

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
**«Санкт-Петербургский государственный университет
промышленных технологий и дизайна»**
Высшая школа технологии и энергетики
Кафедра основ конструирования машин

НАДЕЖНОСТЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Текст лекций для студентов всех форм обучения
по направлению подготовки
15.03.02 — Технологические машины и оборудование

Составители:
Н. Н. Кокушин
И. В. Ключкин
П. В. Кауров

Санкт-Петербург
2025

Утверждено
на заседании кафедры ОКМ
25.09.2025 г., протокол № 2

Рецензенты:
Б. М. Шифрин, В. А. Марков

Текст лекций соответствует программам и учебным планам дисциплины «Надежность технологического оборудования» для студентов, обучающихся по направлению подготовки 15.03.02 «Технологические машины и оборудование».

В работе рассмотрены цели и задачи науки о надежности технологического оборудования, дана сводка основных понятий и показателей надежности. Приведена характеристика надежности технологического оборудования. Изложены методы обеспечения надежности технологического оборудования на основных этапах его жизненного цикла.

Текст лекций предназначен для подготовки бакалавров всех форм обучения.

Режим доступа: http://publish.sutd.ru/tp_get_file.php?id=202016, по паролю.

- Загл. с экрана.

Дата подписания к использованию 16.10.2025 г. Рег.№ 5007/25

Высшая школа технологии и энергетики СПбГУПТД
198095, СПб., ул. Ивана Черных, 4.

© ВШТЭ СПбГУПТД, 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1. Надежность технических объектов	5
2. Развитие науки о надежности	6
3. Простые свойства надежности.....	7
4. Резервирование	9
5. Отказы техники.....	10
6. Надежность целлюлозно-бумажного оборудования	19
7. Надежность бумагоделательных машин.....	27
8. Резервирование на бумагоделательных машинах.....	32
9. Отказы на бумагоделательных машинах	33
10. Надежность химического оборудования	42
11. Основные показатели надежности техники	46
12. Обеспечение надежности на основных этапах жизненного цикла промышленного оборудования	49
13. Надежность технических систем.....	53
14. Надежность при восстановлении.....	58
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	61

ВВЕДЕНИЕ

В тексте лекций освещаются следующие вопросы: сводка основных понятий и показателей надежности; характеристики надежности технологического оборудования; основные этапы жизненного цикла технологических машин и оборудования; методы обеспечения надежности технологического оборудования (в частности машин и аппаратов целлюлозно-бумажной промышленности) на основных этапах его жизненного цикла.

Наука о надежности техники, особенно о надежности используемого на предприятиях технологического оборудования, является частью широко понимаемой науки о машинах (т. е. частью машиноведения), поэтому предметы по надежности примыкают к таким предметам их учебных программ, как теория машин и механизмов, сопротивление материалов, детали машин, оборудование предприятий отрасли и др.

Дисциплина «Надежность технологического оборудования» преподается в тесной связи с соответствующими видами машин и оборудования, поэтому она изучается после спецпредметов или одновременно с ними.

В науке о надежности, прежде всего, используются такие обобщенные понятия, как технический объект (изделие), элемент, система.

Характерными примерами технических объектов являются: машина, аппарат, их узлы, детали (когда они имеют самостоятельные характеристики надежности).

В зависимости от конкретной задачи то или иное изделие можно рассматривать как систему элементов или как элемент более сложной системы.

Например, бумагоделательная машина (БДМ), с одной стороны, это система основных частей и вспомогательных систем, а с другой стороны БДМ – это элемент технологической линии предприятия целлюлозно-бумажной промышленности.

Понятия надежности используются также для характеристики состояния технических объектов (изделий) с позиций надежности. Это следующие понятия: работоспособное (или нет) состояние изделия, исправное (или неисправное) его состояние. Понятия работоспособное и исправное состояния технического объекта близки друг к другу, но они не всегда совпадают. Нарушение работоспособности технического объекта (машины) называется его отказом.

Отказы техники считаются случайными событиями, так как каждый отказ обычно происходит по нескольким причинам (включая основные) в их случайных сочетаниях. Кроме того, время отказа также случайная величина (ввиду трудности точного прогнозирования моментов времени отказов).

1. НАДЕЖНОСТЬ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Надежность техники – это ее свойство выполнять все свои функции в течение некоторой заданной наработки и в требуемых условиях эксплуатации с сохранением всех необходимых характеристик работоспособности техники и выпускаемой продукции в заданных пределах.

Новая техника может иметь высокие начальные характеристики (по качеству работы и др.), но если они в ходе работы быстро ухудшаются, то такая техника имеет низкую надежность и обычно в целом низкую эффективность использования (например, низкую экономическую эффективность).

Современное развитие техники характеризуется интенсификацией режимов её работы, усложнением конструкции, объединением машин и аппаратов в технологические линии, автоматизацией. Все это повышает вероятность различных сбоев в работе, отказов, т. е. ухудшает стабильность, бесперебойность работы техники. Кроме того, надежность снижается в ходе эксплуатации из-за старения техники (в результате износа, коррозии и др.).

Обеспечение и поддержание надежности техники при эксплуатации – это главная задача таких служб предприятий, как отдел главного механика (ОГМ), отдел главного энергетика (ОГЭ) и др. Поэтому положения науки о надежности техники прежде всего отвечают запросам инженеров-эксплуатационников.

Эти положения также активно используются и при разработке новой техники (например, новых машин и аппаратов) инженерами (конструкторами, проектировщиками).

Надежность – это комплексное, сложное свойство техники, надежная техника должна быть: безотказной; долговечной; ремонтпригодной (т. е. допускать быстрое и нетрудоемкое устранение отказов и их последствий); надежность техники должна сохраняться как при работе, так и при ее транспортировке, хранении и др., здесь важно также свойство «сохраняемость надежности».

Представления о надежности техники развивались постепенно. Первоначально считалось, что надежность есть безотказность. Соответственно при обеспечении надежности техники заботились лишь о безотказности. Затем стали также заботиться и о достаточной долговечности техники (расширили понятие надежности, включив в него и долговечность). Сейчас при этом заботятся и о ремонтпригодности и о сохраняемости надежности. Таким образом, в понятие надежности постепенно были включены указанные выше четыре аспекта надежности (четыре простых свойства надежности). Полная характеристика надежности какого-либо конкретного изделия (технического объекта) дается в виде комплекса показателей надежности. Каждый из таких показателей чаще характеризует какое-либо одно простое свойство надежности, но иногда один показатель надежности одновременно характеризует два или более простых свойств надежности. Вид таких комплексов показателей для данной машины или их элементов и требуемые численные значения показателей назначаются при разработке проекта технического объекта.

2. РАЗВИТИЕ НАУКИ О НАДЕЖНОСТИ

Самое начало исследований по надежности относится к началу XX века [1]. Оно было связано с обеспечением надежности подшипников качения. Затем в течение достаточно длительного периода времени исследования надежности и её обеспечение проводились применительно к радио- и электротехнике. В целом развитие науки о надежности проходило в несколько этапов:

1. В начале развития науки о надежности считалось, что отказы техники – это неизбежные случайные события. Соответственно, экспериментально изучались, например, распределения сроков службы до отказа в группах одинаковых невосстанавливаемых или восстанавливаемых изделий (например, подшипников, элементов радио- и электросхем и др.). При этом, например, часто выявлялось, что случайная величина T – срок службы до отказа – подчинялась нормальному закону, известному из теории вероятности. Иначе говоря, в группе таких одинаковых изделий имелся какой-то средний срок службы до отказа T_{cp} и некоторое рассеяние сроков службы T_i вокруг T_{cp} , примерно симметричное в обе стороны (с уменьшением плотности расположения реализаций T_i на оси времени в обе стороны от T_{cp}). В таких случаях одна из функций распределения случайной величины T , а именно, функция плотности вероятности f , имела вид функции Гаусса (рис. 1).

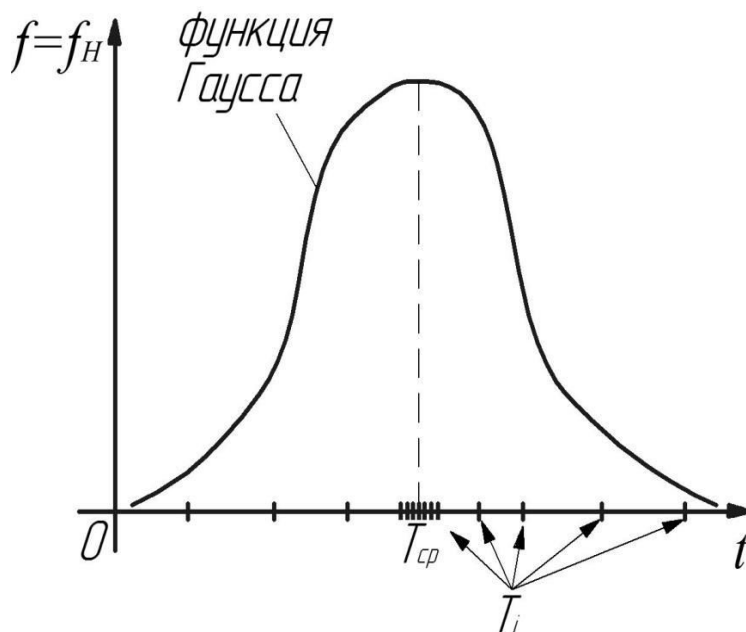


Рисунок 1 – Функция f_H при нормальном законе распределения случайной величины T

В технике, в частности в теории надежности, функция f часто называется функцией плотности расположения реализаций T_i на оси времени t .

Когда случайная величина T подчиняется нормальному распределению, говорят, что в данном случае выполняется нормальный закон надежности.

Если такие экспериментальные данные были получены для элементов сложных технических систем (радиосхем, машин), то по ним математически оценивалась надежность этих систем в целом.

В тот же период начали разрабатывать и издавать первые стандарты по надежности (прежде всего по основным понятиям и терминам надежности). Так, в США первые такие стандарты были изданы в 1952 году. Стандартизация основных терминов надежности во многом была вызвана запросами юридической практики по вопросам взаимоотношений промышленных и других предприятий и организаций.

Указанный этап развития науки о надежности продолжался примерно с начала XX века по 1955 г.

2. Далее большое внимание стало уделяться изучению причин отказов техники и разработке методов их предотвращения. Поскольку одной из основных причин отказов является старение техники, то усилились исследования процессов износа, коррозии, развития усталостных явлений и др. и методов их предотвращения (замедления).

В результате многие отказы перестали восприниматься как неизбежные случайные события. При описании закономерностей надежности наряду с чисто вероятностным иногда начал использоваться и детерминистский подход (на основе законов физики и др.). Данный этап длился примерно с 1955 г. по 1980 г.

3. На основе накопленного опыта разрабатываются практические рекомендации по обеспечению и повышению надежности на основных этапах жизненного цикла техники. Данный этап длится с 1980 г. по настоящее время.

3. ПРОСТЫЕ СВОЙСТВА НАДЕЖНОСТИ

Безотказность – это свойство изделия непрерывно сохранять свою работоспособность в течение некоторой заданной наработки.

Наработка – объем работы изделия (технического объекта), выраженный, например, в единицах времени (тогда это чистое время работы изделия за какой-то срок службы), либо в пройденном километраже (для транспортных машин), либо в единицах выработанной продукции (для технологического оборудования, то есть выпускающего какую-либо продукцию) и т. д.

Свойство безотказности наиболее важно в следующих случаях: когда велика цена каждого отказа (например, в авиации и др.); при необходимости непрерывного режима работы изделия (например, для оборудования ЦБП, химической промышленности).

Долговечность – это свойство изделия длительно сохранять работоспособность (обычно до наступления предельного состояния) при соблюдении всех требований системы технического обслуживания и ремонта и правил эксплуатации в целом.

Предельное состояние – это такое, при котором дальнейшая эксплуатация невозможна или нецелесообразна (например, из-за появления неустранимой угрозы безопасности работающих, недопустимого и неустранимого снижения качества работы. При наступлении предельного состояния изделия оно подлежит списанию или капитальному ремонту. Признаки (критерии) предельного состояния изделия должны указываться в проектной документации на него вместе с проектным сроком службы изделия. Они являются основанием для списания или капитального ремонта изделия.

Свойство долговечности наиболее важно с позиций экономики. Действительно, техника должна отработать достаточно долго, чтобы окупилась затраты на ее приобретение и была получена необходимая прибыль.

Ремонтпригодность – это приспособленность техники к быстрому и нетрудоемкому нахождению места и причины отказа, такому же (быстрому и нетрудоемкому) устранению отказа и его последствий, а также предупреждению возможных отказов.

Свойство ремонтпригодности важно, например, для уменьшения простоев на ремонт после отказов (например, при непрерывном режиме работы техники) и соответствующего уменьшения экономических потерь от невыпуска продукции из-за этих простоев.

Сохраняемость надежности – это свойство сохранять свою работоспособность как при работе, так и на всех остальных стадиях существования техники (при ее хранении, погрузке и разгрузке, транспортировке и работе в качестве резерва).

Это свойство на производстве важно, например, при хранении запчастей к оборудованию на складе, при хранении оборудования перед монтажом, при транспортировке его с завода-изготовителя на предприятие.

Указанные простые свойства надежности обеспечиваются на всех стадиях существования техники (в частности, машин и аппаратов) – при создании техники (ее проектировании и изготовлении) и при эксплуатации.

Каждое простое свойство надежности количественно характеризуется своими показателями надежности. Некоторые показатели надежности одновременно характеризуют два или более простых свойства надежности. Все показатели качества техники делятся на две группы: показатели назначения (например, производительность, ассортимент и требуемое качество продукции, рабочая скорость, потребляемая мощность привода и др.); показатели надежности, эргономичности (соответствия техники возможностям человека), технической эстетики и безопасности.

Показатели надежности в целом количественно характеризуют сохраняемость исходного качества изделия при его эксплуатации (а также и на других стадиях существования техники).

Надежность техники можно считать также частью более широкого понятия эффективность. Эффективность – это способность выполнять свои функции с требуемым высоким качеством работы и с высокой экономической отдачей.

В целом надежность может быть идеальной, базовой, эксплуатационной. Идеальная надежность – это тот предельно высокий уровень надежности изделий данного вида, который можно достичь при использовании всех возможностей повышения надежности этих изделий независимо от их стоимости и эффективности (даже если такое повышение надежности экономически не окупается). Базовая надежность – экономически оправданный уровень надежности техники, который заложен в нее при создании (при проектировании и изготовлении), например, в конструкцию данной машины (аппарата, их элементов). Эксплуатационная надежность – это фактический уровень надежности изделия в данных условиях эксплуатации.

4. РЕЗЕРВИРОВАНИЕ

Резервирование – это метод повышения надежности техники путем использования различных дополнительных средств повышения надежности сверх минимально необходимых для нормальной работы.

Два основных вида резервирования – структурное и нагрузочное.

При структурном резервировании в структуру изделия (например, в конструкцию машины, электрическую схему, технологическую линию предприятия) для повышения надежности добавляются резервные, обычно одинаковые с основными элементами. Резервные элементы чаще используются при отказах основных и вместо них (например, резервные насосы) – это примеры ненагруженного резерва. Когда резервные элементы работают все время, в том числе и одновременно с основными элементами – это нагруженный резерв. Отношение числа резервных элементов к числу основных элементов, резервируемых ими, называется кратностью структурного резервирования. При кратности резервирования, равной единице – дублирование. Структурное резервирование может быть общим (резервирование изделия – например, машины в целом) или отдельным (резервирование отдельных элементов системы (изделия) – например, отдельных элементов технологической линии). При отдельном резервировании элементов конструкции машины на складе может иметься неснижаемый запас запасных узлов (деталей) – запчастей. В теории надежности показано, что отдельное резервирование (дублирование) всех элементов последовательной (с точки зрения надежности) технической системы больше повышает ее надежность, чем дублирование такой системы в целом (например, наличие резервной машины). Поэтому обычно не устанавливают рядом с основными машинами и аппаратами таких же резервных изделий (хотя иногда встречаются и указанные случаи, например, резервирование насосов), а к каждой машине (аппарату) на складе имеется набор запчастей (запасные узлы, детали). Резервирование замещением – это вид структурного резервирования, при котором резервные элементы используются только при отказе основных и вместо них (это практически случай ненагруженного резерва). При скользящем

резервирование группа одинаковых основных элементов изделия (например, одинаковых подшипников машины) имеет общий резерв в виде также группы одинаковых элементов. При отказе любого из основных элементов он заменяется на любой из запасных. При функциональном структурном резервировании имеется возможность при отказе какого-то элемента изделия использовать взамен него какой-либо другой элемент этого изделия, который наряду со своей основной функцией может (хотя бы в какой-то мере) выполнять функцию отказавшего элемента.

При нагрузочном резервировании используется способность элементов изделий (или изделий в целом) нести повышенную нагрузку (в широком смысле слова) по сравнению с минимально необходимой для нормальной работы. Например, при конструировании машин для повышения надежности часто в конструкцию закладывается завышенная прочность основных элементов конструкции (коэффициенты запаса прочности). В проекты машин и аппаратов нередко закладываются также завышенные скорость и мощность привода (например, для возможности последующей модернизации машины с увеличением ее рабочей скорости или нагрузки на привод). В проекты систем трубопроводов может закладываться завышенная пропускная способность отдельных участков трубопроводов (например, при угрозе их засорения) и т. д.

В целом резерв изделия (например, машины, аппарата) – это совокупность всех средств повышения его надежности путем использования резервирования различных видов.

5. ОТКАЗЫ ТЕХНИКИ

Выше было сказано, что отказ – это случайное событие, заключающееся в нарушении (утрате) работоспособности технического объекта. При эксплуатации техники ее отказы – одно из главных понятий надежности. Отказы техники считаются случайными событиями, так как каждый отказ обычно происходит в силу ряда причин (включая основные) в их случайных сочетаниях [2]. Время наступления отказа также величина случайная. Исправная и работоспособная техника обычно отказывает из-за того, что при работе, а также при хранении, транспортировке и т. д. она подвергается различным воздействиям. Такие воздействия прежде всего можно разделить на две группы: внешние воздействия (механические, тепловые, химические и т. д.); внутренние воздействия (например, воздействие привода на машину, деталей машины друг на друга при передаче усилий). К внутренним воздействиям можно отнести и действие остаточных напряжений в литых (особенно тонкостенных) деталях машин, под влиянием которых со временем происходят остаточные деформации (коробление) этих литых деталей.

При указанных воздействиях на технику действуют разные виды энергии (механическая, химическая, тепловая, электромагнитная, энергия света и т. д.).

В результате данных воздействий в элементах техники (например, в узлах и деталях машин и аппаратов) могут происходить различные процессы, приводящие к появлению изменений в элементах техники.

Так, на технологическом оборудовании, т. е. на оборудовании, вырабатывающем какую-либо продукцию, наряду с основными технологическими процессами выработки продукции в элементах конструкции оборудования обычно происходят различные вторичные (сопутствующие) процессы (износ деталей, коррозия, развитие усталостных явлений, вибрации, упругие и пластические деформации деталей и т. д.).

Таковыми сопутствующими процессами, часто сильно влияющими на надежность оборудования, механические службы предприятий должны постоянно заниматься – контролировать их развитие, по возможности устранять вредное влияние их на работоспособность (в частности, на надежность) оборудования. Вторичные процессы можно разделить на группы по скорости их протекания (развития):

1) быстро развивающиеся процессы (например, вибрации конструкции, ее быстрые деформации, поломки). Скорость развития таких процессов – доли секунды, секунды;

2) процессы, развивающиеся со средней скоростью (например, тепловые деформации конструкций, износ режущего инструмента). Их время развития – минуты, часы, дни;

3) медленно развивающиеся процессы (основные виды износа, коррозия, усталостные явления, коробление и др.). Время развития таких процессов – недели, месяцы, годы.

В результате развития вторичных процессов в элементах техники возникают и развиваются различные изменения, которые могут быть обратимыми (исчезающими после устранения их причин) и необратимыми (остающимися после устранения этих причин).

К обратимым изменениям относятся, например, вибрации, упругие деформации, умеренные тепловые деформации (они устраняются при устранении их причин – при снятии механических нагрузок, нагрева). Примерами необратимых изменений в конструкциях машин являются следы износа, коррозия, усталостные явления (вплоть до поломок деталей) – они остаются, например, при остановках машин, устранении коррозионной среды.

Часто указанные изменения (как обратимые, так и, особенно, необратимые) могут быть сильно выражены. Они могут значительно изменить техническое состояние оборудования и ухудшить его работоспособность вплоть до отказов (вплоть до потери работоспособности техники).

После отказов (например, остановок машин из-за поломок их деталей) проводится послеаварийный ремонт для устранения отказов и их последствий (для восстановления работоспособности техники). Отказы оборудования (например, при поломках деталей и узлов) могут происходить как из-за происходящих в элементах конструкции прогрессирующих вторичных процессов, так и вследствие случайных перегрузок, перегревов, заклиниваний деталей и т. д.

Для предупреждения назревающих отказов оборудования, например, из-за износа, периодически (согласно плану) проводится плановый предупредительный ремонт (ППР), включающий ревизию оборудования (его разборку и контроль состояния (степени износа и др.)) и сам предупредительный ремонт изношенных узлов и деталей.

Наиболее простым и распространенным методом как непланового послеаварийного, так и планового предупредительного ремонтов является простая замена отказавших или изношенных элементов конструкции на запасные (новые или восстановленные).

Непрерывно работающая техника периодически останавливается на планово-предупредительный ремонт (ППР), на периодически работающем оборудовании ППР проводится обычно в нерабочие смены (например, ППР металлорежущих станков в ремонтных цехах, работающих в одну смену).

Остановки техники могут быть и не связаны с отказами и ремонтом (например, из-за перебоев в снабжении сырьем, подаче пара, электроэнергии и др.). Поэтому при оценке надежности по данным эксплуатации следует учитывать лишь истинные отказовые ситуации.

Все отказы (например, оборудования) делятся на следующие виды:

1) Отказы внезапные и постепенные

Внезапные отказы – это такие, при которых какие-либо характеристики техники меняются резко, скачком (например, при поломках деталей резко меняется их форма, при пробое конденсаторов их емкость скачком уменьшается до нуля и др.).

При постепенных отказах аналогичные параметры меняются постепенно (например, при износе детали, приведшем к отказу, постепенно уменьшаются ее поперечный размер и масса, при короблении тонкостенной литой детали постепенно изменяется ее форма).

Можно также сказать, что при внезапных отказах неожиданно (внезапно) возникают их причины, а предпосылки постепенных отказов развиваются постепенно.

2) Отказы явные и скрытые

Явные отказы – это такие, которые устанавливаются простым наблюдением (например, поломки элементов конструкции и отсюда отказы машин и аппаратов).

Скрытые отказы устанавливаются с помощью специальных измерений (размеров, массы деталей и др.). Например, факт скрытого отказа машины, вырабатывающей продукцию, при выработке ею брака устанавливается измерениями характеристик качества этой продукции.

3) Отказы независимые и зависимые друг от друга

Например, после поломки цапфы вала при его падении возможна также поломка бочки этого вала. Здесь поломка бочки является отказом, зависимым от поломки цапфы вала.

4) Сбои

Сбои – это самоустраняющиеся отказы. Например, при колебаниях температуры окружающей среды часто «плывут» характеристики некоторых

элементов электронных схем (например, так может меняться емкость конденсаторов). При этом способность выполнять свою функцию у электронной схемы в целом может быть нарушена вплоть до отказа схемы. При восстановлении температуры окружающей среды отказ схемы самоустраниется, так как характеристики элементов приходят в норму.

5) *Перебегающие отказы*

Это многократно повторяющиеся одинаковые самоустраниющиеся отказы типа сбоя.

6) *В зависимости от причин отказы делятся на следующие виды:*

а) конструкционные отказы (происходят из-за недостатков конструкции отказавшей техники);

б) технологические отказы (вследствие нарушения технологии изготовления отказавшего изделия);

в) эксплуатационные отказы (происходят из-за нарушения правил эксплуатации отказавшей техники).

7) *Ресурсные отказы*

Это отказы, из-за которых заканчивается ресурс изделия. При таких отказах данный технический объект списывается или ставится на капитальный ремонт.

8) *Деградационные отказы*

Это такие отказы, которые происходят вследствие неизбежного старения техники при полном соблюдении всех норм и правил ее создания и эксплуатации.

При проектировании техники (например, машин и аппаратов) следует указывать ее возможные отказы (хотя бы основные). При этом по тяжести последствий все отказы делятся на легкие, средние и тяжелые. Данная терминология связана с величиной ущерба от отказа по сравнению со стоимостью отказавшего изделия.

При легких отказах ущерб от них много меньше стоимости отказавшего изделия, при средних отказах – сравним с ней, при тяжелых отказах – много больше стоимости изделия.

Все отказы техники также делятся на функциональные и параметрические [3]. Функциональные отказы это такие, в результате которых техника полностью теряет способность выполнять свои функции (например, полная остановка токарного станка из-за поломки его основных деталей). Параметрические отказы – такие, при которых техника как-то может выполнять свои функции после отказа, но какие-то параметры, характеризующие качество её работы, выходят за допустимые пределы. Например, это выработка брака на сильно изношенном токарном станке (это отказ по параметрам точности изготовления деталей).

В зависимости от того, на какой стадии эксплуатации происходят отказы техники, они делятся на следующие виды: приработочные отказы – это отказы, происходящие на стадии приработки – первой стадии эксплуатации техники (например, оборудования). Отказы на данной стадии в основном идут из-за каких-либо скрытых дефектов в новой технике (например, из-за литейных

раковин в отливках, ошибок конструкторов, погрешностей обработки на станках и др.). Первую стадию эксплуатации иногда называют также стадией «выжигания» скрытых дефектов. Она отличается большой индивидуальностью и отсюда плохой предсказуемостью по отказам. После прохождения всех приработочных отказов или после устранения их причин наступает вторая стадия эксплуатации – стадия нормальной эксплуатации исправной новой техники. Здесь отказы идут из-за случайно возникающих нештатных условий эксплуатации, на которые техника не рассчитана (из-за внезапных перегрузок, перегревов, скачков напряжения в сети, ошибок рабочих, случайных колебаний качества сырья и т. д.). На данной стадии эксплуатации идут внезапные отказы. В постоянных условиях работы частота возникновения таких случайных перегрузок тоже примерно постоянна, поэтому и частота отказов из-за них примерно постоянна.

В теории надежности, когда речь идет о работе группы одинаковых невосстанавливаемых после отказов изделий (например, подшипников качения), частота отказов обычно берется в расчете на одно оставшееся работоспособное изделие в группе в данный момент времени. Такая частота отказов называется интенсивностью отказов – λ .

По данным эксплуатации (испытаний) группы невосстанавливаемых изделий статистическая оценка интенсивности отказов при данном времени приближенно определяется по формуле:

$$\lambda^* = \frac{\Delta n}{\Delta t \cdot N_p} \left[\frac{\text{отк}}{\text{час}} \right],$$

где Δn – количество отказов в группе за время Δt ;

N_p – количество работоспособных изделий, оставшихся в группе к данному моменту времени.

По мере старения техники из-за износа, коррозии и т. д. сопротивляемость ее случайным перегрузкам снижается, и величина интенсивности отказов начинает расти. Начинается третья стадия эксплуатации – стадия износных (постепенных) отказов – их предпосылки развиваются постепенно. Покажем график изменения интенсивности отказов по всем трем стадиям эксплуатации техники (рис. 2).

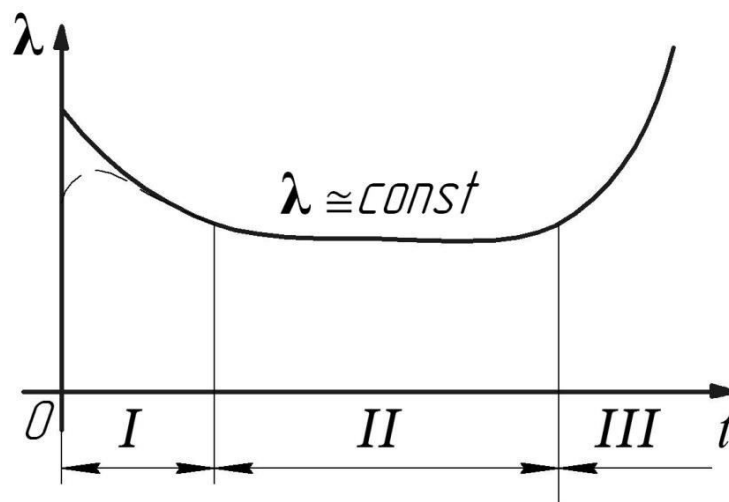


Рисунок 2 – Стадии эксплуатации техники

Отказы на разных стадиях эксплуатации нередко сопоставляют с болезнями человека в зависимости от его возраста. Так, приработочные отказы сопоставляют с детскими болезнями человека, внезапные отказы на второй стадии эксплуатации — со случайными болезнями взрослого здорового организма, износосвые отказы на третьей стадии — со старческими болезнями человека.

Все причины отказов техники (например, машин, аппаратов, их элементов) можно разделить на случайные и систематические причины.

К систематическим причинам отказов относятся, прежде всего, закономерные процессы старения техники (износ, коррозия, усталостные явления, коробление и др.). К случайным причинам отказов относятся скрытые дефекты в новой технике, случайные перегрузки техники при работе, случайные колебания качества используемого сырья и т. д.

Отказы оборудования могут происходить: из-за повреждений его элементов и без повреждений элементов оборудования, например, из-за ослабления крепежа, разрегулировок механизмов, заклинивания деталей, засорения механизмов, отверстий и т. д.

Соответственно, устранение или предупреждение отказов оборудования (и их последствий) достигается следующим образом:

- заменой поврежденных (в том числе отказавших или изношенных элементов оборудования (его узлов, деталей) на запасные (новые или восстановленные)). Здесь ремонт самих деталей и узлов не производится. Производится ремонт машины или аппарата в целом методом замены поврежденных (отказавших или изношенных) деталей и узлов на запасные. Это наиболее простой и самый распространенный вид ремонта машин и аппаратов;
- восстановительной обработкой отказавших или изношенных деталей машин и аппаратов, т. е. ремонтом самих поврежденных элементов оборудования или сочетанием такой обработки с заменой поврежденных деталей и узлов на запасные (например, несколько ремонтов изношенной детали и потом ее замена на запасные части);

- без ремонта как деталей и узлов оборудования, так и самих машин и аппаратов в целом.

Например, подтяжкой крепежа, подрегулировкой и прочисткой механизмов, устранением заклинивания деталей, промывкой и прочисткой механизмов, отверстий, магистралей и т. д. (указанные операции по п. 3 относятся к техническому обслуживанию оборудования).

Выше было указано, что внезапные отказы в основном идут на второй стадии эксплуатации техники (например, машин и аппаратов). При этом в группах одинаковых невосстанавливаемых элементов (подшипников, зубчатых передач и др.) интенсивность отказов на второй стадии эксплуатации обычно постоянна. С другой стороны, в такой группе изделий надежность также характеризуется вероятностью безотказной работы – $P(t)$, которая по данным эксплуатации (испытаний на надежность) равна:

$$P(t) = N_p(t) / N,$$

где $P(t)$ принимается равной доле оставшихся работоспособными изделий в этой группе к моменту времени t ;

$N_p(t)$ – количество работоспособных изделий к моменту времени t ;

N – общее количество изделий.

Так как рассматривается группа невосстанавливаемых изделий, то число отказавших изделий – $n(t)$ в сумме с числом оставшихся работоспособными изделий – $N_p(t)$ при этих же t все время равно исходному числу испытуемых изделий в группе:

$$n(t) + N_p(t) = N.$$

Так как на второй стадии эксплуатации наблюдается зависимость:

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

т. е. вероятность безотказной работы меняется по закону экспоненты, то говорят, что здесь соблюдается экспоненциальный закон надежности.

По данным эксплуатации или испытаний на надежность часто можно проверить, соблюдался ли экспоненциальный закон надежности, и если он соблюдался, то определить, с какой интенсивностью шли отказы. Для такой же техники, работающей в тех же условиях, на будущее также можно ожидать соблюдения экспоненциального закона надежности с этой же интенсивностью отказов. Поэтому можно прогнозировать вероятный ход отказов на будущее и отсюда потребность в запасных изделиях для замены отказавших изделий – потребность в запчастях при экспоненциальном законе надежности [4].

При таком подходе учитываются особенности эксплуатации техники на данном конкретном производстве.

По окончании второй стадии эксплуатации вследствие износа техники (из-за старения техники) снижается ее сопротивляемость случайным

перегрузкам, и частота отказов (интенсивность отказов) техники начинает расти. Появляется третья стадия эксплуатации – стадия износовых (постепенных) отказов.

Предпосылки таких отказов развиваются постепенно, например, в зубчатых передачах из-за износа боковых поверхностей зубьев зубчатых колес, износа тел качения и беговых дорожек в подшипниках качения, износа ползунов в направляющих станков и др.

В постоянных условиях эксплуатации ход износа в парах трущихся деталей описывается зависимостью:

$$X_{\text{изн}} = i \cdot t_{\text{изн}},$$

где $X_{\text{изн}}$ – результат износа (уменьшение поперечного размера, массы детали);

$t_{\text{изн}}$ – время износа;

i – скорость износа.

В постоянных условиях работы скорость износа детали тоже примерно постоянна. Однако даже в группах одинаковых пар трущихся деталей всегда есть некоторый разброс скорости износа относительно ее средней величины, например, из-за колебаний свойств материала деталей, режима смазки, параметров окружающей среды (влажности, температуры) и т. д.

Чаще всего разброс значений скорости износа подчиняется нормальному закону, т. е. в группе одинаковых сопряжений есть какое-то среднее значение скорости износа – $i_{\text{ср}}$ и вокруг него примерно симметричное в обе стороны рассеяние скорости износа. При нанесении по данным эксплуатации (испытаний) этого разброса на числовую ось получаем (рис. 3):

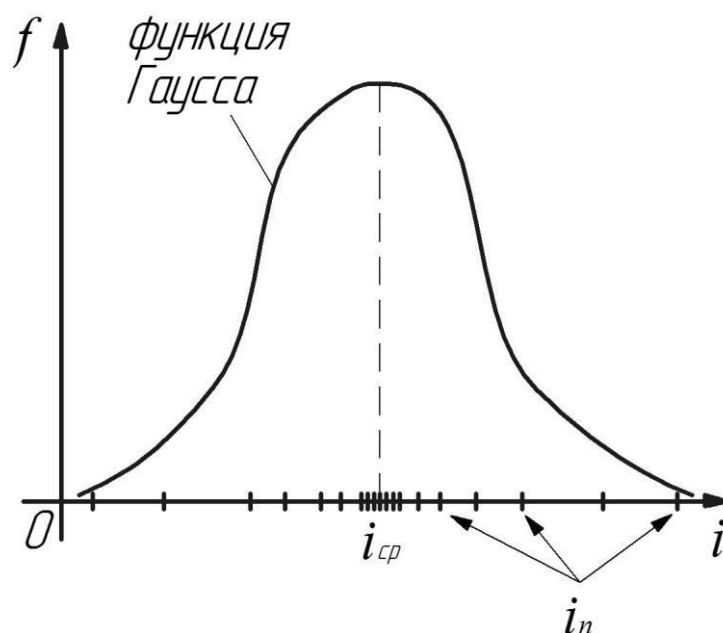


Рисунок 3 – Функция Гаусса для случайной величины i (скорость износа)

Тогда для случайной величины i (скорость износа) – ее функция распределения f (плотность вероятности) имеет вид функции Гаусса, показанный на рис. 3. В теории надежности f чаще называют функцией плотности расположения реализаций случайной величины на ее числовой оси.

Чтобы не допустить аварии (поломки зуба), когда износ зуба достигнет предельно допустимой величины, рабочее колесо в передаче заменяют на запасное.

Если установлено, что на третьей стадии эксплуатации техники случайная величина (срок службы до отказа) подчиняется нормальному распределению, то говорят, что на этой стадии эксплуатации имеет место нормальный закон надежности.

Это возможно тогда, когда для случайной величины (срок службы до отказа) выполняются следующие условия, известные из теории вероятности:

1) на случайную величину действует большое количество факторов, отклоняющих ее от среднего значения в обе стороны;

2) все эти факторы примерно одинаково мало влияют на случайную величину (при таких условиях любая случайная величина подчиняется нормальному закону – см. центральную предельную теорему в теории вероятности).

Если среди факторов, отклоняющих случайную величину от ее среднего значения, есть один или группа, влияющих на нее сильнее остальных факторов, то вид нормального распределения функции искажается (смещается положение максимума, теряется симметричность графика).

Например, если в случае группы одинаковых зубчатых передач был плохо проведен их монтаж (например, были неправильно выставлены боковые зазоры в зацеплениях), нарушается режим смазки и др., то средний срок службы таких передач (например, до поломки зубьев) уменьшается, соответственно максимум функции на третьей стадии эксплуатации смещается влево и вид графика на этой стадии теряет симметричность.

Также и на второй стадии эксплуатации, если здесь наряду со случайными перегрузками на ход отказов уже сильно влияет износ, то на этой стадии нарушается экспоненциальный закон надежности.

Во всех таких случаях для описания хода отказов используют более универсальный закон надежности Вейбулла (Вейбулл – шведский ученый, профессор Стокгольмского университета).

Согласно этому закону, выражение для вероятности безотказной работы имеет вид:

$$P(t) = e^{-t^m/t_0},$$

где m и t_0 – параметры закона Вейбулла;

m – параметр формы;

t_0 – параметр масштаба.

Можно показать, что закон Вейбулла в качестве частных случаев дает экспоненциальный закон надежности (при $m = 1$) и нормальный закон надежности (при $m = 3,3$).

Все вышесказанное о закономерностях надежности относится к ходу отказов в группах одинаковых невосстанавливаемых изделий. Но большинство технических объектов после отказов ремонтируется. Материал по надежности, изложенный выше для невосстанавливаемых изделий, относится также и к первым отказам восстанавливаемых (ремонтируемых) изделий (так как на ход этих отказов наличие или отсутствие ремонта после них не влияет).

Представленные три закона надежности (экспоненциальный – для второй стадии эксплуатации, нормальный – для третьей стадии эксплуатации и закон Вейбулла (для обеих этих стадий) наиболее часто встречаются на практике. Для каждого из них есть методы прогнозирования вероятного хода отказов на будущее и отсюда возможность прогнозирования потребности в запчастях, например, при отказах оборудования [5].

Кроме указанных, на практике иногда встречаются и другие закономерности, например, усеченный нормальный закон надежности, логарифмически нормальный закон надежности и другие.

6. НАДЕЖНОСТЬ ЦЕЛЛЮЛОЗНО-БУМАЖНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Наука о надежности использует данные многих других смежных областей технических знаний (например, наук об износе, коррозии, усталостных явлениях и др.). Однако наука о надежности имеет и собственный предмет изучения. Он заключается в изучении изменения исходного качества оборудования при его использовании, возможностей управления этим изменением качества и др. С этой целью изучаются, например, распределения хода отказов во времени в группах одинаковых технических объектов (изделий), причины этих отказов, методы устранения и предупреждения отказов и их последствий, влияние на надежность сложных технических систем надежности элементов этих систем и т. д. В науке о надежности техники разработан также широкий круг собственных понятий и показателей надежности.

В начале изучения надежности оборудования целлюлозно-бумажных предприятий необходимо, прежде всего, ознакомиться с правильной трактовкой современной терминологии надежности применительно к этому оборудованию, а также дать общее представление об особенностях надежности основного оборудования.

На этой основе более подробная конкретная характеристика надежности всего разнообразия машин и аппаратов может быть дана в соответствующих спецкурсах по оборудованию предприятий.

В технологических линиях предприятий используется разнообразное (в основном технологическое) оборудование. Так, в составе одной технологической линии на предприятии может использоваться до 600 и более различных видов и типоразмеров машин и аппаратов. Ввиду того, что указанное оборудование практически все работает в непрерывном режиме в составе единых технологических линий, в требованиях к обеспечению его надежности имеется много общего. Так, на первый план здесь выдвигается обеспечение высокой безотказности и ремонтпригодности используемых машин и аппаратов. Действительно, улучшение безотказности уменьшает количество аварийных остановов каждой единицы оборудования, а повышение ремонтпригодности снижает продолжительность таких остановов. Все это повышает степень технического использования оборудования (повышает время эффективной работы технологических линий и сокращает экономические потери предприятия из-за невыпуска товарной продукции при этих остановах). Улучшение безотказности и ремонтпригодности также дает значительный экономический эффект и при проведении плановых ремонтов. Из-за большого разнообразия установленного оборудования конкретные методы обеспечения его надежной, безотказной работы также весьма разнообразны.

В целлюлозно-бумажной промышленности при обеспечении надежной работы всего производства наибольшую сложность представляет обеспечение надежности головных агрегатов технологических линий предприятий – бумагоделательных и родственных им картоноделательных и сушильных машин. Поэтому изучению и обеспечению надежности таких машин и их отраслевом машиностроении уделяется наибольшее внимание. Ознакомление со спецификой основных понятий надежности на примере этого оборудования наиболее показательны. К основному оборудованию наряду с бумагоделательными, картоноделательными и сушильными машинами относится и целлюлозное оборудование, имеющее свою специфику надежности, поэтому при первоначальном ознакомлении с надежностью машин и аппаратов следует дать общие сведения по данному оборудованию.

Отличительными особенностями бумагоделательных машин, которые ставят их в разряд высокоорганизованных средств производства, являются непрерывность технологического процесса и длительность цикла эксплуатации. Подаваемый на эти машины полуфабрикат (бумажная масса) в процессе технологической обработки на машине претерпевает значительные превращения. Так, начальные качества этой водно-волокнистой суспензии, как известно, подчиняются в определенной степени законам жидкого тела; готовая же продукция обладает необходимой неизменной структурой, значительным сопротивлением разрыву другими свойствами упругого твердого тела.

В отличие от многих машин и аппаратов, претерпевших значительные, а иногда и принципиальные изменения в процессе их развития, бумагоделательные машины в своей основе сохранили до наших дней свою начальную принципиальную схему. Это говорит о высоком совершенстве первоначальной идеи, воплощенной в принцип производства конечного продукта на бумагоделательной машине. Вся их история развития

характеризуется непрерывным ростом производительности. Так, на первой машине Робера можно было выработать 0,5 т/сутки бумаги, на современных же наиболее высокопроизводительных машинах производят до 1000 т/сутки (и более) газетной бумаги. Этот огромный скачок был достигнут в основном следующими двумя путями:

- 1) за счет увеличения скорости этих машин от 5 м/мин в 1799 г. (год изобретения Робером такой машины) до 1900 м/мин и более в наши дни;
- 2) за счет роста ширины данных машин от 600 до примерно 10000 мм.

Постоянный рост указанных параметров этих машин требует как заботы о сохранении необходимого количества и качества вырабатываемой продукции, так и осуществления многих специальных мер по постоянному обеспечению соответствующего уровня эксплуатационной надежности данных машин. Увеличение скоростей является также фактором, приводящим к формированию технологических процессов, происходящих на машине.

В результате специально проведенных исследований были обработаны данные по изменению скорости и ширины бумагоделательных машин для производства газетной бумаги наиболее высокоскоростных машин. Со временем характер изменения скорости и ширины указанных машин имеет ряд общих черт, а именно:

- 1) постоянный их рост на протяжении всей истории развития бумагоделательных машин;
- 2) медленный рост до 1890-1900 годов и интенсивный рост после 1900 года вплоть до настоящего времени.

Можно выделить четыре стадии в изменении скорости, совпадающие с соответствующими этапами развития конструкций машин. Эти этапы могут быть названы следующим образом:

- 1) становление плоскосеточных БДМ как технологических линий непрерывного действия (рост скорости от примерно 5 м/мин до 100-150 м/мин);
- 2) постепенное совершенствование таких БДМ как линий автоматического действия (рост скорости от 100-150 до примерно 600 м/мин);
- 3) превращение плоскосеточных БДМ в системы с автоматическим управлением технологическим процессом (рост скорости от примерно 600 м/мин до 1000-1100 м/мин);
- 4) появление и широкое применение БДМС с использованием двухсеточного формования бумажного полотна (рост скорости свыше 1000-1100 м/мин).

Рассмотрим сущность основных изменений в технологических параметрах и конструкциях этих машин, которые способствовали обеспечению их необходимой надежности, позволяющей производить данное повышение скорости.

Первые указанные бумагоделательные машины, как и машины для производства других видов продукции, характеризовались малой интенсивностью технологических процессов, низкими динамическими и другими нагрузками на элементы конструкции машин, благоприятными условиями работы трущихся сопряжений вследствие малых удельных нагрузок,

низких относительных скоростей скольжения и т. п. Поэтому применявшиеся тогда для изготовления машин материалы (древесина, малоуглеродистые стали, чугун, медь) и методы их обработки, хотя они по современным представлениям и не обладали высокими эксплуатационными свойствами, тем не менее обеспечивали достаточную долговечность и удовлетворительную безотказность конструкций машин. При малых скоростях машин их сетки изнашивались медленно, большая продолжительность обезвоживания на сеточном столе не требовала использования высокого вакуума, и поэтому не возникало больших сил трения сетки о неподвижные элементы сеточной части. По этим же причинам прессовая часть машины была также надежной в эксплуатации, в ней применялись валы несложной конструкции. Сушильная часть была открытой, с естественной вентиляцией, сушильные цилиндры обогревались паром.

При малых скоростях машин на открытых участках движения бумажного полотна его обрывность при движении и заправках была невелика. При заправках передача полотна через открытые участки движения производилась вручную.

Все процессы на машине поддавались также ручному управлению и регулированию. Открытые конструкции несущих элементов и станин позволяли обслуживающему персоналу зрительно получать необходимую информацию.

Но, с другой стороны, постоянный рост скорости машин мог приводить к постепенному понижению надежности работы отдельных их элементов, а иногда и к потере их работоспособности. Так, переход к скорости 80 м/мин потребовал создания новой конструкции – открытого напорного ящика (вместо напуска в линейках) с гидростатическим напором, обеспечившим соответствующее повышение скорости истечения суспензии из напускной щели.

Повышенный износ сеток при трении о неподвижные элементы сеточного стола привел к замене деревянных планок регистровыми валами. Дальнейшее повышение скорости, уменьшавшее время пребывания полотна на сеточном столе, потребовало удлинения последнего, что несколько снизило износ сетки, так как ее длина увеличилась.

Однако для поддержания сухости полотна бумаги при передаче с сеточного стола в прессовую часть на неизменном уровне (во избежание обрывов полотна) на следующей стадии развития потребовалось уже применить отсасывающий гауч-вал и повысить вакуум в отсасывающих ящиках. Для обеспечения необходимой степени обезвоживания полотна в прессовой части, затем также нашли применение отсасывающие валы.

На первой стадии развития машин все валы устанавливались на подшипниках скольжения. Ремонт машин тогда осуществлялся, как правило, без снятия крупных узлов с машины и с остановом машин на весь период проведения ремонтных работ независимо от их объема и вида.

Повышение скорости до 100 и более метров в минуту повлекло интенсификацию технологических и износных процессов, что вызвало

дальнейшее усложнение конструкции и необходимость решения задач безотказности и ремонтпригодности машин.

В целом технологический уровень машин на первой стадии их развития соответствовал возможностям машиностроения того периода.

Первая стадия развития характерна следующими особенностями:

- широким ассортиментом бумаги, вырабатываемой на данной машине;
- малой интенсивностью процессов на машине (как технологических, так и износных);
- простотой конструкций и высокой надежностью их в работе;
- низкими удельными параметрами (съемы воды, количества вырабатываемой бумаги, потребления энергии);
- медленным повышением скорости и производительности, которые обеспечивались в большей мере за счет пропорционального увеличения количества элементов для обезвоживания и сушки полотна;
- ручным управлением машины;
- осуществлением ремонтных работ по потребности и непосредственно на машине.

Рассмотренный этап развития охватывал период времени от 1799 г. вплоть до 1890-1900 гг., когда машины сформировались как линии, состоящие из агрегатов, связанных в единый непрерывный технологический поток.

На данном этапе создания и развития машин в их конструкции были внедрены следующие устройства и конструкции:

- 1799 г. – плоскосеточная машина Робера;
- 1801 г. – каландр;
- 1803 г. – БДМ Фурдримье-Домкина;
- 1805 г. – круглосеточная машина Брагмая;
- 1807 г. – отсасывающие ящики;
- 1807 г. – плоскоременный привод;
- 1809 г. – круглосеточная машина Динкинсона;
- 1811 г. – бумагоделательная машина Дидцта (Дидо);
- 1811 г. – гауч-пресс;
- 1817 г. – обратный пресс Динкинсона;
- 1820 г. – сушильные цилиндры, обогреваемые углем;
- 1820 г. – паровые сушильные цилиндры;
- 1826 г. – ровнитель Маршалла;
- 1827 г. – самосъемочная машина (с Янки-цилиндром);
- 1829 г. – плоский узлоловитель;
- 1829 г. – узлоловитель Ранка;
- 1830 г. – регистровые валики;
- 1856 г. – узлоловитель Ванделя;
- 1858 г. – суперкаландры;
- 1859 г. – осевой накат;
- 1870 г. – шестеренчатый привод;
- 1883 г. – многоцилиндровая круглосеточная машина;
- 1886 г. – центробежная сортировка;

1886 г. – регулятор концентрации бумажной массы;

1890 г. – пресс с беспрогибным валом;

1900 г. – лоцильный цилиндр.

Практически все указанные выше усовершенствования конструкции и режимов работы машин обеспечивали повышение как конструкционной надежности (улучшение безотказности и долговечности машин в целом и элементов их конструкций), так технологической надежности этих машин (снижение обрывности полотна, выработка брака и т. д.).

Для дальнейшего повышения скорости машин (150 м/мин и выше), ширины, обеспечения их надежности работы и управления ими оказалось необходимым создать многодвигательный электропривод (1908 г.) и применить начальные элементы автоматического управления машиной.

Были разработаны и внедрены автоматические устройства для управления движением и натяжением сеток и сукон, приспособления для заправки бумаги (воздушная – из сеточной части в прессовую и канатиковая в сушильной части машины). Эти нововведения позволили значительно поднять скорости машины и увеличить их ширину, тем более что применение новых материалов (бронзы вместо меди, легированных сталей вместо чугуна и углеродистой стали, резины вместо древесины и т. д.) позволило осуществить дальнейшее усовершенствование конструкций. Ниже приведены основные меры, которые обеспечивали безотказность и ремонтпригодность машин, и резкое повышение скорости на этой стадии развития по сравнению с первой стадией.

Перемешивание и напуск суспензии

Рост скорости до 250 м/мин и выше привел к ухудшению качества перемешивания и напуска суспензии, так как при повышении гидростатического напора в открытых напорных ящиках стало невозможным осуществлять необходимое перемешивание суспензии несмотря на использование перфорированных валов. Поэтому необходимо было создать устройство для распределения, перемешивания и равномерного напуска волокнистой суспензии в едином высокоорганизованном гидродинамическом потоке.

Эти задачи были решены при создании закрытых напорных ящиков с воздушной подушкой и автоматическим управлением скоростью истечения суспензии.

Конструкция его первоначально была схожа с открытым напорным ящиком, но в ходе дальнейшего усовершенствования она значительно усложнилась и потребовала высокой точности изготовления (закрытые ящики с взрывными камерами и с 5-6 перфорированными валами). В то же время увеличение числа вращающихся в водно-волокнистой суспензии частей в закрытых напорных ящиках приводило к уменьшению их надежности. В конечном счете борьба за повышение надежности привела к уменьшению числа перфорированных валов до 2-3, совершенствованию их привода, применению гидродинамических перфорированных плит, а также к созданию надежно работающих механизмов тонкой регулировки верхней губы,

усовершенствованной системы регулирования скорости суспензии, выходящей из напорного ящика и т. п.

Напорный ящик на этой стадии развития превратился в сложный автоматический агрегат, требующий высокой точности изготовления и высокой чистоты обработки его деталей.

Данный напорный ящик обеспечивает требуемое качество напуска суспензии при ширине выпускной щели свыше 8-9 м и скорости истечения до 800 м/мин и выше. Дополнительно к автоматическому (в качестве дублирующего) тогда применялось и ручное дистанционное управление.

Для поддержания должного уровня надежности оказались необходимыми высококвалифицированное техническое обслуживание и профилактический ремонт.

Обезвоживание на сеточном столе

Регистровые валы, повысившие как эффективность обезвоживания полотна на сеточном столе, так и срок службы сеток, исключали возможность активно управлять процессом формования и обезвоживания, при увеличении скорости машины это приводило к ухудшению качества бумаги и картона и к большим потерям наполнителей. Поэтому наряду с высоковакуумными отсасывающими ящиками и двух- и трех камерными гауч-валами появились неподвижные обезвоживающие элементы, позволяющие регулировать процесс формования и обезвоживания на сеточном столе (гидропланки, мокрые отсасывающие ящики, вакуумфойлы).

Высокая интенсивность износа сеток и самих неподвижных обезвоживающих элементов заставили конструкторов машин применить новые материалы (керамические и полимерные) с низкими коэффициентами трения при скольжении и высокой износостойкостью как для покрытий обезвоживающих элементов (грудных досок, гидропланок, мокрых и обычных отсасывающих ящиков), так и для самих сеток (синтетических). Эти конструктивные решения обеспечили интенсификацию процессов формования и обезвоживания полотна на сеточном столе.

Высокие скорости и связанные с ними динамические процессы привели к усложнению конструкций, увеличению их габаритов для высокой жесткости несущих и рабочих элементов сеточного стола. На смену его разборной конструкции и подшипникам скольжения пришли сеточные столы консольного и выдвижного типов с валами, установленными в подшипниках качения, что при больших габаритах значительно упростило обслуживание.

В течение всей второй стадии развития в сеточном столе совершенствовались дистанционные и автоматические системы управления технологическим процессом формования и обезвоживания полотна, поддержания нормального хода и натяжения сетки и др. Повышение скорости и удельных показателей работы сеточного стола достигалось уже не за счет увеличения длины сеточного стола, а за счет интенсификации процессов и повышения энергоемкости.

Получила дальнейшее развитие технология формирования и обезвоживания полотна также и за счет применения различных химикатов, и подогрева суспензии, повышающих эффективность этих процессов.

Надежность в известной мере повышалась также еще за счет последовательной отработки конструкций и дублирования рабочих органов (обезвоживающие элементы, сеткоправки, сетконатяжки и т. п.).

Таким образом, сеточный стол на второй стадии развития, сохранив свои принципиальные функции, стал иметь усовершенствованную конструкцию всех элементов с механизированными процессами и автоматическим управлением и регулированием технологических операций. При этом имелось также дистанционное (дублирующее) управление.

Большое количество обрывов, приводящих к отказам всей БДМ при передаче полотна с сеточной в прессовую часть машины, особенно при изготовлении тонких видов бумаги, привело к окончательному созданию нового агрегата значительно улучшающего безотказность машины – вакуум-пересасывающего устройства. Данный агрегат, резко снижающий количество обрывов полотна в этом месте, существенно повысил технологическую надежность машин в целом. По существу эта автоматизированная система для безобрывной передачи полотна с сетки на сукно первого пресса явилась предвестником создания в дальнейшем новых схем мокрой части БДМ, обеспечивающих в итоге закрытую проводку полотна без свободных участков по всей машине.

Следует также отметить, что усложнение конструкции сеточного стола в какой-то мере снижало надежность БДМ, что потребовало также принятия соответствующих мер по поддержанию сеточного стола в необходимом техническом состоянии.

Прессовая часть

Количество прессов на БДМ на второй стадии практически не изменялось и составляло не более 3-5, но конструкция их претерпела большие изменения.

Обычные прессы с гладкими валами на подшипниках скольжения уже не обеспечивали на скоростях порядка 200 м/мин и выше надежного получения необходимой сухости и прочности полотна. Это ухудшало безотказность машины при повышении ее скорости из-за роста обрывности бумажного полотна в прессовой части.

Данная проблема решилась вначале с помощью прессов с нижними отсасывающими валами (на подшипниках качения) более сложной конструкции и с вакуумными системами. Усовершенствование конструкции отсасывающих валов, применение sprays высокого давления для промывки сукон и отверстий в рубашках отсасывающих валов, нержавеющей стали вместо бронзы, гранитных и стонитовых валов вместо чугуновых – все это позволило поднять скорость БДМ до 500 м/мин при одновременном повышении линейного давления между валами до 40-60 кг/см.

Однако дальнейшее повышение скорости машин опять снижало безотказность работы прессовых частей из-за большой обрывности полотна в

этих частях. Поэтому дальнейшее усовершенствование прессовых частей продолжалось по пути интенсификации обезвоживания (для повышения прочности мокрой бумаги благодаря дальнейшему росту ее сухости) и разработки новых схем прессовой части, обеспечивающих «закрытую» проводку полотна (т. е. с минимальной длиной «свободных» участков полотна в прессовой части или совсем без них). Линейные давления прессования между валами уже достигали 100 кг/см и более.

К новым конструкциям также относились на этой стадии развития прессы с желобчатым валом Венто-Нип, прессы с подкладной сеткой, с валом, обтянутым сеткой-чулком, с промежуточным валиком, трехвальные прессы типа «Твинвер-пресс», «Юни-пресс» с валами с регулируемым прогибом и т. д.

Значительное усовершенствование получили и механизмы кондиционирования сукон и управления их ходом, а также системы заправки бумажного полотна.

В итоге по существу прессовая часть и сеточный стол превратились на второй стадии развития машин в единую сложную автоматически управляемую происходящими процессами «мокрую» часть машины с высокой механизацией также и вспомогательных процессов (обслуживание, ремонт и т. д.). Системы дистанционного управления также применялись здесь как дублирующие.

Сушильная часть

Эту часть машин на второй стадии развития меньше всего затронули принципиальные изменения, несмотря на то, что контактно-конвективный способ сушки бумаги нельзя и сейчас назвать самым производительным. Такая относительная консервативность определяется во многом большими технологическими трудностями и экономическими соображениями при осуществлении качественной сушки бумаги каким-либо другим методом.

7. НАДЕЖНОСТЬ БУМАГОДЕЛАТЕЛЬНЫХ МАШИН

С точки зрения надежности бумагоделательных машин (БДМ) можно отметить следующее:

1) по возможностям предотвращения и устранения отказов – эти машины являются восстанавливаемыми и ремонтируемыми изделиями;

2) по последствиям отказов – отказы БДМ (на БДМ) приводят, в основном, к невыполнению машиной своих функций или к ухудшению выполнения этих функций;

3) по режиму работы и степени использования БДМ – это машины, работающие в непрерывном режиме и с остановками на ремонты различных видов – планово-предупредительные и неплановые послеаварийные ремонты. БДМ используются до наступления их предельного состояния. Рациональная постановка ремонта и в целом эксплуатации, а также эффективные модернизации этих машин могут значительно отодвинуть наступление их предельного состояния;

4) по характеру изготовления БДМ – это машины, которые проектируются и изготавливаются индивидуально, в единичных экземплярах. Учитывая также индивидуальность модернизаций и большое разнообразие вырабатываемой на них продукции, можно сказать, что из примерно десяти тысяч эксплуатируемых на сегодня в мире машин вряд ли найдутся какие-либо две машины, полностью одинаковые как по конструкции, так и по режиму работы;

5) по функциональной структуре БДМ – это машины с элементами резервирования и с некоторой функциональной избыточностью;

б) по характеру эксплуатации и ремонта – эти машины эксплуатируются с применением системы технического обслуживания и ремонта.

Принимая во внимание общепринятое определение работоспособного состояния техники и практический опыт поддержания функционирования БДМ, можно выделить следующие ключевые моменты.

Работоспособное состояние БДМ – это такое состояние, при котором машина может выполнять все свои функции с сохранением всех требуемых характеристик как своих, так и выпускаемой продукции, в необходимых пределах.

Все указанные характеристики (их перечень, требуемые численные значения, допустимые пределы изменений) содержатся в следующей технической документации на БДМ и выпускаемую продукцию:

а) проектная документация на машину (технический и рабочий проекты БДМ, включая чертежи и другую документацию, техническое задание на проектирование машины (от заказчика), эскизный проект и др.);

б) отраслевые стандарты на унифицированные в России узлы БДМ;

в) инструкции на монтаж, пуск, наладку, эксплуатацию БДМ;

г) положение о системе технического обслуживания и ремонта оборудования в части машин;

д) требования к качеству выпускаемой на данной БДМ продукции (содержатся в соответствующих ГОСТах и технических условиях на эту продукцию).

В указанной документации содержатся требования к следующим параметрам БДМ и выпускаемой продукции:

1) параметры технологического режима машины (например, ее рабочая скорость, параметры подаваемой на машину бумажной массы, параметры технологического режима основных частей БДМ и т. д.);

2) параметры конструкции БДМ;

3) требования к точности выверки элементов конструкции БДМ при монтаже;

4) параметры, характеризующие требуемое качество технологического обслуживания и ремонта и т. д. Аналогично регламентируется требуемая экономическая эффективность работы БДМ.

Постоянное обеспечение работоспособного состояния БДМ при эксплуатации – это первая по важности и сложности задача при обеспечении надежной работы этих машин. Работоспособное состояние БДМ

обеспечивается всеми эксплуатационными службами предприятия.

От работоспособного состояния машины отличается ее исправное состояние, при котором машина соответствует всем требованиям технической документации на нее (прежде всего чертежам), но может требовать дополнительной доводки, наладки, смазки и др.

В общем определении надежности техники применительно к БДМ можно отметить следующее. Полная характеристика надежности БДМ дается в виде ряда комплексов показателей надежности, относящихся как к БДМ в целом, так и к элементам конструкции машины. Свои сроки службы имеют и машина, и все ее узлы и детали. Это же относится к наработкам на отказ машины в целом и ее элементов, к затратам времени и средств на ремонт машины и отдельных ее элементов и т. д.

Простые свойства надежности БДМ:

Безотказность БДМ

Для оборудования в целом, для БДМ можно отметить следующее. С учетом непрерывного режима работы и больших экономических потерь при простоях этих машин из-за невыпуска продукции при отказах безотказность БДМ – это первое по важности из всех ее простых свойств надежности. Безотказность БДМ, как и ее надежность, обеспечивается при создании машины (т. е. при проектировании и изготовлении) и при эксплуатации. Это простое свойство надежности машины при ее создании обеспечивается, например, использованием апробированных высоконадежных конструктивных решений и такой же современной технологией изготовления БДМ.

При эксплуатации БДМ необходимо периодически (при ревизиях) и непрерывно (средствами технической диагностики и органолептически) контролировать техническое состояние машины. По данным такого контроля проводятся ремонты (как простой заменой изношенных и отказавших элементов конструкции на запасные, новые или восстановленные, так и восстановительной обработкой этих элементов и, кроме того, сочетанием восстановительной обработки с заменой). Все это направлено на предупреждение возможных отказов изношенных элементов конструкции и устранение произошедших отказов.

Кроме того, на безотказность БДМ сильно влияют как качество ее технического обслуживания (смазка, подтяжка крепежа, прочистка отверстий перфорации, промывка сеток и сукон и др.), так и поддержание заданного технологического режима работы машины. Например, отказами машины являются ее остановки из-за обрывов бумажного полотна, и эта обрывность зависит от соблюдения технологического режима работы БДМ.

Количественно безотказность БДМ в основном характеризуется, например, числом аварийных остановов машины в год (и другими показателями).

Ремонтопригодность БДМ

С точки зрения обеспечения максимально непрерывной работы машины и уменьшения экономических потерь от невыпуска продукции из-за аварийных простоев ремонтпригодность – это второе по важности из всех простых

свойств надежности БДМ. Если улучшение безотказности направлено на уменьшение количества аварийных остановов машины, например, за год, то улучшение ремонтпригодности позволяет уменьшать продолжительность таких остановов. То и другое вместе повышает степень технического использования БДМ (например, повышает время эффективной работы машины в сутки, в год) и уменьшает экономические потери предприятия от аварийных простоев БДМ. Ремонтпригодность конструкции БДМ улучшается, например, блочным построением ее конструкции. Это означает, что конструкция машины построена из отдельных блоков, которые можно независимо друг от друга снимать с БДМ, либо ставить на нее. Блочное построение конструкции улучшает, например, возможность применения блочного (узлового) ремонта БДМ. При таком методе ремонт узла (например, вала бумагоделательной машины при отказе подшипника) производится не на остановленной машине, для ремонта вал целиком (с подшипниками) снимается с остановленной БДМ и отвозится в ремонтно-механический цех. На место снятого узла ставится запасной вал, и машина снова запускается в работу. Тем самым значительно сокращаются простои БДМ на аварийный ремонт, так же как и экономические потери предприятия от невыпуска продукции из-за этих простоев.

Количественно ремонтпригодность БДМ характеризуется, например, средней продолжительностью аварийных остановов машины за год.

Долговечность БДМ

Долговечность БДМ важна, прежде всего, с экономических позиций. Действительно, БДМ, как и любое другое оборудование, должна проработать достаточно долго, чтобы окупились затраты на ее приобретение, и затем была получена необходимая прибыль. Долговечность БДМ на стадии создания машины может быть обеспечена примерно теми же методами, что и при обеспечении ее безотказности. При эксплуатации срок службы машины может быть продлен за счет обоснованных модернизаций и рациональной постановки эксплуатации и ремонта.

Долговечность БДМ количественно характеризуется в основном сроком ее службы. В свое время проектировали эти машины на срок службы 25 лет. Фактически машины служат по 50 лет и более (за счет указанных выше мер по модернизации машин и рациональной постановки их ремонта и в целом эксплуатации).

Сохраняемость надежности БДМ

Это простое свойство надежности относится в основном к отдельным элементам конструкции БДМ (их узлам, деталям) при хранении на складе, транспортировке с заводов-изготовителей на предприятия и др., поэтому о нем речь пойдет далее.

Основные элементы конструкции БДМ, начиная от узлов и деталей и вплоть до основных частей машины и ее вспомогательных систем, имеют свои собственные характеристики надежности (сроки службы, наработки на отказ, время и трудоемкость ремонтов и т. д.). Поэтому говорят о простых свойствах надежности элементов конструкции БДМ (их безотказности, долговечности, ремонтпригодности, сохраняемости надежности). По важности с точки зрения

экономики и обеспечения непрерывного режима работы простые свойства надежности элементов БДМ можно расположить в том же порядке, что и для БДМ в целом. Простые свойства надежности элементов БДМ:

Безотказность элементов БДМ

Эта безотказность обеспечивается:

а) при создании конструкции (при проектировании и изготовлении), например, с использованием высоконадежных материалов (износо- и коррозионностойких, долговечных), с уменьшением нагрузок на элементы конструкции, в том числе динамических нагрузок от сил инерции, с упрощением конструкции элементов машины;

б) выбором передовой технологии изготовления;

в) при эксплуатации безотказность элементов БДМ обеспечивается строгим соблюдением требований системы технического обслуживания и ремонта (в отношении, например, своевременной замены изношенных, а также отказавших элементов конструкции на запасные).

Показатели безотказности элементов конструкции БДМ зависят от того, восстанавливаемые это элементы или нет. Большинство элементов конструкции БДМ (их узлы и детали) – это невосстанавливаемые изделия, они при износе и отказах не ремонтируются, а заменяются на запасные. Лишь сравнительно небольшая часть узлов и деталей БДМ при износе и отказах подвергаются восстановительной обработке [4]. Наконец, применяется сочетание такой восстановительной обработки с заменой (например, обрезиненные прессы валы по мере износа обрезаются несколько раз подвергаются перешлифовке и затем заменяются на запасные). У невосстанавливаемых элементов конструкции БДМ (подшипники, лезвия шаберов и др.) безотказность характеризуется их сроками службы. У восстанавливаемых элементов (например, валы прессы, каландры) безотказность характеризуется сроками службы (наработками) между восстановительными обработками (например, перешлифовками валов) и сроками службы (наработками) между заменами валов на запасные.

Ремонтопригодность элементов БДМ

Ремонтопригодность узлов машины, ремонтируемых простой заменой, улучшается, например, внедрением конструкций, допускающих замену элементов без остановки машины (например, гидропланок), улучшением легкоосъемности узлов, требующих при их замене остановки БДМ, внедрением устройств для механизации трудоемких операций при заменах элементов машин. При ремонте таких узлов их ремонтопригодность количественно характеризуется временем и трудоемкостью демонтажа узла с машины (например, для блочного ремонта) и обратного монтажа на машину. При ремонте элементов конструкции БДМ их восстановительной обработкой ремонтопригодность таких элементов характеризуется также затратами времени, стоимостью и трудоемкостью такой восстановительной обработки.

Долговечность элементов БДМ

Она в основном характеризуется сроками службы (ресурсами) элементов конструкции. Выше было указано, что у невосстанавливаемых элементов

конструкции БДМ их сроки службы помимо долговечности характеризуют и безотказность таких элементов. Поэтому здесь совпадают и методы обеспечения безотказности и долговечности. У восстанавливаемых элементов конструкции методы обеспечения долговечности примерно такие же.

Сохраняемость надежности элементов БДМ

Это простое свойство надежности элементов конструкции важно при их хранении (в качестве запчастей, перед монтажом и др.), при транспортировке (с заводов-изготовителей на предприятия), при дежурстве в качестве резервного оборудования (например, в случае резервных насосов). Для улучшения в целом сохраняемости оборудования при хранении, прежде всего, используют консервационную смазку. При хранении конкретных узлов и деталей могут применяться также специальные меры по улучшению сохраняемости. Так, при хранении валов БДМ в подшипниках качения необходимо периодическое проворачивание валов во избежание появления вмятин от тел качения на беговых дорожках колец. При хранении обрезиненных прессовых валов необходимо избегать попадания прямого солнечного света на обрешинку во избежание ее ороговения и др.

Количественной характеристикой свойства сохраняемости при хранении запчастей на складе является, например, допустимый срок хранения данного узла (детали) в данных условиях.

8. РЕЗЕРВИРОВАНИЕ НА БУМАГОДЕЛАТЕЛЬНЫХ МАШИНАХ

Как было отмечено выше, бумагоделательные машины – это машины с элементами резервирования различных видов. Примеры структурного резервирования на бумагоделательных машинах:

1) При проектировании после определения необходимых количеств обезвоживающих элементов в различных частях БДМ (гидропланок, отсасывающих ящиков, прессов, сушильных цилиндров и др.) часто в запас обезвоживания добавляется некоторое количество резервных обезвоживающих элементов (например, 1-2 отсасывающих ящика или сушильных цилиндров). Это является примером нагруженного структурного резервирования, так как указанные резервные узлы работают все время одновременно с основными узлами.

2) Примером ненагруженного структурного резервирования можно (несколько условно) считать наличие неснижаемого запаса запчастей на складе (так как запчасти используются лишь при отказе (износе) основных элементов конструкции БДМ и вместо них). Это одновременно является примером резервирования замещением.

3) Группы одинаковых узлов на машине (например, подшипников качения) имеют резерв (запчасти на складе) также в виде групп таких же узлов. При отказе любого из основных узлов он заменяется на любой из резерва. Таким образом, в данном случае имеем пример скользящего структурного

резервирования.

Примеры нагрузочного резервирования на бумагоделательных машинах:

1) Примером такого резервирования является обычное при проектировании машин превышение прочности основных элементов конструкции над минимально необходимой прочностью этих элементов для нормальной работы машины (коэффициенты запаса прочности).

2) Примером нагрузочного резервирования является обычно закладываемое в проекты БДМ превышение на 15-30 % максимальной скорости привода над максимальной рабочей скоростью машины. Также и проектная мощность привода БДМ обычно предусматривается несколько завышенной по сравнению с ожидаемой максимально потребляемой мощностью привода при работе машины.

Указанное превышение проектных характеристик привода БДМ над их ожидаемыми при работе закладывается в проекты для расширения возможностей модернизации машин при эксплуатации.

Примером функционального резервирования на БДМ является то, что если при эксплуатации машины выявляется недостаточная обезвоживающая способность сеточной части, то она может быть, хотя бы частично, компенсирована за счет завышенной (если это есть) обезвоживающей способности прессовой и даже сушильной части.

Не все отказы на БДМ ведут к отказам машины в целом (это говорит о некоторой функциональной избыточности конструкции машины). Например, при отказе вентилятора в системе отвода и использования (рекуперации) тепла от сушильной части БДМ обычно продолжается выпуск кондиционной продукции, хотя и с несколько пониженным термическим КПД.

Аналогично при отказе привода дырчатых валиков в напорном ящике машина продолжает работу до ближайшего останова на ремонт, хотя и с несколько пониженным качеством продукции и (или) производительностью.

При отказе одного из резервных сушильных цилиндров (отсасывающих ящиков и др.) отказа машины в целом также не происходит, но здесь имеет место отказ нагруженного резерва машины.

9. ОТКАЗЫ НА БУМАГОДЕЛАТЕЛЬНЫХ МАШИНАХ

Отказы – одно из главных понятий надежности при эксплуатации бумагоделательных машин. Уточняя данное выше общее определение отказа техники, можно также отметить, что отказ БДМ – это вынужденное прекращение выработки машиной кондиционной продукции (бумаги требуемого качества). Отказы машины могут произойти как из-за отказов ее конструкции (например, из-за поломок подшипников), так и из-за нарушений технологического процесса на исправной и работоспособной машине (например, из-за обрывов бумажного полотна при неправильной композиции подаваемой на машину бумажной массы). На машине за все время ее

эксплуатации происходят отказы самых различных видов и по разнообразным причинам.

Одной из главных причин отказов БДМ является то, что на них наряду с основными технологическими процессами выработки бумаги (процессы отлива, прессования, сушки и т. д.) происходит еще большое количество так называемых сопутствующих (или вторичных) процессов в элементах конструкции машины, в одежде (сетках, сукнах), в получаемом по ходу машины бумажном полотне. Такие процессы постоянно происходят в элементах БДМ при работе, они приводят к появлению различных изменений в этих элементах машины.

Некоторые из указанных изменений при устранении вызывающих их причин самоустраняются (например, упругие деформации в металлоконструкциях); они исчезают, например, при остановках машины (за исключением упругих деформаций, вызываемых силой веса). Это обратимые изменения в элементах БДМ. Большинство же таких изменений остаются при прекращении действия вызывающих их причин (например, следы износа на деталях конструкции, их коррозия, усталостные явления в них, коробление тонкостенных отливок и др.). Это необратимые изменения в элементах БДМ. Накапливаясь, такие необратимые изменения могут постепенно менять техническое состояние БДМ вплоть до ее отказов. Указанные причины (изменения в элементах БДМ) относятся к числу систематических причин отказов.

Кроме этого многие отказы происходят под действием случайных причин, к которым относятся, например, случайные дефекты в новой машине, случайные перегрузки при работе БДМ, ошибки рабочих, колебания качества используемого сырья, полуфабрикатов.

Возвращаясь к систематическим причинам отказов, следует сказать, что если вторичные процессы приводят к обратимым изменениям в элементах БДМ, то сами эти вторичные процессы также называются обратимыми. Если же вторичные причины приводят к необратимым изменениям, то они сами называются необратимыми вторичными процессами.

К обратимым вторичным процессам на бумагоделательных машинах можно отнести следующие процессы:

- 1) Упругие деформации деталей и узлов БДМ под действием нагрузок, не превосходящих пределов упругости материалов, из которых изготовлены эти элементы конструкции (например, упругие прогибы валов, цилиндров, станин). Эти прогибы, в принципе, самоустраняются при устранении вызывающих их нагрузок, иначе говоря упругие деформации элементов конструкции БДМ действительно являются обратимыми вторичными процессами. Однако в некоторых случаях упругие прогибы элементов конструкции приводят и к необратимым последствиям (например, циклические знакопеременные прогибы в цапфах валов и цилиндров со временем могут приводить к развитию усталостных явлений вплоть до поломок цапф).

- 2) Вибрации конструкций представляют собой циклические упругие деформации. Вибрации конструкций на БДМ происходят, например, из-за

неуравновешенности вращающихся валов и цилиндров, из-за износа подшипников и др.

3) Упругая вытяжка одежды машины (сеток, сукон). Например, на остановленном сеточном столе БДМ у натянутой сетки усилие натяжения постоянно по всей ее длине, соответственно, вытяжка сетки также постоянна. При снятии усилия натяжения длина сетки должна восстанавливаться, это должна быть упругая вытяжка сетки. На работающем сеточном столе натяжение сетки непостоянно по длине, так как в зонах трения сетки, прежде всего, на отсасывающих ящиках, а также на валах, происходят потери натяжения сетки. Максимальное натяжение – в набегающей ветви сетки (перед гауч-валом), минимальное – в сбегаящей ветви (после гауч-вала и сеткоповоротного вала). Поэтому на работающей машине натяжение сетки меняется по ее длине циклически. Наряду с этим при охвате сеткой валов, особенно приводных, наблюдаются деформации изгиба сетки, также меняющиеся циклически по ее длине. Соответственно, суммарные деформации и напряжения в сетке также меняются циклически. Ранее на БДМ использовались бронзовые сетки, и их циклические деформации приводили к развитию усталостных явлений вплоть до обрывов сетки. Современные синтетические сетки, устанавливаемые в сеточных частях, нечувствительны к знакопеременным нагрузкам. Их обрывы обычно являются следствием износа сеток, реже они происходят из-за схода сеток на сторону и по другим причинам.

4) Упругая (обратимая) составляющая вытяжки бумажного полотна на БДМ (как влажного, так и сухого). Она имеет место в чистом виде (без пластической, необратимой составляющей вытяжки) при небольших рассогласованиях скорости между соседними приводными секциями машины.

5) Умеренные тепловые деформации элементов конструкции БДМ. Например, при подаче пара в сушильные цилиндры они нагреваются и при этом удлиняются вдоль оси. При прекращении нагрева цилиндры охлаждаются, их длина восстанавливается. Это же справедливо, но в меньшей мере, для всех валов, балок, станин и других элементов конструкции БДМ (например, при колебаниях температуры окружающей среды). Поэтому с приводной стороны машины подшипники в опорах валов и цилиндров фиксированы, с лицевой же стороны в опорах валов обеспечивается движение подшипников вдоль оси вала за счет их проскальзывания в опорах (при тепловых деформациях валов). Это обеспечивается посадкой с зазором подшипника в корпусе (кроме сушильных цилиндров – там подвижность лицевых подшипников конструктивно обеспечивается по-другому).

6) Удлинение шерстяных прессовых сукон при намокании и обратное их такое же укорочение при высыхании. Эти деформации сукон обеспечиваются соответствующим ходом натяжных валов, заложенным в конструкцию сукнонатяжек.

7) Умеренные пульсации давления и скорости в потоках бумажной массы в массопроводах перед БДМ. Эти пульсации вызывают умеренные колебания скорости бумажной массы при напуске на сетку и отсюда небольшие

колебания массы 1 м^2 бумажного полотна в машинном направлении. Такие колебания в определенных пределах допустимы, но при усилении пульсаций в потоке массы перед машиной и возрастании соответствующих колебаний массы 1 м^2 нарастает обрывность бумажного полотна на БДМ.

8) Умеренные колебания уровня бумажной массы и давления в воздушной подушке напорного ящика (последствия здесь те же, что и по пункту 7).

9) Шум, генерируемый элементами конструкции БДМ при работе (например, валами или вакуум-насосами). Это процесс в принципе также обратимый, так как при прекращении работы машины указанный шум прекращается. Однако за время длительного действия шума он вызывает необратимое ухудшение слуха у обслуживающего персонала. Для борьбы с указанным вредным воздействием шума принимаются различные меры (например, применяются наушники, улучшается конструкция узлов машины и др.).

Обратимые вторичные (сопутствующие) процессы временно меняют техническое состояние БДМ. При устранении их причин (например, при остановках БДМ) эти процессы практически прекращаются и вызываемые ими изменения в основном самоустраниются (кроме, например, указанных выше упругих деформаций конструкции БДМ из-за ее веса и ухудшения слуха у обслуживающего персонала БДМ из-за генерируемого ею шума).

Необратимые вторичные процессы на БДМ – процессы износа в широком смысле слова (процессы старения машины). Такие процессы начинают заметно развиваться после нескольких лет эксплуатации БДМ. Учитывая, что эти машины часто работают по 50 лет и более, а также с учетом достаточно высокого среднего возраста БДМ в России, указанные вторичные процессы значительно влияют на надежность машин. К необратимым вторичным (сопутствующим) процессам на БДМ относятся следующие:

1) Износ элементов конструкции БДМ и их одежды (износ вследствие взаимного трения элементов БДМ). Например, в зубчатых передачах на боковых поверхностях зубьев со временем видны следы всех обычных видов износа металлов (окислительного, теплового, абразивного, усталостного). В подшипниках качения наиболее выражен усталостный износ вплоть до появления раковин на беговых дорожках колец подшипников и отказов подшипников. Обезвоживающие элементы сеточной части и сами сетки подвержены гидроабразивному износу. Сетки снимаются с машин, например, по достижении предельно допустимого уменьшения диаметра нитей утка из-за износа. Износ лезвий шаберов в различных частях БДМ абразивный или гидроабразивный и т. д.

2) Усталостные явления, например, в цапфах валов и цилиндров, вплоть до поломок цапф.

3) Коррозия или ее угроза (особенно в мокрой части машины). Для ее предотвращения отдельные узлы и детали БДМ изготавливаются из нержавеющей сталей, цветных металлов (бронзы, сплавов алюминия), керамики, высокомолекулярного полиэтилена и других коррозионностойких

материалов. Применяется также протекторная защита от коррозии балок и станин, изготовленных из черных металлов (углеродистой стали, чугуна) листами нержавеющей стали. Наконец, применяется защитная окраска конструкций БДМ (но защитное действие окраски от коррозии длится не более, чем 3-4 года).

4) Усталостная коррозия, которая развивается, например, в отверстиях перфорации отсасывающих валов в сеточной и прессовой частях посередине длины этих валов. Совместное действие коррозии и знакопеременных напряжений в рубашке вала от максимального изгибающего момента ускоряет появление усталостных трещин в отверстиях перфорации и дальнейшее развитие коррозии в этих трещинах. Эти примеры (вплоть до разрушения перфорированных рубашек таких валов) встречаются на широких быстроходных машинах при изготовлении рубашек отсасывающих валов из нержавеющей стали. При замене таких рубашек на рубашки из бронзы угроза отказов из-за усталостной коррозии устраняется.

5) Пластические деформации металла. Примером является «огранка» каландровых валов при обрывах бумажного полотна. В отсутствие устройства для быстрого разведения каландровых валов при обрывах комки бумаги попадают между каландровыми валами. При этом валы приподнимаются, затем при уходе комков бумаги падают и бьются друг о друга. На их поверхности остаются следы от ударов, т. е. следы пластических деформаций в виде плоских площадок вдоль образующих вала. При «огранке» каландровых валов усиливается обрывность бумаги на каландре.

6) Пластическая (необратимая) составляющая вытяжки бумажного полотна на БДМ. Эта составляющая вытяжки наблюдается, например, при достаточно больших рассогласованиях по скорости между соседними приводными секциями БДМ, а также при достаточно сильных вибрациях проходящего по машине полотна, особенно с ростом скорости машины (вплоть до обрывов бумажного полотна на БДМ).

7) Коробление тонкостенных литых чугунных конструкций. Например, такое коробление происходит в тонкостенных литых (из чугуна) корпусах привода сушильной части БДМ из-за наличия в них остаточных напряжений после литья. При таком короблении нарушаются стыки между частями корпуса привода, нарушается герметичность в целом корпусе привода, из-за чего начинаются протечки масла из корпуса наружу. Попадание масла на движущееся рядом бумажное полотно может приводить к выработке машиной брака.

8) Заедание или его угроза. Заедание имеет место при трении скольжения металлических деталей друг по другу под большой нагрузкой. При этом нарушаются защитные окисные пленки на поверхности металла, в контакт вступают слои чистого металла. Поэтому коэффициент трения скольжения, который, например, для сталей при наличии окисных пленок на поверхности деталей примерно равен $\mu = 0,2$, возрастает до $\mu = 0,7$. Для обеспечения проскальзывания приходится прикладывать повышенные усилия, на которые конструкция не рассчитана, что может привести к поломкам. Такая ситуация

возможна, например, в лицевых подшипниковых опорах сушильных цилиндров из-за большого веса цилиндра. Для предотвращения поломок цапф корпуса подшипников здесь устанавливаются на качающихся призмах, либо на роликах.

9) Перегрев металлоконструкции машины или его угроза. При перегреве стали возможно изменение структуры стали и ее механических и других характеристик. Так, при монтаже подшипников качения тепловым способом недопустим их нагрев в масляной ванне до температуры свыше 100 °С. При таком чрезмерном нагреве может произойти частичный отпуск подшипниковой стали. Из-за этого при охлаждении размеры внутреннего кольца подшипника не восстанавливаются до первоначальных размеров, и требуемый натяг внутреннего кольца на цапфе вала не создается.

10) Сильные колебания давления и скорости в потоках бумажной массы перед напорным ящиком. При этом бумажная масса будет подаваться на сетку машины при слишком больших колебаниях скорости напуска. При постоянной скорости сетки это приведет к большим колебаниям массы 1 м² бумажного полотна в машинном направлении, а также к таким же колебаниям влажности бумажного полотна на машине. Это, в свою очередь, повышает обрывность бумажного полотна, особенно с ростом ее скорости, когда усиливается также вибрация бумажного полотна на открытых участках хода. Все это ведет к усилению обрывности бумажного полотна на БДМ.

11) Поломки элементов конструкции БДМ. Они могут происходить на всех стадиях эксплуатации машин. Например, сразу после пуска поломки могут быть из-за различных скрытых дефектов в конструкции новой БДМ, из-за погрешностей ее монтажа и др. На второй стадии эксплуатации новой машины они могут происходить, например, из-за случайных перегрузок конструкции. Наконец, на третьей стадии эксплуатации поломки могут быть результатом износа подшипников, зубчатых передач, развития усталостных явлений в цапфах валов и цилиндров и т. д.

12) Обрывы сеток. Происходит из-за износа, случайного схода сетки на сторону и др.

13) Обрывность бумажного полотна на БДМ. Основные причины обрывности бумажного полотна на БДМ изложены выше, например, в пункте 10. Эффективным средством борьбы с обрывностью является безобрывная проводка бумажного полотна на машине, когда устраняются участки свободного хода бумажного полотна.

14) Ослабление крепежа. Из-за этого, например, в сушильных цилиндрах провисают неподвижные сифоны вплоть до касания с внутренней поверхностью вращающихся цилиндров и поломки сифона. Обычное средство борьбы с ослаблением крепежа-контргайки.

15) Разрегулировка различных механизмов на БДМ. Подрегулировка указанных механизмов должна проводиться в порядке технического обслуживания машин.

16) Засорение и забивание отверстий в рубашках отсасывающих валов, в перфоплитах напорных ящиков, засорение прессовых сукон и др. Для борьбы с указанными явлениями проводятся периодические прочистки и промывки

отверстий и прессовых сукон.

17) Отложение различных микроорганизмов изнутри на стенках напорных ящиков, машинных и других бассейнов. Для предотвращения и уменьшения этого явления устанавливаются специальные спрыски в напорных ящиках и бассейнах.

При прекращении необратимых вторичных процессов (например, при остановках БДМ) их последствия в машинах остаются (они не самоустраиваются). Эти последствия могут накапливаться в виде различных повреждений элементов конструкций, износа одежды, получения бумажного брака. Постепенное накопление повреждений конструкции машины, ее одежды может сильно изменить техническое состояние машины вплоть до отказов.

В дополнение к изложенному выше следует отметить, что отдельные вторичные (сопутствующие) процессы могут влиять друг на друга. Так, износ подшипников качения сильно влияет на изменение их вибрационного, теплового, акустического режимов. Это используют, например, для непрерывного контроля состояния подшипников средствами технической диагностики, прежде всего использованием вибродиагностики. Кроме того, все вторичные процессы на БДМ можно, как было указано выше, разделить на группы по скорости их развития:

1. Быстроразвивающиеся процессы (как обратимые, так и необратимые) – это, например, вибрации металлоконструкций, их прогибы, огранка каландровых валов.

2. Процессы, развивающиеся со средней скоростью – это, например, умеренные тепловые деформации конструкций, изменение структуры сталей при перегреве.

3. Медленноразвивающиеся процессы – например, основные виды износа, усталостные явления, коррозия, коробление.

Для снижения вредных последствий вторичных процессов на БДМ принимаются многочисленные меры при создании машины и ее эксплуатации.

На БДМ в течение всего срока их службы встречаются практически все основные виды отказов. Приведем примеры таких отказов:

1) Отказы внезапные и постепенные

- внезапные отказы БДМ (на БДМ): обрывность бумажного полотна, обрывы и другие отказы сеток из-за износа, внезапного схода на сторону, скачков натяжения сетки, поломки элементов конструкции, например, из-за случайных перегрузок, скрытых дефектов конструкции, погрешностей монтажа (например, неправильного выставления радиальных зазоров в подшипниках, боковых и радиальных зазоров в зубчатых передачах);

- постепенные отказы:

а) отказы постепенные по развитию, но внезапные по проявлению (поломки элементов конструкции и обрывы сеток, являющиеся следствием постепенного износа или развития усталостных явлений и затем случайных перегрузок (например, поломки подшипников, зубчатых передач, цапф валов, цилиндров). При контроле технического состояния узлов появляется возможность прогнозирования таких отказов (периодический контроль

состояния узлов проводится при ревизиях, непрерывный контроль – средствами технической диагностики или органолептически, т. е. с использованием органов чувств человека – прослушиванием подшипников с помощью слуховых трубок, контроля нагревания корпусов подшипников касанием рукой и пр.). Развитие предпосылок такого отказа, например, в зубчатой передаче из-за износа боковых поверхностей зубьев и уменьшения их толщины, видно из графика на рисунке 4.

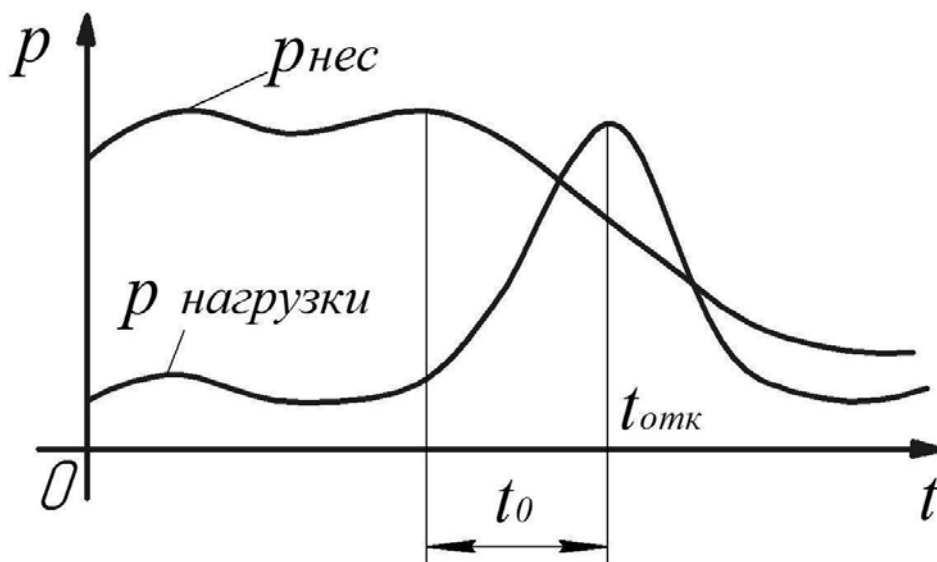


Рисунок 4 – Развитие предпосылок постепенного отказа зубчатой передачи:

$p_{нес}$ – несущая способность зубчатой передачи; $p_{нагрузки}$ – случайная нагрузка на передачу; $t_{отк}$ – момент отказа передачи из-за поломки зуба; t_0 – время развития предпосылки отказа

б) отказы постепенные и по развитию, и по проявлению (например, постепенно наступающее недопустимое ухудшение равномерности влажности бумажного полотна по ширине машины на накате из-за постепенного износа бомбировки прессовых обрезаемых валов).

2) Отказы независимые и зависимые друг от друга

Для нормальной работы каждой части БДМ необходима нормальная работа всех основных узлов данной части машины, а также вспомогательных систем, обеспечивающих ее нормальную работу. Например, если отказала вакуум-система сеточной части БДМ, то сеточная часть не обеспечит нужной сухости бумажного полотна после нее, т. е. сеточная часть откажет по параметру «сухость бумажного полотна». Здесь отказ сеточной части – зависимый от отказа вакуумной системы.

Пример независимого отказа – отказ механизма прижима прессового вала никак не зависит от отказов гидропланок в сеточной части (и наоборот), поэтому данные отказы независимы один от другого (взаимно независимы).

3) Отказы явные и скрытые

Примеры *скрытых* отказов:

Выработка брака на накате или отказы отдельных частей БДМ по параметру «сухость бумажного полотна» – это скрытые отказы БДМ или ее частей, так как для обнаружения таких отказов необходимо проведение специальных анализов в лаборатории.

Примеры *явных* отказов:

Это, например, остановы БДМ из-за обрывов бумажного полотна, сетки, поломок узлов. Факты таких отказов устанавливаются простым наблюдением.

4) Сбои (отказы самоустраняющиеся или устраняемые незначительным вмешательством оператора)

Например, из-за колебаний температуры окружающей среды могут «плыть» характеристики отдельных элементов электронных схем вплоть до отказа какой-либо схемы в целом. При восстановлении температуры среды характеристики элементов схем восстанавливаются, и отказ схемы самоустраняется. Другим примером сбоев являются отказы sprays из-за засорения их отверстий, часто легко устраняемого оператором прочисткой отверстий.

5) Перемежающиеся отказы (повторяющиеся одинаковые сбои)

Примеры в пункте 4 в случаях их неоднократного повторения.

6) Виды отказов в зависимости от их причин:

- конструкционные отказы. В качестве примера можно привести поломки бочек (рубашек) сетко- или сукноведущих валов, когда уравнивающие грузы этих валов крепились не в торцевых патронах, а винтами к бочке вала изнутри, ближе к середине машины. При этом происходят поломки бочек валов в сечениях, ослабленных винтами. Здесь отказы происходят из-за неудачной конструкции валов;

- технологические отказы (происходят из-за нарушения технологии изготовления отказавших изделий). Примером является снижение долговечности элементов конструкции БДМ, изготовленных на предприятиях ЦБП в качестве запчастей из материалов непроектных марок;

- эксплуатационные отказы (происходят из-за нарушения правил эксплуатации). В качестве примера можно привести повышение обрывности бумажного полотна на БДМ при выработке газетной бумаги при недопустимом снижении содержания целлюлозы в композиции бумажной массы (здесь из-за уменьшения содержания в мокром бумажном полотне длинноволокнистой фракции целлюлозы снижается влагонепрочность мокрого бумажного полотна на машине, что повышает указанную обрывность).

7) Ресурсные отказы. Например, отказы подшипников нередко ведут к их полной утрате, т. е. ресурсы подшипников при таких отказах заканчиваются.

8) Деградационные отказы. Это отказы из-за неизбежного и неустраняемого старения изделия при эксплуатации (при их правильных создании и эксплуатации) – такими отказами могут быть также поломки подшипников, цапф валов, зубчатых передач и др.

На практике различают следующие отказы на БДМ: легкие, средние и

тяжелые. Примеры таких отказов:

- на БДМ к *легким* отказам можно отнести засорение sprays, износ отдельных гидропланок (ущерб от них много меньше стоимости отказавшего узла);

- при *средних* отказах ущерб от них сравним со стоимостью узла. Примерами являются отказы узлов, ведущие к их утрате и отсюда к необходимости установки запасных узлов (например, установка запасного подшипника при утрате отказавшего подшипника вала);

- при *тяжелых* отказах ущерб от них значительно превышает стоимость отказавшего узла. К таким относятся отказы, приводящие к длительным простоям БДМ и даже всей технологической линии предприятия (например, отказ центрального гранитного вала многовального пресса при отсутствии таких запасных валов на складе).

Отказы на БДМ можно также разделить на отказы функционирования и параметрические отказы [3]. Возможны отказы функционирования как БДМ в целом (например, при обрывах бумажного полотна), так и такие же отказы отдельных частей, узлов и механизмов (например, отказы сеточной части из-за обрыва сетки, отказы гауч-вала, привода дырчатых валов в напорных ящиках). Параметрические отказы также могут быть у всей машины (например, из-за брака на накате), или у отдельных частей или узлов машины (например, по параметру сухости бумажного полотна после данных части или узла). Ранее было отмечено, что надежность БДМ в целом и по элементам конструкции зависит как от надежности конструкции машины, так и от соблюдения технологического режима БДМ, поэтому используются термины: конструкционная надежность и технологическая надежность.

В заключение раздела об отказах на БДМ отметим, что наиболее аварийно-опасными узлами этих машин являются подшипники, шестерни зубчатых передач привода сушильной части, конденсатоотводные сифоны и черпаки в сушильных цилиндрах, обрезинивка прессовых валов, бочки сукно- и сетководящих валов, рубашки валов, цапфы валов и сушильных цилиндров.

10. НАДЕЖНОСТЬ ХИМИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Статистический анализ надежности химического оборудования показывает, что примерно 90 % его работает достаточно надежно, а около 10 % – это малонадежное оборудование со средней наработкой на отказ менее 300 часов [7].

В химической промышленности малонадежным является следующее оборудование (с указанием его долей по стоимости от всего малонадежного оборудования, %):

- теплообменники всех видов - 35,8
- емкости с мешалками - 25,9
- емкостные аппараты - 16,4

- фильтры всех типов	- 8,7
- колонны	- 4,2
- сушилки всех типов	- 3,5
- прочее	- 5,5

Для химического оборудования характерны следующие причины отказов:

- коррозионный износ дает свыше 60 % всех отказов;
- поломки деталей машин и аппаратов, износ деталей привода, разрушение лакирующего (защитного) слоя стенок аппаратов, износ подшипников, износ сальников, закупорка труб, прогары корпуса (каждая из этих причин дает менее 10 % отказов).

Таким образом, ведущей причиной отказов такого оборудования является коррозионный износ. Как известно, коррозия металла – это вид его разрушения при химическом и электрохимическом взаимодействии металла с окружающей средой. По характеру разрушения коррозия металла может быть сплошной (равномерной по площади) или местной (в виде отдельных трещин, отверстий, язвин, пятен и др.).

В химических производствах отказы оборудования по видам коррозии распределяются следующим образом, %:

- коррозионное растрескивание	- 35
- дырочная коррозия	- 20
- общая (равномерная) коррозия	- 18
- межкристаллитная коррозия	- 16
- другие виды коррозии (например, усталостная коррозия)	- 11

Характеристика видов коррозионного износа:

1) Коррозионное растрескивание происходит в основном в стенках аппаратов и трубопроводов. Сквозные трещины здесь практически неожиданно появляются при одновременном действии на металл двух факторов:

- коррозионное воздействие агрессивной среды на металл;
- наличие остаточных напряжений в металле.

При этом такое растрескивание происходит только при остаточных растягивающих напряжениях в металле. Характерные места на оборудовании, где появляются сквозные трещины в стенках аппаратов и трубопроводов, следующие: сварные швы (точнее, стенка рядом со швом), изогнутые трубы, листы, места развальцовки труб. Растягивающие остаточные напряжения появляются также в деталях, полученных штамповкой, точением, если эти напряжения не сняты специальной термообработкой. Коррозионному растрескиванию более подвержены крупнозернистые стали, поэтому все виды термообработки, влияющие на зернистость сталей, отражаются и на их склонности к коррозионному растрескиванию (в частности, специальной термообработкой достигается снижение склонности металла к такому растрескиванию). При попытке заварить основную трещину сваркой

раскрываются соседние микротрещины, поэтому надежный ремонт здесь возможен лишь при полном удалении всего пораженного участка, например, его вырубкой. Коррозионному растрескиванию не предшествует заметное изменение свойств металла, в том числе его механических свойств, поэтому здесь не редко происходят аварийные остановки оборудования.

2) Дырочная коррозия. При этом под действием коррозионной среды в стенках аппаратов появляются сквозные отверстия. Этот вид коррозии особенно опасен для аппаратов, работающих под давлением. Многие такие аппараты имеют биметаллические стенки (внутренний защитный слой стенки выполнен из нержавеющей стали, наружный – из углеродистой стали, обычно котельной); например, это характерно для биметаллических варочных котлов в производстве целлюлозы. Для обнаружения коррозионного повреждения внутреннего (защитного, т. е. плакирующего) слоя в наружном слое выполняются сигнальные отверстия, появление продукта в этих отверстиях говорит о коррозионном повреждении внутреннего (плакирующего) слоя.

3) Межкристаллитная коррозия. Коррозионное разрушение здесь идет от поверхности внутрь по границе между зернами стали. Главная опасность при этом то, что продукты коррозии остаются внутри металла. Внешний вид конструкции здесь не меняется, а ее механические характеристики сильно снижаются. При этом, возможны внезапные отказы даже при сниженных нагрузках. Это встречается, например, при сварке хромоникелевых нержавеющей сталей. Для снижения склонности стали к межкристаллитной коррозии применяют ее нагрев до температуры примерно 1100 °С с последующей закалкой стали водой.

4) Сплошная (равномерная) коррозия. Имеются два основных вида:

- атмосферная коррозия (это обычное ржавление металла на воздухе);
- кислородная коррозия (характерна для трубопроводов подачи свежей воды, в которой всегда есть растворенный кислород).

Для защиты от атмосферной коррозии применяют окраску конструкций, её антикоррозийную металлизацию, покрытие черного металла (углеродистых сталей, чугуна) листами нержавеющей стали. Средства защиты от кислородной коррозии следующие:

- использование замкнутых систем подачи воды, т. е. систем без подпитки свежей водой;
- добавление в свежую воду химикатов, снижающих содержание в ней кислорода.

Долговечность конструкции при сплошной коррозии оценивается по заложенному в конструкцию припуску на коррозию. При местных видах коррозии произвести оценку конструкции на долговечность сложнее, но она возможна по данным статистики отказов, иначе говоря, методами теории надежности. В целом по всем видам коррозии ей в наибольшей степени подвержены следующие места на оборудовании:

- зоны с высокой скоростью движения агрессивной среды, особенно при наличии в ней абразива (здесь с ростом скорости больше нарушаются защитные окисные пленки на металле – например, у входных и выходных патрубков

емкостей);

- участки конструкции с остаточными напряжениями в них;
- застойные зоны агрессивной среды;
- зоны ее нагрева;
- узлы трения в агрессивных средах (при нагреве и трении коррозия металла ускоряется).

Особенностью большинства химических производств является то, что все основное оборудование здесь скомпоновано в виде единой технологической линии (или нескольких линий (цепочек)). В таких условиях внимание к надежности каждого элемента линии должно быть повышено, так как отказ одного элемента может остановить линию в целом. Это приводит к большим экономическим потерям, чем отказ отдельно работающей такой же машины (аппарата). Еще больше внимания должно уделяться надежности крупногабаритных аппаратов в составе линий, поскольку их простои обходятся дороже. Следует учитывать также, что у сварных крупногабаритных аппаратов вероятность отказа повышена из-за большой суммарной протяженности сварных швов и большей суммарной площади уплотнительных зон.

Надежность химического оборудования зависит от вида рабочей агрессивной среды в нем. Например, надежность одинаковых насосов при прокачке разных химикатов разная. При этом у насосов большая часть отказов связана с протечками в уплотнениях. В связи с этим рекомендуется шлифовка участков валов насосов в уплотнениях, так как при грубой обработке этих участков они быстрее изнашивают уплотнения вплоть до протечек.

Для повышения надежности технологических линий химических производств в них нередко рядом с основными элементами линий (аппаратами и машинами) устанавливаются резервные элементы линий (такие же аппараты и машины), которые используются при отказе основных (это структурное резервирование). В каждом случае целесообразность резервирования проверяется экономически. Для крупнотоннажного химического оборудования такое резервирование практически исключено из-за его высокой стоимости. Наиболее часто резервируется насосное оборудование. Кроме того, иногда резервируют участки технологических линий или короткие линии (цепочки) целиком. Например, если в древесно-подготовительном цехе целлюлозно-бумажного комбината имеются три линии, состоящие каждая из корообдирочного барабана, рубительной машины и вибрационных сортировок, то для повышения надежности здесь может быть предусмотрена еще резервная (четвертая) линия в том же составе, используемая при отказе какой-либо из основных линий. Чаще всего применяется ненагруженное структурное резервирование, когда резервное оборудование используется только при отказе основного. Но иногда, например, если недопустима даже кратковременная остановка в работе линии, применяется и нагруженное резервирование. При нем резервное оборудование работает все время, в том числе и одновременно с основным.

Например, если в линии должно непрерывно производиться кипячение продукта и недопустимы даже кратковременные перерывы в кипячении, то в

линию устанавливаются рядом два одинаковых кипятильника – основной и резервный, работающие все время одновременно и каждый в половину своей мощности. При отказе любого из них второй продолжает работу на 100 % своей мощности, например, на время ремонта отказавшего.

Выше было отмечено, что на химических производствах нередко встречаются по несколько одинаковых цепочек аппаратов. Так, в производствах синтетического каучука обычно имеются по 4-5 одинаковых линий (цепочек). Каждый аппарат в цепочках допускает некоторую перегрузку по производительности. При отказе какого-либо аппарата, чтобы не останавливать при его ремонте всю данную цепочку, нагрузка этого аппарата может быть распределена между такими же аппаратами в других цепочках на время ремонта отказавшего аппарата. Для возможности такого режима должна быть предусмотрена соответствующая трубопроводная обвязка всех аппаратов в цепочках.

11. ОСНОВНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ НАДЕЖНОСТИ ТЕХНИКИ

Количественно техника оценивается показателями надежности. Эти показатели делятся на две группы:

- единичные показатели надежности;
- комплексные показатели надежности.

Каждый единичный показатель количественно оценивает какое-либо одно простое свойство надежности (безотказность или долговечность и т. д.). Каждый комплексный показатель одновременно оценивает два или более простых свойств надежности.

Величины показателей надежности наиболее точно оцениваются по данным эксплуатации (испытаний на надежность) работающих образцов техники. При этом, чем на более широкой базе по количеству проверяемого оборудования определены такие показатели, тем точнее полученные данные.

При отсутствии возможности экспериментального получения величин показателей надежности они предварительно могут быть оценены аналитически. Различают понятия: статистическая оценка показателя надежности и его математическое ожидание.

Статистическая оценка получается по данным эксплуатации (испытаний) нескольких одинаковых изделий, работающих в требуемых одинаковых условиях. Число используемых изделий при этом нередко бывает недостаточно для точного определения показателя. При увеличении числа изделий точность определения статистической оценки показателей повышается. При этом они (показатели) стремятся как к пределам к своим точным значениям, которые называются математическими ожиданиями величин этих показателей надежности.

Единичные показатели надежности:

1) Показатели безотказности (используются для оценки

надежности как невосстанавливаемых, так и восстанавливаемых изделий):

- вероятность безотказной работы (показатель также может характеризовать надежность как восстанавливаемой, так и невосстанавливаемой техники);

- средняя наработка до отказа (характеризует надежность невосстанавливаемых изделий). По данным испытаний группы таких изделий показатель определяется как среднее арифметическое всех наработок до отказа в группе;

- гамма-процентная наработка до отказа (характеризует надежность невосстанавливаемых изделий). Это наработка до отказа, которую имеют не менее гамма-процентов всех изделий данного вида;

- назначенная наработка до отказа (характеризует надежность невосстанавливаемых изделий). Это наработка, по достижении которой для повышения надежности изделие снимается с эксплуатации независимо от его фактического технического состояния;

- средняя наработка на отказ (характеризует надежность восстанавливаемых изделий). Показатель определяется делением суммарной наработки изделия за какой-то срок службы на количество отказов за этот срок службы. В группе одинаковых восстанавливаемых изделий показатель определяется как среднее арифметическое таких показателей у всех изделий за один и тот же срок службы в одинаковых условиях;

- интенсивность отказов (характеризует надежность невосстанавливаемых изделий). Для получения величины интенсивности отказов по данным эксплуатации (испытаний) группы одинаковых невосстанавливаемых изделий частоту отказов в группе изделий при данном времени делят на количество оставшихся работоспособных изделий к этому же моменту времени;

- кроме показателя интенсивности отказов частота отказов в группе одинаковых невосстанавливаемых изделий характеризуется также показателем частотой отказов в расчете на одно исходное изделие в данной группе;

- среднее количество отказов у одного изделия в группе за определенное время (показатель характеризует надежность восстанавливаемых изделий);

- параметр потока отказов (характеризует надежность восстанавливаемых изделий). Поток отказов – это последовательность моментов времени отказов в группе одинаковых восстанавливаемых изделий. По смыслу величина потока отказов дает частоту отказов при данном моменте времени у усредненного (по отказам) изделия в группе изделий.

2) Показатели долговечности (для восстанавливаемых и невосстанавливаемых изделий)

Показатели долговечности делятся на две группы: ресурсы изделий и сроки службы изделий. Имеются следующие разновидности ресурсов:

- технический ресурс изделия (ресурс изделия) – это суммарная наработка изделия с момента ввода его в эксплуатацию (или после капитального ремонта) и до наступления предельного состояния изделия;

- средний ресурс изделия – определяется как среднее арифметическое технических ресурсов в группе изделий данного вида;

- гамма-процентный ресурс изделия – это ресурс, который имеют не менее гамма-процентов изделий данного вида;

- назначенный ресурс – ресурс, по истечении которого для повышения надежности изделие должно сниматься с эксплуатации, независимо от его фактического состояния.

Срок службы изделия отличается от ресурса этого изделия, выраженного в единицах времени, дополнительным учетом всех возможных остановов и простоев изделия. Разновидности сроков службы используются те же, что и у ресурсов.

3) Показатели ремонтпригодности (для восстанавливаемых изделий, так как ремонт невосстанавливаемых изделий не производится)

Основных показателей ремонтпригодности два:

- время восстановления после отказа;

- вероятность восстановления за заданное время.

Величина времени восстановления после отказа (для данного изделия после данного отказа) на практике определяется как время ремонта данного изделия после данного отказа (т. е. время восстановления работоспособности изделия). Вероятность восстановления за заданное время определяется аналогично вероятности безотказной работы. Всего имеется несколько десятков показателей ремонтпригодности. Они характеризуют различные ее аспекты, такие как: время, стоимость, трудоемкость восстановления, ремонтодоступность изделия, его контролепригодность, легкоъемность узлов, степень унификации узлов и деталей данного оборудования, монтажепригодность изделия и т.д.

4) Показатели сохраняемости надежности (для восстанавливаемых и невосстанавливаемых изделий). Например, при хранении на складе используются следующие показатели надежности данной группы:

- допустимое время хранения в данных условиях;

- гамма-процентный срок хранения;

- назначенный срок хранения.

Комплексные показатели надежности:

1) Коэффициент готовности:

$$K_r = T_0 / (T_0 + T_e),$$

где T_0 – средняя наработка на отказ (показатель безотказности);

T_e – среднее время восстановления после отказов (показатель ремонтпригодности).

Величина коэффициента готовности одновременно характеризует безотказность и ремонтпригодность восстанавливаемого изделия. По данным эксплуатации, коэффициент готовности дает долю времени, предназначенного для работы изделия, в течение которой это изделие действительно работало. На будущее также можно сказать, что коэффициент готовности дает вероятность

того, что за время, предназначенное для работы, изделие действительно будет работать (в тех же условиях).

2) Коэффициент технического использования. Величина коэффициента технического использования характеризует безотказность восстанавливаемых изделий.

12. ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ НА ОСНОВНЫХ ЭТАПАХ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ПРОМЫШЛЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Основные этапы жизненного цикла оборудования (например, машин и аппаратов) следующие:

- 1) проектирование и конструирование (при необходимости с проведением предварительных исследований);
- 2) изготовление;
- 3) монтаж, пуск, наладка;
- 4) эксплуатация;
- 5) физический и моральный износ (рациональная граница эксплуатации).

Известно, что на стадиях создания машины (этапы 1, 2, 3) обеспечивается базовая надежность машин и аппаратов, на стадии эксплуатации (этапы 4, 5) обеспечивается эксплуатационная (фактическая) его надежность [6].

Базовая надежность оборудования обеспечивается в два этапа:

- 1) при разработке проектной документации;
- 2) при изготовлении оборудования.

Разработке проектной документации должен предшествовать анализ фактической надежности в работе образцов техники, ближайших к разрабатываемой (изучение надежности ближайшего прототипа). При этом выявляются «слабые» места прототипа, лимитирующие его надежность и в целом качество работы, при проектировании принимаются меры к их улучшению (вплоть до устранения). При этом надежность разрабатываемого оборудования может быть обеспечена и улучшена за счет улучшения конструкции, применения высоконадежных материалов, упрочнения элементов конструкции, использования защитных покрытий (в том числе антикоррозионных) и др. Повышение надежности за счет улучшения конструкции, т. е. улучшение конструктивной надежности оборудования, может быть достигнуто, например, уменьшением или устранением перегрузок отдельных элементов конструкции, в том числе динамических перегрузок – под действием сил инерции, по возможности более равномерным распределением нагрузки по всем элементам конструкции, упрощением конструкции, использованием опыта живой природы и т. д.

Например, повышение надежности дисковых рубительных машин (наряду с улучшением основного технологического процесса рубки) в свое время было достигнуто при переходе с малоножевых машин на многоножевые. При работе ранних малоножевых машин (при числе ножей равном 3-4), как

показывают расчеты и измерения, угловая скорость вращения вала машины уменьшалась при рубке баланса. Уменьшение угловой скорости обусловлено «мягкой» статической характеристикой асинхронного электродвигателя. Пульсация скорости вызывается тем, что при малом количестве ножей баланс при рубке находится то между ножами (тогда двигатель работает в режиме холостого хода, и величина угловой скорости растет), то под ножом (здесь угловая скорость уменьшается из-за мягкой статической характеристики двигателя). Неравномерность вращения вала приводит к ускорениям элементов конструкции и, соответственно, к инерционным нагрузкам на элементы машины. Наиболее неблагоприятно это влияет на подшипники качения вала. Из-за динамических ударов тел качения (роликов) о сепараторы эти сепараторы разрушаются, и подшипники выходят из строя. Аварийность подшипников качения была характерной для малоножевых рубительных машин. Для снижения данной аварийности на малоножевых машинах сначала устанавливали маховик, сглаживающий пульсации угловой скорости вала. Затем для более радикального решения вопроса стали увеличивать количество ножей на машине (длительное время рубительные машины работали при количестве ножей равном 10, сейчас эти машины работают в основном при количестве ножей равном 15-16). При этом даже при тонких балансах отсутствуют периоды времени, когда при рубке баланс находится между ножами, в результате скорость вращения вала замедляется более плавно (без пульсации величины угловой скорости), аварийность подшипников из-за поломок сепараторов устраняется.

При разработке принципиально новых образцов конструкций оборудования при необходимости проводятся предварительные испытания опытных образцов конструкции, либо апробируются опережающие образцы новых по конструкции узлов на промышленном оборудовании.

В качестве примеров повышения надежности оборудования за счет применения высоконадежных материалов можно привести следующие:

- применение титана взамен нержавеющей стали при изготовлении отбельного оборудования позволило значительно повысить его долговечность и снизить аварийность благодаря большей коррозионной стойкости титана;
- применение керамики и высокомолекулярного полиэтилена низкого давления позволило значительно повысить долговечность обезвоживающих элементов в сеточных частях машин (гидропланок, крышек отсасывающих ящиков) из-за большей износостойкости этих материалов;
- применение покрытий желобчатых прессовых валов нержавеющей сталью взамен обрешетки также повысило долговечность этих валов. Однако при этом возможно снижение сроков службы прессовых суков.

Упрочнение деталей оборудования часто достигается их термообработкой, при этом возможно и повышение износостойкости поверхностей. Аналогичный результат достигается также нанесением защитных покрытий. При разработке конструктивно сложного оборудования целесообразно проводить расчетную оценку его надежности. Для возможности предварительной оценки надежности разработана методика составления

структурных схем надежности машин и оценки уровня их надежности как вероятности безотказной работы машины [4].

Если имеются несколько вариантов перспективной конструкции (одинакового назначения, но с разной надежностью), то оптимальным считается вариант, обеспечивающий минимальные затраты на весь жизненный цикл данной конструкции (например, машины).

С повышением надежности затраты на эксплуатацию уменьшаются из-за снижения аварийности, и отсюда уменьшаются расходы на ремонт оборудования. Затраты на создание техники для повышения ее надежности, наоборот, должны возрасти (например, из-за использования более дорогих высоконадежных материалов, более современной технологии изготовления и т. д.). Все вышеизложенное относится к обеспечению базовой надежности при разработке технического проекта оборудования. В техническом проекте разрабатываются общие виды оборудования, дающие полное представление о технических решениях, заложенных в проект. На базе технического проекта разрабатывается рабочая проектная документация (рабочий проект). По чертежам рабочего проекта производятся изготовление и сборка оборудования.

Разработку рабочего проекта следует производить на заводе-изготовителе, поскольку здесь можно лучше использовать возможности данного завода для совершенствования качества разрабатываемого оборудования (в том числе его надежности). Например, могут быть лучше использованы возможности завода по технологии изготовления, термообработке, по используемым материалам и др. Здесь может также производиться обкатка изготовленного оборудования, его испытания на специальных стендах. При этом часто выявляются и устраняются различные скрытые дефекты изготовленных изделий, поэтому при установке их на месте будущей эксплуатации надежность оборудования будет более высокой. При обеспечении базовой надежности оборудования также немаловажную роль играют монтаж, пуск и наладка оборудования.

При эксплуатации оборудования (машин и аппаратов) для обеспечения его фактической надежности основным является следующее:

- эксплуатация в полном соответствии с требованиями системы технического обслуживания и ремонта;
- регулярный сбор данных по фактической надежности (и в целом по качеству работы) эксплуатируемой техники, выявление «слабых» мест в ней, по возможности их улучшение и устранение в ходе эксплуатации вплоть до модернизации оборудования.

Работу по второму направлению фактически можно расценивать как продолжение аналогичной работы по изучению надежности ближайшего прототипа перед началом разработки проектной документации. При этом на стадии эксплуатации также могут приниматься меры по дополнительному улучшению конструкции машин и аппаратов или применению более надежных материалов (износостойких, коррозионностойких) и т. д.

По основным терминам надежности имеем следующие формулировки, относящиеся к техническому обслуживанию и ремонту:

- техническое обслуживание – это комплекс работ и соответствующих норм и положений, направленных на поддержание работоспособности техники при эксплуатации (например, к техническому обслуживанию относятся такие работы на оборудовании, как смазка, подтяжка крепежа, подрегулировка механизмов и др.);

- ремонт – это комплекс работ и соответствующих норм и положений по восстановлению утраченной работоспособности техники.

В настоящее время известны три основные стратегии (системы) ремонта:

- 1) ремонт послеаварийный;
- 2) планово-предупредительный ремонт;
- 3) ремонт по потребности (или по фактическому состоянию техники).

1. Ремонт послеаварийный – это историческая наиболее ранняя система ремонта. При ней ремонт оборудования проводился только после отказов оборудования (например, машин и аппаратов). При этой системе ремонта по мере интенсификации режимов работы техники (повышения ее рабочих скоростей, давлений, температур и др.) аварийность оборудования росла. Для снижения аварийности в начале XX века была предложена система планово-предупредительного ремонта.

2. Планово-предупредительный ремонт. Данная система ремонта в промышленно развитых странах была введена в 20-30 гг. XX-го века (в СССР данная система введена в 1923 г.). При этой системе проводится периодический контроль состояния техники при ревизиях (согласно плану) и при необходимости ее профилактический ремонт для предупреждения возможных отказов техники (ремонт проводится по результатам ревизий). Но эта система не полностью устраняет аварийность промышленного оборудования (в основном из-за периодичности ревизий), поэтому в ней сохраняются элементы системы послеаварийного ремонта.

3. Ремонт по потребности. Данная система ремонта предусматривает непрерывный контроль состояния работающей техники средствами технической диагностики (а также и органолептически). При таком контроле можно останавливать технику на ремонт лишь при его фактической необходимости. Внедрение системы ремонта по потребности в мире и в России показывает возможность дальнейшего значительного снижения аварийности оборудования. В начале внедрения третьей системы ремонта по данным непрерывного контроля состояния техники уточняются виды и объемы работ при плановых остановках на планово-предупредительный ремонт.

В общем случае управление техническим состоянием оборудования, в том числе его надежностью, на всем протяжении жизненного цикла оборудования можно представить в виде следующего схематического процесса. Пусть качество работы оборудования характеризуется набором его выходных эксплуатационных параметров. К таким выходным параметрам машины относятся, например, рабочая скорость машины, потребляемая мощность привода, характеристики надежности машины, производительность машины, показатели качества продукции и др. Выходные характеристики изделия

(машины) зависят от:

- технического состояния машины;
- правильности технологического режима машины;
- качества используемого сырья;
- качества эксплуатации, ремонта, технического обслуживания и т. д.

В общем случае выходные параметры машины зависят от ее задающих характеристик, т. е. результат работы машины определяется ее состоянием, технологическим режимом работы и т. д. При разработке новых машин на основе анализа работы аналогичного оборудования конструктор уточняет все технические характеристики будущей машины, при этом получается проектный вектор ее технических характеристик. При этом, если нужно, улучшаются (устраняются) «слабые» места у взятой за основу машины – прототипа.

При изготовлении, монтаже и пусконаладочных работах стремятся обеспечить проектный вектор технических характеристик машины. Обычно обеспечить точно ее не удастся. При эксплуатации она уходит от первоначального положения, и получается вектор технических характеристик (при этом точка стремится выйти в область отказов). С целью недопущения этого проводятся работы по техническому обслуживанию машины (смазка, промывка и т. д.), однако техническое обслуживание не позволяет полностью исключить отказы машины. Поэтому для предотвращения отказов проводятся работы (планово-предупредительного ремонта). В какой-то момент времени планово-предупредительный ремонт не полностью выполняет свои функции, происходит отказ машины. Для устранения отказа далее проводится послеаварийный ремонт. Проектный уровень технических характеристик машины может быть в ходе эксплуатации улучшен путем модернизации машины. Таким образом, видно, что обеспечение необходимого технического состояния машины, в том числе ее надежности, требует проведения соответствующих мероприятий на протяжении всего жизненного цикла оборудования. На стадиях создания техники (проектирования и изготовления) обеспечивается базовая надежность машины, на стадии эксплуатации – ее эксплуатационная (фактическая) надежность.

13. НАДЕЖНОСТЬ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Выше шла речь о надежности изделий (например, отдельных элементов техники), имеющих собственные «неделимые» характеристики надежности. Наряду с этим большой практический интерес представляет оценка надежности сложных технических систем (например, машин, технологических линий, электронных схем и др.) по известной надежности их элементов. Надежность элементов может по-разному влиять на надежность технических систем в зависимости от структуры этих систем. Такие системы могут быть трех видов:

- 1) последовательные;
- 2) параллельные;
- 3) общего вида.

1. Надежность последовательных технических систем может быть представлена в виде цепи их последовательно соединенных элементов. Такая цепь безотказно работает лишь при условии одновременной безотказной работы всех элементов, то есть при отказе любого элемента цепь отказывает. С точки зрения теории вероятности здесь можно сказать, что случайное событие, заключающееся в безотказной работе цепи, произойдет лишь тогда, когда одновременно произойдут другие случайные события, имеющие место при безотказной работе каждого элемента. Такое основное событие в теории вероятности называется произведением этих событий, а его вероятность равна произведению вероятностей этих событий (когда они независимы друг от друга). Надежность данной последовательной цепи значительно ниже надежности одиночных элементов, из которых эта цепь составлена. Надежность последовательной цепи снижается с увеличением числа элементов в ней. В технике часто встречаются технические системы, работающие безотказно только при одновременной безотказной работе всех их элементов (эти системы отказывают при отказе любого их элемента). Например, часто встречаются такие машины, технологические линии, электронные схемы и др. Все такие системы называются системами с последовательным включением элементов в схемы их надежности или, короче, последовательными системами по надежности. Если при произвольной схеме она отказывает при отказе любого ее элемента, то схема надежности ее тоже чисто последовательная, и надежность такой электрической схемы рассчитывается так же, как надежность последовательной схемы элементов. То же самое может быть и в случае машин.

При составлении схемы надежности машины сначала отбрасывают все ее элементы, ни разу не отказывающие за весь срок службы машины (например, станины), и элементы, надежность которых не влияет на надежность этой машины (например, перила, поручни и др.). Если отказ любого из оставшихся элементов машин (из-за износа, поломок, коррозии и др.) приводит к отказу машины в целом, то все эти элементы включены в схему надежности машины последовательно (схема надежности машины может быть составлена на уровне узлов или частей этой машины или, более подробно, на уровне ее деталей). Расчет надежности машины при последовательной схеме ее надежности производится так же, как расчет надежности последовательной цепи элементов.

Например, если надежность всех элементов машины (с последовательной схемой надежности) подчинится нормальному закону надежности, то это значит, что любой элемент машины (деталь или узел) имеет какой-то средний срок службы и некоторое рассеивание этих сроков службы вокруг среднего, примерно симметричное в обе стороны по времени работы и описываемое функцией Гаусса. Тогда для группы таких одинаковых машин тоже будет иметь место какой-то средний срок их службы до первого отказа и некоторое рассеивание сроков службы машин при первых отказах вокруг этого среднего срока службы, примерно симметричное в обе стороны по времени и также описываемое своей функцией Гаусса. Если надежность всех элементов последовательной по надежности технической системы подчиняется закону распределения с разными параметрами у всех элементов этой системы, то

можно сказать, что надежность таких последовательных систем при первых отказах также подчиняется этому закону.

Если нужно получить данные по надежности отдельных элементов, например, величину их интенсивности отказов, то для ускорения испытаний можно ставить на испытания последовательные системы с определенным количеством элементов в каждой системе. По результатам испытаний получаем величину интенсивности отказов систем, по которой находим искомую величину интенсивности отказов элементов. Времени на такие испытания систем затрачивается меньше, чем на испытания отдельных элементов.

Например, если необходимо экспериментально определить характеристику надежности новых подшипников качения – их интенсивность отказов, то вместо одиночных подшипников на испытания можно ставить комплекты подшипников (в каждом комплекте все подшипники испытываются независимо друг от друга). За отказ комплекта считается первый отказ подшипника в нем. По данным испытаний экспериментально находят интенсивность отказов комплектов подшипников, и затем подсчитывают искомую величину. Времени на такие испытания нужно меньше, чем на испытания одиночных подшипников. Указанный подход возможен и в случаях других новых узлов и деталей машин (в пределах их стадий нормальной эксплуатации).

2. Надежность параллельных технических систем может быть представлена в виде цепи с параллельным подключением элементов. В этом случае цепь полностью откажет лишь при одновременном отказе всех элементов. Иначе говоря, случайное событие, заключающееся в полном отказе цепи, произойдет лишь тогда, когда одновременно произойдут другие случайные события, заключающиеся в отказе каждого элемента. Поэтому отказ цепи есть случайное событие, являющееся произведением других случайных событий, заключающихся в отказе каждого элемента, и вероятность отказа цепи равна произведению вероятностей отказов элементов (когда отказы всех элементов независимы друг от друга). Надежность такой системы повышается с увеличением числа элементов (вероятность отказа цепи с увеличением числа элементов снижается), и надежность системы здесь выше надежности одиночных элементов. В технике встречаются системы, которые отказывают лишь при одновременном отказе всех их элементов. Например, система эскалаторов на станции метро, система основного и резервного насосов и др. Все такие системы называются системами с параллельным включением элементов в схему надежности системы (параллельными системами по надежности).

3. В общем случае схемы надежности технических систем включают участки с последовательным и параллельным включением элементов в схемы надежности систем. Участки с последовательным включением элементов называются основными, так как встречаются наиболее часто. Если в схеме для повышения надежности дополнительно установлены резервные элементы, используемые при отказе основных, то в указанной схеме надежности появляются участки с параллельным включением элементов. Иногда

резервирование элементов используется также в машинах и технологических линиях предприятий. Однако оно применяется гораздо реже из-за более высокой стоимости резервирования.

Например, иногда в подшипниковых узлах машин и аппаратов для повышения надежности устанавливают по два подшипника. Резервированием можно (в какой-то мере условно) считать также наличие запчастей (запасных узлов, деталей) на складе для работающих машин и аппаратов. В этом случае схема надежности системы: машина (аппарат) с запчастями – может выглядеть аналогично показанной выше для схемы с резервированием. В технологических линиях предприятий, тоже могут устанавливаться резервные элементы этих линий. Иногда могут резервироваться также участки технологических линий.

Например, если в древесно-подготовительном цехе имеются три основные технологические линии (это участки основной линии предприятия), состоящие каждая из корообдирочного барабана, рубительной машины, сортировок, то для повышения надежности в цехе может быть дополнительно установлена еще и четвертая линия (в том же составе), которая используется при отказе какой-либо из основных линий.

Определим, что больше повышает надежность последовательной технической системы: резервирование системы целиком или резервирование ее элементов. Оценим это на примере машины. Надежность машины в основном лимитируется двумя ее узлами: двигателем и коробкой передач. Оценим вначале надежность автомобиля без резервирования.

Пусть известно, что вероятность безотказной работы двигателя за год 0,9. Тогда вероятность отказа двигателя за год 0,1. Аналогично вероятность безотказной работы коробки передач пусть тоже равняется 0,9.

Так как автомобиль отказывает при отказе любого из этих двух элементов, то они в упрощенную схему надежности включены последовательно. Поэтому по теореме произведения вероятностей вероятность безотказной работы автомобиля равна:

$$P_A = P_{дв} \cdot P_{кп} = 0,9 \cdot 0,9 = 0,81.$$

В данном случае вероятность отказа системы равна:

$$Q_{пр} = Q^2_{пр} = 0,1^2 = 0,036,$$

а вероятность безотказной работы системы равна:

$$P_{пр} = 1 - 0,036 = 0,964.$$

Видим, что при наличии запасной машины вероятность отказа снизилась примерно в 5 раз. В таких случаях говорят, что надежность повышена в 5 раз.

Надежность при резервировании отдельных узлов автомобиля для системы из двух двигателей (соответствующего участка общей схемы надежности):

$$Q_{\text{уч.дв}} = 0,1^2 = 0,01, P_{\text{уч.дв}} = 1 - 0,01 = 0,99.$$

Аналогично для участка коробки передач:

$$Q_{\text{уч.кп}} = 0,1^2 = 0,01, P_{\text{уч.кп}} = 0,99.$$

Так как оба участка включены в общую схему надежности системы последовательно, то по теореме произведения вероятностей можно записать:

$$P_{\text{уч.дв}} \cdot P_{\text{уч.кп}} = 0,99 \cdot 0,99 = 0,98,$$

$$Q = 1 - 0,98 = 0,02.$$

Видим, что при таком резервировании вероятность отказа снижена в 10 раз, т. е. здесь надежность повышена в 10 раз (за счет запасных узлов).

Таким образом, наличие запасных узлов больше повышает надежность, чем наличие запасной машины.

Рассмотрим теперь последовательную (с точки зрения надежности) техническую систему с количеством элементов, равным 10. Этот пример будет ближе, например, когда упрощенная схема надежности машины составляется на уровне основных ее частей. Аналогично предыдущему примеру также рассмотрим три случая:

- 1) машина без резервирования;
- 2) резервирование машины в целом;
- 3) резервирование отдельных частей машины.

1. Надежность машины без резервирования

Так как машина отказывает при отказе любой из ее частей, то она представляет собой последовательную систему. Пусть по данным эксплуатации за какой-то характерный период (например, за год) вероятность безотказной работы каждого элемента ($P_{\text{э}i}^n$) системы равна 0,9 и, соответственно, вероятность отказа элемента равна 0,1. Тогда вероятность безотказной работы машины в целом равна:

$$P = P_{\text{э}i}^n = 0,9^{10} = 0,35$$

и ее вероятность отказа:

$$Q = 1 - 0,35 = 0,65.$$

2. Резервирование машины в целом

Тогда вероятность отказа такой системы равна:

$$Q = Q^2 = 0,65^2 = 0,42$$

и ее вероятность безотказной работы:

$$P = 1 - Q = 1 - 0,42 = 0,58.$$

3. Резервирование отдельных элементов машины (их дублирование)

Здесь схема надежности состоит из 10 участков, на каждом из которых параллельно подключены друг к другу два одинаковых элемента.

Вероятность отказа каждого участка схемы равна:

$$Q_i = Q_{\text{эл}}^2 = 0,1^2 = 0,01$$

и вероятность безотказной работы участка такова:

$$P_i = 1 - Q_i = 1 - 0,01 = 0,99$$

По теореме произведения вероятностей вероятность безотказной работы всей системы равна:

$$P = 0,99^{10} = 0,9$$

и ее вероятность отказа равна:

$$Q = 1 - P = 1 - 0,9 = 0,1.$$

При любом количестве элементов в последовательной технической системе ее надежность повышается больше при резервировании отдельных элементов (например, наличие запчастей для машин), чем при резервировании системы в целом (например, наличие запасной машины). Поэтому на производстве, гораздо чаще к машинам имеют неснижаемые запасы запчастей, и сравнительно редко рядом с основными машинами ставят запасные машины на случай отказа основных (например, рядом с основными насосами в цехах часто рядом ставят запасные насосы, хотя и в этом случае имеются запчасти к этим насосам).

14. НАДЕЖНОСТЬ ПРИ ВОССТАНОВЛЕНИИ

У восстанавливаемых изделий наряду с потоком случайных событий, заключающихся в отказах изделий, имеет место еще один поток случайных событий по восстановлению изделий после отказов. Поэтому наряду со случайной величиной (срок службы до отказа) появляется еще одна случайная

величина – время восстановления после отказа. Эта величина состоит из трех этапов:

- 1) время между фактическим моментом отказа и моментом его обнаружения;
- 2) время поиска места и причины отказа;
- 3) время на устранение отказа и его последствий (время послеаварийного ремонта).

В зависимости от вида техники основным может быть тот или иной из указанных этапов. Например:

- при отказе прессового вала на бумагоделательной машине из-за поломки его цапфы время на восстановление после отказа в основном затрачивается на замену этого вала на запасной. Здесь основным по длительности является третий этап;

- в сложных электрогидравлических системах управления на металлорежущих станках поиск места и причины отказа такой системы может занимать больше половины времени всего простоя станка из-за отказа. Здесь основным является второй этап;

- в электронике некоторые отказы довольно долго могут оставаться незамеченными. Здесь основным этапом может быть первый.

Даже после одинаковых отказов у одинаковых изделий начало периодов времени восстановления после отказа обычно не совпадает, так как отказы разных изделий происходят неодновременно. Отдельные этапы времени восстановления после отказа у одинаковых изделий тоже происходят неодновременно.

При накоплении одинаковых отказавших изделий после одинаковых отказов иногда возможна одновременная постановка на ремонт по одинаковой технологии группы таких изделий, т. е. при этом периоды времени могут начинаться одновременно. Но это скорее не правило, а исключение.

Тем не менее, несколько условно расчетная ситуация надежности при ремонте на третьей стадии принимается следующей вид. Имеется определенное количество одинаковых отказавших изделий после одинаковых отказов. В начальный момент времени производится их восстановление путем ремонта по одинаковой технологии. Основных разновидностей технологии ремонта здесь две:

- 1) простая замена отказавших изделий (обычно деталей или узлов машин) на запасные;
- 2) восстановительная обработка самих отказавших изделий (деталей или узлов) по одинаковой технологии.

Как указывалось выше, в первом случае производится ремонт машин в целом путем замены ее отказавших деталей и узлов на запасные элементы машин. Во втором случае производится ремонт самих отказавших элементов машин (но вместе с этим и ремонт машины в целом путем ремонта ее элементов). В ходе восстановления работоспособности фиксируется время восстановления каждого изделия (а также, если нужно, трудоемкости и стоимости их восстановления) и количество восстановленных изделий к

данному моменту времени. Указанные данные могут быть задним числом собраны по соответствующей документации (журналы ремонта, эксплуатации и др.).

Таким образом, получается расчетная ситуация, во многом аналогичная с такой же ситуацией при отказах невосстанавливаемых изделий. Поэтому и характеристики надежности на третьей стадии (при ремонте) получаются во многом аналогичными характеристикам надежности при отказах невосстанавливаемых изделий. Например, в обоих случаях происходит по одному случайному событию в ходе испытаний – один отказ (нарушение работоспособности) или одно восстановление работоспособности у одного изделия и др.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Решетов, Д. Н. Надежность машин / Д. Н. Решетов, А. С. Иванов, В. З. Фадеев. – М.: Высшая школа, 1988. – 238 с. – Текст: непосредственный.
2. Амалицкий, В. В. Надежность машин и оборудования лесного комплекса / В. В. Амалицкий. – М.: МГУЛ, 2002. – 279 с. – Текст: непосредственный.
3. Проников, А. С. Надежность машин / А. С. Проников. – М.: Машиностроение, 1978. – 592 с. – Текст: непосредственный.
4. Каменев, А. Ф. Основы надежности бумагоделательных машин / А. Ф. Каменев. – М.: Лесная промышленность, 1978. – 192 с. – Текст: непосредственный.
5. ГОСТ 27.002-2015. Надежность в технике. Термины и определения: межгосударственный стандарт : издание официальное : утвержден и введен в действие Межгосударственным советом по стандартизации, метрологии и сертификации (протокол от 28 декабря 2015 г. N 83-П) : введен впервые : дата введения 2017-03-01/ подготовлен Обществом с ограниченной ответственностью «Институт надежности машин и технологий». – Москва: Стандартинформ, 2016. – 28 с. – Текст: непосредственный.
6. Кокушин, Н. Н. Монтаж и ремонт целлюлозно-бумажного оборудования / Н. Н. Кокушин. – М.: Экология, 1991. – 208 с. – Текст: непосредственный.
7. Ермаков, В. И. Ремонт и монтаж химического оборудования / В. И. Ермаков, В. С. Шеин. – Л.: Химия, 1891. – 368 с. – Текст: непосредственный.