Y0* | 0,021 |  | 150 | 135 | 113 | 96 |
| 2 | Исходный ресурс,  выборочный контроль  параметра | Известное распределение *Yi* | 0,020 | 152 | 137 | 116 | 98 |
| 3 | Исходный ресурс,  выборочный контроль  параметра | Стохастический характер  изменения *Yi* | 0,020 | 99 | 77 | 41 | 4 |
| 4 | Остаточный ресурс,  мониторинг параметра | Фактические значения *Y0* | 0,0009 | 243 | 241 | 238 | 234 |

При подстановке оценки *Vi* в модель (8.7) получаем нормально распределенную оценку текущего значения параметра *Yt*:

 (8.13)

с математическим ожиданием  и дисперсией .

Оценка  позволяет построить прогнозируемое значение определяющего параметра Yi+m (m=0, 1, 2,……):

 (8.14)

с математическим ожиданием  и дисперсией .

Таким образом, случайная величина

 (8.15)

Имеет стандартное нормальное распределение и интервал восстановления *(i+m)∙Δt* определяется аналогично (8.10)

 (8.16)

Отсюда находим

 (8.17)

Выражения (8.10) и (8.17) аналогичны, однако в (8.17) вместо математического ожидания и среднеквадратического отклонения, характеризующих свойства генеральной совокупности идентичных систем, появляется оценка *Vi* и ее среднеквадратическое отклонение *SVi*, характеризующее процесс идентификации модели старения конкретной единственной системы.

Учитывая, что погрешность измерения выбирается, как правило, не менее чем в 10 раз меньше разброса измеряемого параметра в партии изделий, проведем численное сравнение двух подходов. Пусть *[Y]*=3 мм, *Yв*=13 мм, *V50ч*=0,04 мм/ч, *Δt*=5 ч, *i*=10, *σ0*=0,1 мм. Расчет дает значение *SV50ч*=8,72∙10-4 мм/ч.

В таблице 8.1 приведены результаты расчета интервалов восстановления для различных значений вероятностей безопасной работы. Таблица 8.1 иллюстрирует преимущества подхода к обслуживанию по фактическому состоянию.

В заключение заметим, что при достаточно большом числе измерений, используемых для неизвестной скорости *V*, дисперсия ее оценки стремится к нулю, модель старения становится детерминированной и с вероятностью *R3*≈1 может быть установлен необходимый момент восстановления. Так, в данном числовом примере при получим *τв*=250 ч.

Рассмотренный подход может быть обобщен на любую параметрическую модель старения, при этом основное внимание уделяется методу идентификации модели.

При идентификации модели динамики параметров достаточно часто дисперсия оценки параметра точно неизвестна и оценивается по той же выборке. Действительно, модели изменения параметров в процессе эксплуатации систем являются в основном эмпирическими. Поэтому разброс оценки определяется не только случайными погрешностями измерений, но и неизвестными случайными флюктуациями параметра от модельного значения. В таком случае задача несколько усложняется, поскольку случайная величина  уже не будет иметь нормальное распределение вероятностей.

Рассмотрим более подробно распределение случайной величины . Представим случайную величину *z* в виде

 (8.18)

где *n* –объем выборки, по которой производилась оценка *Yt*. Первое слагаемое числителя совпадает с предыдущим случаем, то есть

 (8.19)

Второе слагаемое числителя – случайная величина, имеющая стандартное нормальное распределение, то есть

 (8.20)

Знаменатель представляет собой случайную величину, имеющую распределение ,

где *χ2* – распределение Пирсона с (*n-m*) степенями свободы;

*m* – число оцениваемых параметров (в данном примере *m*=1).

В результате случайная величина *z* имеет нецентральное *t* - распределение Стьюдента с параметром нецентральности *u[R]*.

В такой ситуации, если принять доверительную вероятность равной *[R]*, распределение ресурса будет характеризоваться статистикой *k*, являющейся математическим ожиданием нормально распределенной случайной величины  [7]:

 (8.21)

В таблице 8.1 приведены результаты расчетов значений характеристик *k* при различных *[R]* и *n*.

Алгоритм расчета времени восстановления в данном случае будет иметь вид

 (8.22)

В таблице 8.1 приведены значения времени восстановления для рассматриваемого примера при замене СКО *SV* на ее оценку  той же величины.

Анализ значений в таблице 8.1 показывает, что неопределенность оценки дисперсии снижает эффект от перехода к обслуживанию по техническому состоянию. Это ставит высокие требования к точности идентификации деградационных процессов старения при эксплуатации изделия.

**Практические аспекты перехода к ОТС.** Внимательное изучение возможностей штатных (встроенных) систем контроля работы оборудования в ГМК дает основание считать, что они приносят пользу, которая не вполне связанна с переходом на ОТС. Учитывая высокую аварийность оборудования и осуществление ремонтов, преимущественно, по факту отказов, можно судить о том, что, фактически, не действует система ППР на многих производствах. А значит, применение систем контроля рабочих параметров процессов и машин, что трактуется как переход на ОТС, сразу может не ощущаться. И без наличия системы мониторинга, ориентированной на обнаружение неисправных состояний, ресурс конструкций используется полностью, хотя и путем аварий. Лишь некоторые системы мониторинга (все в прокатном производстве) ориентированы на оценку остаточного ресурса основных узлов оборудования, что дает возможность полностью получить эффект от ОТС.

Построение реально работающей системы мониторинга технологического оборудования в инженерно-организационном отношении – трудоемкая задача. Она осложняется субъективными причинами мотивационного характера. Речь идет о том, что на ранних стадиях эксплуатации оборудования, когда оно имеет малую степень износа, необходимость обслуживания по техническому состоянию не ощущается. Надежность поддерживается планово-предупредительной системой ремонтов. Эта система становится малоэффективной на поздних стадиях эксплуатации, когда, с одной стороны, необходимо сдерживать возрастающие расходы на техническое обслуживание, связанные с преждевременной заменой не выработавших технический ресурс узлов, а с другой стороны. нужно застраховаться от аварий, что наиболее существенно сказывается на годовой производительности. Но чтобы на таких стадиях обоснованно оценивать техническое состояние, необходимо знать историю эксплуатации от ее начала.

Чтобы успешно осуществить переход к новой системе ТОиР целесообразно придерживаться ряда рекомендаций:

1. Следует создавать многоцелевую систему, обрабатывающую показания различных источников информации, в которую на уровне подсистемы входит функция оценки остаточного ресурса базовых узлов.
2. Менеджмент предприятий и обслуживающий персонал должен понимать, что никакие рекламные заявления производителей и поставщиков средств диагностики не решают проблему перехода на ОТС без диагностических алгоритмов. Поэтому необходимо сосредоточить усилия на разработке диагностических моделей и алгоритмов, доведя процедуру оценки технического состояния до технологии, доступной инженерному составу.
3. Диагностические алгоритмы должны обеспечивать точность, достоверность и пошаговую заблаговременность прогнозирования.

Чтобы отвечать этим требованиям, необходимо придерживаться принципа поэтапного назначения ресурса, а также использовать аппарат ресурсной механики для построения деградационных моделей. Переход к ОТС также должен быть поэтапным. На первом этапе необходимо наладить информационную систему по истории эксплуатации сменных узлов и сплошной контроль наработки базовых узлов. Он может осуществляться от естественных (штатных) источников информации. Второй этап связан с использованием специализированных средств диагностики. Причем для оценки остаточного ресурса основная информация идет от сплошного контроля, а периодический контроль специализированными средствами позволяет идентифицировать условия эксплуатации, отражающиеся на интенсивности процесса накопления повреждений.

**9. Выбор диагностических параметров**

Чтобы параметр выходного процесса мог стать диагностическим, то есть применяться при диагностировании, он должен удовлетворять следующим требованиям: 1) однозначности (соответствие каждому значению структурного параметра только одного значения параметра выходного процесса); 2) широты поля изменения, то есть возможно большее относительное изменение параметра выходного процесса при заданном абсолютном изменении структурного параметра; 3) доступности и удобства измерения параметра.

Для выбора признаков применяют 1) статистические и 2) информационные методы.

1. При первом методе имеется информация о законах изменения параметров и их статистическая характеристика, полученная в результате обработки последствий аварийных отказов. Принцип выбора признаков состояний заключается в анализе потерь информации, связанных с неполнотой их контроля, а состав контрольных признаков составляют таким образом, чтобы потери информации после контроля не превосходили определенного уровня. Если значимость потерь по каждому признаку одинакова, то можно определить минимальный набор признаков, обеспечивающих заданную вероятность нормальной работы обследуемого объекта.
2. При информационном методе контроль состояний объекта рассматривают как проведение опытов по заданному алгоритму, в результате чего неопределенность в знаниях о действительном состоянии обследуемого объекта заменяют информацией.

**9.1 Информационный критерий при выборе признаков технического**

**состояния**

Степень неопределенности состояний рекомендуется характеризовать энтропией, широко используемой в теории информации. При этом если система имеет *n* случайных состояний *D1*, *D2*, *D3*,…… *Dn* с вероятностью каждого состояния *P(D1)*, *P(D2)*,…….., *P(Dn)*, и эти состояния несовместимые, то мерой неопределенности оценки состояний может быть энтропия системы

 (9.1)

Степень неопределенности системы зависит от числа возможных состояний *n* и априорных вероятностей . То есть если система, например, имеет три возможных состояния с вероятностями *P(D1)*=0,96; *P(D2)*=0,03; *P(D3)*=0,01, то с большой достоверностью можно утверждать, что она пребывает в состоянии *D1*. А если *P(D1)*=1 и вероятность остальных состояний равна нулю, то система вообще нее обладает неопределенностью и *H(D)*=0. В случае, когда все априорные вероятности равны, энтропия имеет максимальное значение и соответствует наибольшей неопределенности. В качестве единицы энтропии принята степень неопределенности, равная одному биту.

Считают, что само введение энтропии не полностью характеризует неопределенность системы, так как она учитывает только вероятности состояний и их число, но не отражает важность состояний, их близость и др. Поэтому введено понятие «количество информации», которое характеризует степень определенности знаний о состоянии объекта по результатам измерений признаков, получаемых при обследования объекта. За меру количества информации о состоянии, содержащейся в измерении величины, может быть принята разность:

 (9.2)

где *H(D)* –начальная (безусловная) энтропия неопределенности;

*Hх(D)* – остаточная после измерения параметра *х* энтропия неопределенности.

Если *D* и *x* независимы (параметр *х* не связан с состоянием *D*), то

*H(D)= Hх(D)*

и количество информации, которое несет этот параметр, будет равно нулю. Чем меньше *Hх(D)*, тем больше информации несет измеряемый параметр.

При расчетах рекомендуется использовать вместо десятичных логарифмов (9.1) двоичные логарифмы. Целесообразность такого подхода может быть показана на примере, когда имеет место равенство состояний *P(D1)*= *P(D2)*=0,5. Тогда согласно (9.1) можно записать [10]:



Для объяснения получения результата, равного единице, выполним последовательное решение этой зависимости:



Таким образом, применительно к (9.2) это значение будет соответствовать начальной энтропии. После изменения *х1* параметра вероятности установлено, что, например, *P(D1)*=0,4 и *P(D2)*=0,6. Тогда величина состояний неопределенности составит:



Количество информации о состоянии объекта после измерения параметра *х1* составит:



После измерения *х1* вероятности состояний *P(D1)*=1, *P(D2)*=0, а количество информации



Таким образом, учитывая количество информации о первом и втором параметрах, можно принять за достоверный второй параметр, так как он имеет максимальную информацию, равную единице.

Величина *Hх(D)*представляет собой остаточную неопределенность в определении состояния системы после измерения параметра *х*. чем меньше будет ее величина, тем больше информации несет измеряемый параметр, что и видно из приведенного выше расчета.

Часто информацию относительно состояния одной системы получают с помощью наблюдения за состоянием другой системы, с ней связанной. Обычно эта вторая система (система сигналов) дает информацию о состоянии основной системы. Среднюю величину этой информации, или интенсивность второй системы, например, *В* относительно первой, например, *А* определяют из равенства



где *Н(В/А)* – условная энтропия системы *В* относительно системы *А*.

Принято считать, что 

После преобразований формула для определения информации, которую несет система сигналов *В* относительно системы *А*, приобретает вид:

 (9.3)

Если системы *А* и *В* независимы, то и тогда из (9.3) следует, что  И это вполне естественно, так как наблюдение над одной системой не может дать информации относительно другой, если между состояниями этих систем нет связи.

Величина информации относительно состояния системы, полученная в результате контроля конкретного параметра, определяется соотношением:

 (9.4)

Величину информации, содержащейся в состоянии *Bj* относительно состояния *Ai*, определяют по формуле:

 (9.5)

На практике получили распространение диагностические признаки (параметры), которые можно разделить на три группы:

- параметры рабочих процессов (динамика изменения давления, усилия, энергии), непосредственно характеризующие техническое состояние оборудования – естественный источник информации;

- параметры сопутствующих процессов или явлений (тепловое поле, шумы, вибрации и др.), косвенно характеризующие техническое состояние;

- параметры структурные (зазоры в сопряжениях, износ деталей и др.), непосредственно характеризующие состояние конструктивных элементов оборудования.

По всем отказам намечаются диагностические параметры, контроль которых поможет оперативно отыскать причину отказа, и метод ТД (табл. 9.1).

Методы технического диагностирования (ТД) Таблица 9.1

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Наименование  метода | Определение  метода | Объекты ТД | Целевое  назначение  метода |
| Контроль правильности функционирования | | | |
| Функциональных циклограмм | Проверка соответствия положения (переключения) всех электро-, гидро-, пневмоаппаратов схемы функциональной циклограмме, представленной в табличной форме, а также установление порядка срабатывания аппаратов схемы при переходе от одного режима работы к другому | Сложные электро-, гидро-, пневмосхемы технологических линий, комплексов, сложного оборудования | Поиск причин  отказов |
| Контроль правильности функционирования | | | |
| Фотографирование циклограмм | Определение времени выполнения исполнительными органами рабочих и вспомогательных операций и сопоставление с проверенной при испытаниях расчетной циклограммой | Автоматические линии, автоматизированные комплексы, модули и т. д. | Проверка  правильности функционирования |
| Эталонных  характеристик | Сравнение значения контролируемого параметра с эталонным значением | Технологические линии, комплексы, сложное оборудование | Проверка  правильности функционирования |
| Эталонных  зависимостей | Сравнение экспериментально полученной функциональной зависимости в любой момент времени работы с эталонной или расчетной зависимостью | Технологические линии, комплексы, сложное оборудование | Поиск причин отказов, предупреждение отказов |
| Тестов | Определение правильности функционирования с помощью контрольных тестов | Системы программного управления | Проверка  правильности функционирования |
| Контроль технического состояния оборудования | | | |
| Органолептический | Определение причин отказов и неисправностей оборудования с помощью органов чувств | Механические системы оборудования | Предупреждение отказов |
| Термометрии | Определение технического состояния оборудования с помощью измерения температуры деталей и сборочных единиц | Муфты включения, тормоза, подшипники, электроприводы и другое оборудование | Поиск причин отказов, предупреждение отказов |
| Вибро - акустической диагностики | Определение технического состояния оборудования с помощью измерения параметров вибраций или шума | Приводы, редукторы, трубопроводы гидросистем и т. п. оборудование | Поиск причин отказов, предупреждение отказов |
| Искусственных баз и определения содержания продуктов износа в масле | Определение технического состояния оборудования с помощью измерения износа деталей | Изнашивающиеся детали оборудования | Прогнозирование ресурсов (срока службы) деталей и соединений |

**10. Диагностирование технического состояния посредством контроля**

**параметров**

Усложнение конструкций систем оборудования привело к увеличению разнообразия входящих в них систем (блоков) по характеру используемых физико-химических процессов, характеру и степени нагрузок и, как следствие, к различным уровням их надежности. Поэтому оптимальных сроков выполнения технического обслуживания и ремонта для сложного объекта в целом практически не существует. Выполнение заранее назначенного объема профилактических работ в установленные сроки для большинства съемных изделий не уменьшает вероятности возникновения отказов, а для некоторого оборудования, увеличивает поток послеремонтных отказов.

Интенсивность расходования фактического ресурса (интенсивность старения, изнашивание) объектов носит случайный характер и меняется в широких приделах в зависимости от условий эксплуатации: режимов работы, продолжительности рейсов, организации и качества технического обслуживания и ремонта, условий хранения и транспортирования. Современный уровень и перспективы развития средств технического диагностирования, дефектоскопии и автоматизированного контроля открывают реальные возможности применения стратогии обслуживания и ремонта систем и изделий самолетов по состоянию с контролем параметров.

Стратегия обслуживания и ремонта с контролем параметров представляет собой совокупность правил по определению режимов и регламента диагностирования изделий и принятию решений о необходимости их обслуживания, замены и ремонта на основе информации о фактическом техническом состоянии. При данной стратегии обслуживания и ремонта изделия и системы эксплуатируются (используются) до предотказного состояния.

Для выявления предотказного состояния изделия может использоваться принцип назначения упреждающих допусков на диагностические параметры. При этом под упреждающим допуском понимают совокупность значений параметров, заключенных между предельными и предотказовым уровнями параметра. Выход параметра за предельный уровень означает отказ, а достижение предотказного уровня – необходимость выполнения профилактических работ или замены изделия.

Область применения стратегии обслуживания и ремонта с контролем параметров целесообразно ограничить системами и изделиями, которые по соображениям безопасности полетов не могут быть допущены к эксплуатации до отказа, а по экономическим соображениям – к эксплуатации до выработки установленного межремонтного ресурса. Прежде всего это дорогостоящие системы и изделия с высокой функциональной значимостью, имеющие недостаточную степень резервирования и вместе с тем обладающие высоким уровнем эксплуатационной технологичности и контролепригодности.

Техническое диагностирование – процесс определения с определенной точностью технического состояния объекта. Результатом технического диагноза является заключение о техническом состоянии объекта с указанием при необходимости места, вида и причины дефекта (дефектов), неисправностей.

В зависимости от вида технического состояния, которое требуется установить при диагностировании, производят:

проверку неисправности (диагностирование при контроле исправности);

проверку работоспособности (диагностирование при контроле работоспособности);

проверку функционирования (диагностирование при контроле правильности функционирования). Состояние правильного функционирования – это вид технического состояния, в котором применяемое по назначению изделие в целом или его составная часть выполняет в текущий момент предписанные им алгоритмы функционирования со значениями параметров, соответствующих заданным требованиям;

поиск дефекта (диагностирование, целью которого являются определение места, а при необходимости причины и вида дефекта объекта).

Часто потребность в поиске дефекта (неисправности) появляется при проверке исправности, работоспособности или правильного функционирования. Диагноз ставится путем выявления (всеми доступными оратору методами) симптомов неисправного состояния, определения без разборки фактических значений структурных параметров объекта и методического их сопоставления с допустимыми отклонениями от нормального уровня (номинала). Особенностями измерения параметров механических систем является необходимость преобразования неэлектрических величин в электрические.

Совокупность операций, выполняемых при техническом диагностировании, можно разделить на этапы: преобразование физических явлений, сопровождающих работу исследуемого объекта в диагностический сигнал (электрическую величину); измерение определенных параметров диагностического сигнала; сравнение значений измеренных параметров диагностического сигнала со значениями, установленными технической документацией (оценка технического состояния).

Для оценки технического состояния достаточно сравнить измеренный параметр с его допускаемым значением [*y*], соответвтвующий нормам технических условий. Если *y <* [*y*], то объект работоспособен и подлежит дальнейшей эксплуатации. Если же *y >* [*y*], то он находится в неисправном состоянии и эксплуатация должна бать прекращена. Таким образом, задача постановки диагноза сводится к определению параметра *y* и сравнению его со значением [*y*].

Наибольшее развитие в настоящее время получают системы, предусматривающие использование встроенных диагностических подсистем, работающих в тесной связи с переносными диагностическими, которые позволяют провести оценку исправности, работоспособности, функционирования и поиск неисправности до съемного узла. Для выполнения этих задач в настоящее время разработано множество методов и средств диагностирования. Эффективное их использование идет как по пути совершенствования средств и создания специализированных систем, так и приспособление самолета и двигателя к возможности проведения диагностирования с минимальными затратами времени и средств. Оптимальная эффективность в применении методов и средств диагностирования может быть достигнута только в результате разработки и объединения этих методов и средств в определенную единую интегральную систему диагностирования, которая должна решать задачи по обнаружению и неисправности до узла и оценку тенденции изменения состояния функциональной системы.

**10.1. Моделирование деградационных процессов**

В табл. 10.1 приведены модели изменения параметров ряда изделий машиностроения, построенные на основе качественного описания природы процессов, приводящих к отказам.

Модели изменения параметров Таблица 10.1

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Параметр, характеризующий изменение прочности | Устройство | Качественное описание физики процесса | Математическая модель |
| Размер уплотнения | Силовой цилиндр, клапан | Изменение состояния и свойств материала под действием повторных переменных напряжений |  |
| Величина зазора | Плунжерная пара насоса, торцевое уплотнение | Механический абразивный износ |  |
| Конусность | Кран, вентиль | Контактная усталость рабочих поверхностей деталей с образованием микротрещин и других дефектов |  |
| Режущий угол инструмента | Резец, фреза | Изменение состояния материала режущей кромки под воздействием механического выламывания частиц в результате абразивного износа |  |
| Глубина профиля | Автопокрышка | Изменение состояния материала под действием многократных нагрузок на поверхностный слой |  |
| Изменение диаметра валов | Валы | Окисление поверхностных слоев металла и последующее разрушение окислов при действии незначительных повторных возвратно-поступательных перемещений несопрягаемых деталей |  |
| Величина потока жидкости | Распределительное устройство в гидросистеме | Изменение состояния и свойств материала деталей системы |  |
| Величина утечки жидкости или газа | Гидро- и пневмоцилиндры | Изменение состояния и свойств материала под действием повторных переменных напряжений |  |
| Перепад давления | Насос, гидромотор, входящий в систему гидропривода | Изменение состояния и свойств материала под действием повторных переменных напряжений |  |
| Скорость проходки, величина подачи | Буровой инструмент | Основной механизм разрушения – механический износ, характеризующийся выкрашиванием режущей кромки |  |
| Значение нормального и касательного напряжений | Рама автомобиля | Изменение состояния и свойств материала, связанное с накоплением усталостных повреждений |  |
| Давление страгивания | Гидроцилиндр | Изменение состояния и свойств материала под действием повторных переменных напряжений |  |
| Потеря мощности в системе | Двигатель внутреннего сгорания | Изменение состояния и свойств поршневых колец, характеризуется отрывом частиц металла под действием горячих газов |  |
| Увеличение температуры в системе | Система с уплотнительными кольцами | Происходит схватывание отдельных атомов цветного металла и перенос их на стальную поверхность, что приводит к появлению на рабочих поверхностях рисок изадиров |  |
| Величина усилия прижатия | Пресс | Изменение состояния и свойств материала под действием повторных переменных напряжений |  |

Хорошей аппроксимацией деградационных процессов старения являются регрессивные модели полиномиального вида.

Для металлургических машин характерен периодический режим работы: определенный период работы чередуется с периодом простоя, в течение которого можно осуществлять контроль текущего состояния и при необходимости ремонтно – профилактическое обслуживание (полеты самолетов, сменная работа станков и пр.)

Для таких изделий важно не только определить состояние в момент контроля, но и осуществить контроль динамики этого состояния на один шаг вперед, где величина шага зависит от периода работы (время полета, смена).

Специфика функционирования изделий данного класса определяет требования, предъявляемые к методу идентификации деградационных процессов старения. Действительно, модели старения в основном являются эмпирическими, хорошо аппроксимирующими реальные процессы лишь в ограниченном отрезке времени. Для аппроксимации могут быть применены полиномиальные модели невысокого порядка, в том числе наиболее простые – нулевого и первого порядков, поскольку шаг прогнозирования мал по сравнению со временем функционирования изделия.

Алгоритм идентификации так же, как и функционирование изделий, должен иметь пошаговый характер с последовательной корректировкой оценок состояния на каждом шагу.

Таким образом, наиболее рациональным методом идентификации деградационных процессов старения является рекуррентная форма регрессивного анализа – метода наименьших квадратов.

Особенность всех рекуррентных алгоритмов – сильная зависимость их сходимости от выбора начальных условий. Учитывая, однако, принятую аппроксимацию модели старения, могут быть даны некоторые рекомендации по необходимому числу экспериментальных точек.

Так, если ограничиться постоянным членом *y = c0*, то оценка наименьших квадратов этого постоянного члена имеет вид

, (10.1)

при этом дисперсия оценки по сравнению с дисперсией одного измерения уменьшается в *n* раз:

, (10.2)

При использовании линейной аппроксимации *y = c1t* оценка наименьших квадратов параметра *c1* имеет вид

, (10.3)

Сумма  и при больших значениях *n* , т.е. дисперсия оценки  пропорциональна  и уже начиная с *n=2* меньше, чем дисперсия оценки .

Аналогично при использовании аппроксимации *y = сk tk*  оценка наименьших квадратов имеет вид [7]:

, d. (10.4)

Таким образом, число экспериментальных точек может быть выбрано из условия обеспечения удовлетворительной точности при наиболее простой пошаговой аппроксимации нулевого порядка. Величина интервала Δ*t* определяется технико-экономическими показателями контрольно-измерительного комплекса.

**Литература**

1. Биргер И.А. Техническая диагностика/ И.А. Биргер // М.: Машиностроение, 1978.- 240с.

2. Байхельт Ф. Надежность и техническое обслуживание/Ф. Байхельт, П. Франкен // М.: Радио и связь, 1988.-392 с.

3. Большаков В.И. Технологическое оборудование в системе металлургического производства / В.И Большаков, С.Д. Гринберг // Теория и практика металлургии.-2002.-№5-6.-С.26-31.

4. Мониторинг состояния технологического оборудования и ресурсные подходы к диагностическим моделям /С. В. Белодеденко, В. Ю. Богдан, Е. И. Хребто, А. В. Ларионцев. //Металлург. и горноруд. пром-сть.- 2007. - №6. – С.94-98.

5. Основи технічного обслуговування механічних систем за контролем безпеки/ С. Білодіденко, Г. Біліченко**,** В. Гануш, А. Попов // Вісник Тернопільського нац. техн. ун-ту.-2011.-спецвипуск, ч.1.-С.170-178.

6. Ченцов Н.А. Организация, управление и автоматизация ремонтной службы/ Н.А. Ченцов // Донецк: Неру-пресс, 2007.-258с.

7. Александровская Л.Н. Современные методы обеспечения безотказности сложных технических систем / Л.Н. Александровская, А.П. Афанасьев, А.А.Лисов. - М.: Логос, 2001.- 208 с.

8. Клюев В.В. Подходы к построению систем оценки остаточного ресурса технических объектов //В.В. Клюев, А.С. Фурсов, М.В. Филиппов. - Контроль. Диагностика. – 2007.-№3.- С. 18-23.

9. Золотницкая Г.Д. Диагностика оборудования доменных печей /Г. Д. Золотницкая, Ю. В. Серов, А. П. Калинин// Черная металлургия. – 1989. - №2. – С. 37-45.

10. Техническая диагностика. Контроль и прогнозирование / А.Я. Жук, Г.П. Малышев, Н.К. Желябина, О.М.Клевцов// Запорожье: Изд-во ЗГИА, 2008.-500с.