

Рис. 5.1. Функциональные характеристики надежности: $F(t)$ – функция плотности распределения долговечности, t^* – определенный момент времени t

5.2. Состояния надежности и повреждения технической системы

5.2.1. Техническое состояние и состояние надежности

Техническая система (объект) во время эксплуатации теряет свою работоспособность. Причиной потери работоспособности является нежелательное изменение свойств ее элементов. Изменение свойств элементов технических систем во время эксплуатации обусловлено физическими процессами изнашивания, усталости, коррозии, старения, фреттинга, питтинга и др. Интенсивность изнашивания зависит от многих факторов, в частности от качества выполнения,

внешних условий работы (нагрузки, скорости, температуры), внешней среды. Техническое состояние системы или ее элемента возможно улучшить путем ремонта или с применением конструкционных, эксплуатационных, технологических и восстановительно-консервирующих методов и мероприятий, рассмотренных более детально во второй части монографии.

В классической теории надежности принимается, что техническая система может находиться в одном из двух классов (видов) технического состояния: пригодном состоянии (работоспособном), если она не является поврежденной, или в непригодном состоянии (неработоспособном), если она повреждена.

В теории эксплуатации технических систем (машин и механических устройств) выделяется несколько больше видов (классов) технического состояния:

- состояние технической исправности, которое называется состоянием параметрической пригодности;
- состояние технической неисправности, которое называется состоянием параметрической непригодности;
- состояние функциональной пригодности (т.е. способности функционировать);
- состояние функциональной непригодности.

Графическая интерпретация указанных видов технических состояний приведена на рис. 5.2.

Описание представленной классификации будет следующим: если ни один из параметров технической системы, которые характеризуют ее техническое состояние, не превысил предельной величины, то эта система является технически исправной (параметрически пригодной). Это означает, что технико-эксплуатационные свойства системы отвечают свойствам, заложенным при конструировании, и потому она может выполнять все предусмотренные функции. Когда же любой из параметров превысит допустимую величину, тогда техническая система переходит в состояние неисправности, несмотря на то, что она в дальнейшем может выполнять свои основные рабочие функции. Однако качество их реализации будет неудовлетворительным. В конце концов, когда один из параметров структуры достигнет предельной величины, техническая система не сможет выполнять рабочие функции и утратит свою способность функционировать, то есть будет находиться в состоянии функциональной непригодности. Из вышеуказанного следует, что техническая система может находиться в одном из трех состояний (классов):

- исправно-пригодном, или, по-иному, исправном, поскольку исправный – это всегда пригодный;
- исправно-непригодном;
- неисправно-пригодном, т.е. пригодном, поскольку пригодный – это всегда исправный;
- неисправно-непригодном, т.е. непригодном, поскольку непригодный – это всегда неисправный.



Рис. 5.2. Графическое представление классификации технических состояний

Трехклассовое разделение состояний технических систем предлагается в литературе, описывающей надежность механических систем, в отличие от классической теории надежности, которая чаще всего применяется в электрических и электронных системах.

Неисправно-пригодное состояние порой называют состоянием посредственной (косвенной) пригодности, то есть переходным состоянием между пригодным и непригодным состояниями. Это состояние указывает на то, что параметры, которые характеризуют функционирование технической системы, превышают область допустимых значений, однако элементы и техническая система в

целом еще находятся в физическом состоянии пригодности к работе. Система в этом состоянии уже не полностью отвечает техническим требованиям. Она не должна сразу же быть выведена из эксплуатации. Однако на протяжении некоторого периода времени ее следует подвергнуть ремонту и только после этого, возможно, она будет пригодной к дальнейшей эксплуатации при нормальной нагрузке.

В эксплуатационной практике для восстанавливаемых технических систем их разделение на три класса не совсем обосновано.

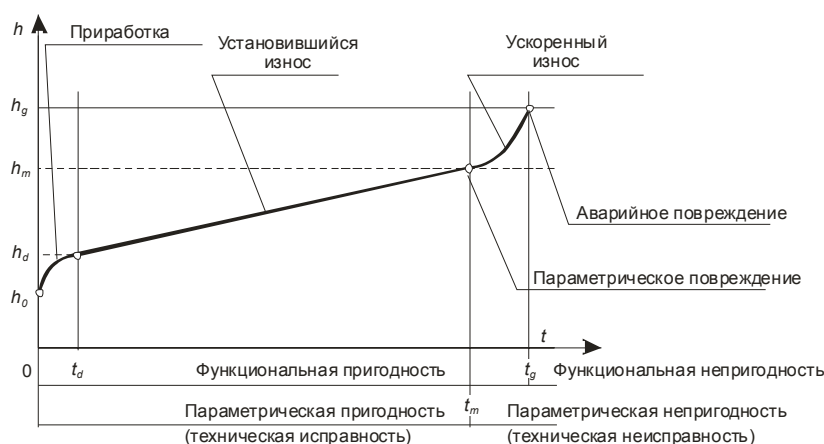


Рис. 5.3. Схема классификации технических состояний элементов механической системы, которые изнашиваются согласно модели Лоренца: h_0 – начальный износ, h_d – износ после эксплуатационной приработки, h_m – допустимый износ, t_d – время (продолжительность) эксплуатационной приработки, t_m – время до параметрического повреждения, t_g – время до аварийного повреждения

Конструкционный элемент (кинематическая пара), испытывающий непрерывный износ во время эксплуатации, достигает допустимого износа h_m за время t_m . Это означает, что в момент времени t_m элемент переходит из состояния полной пригодности (функциональной и параметрической) в состояние параметрической непригодности. Он и в дальнейшем может работать, однако не будет целиком технически исправным. Если процесс его

эксплуатации будет продолжаться и в дальнейшем, то в момент времени t_g элемент достигнет предельной величины h_g . То есть из состояния параметрической непригодности (технической неисправности) он переходит в состояние функциональной непригодности. В теории надежности техническое состояние функциональной непригодности называется состоянием непригодности по надежности.

Для оценки технического состояния системы (элемента, объекта) должны применяться измеряемые величины – диагностические параметры. Они, как правило, характеризуют исходные процессы, возникающие во время работы. Протекание исходных процессов зависит от состояния структурных элементов системы. Кроме этого, значения исходных параметров будут изменяться с изменением структурных параметров. Связь между параметрами структуры и исходными параметрами на примере автомобильного двигателя можно, в общем, описать так:

$$Y(t) = f [X(t), W(t)] + U(t), \quad (5.3)$$

где $X(t)$ – множество входных параметров (управляющих параметров); $Y(t)$ – множество выходных параметров (функциональных параметров); $W(t)$ – множество структурных параметров, характеризующих состояние элементов (систем, узлов, деталей); $U(t)$ – множество внешних параметров (условий эксплуатации).

5.2.2. Методология описания параметров технического состояния системы в моделях надежности

Первым шагом при описании параметра технического состояния является поиск соответствующей ему меры (характеристики). Чаще всего параметр и его характеристика отождествляются, однако это не должно быть обязательным правилом. Например, при исследовании прочности элемента можно использовать напряжение, а при исследовании жесткости – деформацию, хотя известно, что эти величины связаны между собой и определяются одновременно в рамках единой теории.

Следующим шагом процедуры моделирования является установление зависимости описываемого параметра от исследуемых переменных. Этими переменными могут быть факторы, приводящие к изменению состояния объекта. При рассмотрении вопроса о

состоянии исправности или неисправности технической системы наиболее важным является установление зависимости изменений параметров технического состояния от факторов, являющихся причиной этих изменений. В простых случаях выбор факторов, влияющих на параметр технического состояния, часто является простым и очевидным. Например, напряжение зависит от формы элемента и нагрузки, объем истечения жидкости – от геометрии зазора, давления и обратного (внешнего) давления. Однако в случаях более сложных синтетических параметров, характеризующих объект (систему) более комплексно, задача выбора независимых переменных может быть значительно более сложной. В этом случае следует провести соответствующий анализ и селекцию причинно-следственных связей в функционировании системы.

Формальное описание изменений параметра содержит описание исходного состояния, описание внешних параметров (воздействий, влияний, разрушительных факторов) и описание сопротивления технической системы (элемента, объекта) внешним воздействиям. В общем случае все эти факторы могут зависеть от времени.

Исходное состояние может зависеть от качества изготовления технического объекта (например, возможно изменение его качества вследствие невыполнения технологических требований). Сопротивление технической системы внешним воздействиям может быть переменным вследствие старения материала в процессе его эксплуатации. Нагрузка на систему, как правило, является переменной (постоянные нагрузки являются скорее исключением, чем правилом).

В конкретных случаях каждый из представленных факторов может быть постоянным во времени, что существенно упрощает его описание.

С учетом указанных факторов получаем описание изменений параметра состояния технического объекта (системы) с течением времени и в зависимости от ряда других факторов.

Следует отметить, что математический аппарат, примененный к описанию технического состояния, может быть разнообразным и будет зависеть от характера исследуемых факторов. Если, например, факторы являются дискретными функциями времени, то зависимость будет иметь функциональный характер. Если внешние факторы (воздействия) являются процессами случайно-изменяемыми во времени, то для их описания следует применить теорию стохастических процессов.

В методологии описания возможны три подхода:

а) Полное причинно-следственное описание в рамках разработанной теории. Такое описание разрешает провести полный качественный и количественный анализ. Оно выявляет не только вид реакции технического объекта на внешние воздействия, а также указывает, что приводит к такой, а не иной его реакции.

б) Описание, которое связывает воздействия и реакции на них без рассмотрения структуры технического объекта. Этот метод является типичным, например, в теории автоматического регулирования. На основе анализа внешних факторов и реакций на них строится количественная характеристика объекта. Такое описание объясняет, как объект реагирует на внешние воздействия, однако здесь не исследуется, почему реакция является такой, а не иной.

в) Описание, которое характеризует только реакции системы (объекта). Это будет определенная модификация предыдущего описания. Полагается, что внешние воздействия являются постоянными в достаточно широком диапазоне. Технический объект полагается определенного вида генератором исходного сигнала, который считается мерой (характеристикой) исследуемого параметра технического состояния объекта. Изменение внешних факторов в этом случае учитывается в характеристике генератора.

Использование того или иного подхода зависит, прежде всего, от объема информации, доступной исследователю, и цели, которой описание должно служить. В каждом случае можно проследить кинетику изменений параметра состояния во времени, что является основанием для анализа проблемы выхода за пределы зоны пригодности, вызванного этим параметром.

5.2.3. Повреждения технических систем

Повреждения являются основанием для оценки надежности технической системы (объекта). Следствием повреждения, в зависимости от его вида, является ремонт или списание системы.

Повреждение появляется тогда, когда хотя бы один из выбранных измеряемых или неизменяемых параметров, характеризующих состояние системы, уже не отвечает требованиям, необходимым для правильного функционирования, или когда эта система (объект) будет не способной к физическому функционированию.

Повреждения можно рассматривать на разных уровнях сложности, например, повреждения двигателя, его систем, узлов или деталей. Независимо от уровня исследований повреждения технической системы обусловлены повреждениями ее элементов.

При наблюдении за изменениями значений соответствующих физических параметров технической системы можно увидеть ее повреждения визуально не только как случайные события, а и как результат процесса их возникновения. В общем, причиной возникновения повреждения является реализация ситуации, при которой нагрузки (механические, электрические, термические или другие) технической системы превысят допустимый уровень ее прочности. В результате, как правило, происходит разрушение фрагментов физической структуры системы или ее полное разрушение.

К наиболее распространенным повреждениям механических систем относятся:

- внезапные повреждения (вследствие перегрузки);
- постепенные повреждения (износ).

В каждой из этих групп повреждений выделяют параметрические повреждения и аварийные повреждения.

Параметрическое повреждение означает переход технической системы из состояния полной исправности (параметрической пригодности) в состояние неисправности (параметрической непригодности). *Параметрическое повреждение* элемента трибосистемы *вследствие изнашивания* означает превышение допустимой величины износа.

Аварийное повреждение означает переход технической системы из состояния пригодности или, в отдельных случаях при предыдущем параметрическом повреждении, из неисправного состояния в состояние функциональной непригодности (в состояние полной технической непригодности). *Аварийное повреждение вследствие износа* элементов трибосистемы означает превышение предельной величины износа.

Внезапные повреждения (при перегрузке) возникают вследствие резкого изменения параметров элемента. Причиной таких повреждений могут быть термические трещины, трещины вследствие перегрузки, усталостные макротрещины и др. Основной чертой такого повреждения является независимость вероятности его возникновения от времени эксплуатации.

Постепенные повреждения (вследствие износа) связаны с процессами изнашивания, коррозии или усталости материалов.

Повреждения операционного типа делятся на повреждения: обусловленные конструкторскими просчетами, обусловленные технологическими (производственными) ошибками и обусловленные эксплуатационными ошибками или несоблюдением рекомендованных условий эксплуатации.

Повреждения, возникающие по конструкционной причине, – это повреждения, появляющиеся вследствие неудачных конструктивных решений, неверно выбранных посадок, недостаточной жесткости и неверно выбранных расчетных данных о величинах действующих эксплуатационных нагрузок.

Повреждения, возникающие по технологической причине, – это повреждения, появляющиеся вследствие ошибок и несовершенства технологических процессов.

Повреждения, возникающие во время эксплуатации, вызваны нарушением принципов правильной эксплуатации, использованием

5.3. Математическая модель состояний надежности технической системы

5.3.1. Общие положения

Пусть n – измеримая векторная функция y действительной положительной переменной t

$$y(t) = [y^{(1)}(t), \dots, y^{(n)}(t)], t \in [0, t_{\max}], 0 < t_{\max} \leq \infty \quad (5.4)$$

полностью описывает техническую систему в плане оценки ее надежности. То есть при известном значении функции y для выбранного момента времени t возможно установить, будет ли данная система пригодна для выполнения предусмотренных задач (может ли нормально работать). Величину t_{\max} следует интерпретировать как требуемое максимальное время нормальной работы (ресурс) систем исследуемого класса. Порой в функции (5.4) принимается, что $t \in [t_0, t_{\max}]$, где t_0 является временем начала эксплуатации. Условный выбор начала времени эксплуатации в момент времени $t_0 = 0$ не влияет на общий характер постановки задачи. Составляющие $y^{(i)}$, $i = 1, \dots, n$ являются скалярными функциями, которые отображают влияние конструкции, качество выполнения, технические условия эксплуатации, экономические условия и внеэкономическую конкурентоспособность надежности технической системы (объекта) при эксплуатации. Функции $y^{(i)}$, $i = 1, \dots, n$ называются *функциональными параметрами* и классифицируются как технические параметры, технико-экономические параметры и *параметры комплексных требований качества*. В общем их можно