

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИСиС»

Кафедра инжиниринга технологического оборудования

В.Б. Шишко
Н.А. Чиченев

Надежность технологического оборудования

Учебник

Допущено учебно-методическим объединением по образованию в области металлургии в качестве учебника для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению 150400 – Металлургия

Москва 2012

УДК 669.002
Ш65

Рецензенты:
д-р техн. наук, проф. *А.В. Зиновьев*;
д-р техн. наук *О.А. Кобелев* (ОАО НПО «ЦНИИТМАШ»)

Шишко, В.Б.
Ш65 Надежность технологического оборудования : учеб. /
В.Б. Шишко, Н.А. Чиченев. – М. : Изд. Дом МИСиС, 2012. –
190 с.
ISBN 978-5-87623-629-6

Рассмотрены методология и методы теории надежности, а также основные законы распределения наработок до отказа (на отказ), на основании которых оценивается надежность машин и агрегатов. Приведены методы оценки надежности технических систем и применяемые для этой цели планы испытаний с измерением наработок. В приложении приведены основные справочные данные, необходимые для теоретических расчетов и анализа результатов испытаний.

Учебник предназначен для студентов, обучающихся по специальности (профилю) 150404 «Металлургические машины и оборудование» направления 150400 «Технологические машины и оборудование» и преподавателей, ведущих подготовку по этой дисциплине. Может быть полезен студентам других специальностей (профилей), относящихся к направлению 150400 «Технологические машины и оборудование», а также обучающимся по направлению 150100 «Металлургия».

УДК 669.002

ISBN 978-5-87623-629-6

© Шишко В.Б.,
Чиченев Н.А., 2012

ОГЛАВЛЕНИЕ

Условные обозначения.....	6
Предисловие.....	8
Введение.....	10
1. Основы теории надежности.....	13
1.1. Основные понятия и определения.....	13
1.2. Математические зависимости для оценки надежности.....	18
1.2.1. Функциональные зависимости надежности.....	18
1.2.2. Теорема сложения вероятностей.....	23
1.2.3. Теорема умножения вероятностей.....	25
1.2.4. Формула полной вероятности.....	27
1.3. Показатели надежности.....	28
1.4. Распределения, используемые в теории надежности.....	33
1.4.1. Распределения и области их применения.....	33
1.4.2. Экспоненциальный (показательный) закон.....	35
1.4.3. Нормальный закон распределения.....	39
1.4.4. Логарифмическое нормальное распределение.....	45
1.4.5. Распределение Вейбулла.....	48
1.4.6. Совместное действие внезапных и постепенных отказов ..	51
Контрольные вопросы.....	52
2. Надежность элементов и систем технологического оборудования.....	53
2.1. Надежность невосстанавливаемого элемента.....	53
2.1.1. Вероятность отказа и вероятность безотказной работы....	53
2.1.2. Интенсивность отказов.....	54
2.1.3. Средняя наработка до отказа.....	58
2.2. Надежность восстанавливаемого элемента.....	61
2.2.1. Восстанавливаемый элемент в случае мгновенного восстановления.....	61
2.2.2. Распределение Пуассона.....	64
2.2.3. Восстанавливаемый элемент с конечным временем восстановления.....	67
2.3. Надежность систем.....	68
2.3.1. Общие сведения.....	68
2.3.2. Система с последовательным соединением элементов	69
2.3.3. Система с параллельным соединением элементов.....	70
2.3.4. Надежность восстанавливаемых систем.....	76
Контрольные вопросы.....	77

3. Восстановление работоспособного состояния оборудования.....	79
3.1. Стратегии восстановления.....	79
3.2. Стратегии восстановления при внезапных отказах.....	80
3.2.1. Стратегия аварийных замен.....	80
3.2.2. Стратегия плановых и аварийных полных замен.....	80
3.2.3. Стратегия плановых и аварийных минимальных замен... ..	81
3.2.3. Стратегия аварийных минимальных замен.....	84
3.3. Восстановление при постепенных отказах	86
3.4. Восстановление на основе задания лимита времени	88
3.5. Оценка эффективности принимаемых решений при техническом обслуживании.....	90
3.6. Ремонтпригодность машин.....	92
3.6.1. Показатели ремонтпригодности машин, используемые на стадии проектирования	92
3.6.2. Показатели ремонтпригодности машин, используемые в процессе их эксплуатации	95
Контрольные вопросы.....	96
4. Эксплуатационная надежность металлургических машин	97
4.1. Испытания на надежность	97
4.1.1. Общие сведения	97
4.1.2. Биноминальный план испытаний.....	99
4.1.3. Планы испытания на надежность с измерением наработок.....	100
4.2. Оценка показателей безотказности.....	104
4.2.1. Оценивание показателей на основе параметрических методов.....	104
4.2.2. Оценивание показателей на основе непараметрических методов.....	111
4.2.3. Оценивание показателей безотказности при испытаниях с измерением определяющего параметра (величины износа)	114
4.3. Оценка показателей долговечности.....	116
4.3.1. Модели оценивания.....	116
4.3.2. Непараметрические модели оценивания	117
4.3.3. Оценивание среднего ресурса на основании информации о величине износа	119
4.3.3. Оценивание остаточного ресурса.....	121
Контрольные вопросы.....	123

5. Повышение надежности технологического оборудования	124
5.1. Пути повышения надежности.....	124
5.2. Повышение надежности оборудования при проектировании	128
5.3. Повышение надежности оборудования при изготовлении....	130
5.4. Повышение надежности оборудования при эксплуатации ...	132
5.5. Экономический подход к надежности оборудования	136
Контрольные вопросы.....	138
Заключение.....	139
Словарь терминов (glossary).....	140
Библиографический список	150
Приложение 1. Элементы теории вероятности и математической статистики, используемые в теории надежности	152
Приложение 2. Значения нормированной функции Лапласа $\Phi(u)$ и плотности нормированного нормального распределения $f(u)$ от квантиля u	183
Приложение 3. Квантили нормального распределения u_q , при которых случайная величина принимает значение P	184
Приложение 4. Значения гамма-функции $\Gamma(b)$ для $1 \leq b \leq 2$	185
Приложение 5. Критерий t_q распределения Стьюдента	186
Приложение 6. Значения критерия χ^2 в зависимости от числа степеней свободы f и доверительной вероятности q	187
Приложение 7. Значения критерия Фишера	188
Приложение 8. Значения v и w для оценки грубых ошибок.....	189

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

A	– коэффициент асимметрии
$A(t)$	– Затраты на восстановление
a, b	– параметры распределения Вейбулла
A, B, C	– случайные события
a, b, c	– коэффициенты
C	– затраты
D	– дисперсия
E	– коэффициент эксцесса
f	– число степеней свободы
$f(x)$	– плотность распределения, плотность вероятности
$F(x)$	– функция распределения
F_α	– критерий Фишера
$H(t)$	– функция восстановления (поток отказов)
$h(t)$	– интенсивность отказов (плотность восстановления)
I_t	– скорость изнашивания
I_τ	– промежуток времени
$J(t)$	– эксплуатационные затраты
J_β	– доверительный интервал
K_r	– коэффициент готовности
$K_{ог}$	– коэффициент оперативной готовности
$K_{тп}$	– коэффициент технического использования
k	– число отказавших объектов
L	– наработка
l	– число связей
M	– математическое ожидание
n	– число испытаний, объектов, наработок до цензурирования
N	– число испытаний, объектов, объем выборки
N_k	– число работоспособных изделий после отказа при наработке t_k
p	– вероятность появления события
$P(t)$	– вероятность события, вероятность безотказной работы
$P_B(t)$	– вероятность восстановления работоспособного состояния
q	– вероятность отсутствия (не появления) события
$Q(t)$	– вероятность отказа
Q_B	– средняя трудоемкость восстановления
R	– интенсивность эксплуатационных затрат
r	– число отказов, наработок до отказа, измерений

r	–	число наблюдаемых объектов на интервале $[\tau; \tau + t]$
s	–	среднее квадратичное отклонение
T	–	среднее время безотказной работы (средняя наработка до отказа)
$T_{\text{в}}$	–	среднее время восстановления работоспособного состояния
$T_{\text{р}}$	–	средний ресурс
$T_{\text{с}}$	–	средний срок службы
t	–	время, наработка до отказа
$t_{\text{в}}$	–	длительность восстановления работоспособного состояния
$t_{\text{н}}$	–	продолжительность испытаний, измеряемая в единицах наработки
t_{max}	–	предельная суммарная наработка
t_{α}	–	коэффициент Стьюдента
t_{Σ}	–	суммарная наработка
U	–	величина износа
U_{max}	–	максимально допустимая величина износа (отказ),
u	–	квантиль
X	–	случайная величина
x	–	возможное значение случайной величины X
z	–	наработка изделия
Z_N	–	наработка до отказа
α	–	уровень значимости
β	–	доверительная вероятность
χ^2	–	критерий Пирсона
Δ	–	исходный зазор в соединении
λ	–	интенсивность отказов
ν	–	коэффициент вариации
$\nu(t)$	–	число отказов до момента t
$\Phi(z)$	–	нормированная функция Лапласа
$\varphi(z)$	–	плотность нормированного нормального распределения
ρ	–	число отказавших объектов на интервале $[\tau; \tau + t]$
σ	–	среднеквадратичное отклонение (или стандарт)
τ	–	межремонтный период, наработка до цензурирования
$\omega(t)$	–	параметр потока отказов
ξ	–	наработка

ПРЕДИСЛОВИЕ

Эффективность современного автоматизированного и энергозатратного металлургического производства во многом зависит от надежной работы технологического оборудования. В связи с этим возрастает потребность в специалистах, обладающих компетенциями в области надежности технологических машин и оборудования.

Данный учебник охватывает широкий комплекс вопросов, связанных с повышением надежности технологического оборудования. При изложении материала авторы стремились отразить требования перестройки высшей школы, направленные на повышение качества подготовки специалистов, усиление творческой самостоятельной работы студентов для овладения последними достижениями науки и техники в своей области, приобретение студентами соответствующих компетенций.

В главе 1 приведены основные понятия и определения теории надежности, даны математические зависимости, применяемые для оценки надежности, рассмотрены показатели надежности технологического оборудования и распределения, используемые в теории надежности.

Глава 2 посвящена надежности элементов и систем технологического оборудования, приведены зависимости для расчета надежности невосстанавливаемых и восстанавливаемых элементов, а также надежности систем с последовательным и параллельным соединением элементов.

В главе 3 даны основные сведения о стратегии восстановления работоспособности технологического оборудования при внезапных и постепенных отказах и оценке эффективности принимаемых решений при техническом обслуживании, описаны показатели ремонтно-пригодности.

Глава 4 посвящена эксплуатационной надежности технологических машин и оборудования, рассмотрены особенности испытаний на надежность с целью оценки показателей безотказности и долговечности.

В главе 5 изложены мероприятия по повышению надежности оборудования при проектировании, изготовлении и эксплуатации, рассмотрены экономические аспекты надежности.

Для закрепления теоретических положений приведены примеры определения показателей надежности конкретных механизмов и узлов технологического оборудования.

В приложении 1 приведены основные понятия из теории вероятностей и математической статистики, которые применяются в теории надежности. Другие приложения содержат справочный материал, необходимый при решении задач надежности, не прибегая к специальной справочной литературе.

Цель данной дисциплины – ознакомление студентов с методологией и принципами теории надежности, обучение методике расчета надежности элементов технологического оборудования. После её изучения студенты должны уметь оценивать надежность элементов технологического оборудования, вычислять показатели их безотказности, долговечности и ремонтпригодности, применять планы испытаний для оценки надежности, использовать параметрические и непараметрические методы оценки критериев надежности.

Учебник написан на основе курса лекций, которые авторы читают более 15 лет на кафедре инжиниринга технологического оборудования НИТУ «МИСиС» для студентов, обучающихся по специальности (профилю) 150404 «Металлургические машины и оборудование» направления 150400 «Технологические машины и оборудование».

ВВЕДЕНИЕ

Технические устройства и машины являются неотъемлемой частью человеческого общества в целом и каждого человека в отдельности. От того, какие машины созданы и как они взаимодействуют с людьми и окружающей средой зависят многие проблемы общества. Качество и конкурентная способность технологических машин и оборудования в первую очередь определяется их надежностью.

Идет непрерывный процесс обновления технологического оборудования, совершенствуются существующие и появляются новые образцы техники, для которых характерно улучшение технико-экономических характеристик: увеличение скорости, повышение уровня нагрузки, расширение диапазона температур, снижение габаритов и массы, повышение степени автоматизации и др. Растут требования к точности функционирования и эффективности работы машин, происходит их объединение в системы с единым управлением. При этом, чем выше технический уровень машин, тем актуальнее требования к их надежности.

Формирование показателей надежности независимо от разнообразия типов машин и условий их эксплуатации происходит по общим законам в соответствии с логикой событий. Раскрытие и изучение этих законов является основой для прогнозирования, расчета и оценки надежности и построения на их основе наиболее рациональных условий производства, испытания и эксплуатации технических систем.

Основным содержанием и целью теории надежности технических систем является разработка методов оценки показателей надежности на различных стадиях с учетом конструктивных особенностей, технологии изготовления, назначения и условий эксплуатации. Знание свойств технических систем сохранять работоспособность и закономерностей их изменения с течением времени позволит решать технические задачи обеспечения заданного уровня надежности.

При рассмотрении проблем надежности технических систем в стандартах и нормативно-технической документации используются термины «объект» и «изделие». Поэтому в дальнейшем при анализе надежности технологических машин и оборудования эти термины будут использованы как равноценные.

Значительные средства затрачиваются на поддержание машин в работоспособном состоянии. Это является следствием того, что в силу различных обстоятельств со временем происходит старение машин. Недостаточный уровень надежности машин влечет за собой

значительное снижение не только их конкурентных возможностей, но и влечет за собой значительные экономические потери.

Все это выдвигает на первый план решение вопросов обеспечения необходимой надежности машин еще на стадии их проектирования и изготовления. Современный уровень развития техники позволяет обеспечить практически любой уровень надежности технической системы. Однако при этом уровень затрат должен быть соизмерим с достигаемым эффектом. Эффективность металлургического производства неразрывно связана с работоспособностью технологического и вспомогательного оборудования, которая в значительной степени зависит от организации ремонтного хозяйства и принятой системой технического обслуживания.

Опыт эксплуатации металлургического оборудования показывает значительный рост затрат на поддержание и восстановление его работоспособного состояния. По данным зарубежных и отечественных исследователей затраты на техническое обслуживание и ремонты (ТОиР), отнесенных к стоимости выплавляемого металла, достигают 40 %. Доля собственного ремонтного персонала в общей его численности на металлургических предприятиях составляет от 14 до 45 %, при этом доля затрат на основные и вспомогательные материалы составляют в среднем около 31 % всех затрат на техническое обслуживание.

Сравнительно недавно основной задачей ремонтного хозяйства в металлургии было обеспечение высокого уровня производства, причем затраты на ТОиР имели второстепенное значение. В связи с ужесточением конкуренции на рынке металлопродукции ситуация изменилась коренным образом, и в настоящее время задачей ремонтного хозяйства является обеспечение надежности производственного оборудования для выпуска качественной и конкурентоспособной продукции при минимальных затратах. Таким образом, область компетенции и ответственности ремонтного хозяйства расширяется.

Руководителям ремонтного хозяйства металлургических предприятий ежедневно приходится решать следующие основные задачи, направленные на обеспечение функциональной готовности и работоспособности машин и оборудования:

- 1) оценка технического состояния;
- 2) определение сроков и объемов проведения ТОиР;
- 3) определение видов и объемов ресурсов для выполнения ТОиР;
- 4) распределение материальных и трудовых ресурсов по времени, по видам ремонтно-профилактических работ и исполнителям (собственные силы или сторонние организации);

- 5) организация и управление проведением ТОиР;
- 6) разработка мероприятий по модернизации и реконструкции оборудования и др.

Эффективное использование металлургического оборудования зависит от квалифицированного ухода за ним и, особенно от обеспечения смазочными системами и устройствами, грамотного применения смазочных материалов, качества технического обслуживания и эксплуатации.

Решение проблемы повышения срока службы и безотказной работы технологических машин и оборудования при одновременном снижении их металлоемкости возможно лишь при наличии высококвалифицированных кадров инженеров, в совершенстве владеющих современными методами расчета на прочность, износостойкость и надежность деталей машин и элементов конструкций.

Методы теории надежности в настоящее время получили достаточно широкое развитие и дают инженеру-проектировщику возможности для удовлетворения возникающих вопросов практики. В проблеме создания конкурентоспособной продукции и отыскания наиболее эффективных путей ее сбыта существенную роль играет уровень надежности поставляемых потребителю машин. Чем выше гарантированный изготовителем уровень надежности машины, тем, при прочих равных условиях, большей конкурентоспособностью она будет обладать.

Таким образом, проблема надежности активно внедряется во все сферы человеческой деятельности, устанавливает свои требования и ограничения к уровню надежности создаваемых машин. Чем выше технические характеристики машины, тем актуальнее проблема повышения ее надежности.

В настоящем учебнике рассмотрены методология и методы теории надежности, применяемые для прогнозирования и оценки основных характеристик надежности технических систем, к которым в первую очередь относятся работоспособность и безотказность. Принимая во внимание, что теория надежности базируется на теории вероятности и математической статистике, рассмотрены основные законы распределения наработок до отказа (на отказ), которые являются случайной величиной. Рассмотрены методы и оценки надежности сложных технических систем, а также планы испытаний и методы статистической обработки экспериментальной информации для оценки вероятности безотказной работы как действующих, так и для прогнозирования характеристик вновь создаваемых систем.

1. ОСНОВЫ ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ

1.1. Основные понятия и определения

Теория надежности – наука, которая устанавливает закономерности возникновения отказов объектов и методы их прогнозирования, изыскивает способы повышения надежности изделий при конструировании, изготовлении, а также поддержании их работоспособного состояния при эксплуатации; разрабатывает методы контроля надежности изделий.

Надежность является сложным свойством, которое в зависимости от назначения объекта и условий его применения состоит из сочетания свойств безотказности, долговечности, ремонтпригодности и сохраняемости.

В соответствии с ГОСТ 21.002–89 «Надежность в технике. Понятия и определения» *надежность* определяется, как свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, ремонтов, хранения и транспортировки. Для металлургического оборудования характерным является сочетание следующих свойств.

Безотказность – свойство объекта сохранять работоспособное состояние в течение некоторого времени или некоторой наработки.

Долговечность – свойство объекта сохранять работоспособное состояние до наступления предельного состояния при установленной системе технического обслуживания и ремонтов.

Ремонтпригодность – свойство объекта, заключающееся в приспособленности к предупреждению и обнаружению причин возникновения отказов и повреждений, а также поддержанию и восстановлению работоспособного состояния объекта путем проведения технического обслуживания и ремонтов.

Знание этих свойств и закономерностей их изменения во времени позволяет решать многие практические задачи не только по обеспечению определенного уровня надежности, но и направленные на его повышение.

Под *работоспособным состоянием объекта* понимают такое состояние, при котором значения всех параметров, характеризующих способность выполнять заданные функции, соответствуют требованиям нормативно-технической и(или) конструкторской документации.

Нарушение работоспособного состояния является событием, получившим название *отказ*.

По характеру своего проявления отказы подразделяются на внезапные и постепенные. *Внезапный отказ* характеризуется скачкообразным изменением значений одного или нескольких параметров объекта. *Постепенный отказ* обусловлен естественными процессами старения, изнашивания, коррозии и усталости при соблюдении всех установленных правил и(или) норм проектирования, изготовления и эксплуатации.

По причинам возникновения отказы делят на конструктивные, производственные и эксплуатационные. Отказы, являющиеся следствием ошибок конструирования или нарушения установленных правил или норм проектирования, называют *конструктивными*. Отказы, связанные с несовершенством или нарушением установленного процесса изготовления или ремонта, выполненного на ремонтном предприятии, называют *технологическими* или *производственными*. Нарушение установленных правил и(или) условий эксплуатации приводит к отказам, называемым *эксплуатационными*. Для металлургических машин при пуске их в эксплуатацию наиболее характерными являются внезапные конструктивные отказы. При установившемся процессе эксплуатации наиболее часто возникают внезапные эксплуатационные отказы.

На рис. 1.1 приведена схема отказа конкретной детали вследствие перегрузки, т.е. нарушения правил технической эксплуатации. Если прочностные свойства детали не изменяются, то в момент времени t_1 произойдет отказ, связанный с перегрузкой. Если же в результате многократного воздействия нагрузки происходит снижение прочностных свойств, то в момент времени t_2 произойдет постепенный отказ.

Внезапные отказы могут являться следствием разброса механических свойств материала, из которого изготовлена деталь, и уровня нагрузок, действующих на нее (рис. 1.2). Если принять, что величины нагрузки и прочности подчиняются нормальному закону распределения (см. п. 1.3), то существует зона (на рисунке заштрихована) внезапных отказов при расчетном коэффициенте запаса прочности.

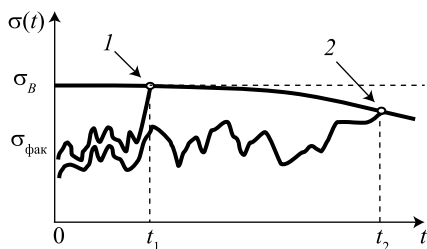


Рис. 1.1. Схема появления внезапных (1) и постепенных (2) отказов

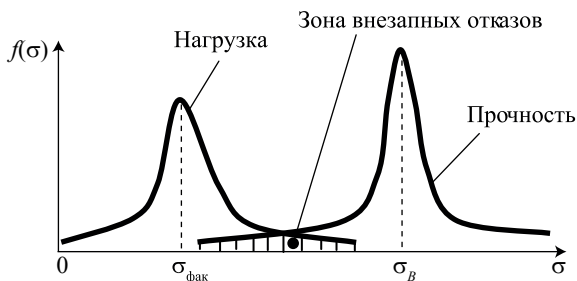


Рис. 1.2. Схема появления отказа при разбросе значений нагрузки и прочностных свойств деталей

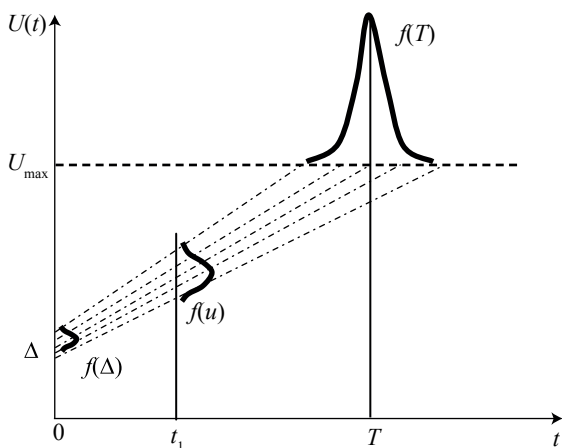


Рис. 1.3. Схема возникновения постепенных отказов:
 U_{\max} – максимально допустимая величина износа (отказ);
 Δ – исходный зазор в соединении; $f(\Delta)$ – плотность распределения зазора в соединении; $f(u)$ – плотность интенсивности (скорость) отказов $u = dU/dt$; $f(T)$ – плотность вероятности отказов;
 T – время работы до отказа

Схема возникновения постепенных отказов в узлах трения вследствие развития процессов изнашивания показана на рис. 1.3.

Первоначальный разброс величины зазора вследствие допуска на изготовление в процессе эксплуатации увеличивается и определяется скоростью изнашивания u , которая имеет нормальный закон распределения. Поэтому время работы до отказа тоже имеет нормальный закон распределения.

В теории надежности введено понятие система и элемент. Под *системой* понимают множество элементов и связь между ними, образующих некоторую целостность. Под *элементом* понимают часть системы, предназначенную для выполнения определенных функций и неделимую на составные части при данном уровне рассмотрения. Таким образом, только уровень рассмотрения определяет отношение того или иного объекта, образующего некоторую целостность, к системе или элементу.

При исследовании надежности металлургического оборудования в качестве элементов принимают детали или узлы, которые подвергаются замене или восстановлению в процессе технического обслуживания или ремонта.

Элементы и системы, которые в случае отказа заменяют, называют *невосстанавливаемыми*. Элементы и системы, которые в случае отказа подвергаются восстановлению, называют *восстанавливаемыми*.

Важным понятием теории надежности является *наработка*, под которой понимается продолжительность или объем работы. Нарботка может быть как непрерывной величиной (продолжительность работы в часах, тонны выплавленного металла, кубометры переработанной руды, километры пробега и т.п.), так и целочисленной величиной (число плавов, запусков и т. п.). Различают наработку до отказа и наработку между отказами или наработку на отказ. *Нарботка до отказа* это наработка объекта от начала его эксплуатации до возникновения первого отказа. *Нарботка между отказами* – это наработка объекта от момента восстановления его работоспособного состояния после отказа до возникновения следующего отказа. Это понятие относится только к восстанавливаемым объектам.

В процессе эксплуатации металлургическое оборудование может находиться в различных видах технического состояния: исправное – неисправное, работоспособное – неработоспособное, правильное функционирование – неправильное функционирование, предельное.

Исправное – состояние объекта, при котором он полностью соответствует требованиям нормативно-технической документации.

Работоспособное – состояние объекта, при котором значения всех параметров, характеризующих способность выполнять заданные функции, соответствуют требованиям нормативно-технической документации.

При *правильном функционировании* объект находится в состоянии, при котором он соответствует требованиям нормативно-технической документации в данном режиме работы в данный момент времени.

Предельным называется такое состояние объекта, при котором его дальнейшее применение по назначению недопустимо или нецелесообразно, либо восстановление его исправного или работоспособного состояния недопустимо или нецелесообразно.

По ГОСТ 15467–79 любое несоответствие продукции установленным требованиям называется *дефектом*. При рассмотрении надежности металлургического оборудования под дефектом (повреждение, отказ, неустраняемый дефект) понимается переход из исправного состояния в неисправные состояния (работоспособное, неработоспособное, предельное).

Повреждение – событие, заключающееся в нарушении исправности оборудования при сохранении его работоспособности.

Отказ – событие, заключающееся в нарушении работоспособности оборудования.

Сбой – самоустраняющийся отказ или однократный отказ, устранимый незначительным вмешательством оператора.

Восстановление исправного или работоспособного состояния происходит с помощью различных видов технического обслуживания и ремонта (табл. 1.1).

Таблица 1.1

Возможные переходы видов технического состояния

Техническое состояние	Дефект			Вид ТОиР		
	Повреждение	Отказ	Неустраняемый отказ	Поддержание	Текущий ремонт	Капитальный ремонт
Исправное	↓	↓	↓	↑	↑	↑
Работоспособное	↓	↓ ↓	↓ ↓	↑	↑ ↑	↑ ↑
Неработоспособное		↓ ↓	↓ ↓		↑ ↑	
Предельное			↓ ↓			↑ ↑

Отказы, возникающие в процессе эксплуатации, могут быть вызваны неблагоприятным сочетанием различных факторов – рассеянием действующих нагрузок, отклонением от номинального значения механических характеристик материалов, неблагоприятным сочетанием допусков в местах сопряжения и т.п.

Поэтому в расчетах надежности различные параметры рассматривают как случайные величины, которые могут принимать то или иное значение, неизвестное заранее. Для показателей надежности применяют две формы представления: вероятностная и статистиче-

ская. Вероятностная форма обычно удобнее при аналитических расчетах надежности, статистическая – при экспериментальном исследовании надежности оборудования. Кроме того, одни показатели лучше интерпретируются в вероятностных терминах, а другие – в статистических.

Элементы теории вероятностей и математической статистики, которые используются в теории надежности, приведены в Прил. 1.

1.2. Математические зависимости для оценки надежности

1.2.1. Функциональные зависимости надежности

Различают случайные величины *прерывного* (дискретного) и *непрерывного* типов. Условимся случайные величины в дальнейшем обозначать большими буквами, а их возможные значения – соответствующими малыми. Для каждого числа x в диапазоне изменения случайной величины X существует определенная вероятность $P(X < x)$ того, что X не превышает значения x . Вероятность этого события называют *функцией распределения*:

$$F(x) = P(X < x). \quad (1.1)$$

Функция распределения – универсальная характеристика, так как она является функцией как непрерывных, так и дискретных случайных величин. Функция $F(x)$ относится к неубывающим функциям: она монотонно возрастает при непрерывных процессах и ступенчато возрастает при дискретных процессах. В пределах изменения случайной величины X эта функция изменяется от 0 до 1: $F(-\infty) = 0$; $F(\infty) = 1$.

Производную от функции распределения по текущей переменной называют *плотностью распределения*:

$$f(x) = \frac{dF(x)}{dx} = F'(x). \quad (1.2)$$

Плотность распределения характеризует частоту повторений данного значения случайной величины. В теории надежности величину $f(x)$ называют *плотностью вероятности*. Плотность распределения есть неотрицательная функция своего аргумента $f(x) \geq 0$.

Интеграл в бесконечных пределах от плотности распределения равен единице:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f(x)dx = 1.$$

В ряде случаев в качестве характеристик распределения случайных величин достаточно использовать некоторые числовые величины, среди которых в теории надежности наиболее употребительными являются математическое ожидание (характеризует среднее значение), мода и медиана (характеризуют положение центров группирования случайных величин на числовой оси), дисперсия, среднее квадратичное отклонение и коэффициент вариации (характеризуют рассеяние случайной величины). Значения характеристик, полученные по результатам испытаний или эксплуатации, называют *статистическими оценками*. Характеристики распределения используют для прогнозирования надежности.

Для дискретных случайных величин *математическое ожидание* M_x равно сумме произведений всех возможных значений x_i на вероятности этих значений P_i :

$$M_x = \sum_{i=1}^m x_i P_i. \quad (1.3)$$

Математическое ожидание для непрерывной случайной величины выражается интегралом в бесконечных пределах от произведения непрерывно изменяющихся возможных значений случайной величины на плотность распределения:

$$M_x = \int_{-\infty}^{+\infty} xf(x)dx. \quad (1.4)$$

Математическое ожидание случайной величины непосредственно связано с ее средним значением. При неограниченном увеличении числа опытов среднее арифметическое значение \bar{x} величины x приближается к математическому ожиданию и называется *оценкой среднего значения*:

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^m \frac{x_i n_i}{n}, \quad (1.5)$$

где m – число групп с одинаковым значением случайной величины x_i ;
 n – общее число опытов; x_i – текущее значение случайной величины; n_i – число опытов, в которых появилось x_i .