

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Казахский национальный технический университет
имени К.И. Сатпаева

Н.Г. Хайрлиева

**ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ, ЖИВУЧЕСТИ И
БЕЗОПАСНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

Рекомендовано Научно-методическим советом университета
в качестве учебного пособия

Алматы 2013

УДК 620(075.8)

ББК 30.14 я 73

X 15

- X 15 Хайрлиева Н.Г.** Оценка надежности, живучести и безопасности технических систем: Учеб. пособие. – Алматы: КазНТУ, 2013. – 151 с.
Ил. 153. Табл. 6. Библиогр. – 4 назв.
ISBN 978-601-228-498-0

В предлагаемом пособии «Оценка надежности, живучести и безопасности технических систем» рассматриваются основные понятия и определения надежности, классификация отказов технических систем, основные законы теории надежности. Определяются количественные показатели надежности: частота отказов, интенсивность отказов, вероятность восстановления, вероятность появления ошибок и др. Оценивается влияние климатических факторов на надежность. Выбираются критерии надежности и ее показатели. Описаны операции сбора статистической информации и методы ее обработки, вопросы эксплуатационной надежности. Оценивается надежность человека-оператора и экспериментальная надежность, производственные опасности технологических процессов, а также прогнозирование опасностей.

УДК 620(075.8)

ББК 30.14 я 73

Рецензенты:

- Д.Н. Шукаев* – зав. каф. «Информационные технологии»
КазНТУ им. К.И. Сатпаева, д-р техн. наук, проф.
А.Г. Акчурун – каф. «АДТС» КазАТК им. М. Тынышпаева,
д-р техн. наук, проф.
Е.Е. Баубеков – каф. «АДТС» КазАТК им. М. Тынышпаева,
д-р техн. наук, проф.

Печатается по плану издания Министерства образования и науки Республики Казахстан на 2013 г.

ISBN 978-601-228-498-0

© Хайрлиева Н.Г., 2013

© КазНТУ, 2013

ВВЕДЕНИЕ

Обеспечение надежности является серьезной задачей для специалиста, эксплуатирующего сложные технические системы, отказ которых может привести к авариям и чрезвычайным происшествиям. Во-первых, он должен рассмотреть последствия каждого отказа. Неучтенные отказы могут стать впоследствии причиной невыполнения производственной программы. Во-вторых, частые отказы или длительные периоды неисправного состояния могут привести к полной потере работоспособности системы и ее непригодности к последующей эксплуатации. Третий аспект надежности связан с безопасностью для людей и окружающей среды. Очевидно, без знания основных вопросов теории надежности невозможно реализовать наилучшие условия проектирования технических систем и решить задачи безопасности при эксплуатации. Рассмотрение вопросов теории надежности ограничивается рассмотрением понятий, законов распределения отказов, способов резервирования, и основных методов расчета надежности систем до первого отказа.

ГЛАВА I. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ НАДЕЖНОСТИ

1.1. Основные понятия и определения надежности

Основным понятием в теории надежности является понятие системы, под которым понимается совокупность совместно действующих объектов, предназначенных для выполнения заданных функций. Понятие «система» является в определенной степени условным. В зависимости от объектов исследования, от тех задач, которые поставлены перед специалистами, в понятие «система» могут попадать различные совокупности объектов. Например, в качестве систем могут рассматриваться автоматическая система управления движением судна, электронная вычислительная машина, двигатель и т. д.

Все системы, рассматриваемые в теории надежности, могут быть разделены на восстанавливаемые, в которых после появления отказа происходит замена отказавшего объекта, и невосстанавливаемые, в которых замены не происходит.

Объекты, образующие системы, представляют собой элементы системы. В теории надежности под элементом понимают часть системы, которая имеет самостоятельную характеристику надежности, используемую при расчетах и выполняющую определенную частную функцию в интересах системы. Таким образом, очевидно, что деление системы на отдельные элементы нельзя осуществлять произвольным образом. Примерами элементов для систем, перечисленных выше, могут служить соответственно исполнительный механизм рулевого привода, запоминающее устройство ЭВМ, шатунно-кривошипный механизм. Каждый из этих элементов можно рассматривать в качестве системы, состоящей из более мелких элементов.

Все элементы, используемые в ТС, можно разделить на первичные (типа радиоэлементов, двигателей и т. д.) и элементы, состоящие из первичных элементов (типа электронных усилителей, электромашинных усилителей и т. д.).

Как правило, либо путем анализа физических процессов, либо путем проведения испытаний, либо из опыта эксплуатации определяют характеристики надежности первичных элементов.

Для остальных элементов, в т. ч. и для систем, характеристики надежности определяются с учетом характеристик надежности первичных элементов различными расчетными методами.

В зависимости от конструкции и принципов работы первичные элементы, используемые в ТС, можно разделить на механические (редукторы, переключатели, кнопки и т. д.), электро-механические (электродвигатели, тахогенераторы и т. д.), электронные (полупроводниковые приборы, интегральные схемы).

Каждая группа элементов имеет свои особенности относительно надежности, что приводит к необходимости учитывать эти особенности при проведении расчетов показателей надежности.

Элементы и системы могут находиться в двух состояниях: работоспособном и неработоспособном. Понятие работоспособности является одним из основных понятий теории надежности.

Исправность – состояние объекта, при котором он соответствует всем требованиям, установленным нормативно-технической документацией (НТД).

Работоспособность – состояние объекта, при котором он способен выполнять заданные функции, сохраняя значения основных параметров, установленных НТД. Основные параметры характеризуют функционирование объекта при выполнении поставленных задач. Понятие исправность шире, чем понятие работоспособность. Работоспособный объект обязан удовлетворять лишь тем требованиям НТД, выполнение которых обеспечивает нормальное применение объекта по назначению. Таким образом, если объект неработоспособен, то это свидетельствует о его неисправности. С другой стороны, если объект неисправен, то это не означает, что он неработоспособен.

Надежность – свойство системы или элемента выполнять заданные функции, сохраняя во времени значения установленных эксплуатационных показателей в заданных пределах, соответствующих заданным режимам и условиям использования, технического обслуживания, ремонтов, хранения и транспортировки. Надежность определяется безотказностью, ремонтпригодностью и сохраняемостью.

Восстанавливаемость – свойство системы или элемента, заключающееся в проведении восстановительных работ после появления отказа с целью восстановления работоспособности.

Понятие надежности является фундаментальным понятием, которое охватывает все стороны технической эксплуатации элементов и систем. В первую очередь, надежность является составной частью более широкого понятия эффективности. Под эффективностью понимается свойство системы или элемента выполнять заданные функции с требуемым качеством. На эффективность функционирования системы наряду с надежностью влияют и другие характеристики, например точность, помехоустойчивость и т. д.

В целях обеспечения надежности в ТС широко используется введение избыточности.

Избыточность – дополнительные средства и возможности сверх минимально необходимых для выполнения ТС заданных функций.

Резервирование – метод повышения надежности путем введения избыточности.

В процессе эксплуатации ТС проводится целый ряд работ, направленных на повышение надежности, которые носят название профилактических.

Профилактические работы – совокупность планируемых осмотров и ремонтов аппаратуры, целью которых является обеспечение требуемых характеристик надежности.

Надежность объекта характеризуется следующими основными состояниями и событиями.

Предельное состояние – состояние объекта, при котором его применение по назначению недопустимо или нецелесообразно. Применение (использование) объекта по назначению прекращается в следующих случаях:

- при неустранимом нарушении безопасности;
- при неустранимом отклонении величин заданных параметров;
- при недопустимом увеличении эксплуатационных расходов.

Для некоторых объектов предельное состояние является последним в его функционировании, т. е. объект снимается с

эксплуатации, для других – определенной фазой в эксплуатационном графике, требующей проведения ремонтно-восстановительных работ.

В связи с этим объекты могут быть:

- невосстанавливаемые, для которых работоспособность в случае возникновения отказа, не подлежит восстановлению;
- восстанавливаемые, работоспособность которых может быть восстановлена, в т. ч. и путем замены.

К числу невосстанавливаемых объектов можно отнести, например: подшипники качения, полупроводниковые изделия, зубчатые колеса и т. п. Объекты, состоящие из многих элементов, например, станок, автомобиль, электронная аппаратура, являются восстанавливаемыми, поскольку их отказы связаны с повреждениями одного или немногих элементов, которые могут быть заменены. В ряде случаев один и тот же объект в зависимости от особенностей, этапов эксплуатации или назначения может считаться восстанавливаемым или невосстанавливаемым.

Показатель надежности количественно характеризует, в какой степени данному объекту присущи определенные свойства, обуславливающие надежность. Одни показатели надежности (например, технический ресурс, срок службы) могут иметь размерность, ряд других (например, вероятность безотказной работы, коэффициент готовности) являются безразмерными.

Технический ресурс – наработка объекта от начала его эксплуатации или возобновления эксплуатации после ремонта до наступления предельного состояния. Строго говоря, технический ресурс может быть регламентирован следующим образом: до среднего, капитального, от капитального до ближайшего среднего ремонта и т. п. Если регламентация отсутствует, то имеется в виду ресурс от начала эксплуатации до достижения предельного состояния после всех видов ремонтов. Для невосстанавливаемых объектов понятия технического ресурса и наработки до отказа совпадают.

Назначенный ресурс – суммарная наработка объекта, при достижении которой эксплуатация должна быть прекращена независимо от его состояния.

Срок службы – календарная продолжительность эксплуатации (в т. ч., хранение, ремонт и т. п.) от ее начала до наступления предельного состояния.

Надежность является комплексным свойством, включающим в себя в зависимости от назначения объекта или условий его эксплуатации ряд простых свойств:

- безотказность;
- долговечность;
- ремонтпригодность;
- сохраняемость.

Безотказность – свойство объекта непрерывно сохранять работоспособность в течение некоторой наработки или в течение некоторого времени.

Наработка – продолжительность или объем работы объекта, измеряемая в любых неубывающих величинах (единица времени, число циклов нагружения, километры пробега и т. п.).

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

Ремонтпригодность – свойство объекта, заключающееся в его приспособленности к предупреждению и обнаружению причин возникновения отказов, поддержанию и восстановлению работоспособности путем проведения ремонтов и технического обслуживания.

Сохраняемость – свойство объекта непрерывно сохранять требуемые эксплуатационные показатели в течение (и после) срока хранения и транспортирования.

В зависимости от объекта надежность может определяться всеми перечисленными свойствами или частью их. Например, надежность колеса зубчатой передачи, подшипников определяется их долговечностью, а станка – долговечностью, безотказностью и ремонтпригодностью.

Основные термины, определения и показатели теории надежности приведены в табл. 1.

Таблица 1

Основные термины, определения и показатели теории надежности

Термин	Определение	Примечание
1	2	3
Работоспособность	Состояние объекта, при котором он способен выполнять заданные функции, сохраняя значения основных параметров в пределах, установленных нормативно-технической документацией	Параметры, характеризующие выполнение заданных функций, определяют эксплуатационные свойства объекта
Исправность	Состояние объекта, при котором он соответствует всем требованиям, установленным нормативно-технической документацией	Параметр «исправность» полнее параметра «работоспособность», т. к. включает требования не только возможности выполнения заданных функций. Различают исправность, приводящую к отказам и не приводящую к отказам
Неисправность	Состояние объекта, при котором он не соответствует хотя бы одному из требований нормативно-технической документации	Следует различать неисправность, вызывающую и не вызывающую отказы
Отказ	Событие, заключающееся в полной или частичной потере работоспособности	Основными критериями отказов являются интенсивность отказов, частота отказов и поток отказов, которые рекомендуется оговаривать в технической документации

Продолжение таблицы 1

1	2	3
Наработка	Продолжительность функционирования объекта	Выражается в единицах объема выполненной работы за промежуток времени или во времени функционирования. Различают: суточную, месячную или наработку до первого отказа или между отказами
Безотказность	Свойство объекта сохранять работоспособность непрерывно	Для неремонтируемых объектов или заменяемых при первом отказе параметрами безотказности являются вероятность безотказной работы и интенсивность отказов, для ремонтируемых изделий – наработка на отказ. Это свойство особенно важно для ответственных объектов
Долговечность	Свойство объекта длительно (с перерывами на ремонт и техническое обслуживание) сохранять работоспособность до наступления предельного состояния	Показателями долговечности могут служить «ресурс», «срок службы». Предельное состояние объекта оценивается требованиями безопасности, невозможностью либо неэффективностью его дальнейшей эксплуатации
Ремонтопригодность	Свойство объекта, выражающееся в возможности восстановления его работоспособности в период ремонтов и технического обслуживания «вероятность выполнения ремонта в заданное время», «средняя стоимость техобслуживания и эксплуатации»	Важность этого параметра определяется затратами на ремонт и временем поиска неисправности. Параметрами ремонтпригодности может служить «среднее время восстановления»

Продолжение таблицы 1

1	2	3
Срок службы	Продолжительность эксплуатации объекта от определенного момента времени до предельного состояния	Срок службы может исчисляться от начала эксплуатации или ее возобновления после капитального ремонта
Ресурс	Наработка объекта от определенного момента времени до наступления предельного состояния	Различают «ресурс до первого ремонта», «межремонтный ресурс», «назначенный ресурс», «средний ресурс». Ресурс характеризует долговечность объекта при выбранной вероятности неразрушения
Сохраняемость	Свойство объекта непрерывно сохранять значения установленных показателей его качества в заданных пределах в течение и после хранения и транспортирования	Параметрами могут служить «средний срок сохраняемости», «гамма-процентный срок сохраняемости». В ремонтной службе этот параметр важен для оценки эксплуатационных показателей запасных частей после хранения
Гамма-процентный ресурс	Наработка, в течение которой объект не достигает предельного состояния с заданной вероятностью	Гамма-процентный ресурс является одним из расчетных показателей деталей машин
Назначенный ресурс	Суммарная наработка, при достижении которой эксплуатация должна быть прекращена независимо от состояния объекта	Назначается из соображений безопасности и экономичности

Продолжение таблицы 1

1	2	3
Наработка на отказ	Среднее значение наработки рекомендуемого объекта между отказами	Наработка на отказ является параметром надежности и особенно важна для постепенных отказов
Среднее время восстановления	Среднее время восстановления работоспособности	Среднее время восстановления является показателем ремонтопригодности
Коэффициент готовности	Вероятность того, что объект окажется работоспособным в произвольно выбранный момент времени в установившемся процессе эксплуатации	Коэффициент готовности является комплексным показателем надежности
Коэффициент технического использования	Отношение средней наработки объекта в единицах времени за некоторый период эксплуатации к сумме средних значений наработки, времени простоя и времени ремонтов за тот же период эксплуатации	Коэффициент технического использования является комплексным показателем надежности
Вероятность безотказной работы	Вероятность того, что в пределах заданной наработки отказа объекта не произойдет	Вероятность безотказной работы является одним из основных критериев надежности, отнесенных к заданному промежутку времени или к заданной наработке

Продолжение таблицы 1

1	2	3
Интенсивность отказов	Вероятность отказа в единицу времени после данного момента времени при условии, что отказ до этого момента не возник	Интенсивность отказов – важный критерий надежности для невосстанавливаемых объектов
Параметр потока отказов	Среднее количество отказов ремонтируемого изделия в единицу времени, взятое для рассматриваемого момента времени	Параметр потока отказов соответствует интенсивности отказов для восстанавливаемых объектов, но включает повторные отказы
Надежность	Свойство объекта выполнять заданные функции в определенных условиях эксплуатации в течение требуемого промежутка времени	Количественно надежность оценивается показателями, выбираемыми с учетом особенностей объекта, условий его эксплуатации и последствий отказов (оптимальный, максимальный и абсолютный уровень надежности). Может выражаться вероятностью безотказной работы или произведением вероятности безотказной работы на коэффициент готовности или технического использования
Резервирование	Метод повышения надежности объекта введением избыточности, необходимой и достаточной для выполнения им заданных функций	Различают резервирование постоянное, замещение, однократное, многократное, общее, раздельное, ненагруженное, облегченное, нагруженное, восстанавливаемое, невосстанавливаемое, фиксированное, скользящее, однородное, смешанное

1.2. Классификация отказов технических систем (ТС)

Отказом будем называть событие, после появления которого выходные характеристики аппаратуры выходят за допустимые пределы.

Отказ может наступать не только при механических или электрических повреждениях элементов (обрывы, короткие замыкания), но и при нарушении регулировки, из-за ухода параметров элементов за допустимые пределы и т. п. Моменты возникновения отказов в сложной системе обычно являются событиями случайными. Однако место их возникновения удается иногда предсказать заранее. Это возможно в тех случаях, когда систематически наступает механический или электрический износ одного и того же элемента (или узла) во многих однотипных системах. Подобные отказы иногда называют закономерными в противоположность отказам случайным, место и моменты возникновения которых заранее предсказать затруднительно.

Систематические отказы одних и тех же элементов наиболее часто наблюдаются в начале эксплуатации первых образцов системы и возникают вследствие конструктивных или технологических ошибок. В дальнейшем ТС усовершенствуется и подобные отказы не возникают.

Отказы как случайные события могут быть *независимыми и зависимыми*. Если отказ какого-либо элемента в системе не приводит к отказу других элементов, то такой отказ называется независимым. Отказ, появившийся в результате отказа других элементов, называется зависимым.

В большинстве случаев механические или электрические повреждения элементов наступают мгновенно, внезапно и приводят к потере работоспособности либо самого элемента, либо всей ТС. Такие отказы называют *мгновенными или внезапными*. Длительное постепенное изменение параметров элементов по причине старения материалов в большинстве случаев приводит лишь к ухудшению выходных характеристик ТС при сохранении ее работоспособности. Такие отказы называют *постепенными*.

В большом числе случаев мгновенные и постепенные отказы можно считать событиями независимыми и рассматривать количественные характеристики надежности от действия указанных отказов раздельно. Однако весьма часто постепенные отказы влияют на мгновенные и наоборот. Это объясняется тем, что ухудшение характеристик отдельных элементов часто приводит к изменению режимов работы других элементов, а, следовательно, к изменению вероятности их мгновенных отказов.

Деление отказов на мгновенные и постепенные в теории надежности имеет большое значение. Характер отказа оказывает решающее влияние на методику расчета надежности, на способы построения надежных схем, на способы обнаружения места отказа и т. п.

Отказы также можно разделить на *окончательные и перемежающиеся*. При окончательном отказе ТС либо становится неработоспособной, либо ее характеристики выходят за допустимые пределы на все время, пока не будет устранен отказ. Перемежающийся отказ продолжается короткое время, затем система самовосстанавливается и работает надежно.

Не всегда отказы элементов ТС приводят к потере ее надежности. В сложной системе всегда имеются элементы, выход из строя которых не приводит к уходу основных характеристик за допустимые пределы. К таким элементам относятся, например, сигнальные лампы, некоторые приборы контроля за работой ТС, резервные элементы, используемые для повышения надежности и т. п. Отказ таких элементов иногда называют *второстепенной неисправностью* и не учитывают при расчете надежности системы.

Время появления отказов в большинстве случаев является событием случайным. Как случайное событие отказы могут быть: несовместные, равновозможные, достоверные, невозможные. Эти термины имеют понятия, общепринятые в теории вероятностей.

Сформулировать понятие отказа для данной конкретной системы бывает чрезвычайно трудно. Это объясняется тем, что во многих случаях не существует критерия для установления

допусков на выходные характеристики системы, и они носят субъективный характер.

Критерий отказа – отличительный признак или совокупность признаков, согласно которым устанавливается факт возникновения отказа.

Сформулированные определения надежности и отказа требуют нового подхода к исследованию надежности и динамики сложных технических систем. Если под отказом элемента понимать событие, после наступления которого, основные характеристики выходят за допустимые пределы, то тогда отказы элементов будут событиями случайными и зависимыми. Действительно, изменение параметров одного элемента сложной системы всегда влечет за собой изменение режимов работы других элементов, а, следовательно, приводит к изменению их параметров. В этом случае при большом числе элементов системы расчет количественных характеристик надежности крайне затруднителен.

Динамические свойства автоматической системы зависят от воздействий, параметров и начальных условий. Параметры системы в связи с уменьшением ее надежности изменяются. Они являются случайными функциями времени и имеют определенные законы распределения вероятностей. В связи с этим задачи устойчивости, качества переходного процесса, точности должны решаться с учетом возможных случайных изменений параметров, т. е. с учетом надежности. Математически эта задача сводится к исследованию дифференциальных уравнений, коэффициенты которых являются случайными функциями времени и имеются корреляционные связи между параметрами.

Отказ – это нарушение работоспособного состояния технического устройства из-за прекращения функционирования или из-за резкого изменения его параметров. В теории надежности оценивается вероятность отказа, т. е. вероятность того, что техническое средство откажет в течение заданного времени работы. Теория надежности позволяет оценить срок службы, по окончании которого техническое средство вырабатывает свой ресурс и должно подвергнуться капитальному ремонту, модернизации или замене.

Количественная информация о надежности накапливается в процессе эксплуатации технических систем и используется в расчетах надежности. При этом выявляются ненадежные элементы и факторы, ускоряющие или вызывающие отказы, слабые места в конструкции; вырабатываются рекомендации по улучшению устройств и оптимальным режимам их работы.

Рассмотрим более подробно понятие отказа для элементов ТС. Например, для такого первичного элемента, как транзистор, очень часто отказы возникают из-за пробоя коллекторного и эмиттерного переходов. В этом случае две точки схемы оказываются соединенными накоротко. Подобный отказ носит название внезапного отказа типа «короткое замыкание». Следует отметить, что отказ типа короткого замыкания характерен также и для такого первичного элемента, как конденсатор. У транзисторов существует и другой тип отказов, когда происходит сгорание внутренних соединений кристалла с внешними контактами или нарушение внешних контактов. В этом случае сопротивление между двумя точками схемы становится равным бесконечности. Такой отказ носит название внезапного отказа типа «обрыв». Отказы типа «обрыв» характерны также и для таких первичных элементов, как резисторы.

Кроме внезапных отказов у транзисторов возможны и постепенные отказы, связанные с изменением параметров.

Рассмотрим понятие отказа для систем автоматического регулирования и управления. Для этих систем одним из важнейших требований является требование устойчивости системы. Если система устойчива, то в этом случае обеспечивается поддержание заданного значения некоторого параметра (например, курса судна) при различных внешних воздействиях (волнение моря, ветровая нагрузка и т. д.). Отказ одного из элементов системы может привести к нарушению устойчивости, что представляет собой отказ системы. Следует заметить, что нарушение устойчивости, а, следовательно, и отказ системы, может произойти за счет изменения параметров отдельных элементов, образующих систему. Поэтому, исходя из требований к процессу функционирования системы, для отдельных элементов должны быть, определены допустимые отклонения их параметров.

Для ТС, наряду с требованиями устойчивости, предъявляется требование обеспечения заданного качества переходного процесса. Пусть, например, график изменения регулируемого параметра во времени имеет вид, показанный на рис. 1. Параметрами переходного процесса являются: $\theta_{пер}$ – перерегулирование; $t_{уст}$ – время установления переходного процесса. Кроме того, для большинства систем существует $\theta_{уст}$ – установившаяся ошибка. Для каждой системы величины $\theta_{пер}$, $\theta_{зад}$, $t_{уст}$ и $\theta_{уст}$ являются заданными, причем $\theta_{зад}$ представляет собой установившееся значение регулируемого параметра.

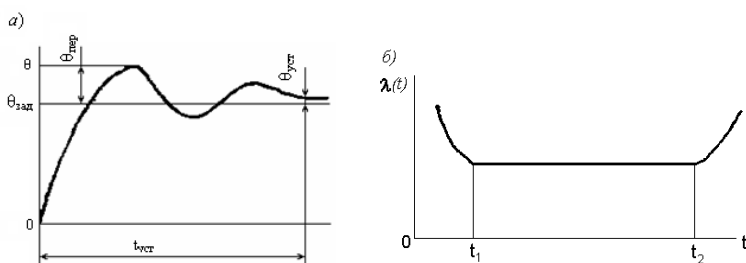


Рис. 1. Изменение регулируемого параметра во времени (а) и интенсивности отказов $\lambda(t)$ (б)

Отказы отдельных элементов, а также изменения параметров элементов могут привести к тому, что указанные выше параметры будут превышать заданные, что также представляет собой отказ системы.

Для технических систем автоматического регулирования и управления большое значение имеют сбои. *Сбой* – событие, заключающееся в том, что в результате изменения параметров элементов под воздействием внутренних или внешних причин система (или элемент) в течение некоторого времени прекращает выполнение своих функций. Правильная работа системы в этом случае восстанавливается самопроизвольно, без вмешательства извне. Таким образом, сбой – это самоустраняющийся отказ, приводивший к кратковременному нарушению работоспособности.

Сбои особенно опасны для систем, в которых используются ЭВМ, т. к. следствием сбоя является искажение информации (исходных данных, управляющих воздействий и так далее, что приводит к неправильному функционированию системы. Сложность проблемы заключается в том, что сбой длится небольшое время, после чего система вновь становится работоспособной и установить наличие искажения информации становится затруднительным. Учитывая специфику появления сбоев, следует отдельно рассматривать методы расчета надежности и методы обеспечения надежности при наличии сбоев.

Классификация отказов:

По типу функционирования отказы подразделяются на:

- отказы функционирования (выполнение основных функций объектом прекращается, например, поломка зубьев шестерни);
- отказы параметрические (некоторые параметры объекта изменяются в недопустимых пределах, например, потеря точности станка).

По своей природе отказы могут быть:

- случайные, обусловленные непредусмотренными перегрузками, дефектами материала, ошибками персонала или сбоями системы управления и т. п.;
- систематические, обусловленные закономерными и неизбежными явлениями, вызывающими постепенное накопление повреждений: усталость, износ, старение, коррозия и т. п.

Основные признаки классификации отказов:

- характер возникновения;
- причина возникновения;
- характер устранения;
- последствия отказов;
- дальнейшее использование объекта;
- легкость обнаружения;
- время возникновения.

Рассмотрим подробнее каждый из классификационных признаков:

Характер возникновения:

- внезапный отказ – отказ, проявляющийся в резком (мгновенном) изменении характеристик объекта;
- постепенный отказ – отказ, происходящий в результате медленного, постепенного ухудшения качества объекта.

Внезапные отказы обычно проявляются в виде механических повреждений элементов (трещины – хрупкое разрушение, пробой изоляции, обрывы и т. п.) и не сопровождаются предварительными видимыми признаками их приближения. Внезапный отказ характеризуется независимостью момента наступления от времени предыдущей работы.

Постепенные отказы – связаны с износом деталей и старением материалов.

Причина возникновения:

- конструкционный отказ, вызванный недостатками и неудачной конструкцией объекта;
- производственный отказ, связанный с ошибками при изготовлении объекта по причине:
 - несовершенства или нарушения технологии;
- эксплуатационный отказ, вызванный нарушением правил эксплуатации.

Характер устранения:

- устойчивый отказ;
- перемежающийся отказ (возникающий/исчезающий), последствия отказа: легкий отказ (легкоустраняемый);
- средний отказ (не вызывающий отказы смежных узлов – вторичные отказы);
- тяжелый отказ (вызывающий вторичные отказы или приводящий к угрозе жизни и здоровью человека).

Последствия отказов:

окончательные и перемежающиеся.

Дальнейшее использование объекта:

- полные отказы, исключаяющие возможность работы объекта до их устранения; частичные отказы, при которых объект может частично использоваться.

Легкость обнаружения:

- очевидные (явные) отказы;
- скрытые (неявные) отказы.

Время возникновения:

- приработочные отказы, возникающие в начальный период эксплуатации;
- отказы при нормальной эксплуатации;
- износные отказы, вызванные необратимыми процессами износа деталей, старения материалов и пр.

1.3. Количественные показатели надежности

Качественного определения надежности недостаточно, т. к. оно не позволяет:

- рассчитать надежность;
- сформулировать требования на надежность вновь разрабатываемой аппаратуры;
- сравнить надежность различных элементов и систем;
- рассчитать сроки службы и необходимое количество запасных деталей для нормальной эксплуатации аппаратуры;
- наметить пути повышения надежности;
- рассчитать количество аппаратуры, необходимое для решения поставленной задачи и т. д. и т. п.

Для этих целей необходимы критерии надежности.

В связи с этим возникает необходимость введения количественных характеристик надежности. Поскольку отказы и сбои элементов являются случайными событиями, то теория вероятностей и математическая статистика являются основным аппаратом, используемым при исследовании надежности, а сами характеристики надежности должны выбираться из числа показателей, принятых в теории вероятностей.

Для ТС выбор характеристик надежности должен осуществляться с учетом особенностей функционирования ТС на различных объектах. В соответствии с этим могут быть определены следующие характеристики надежности:

1. *Вероятность безотказной работы* – вероятность того, что в заданном интервале времени t в системе или в элементе не возникает отказ. Эта характеристика связана с функцией распределения времени безотказной работы следующим соотношением:

$$P(t) = 1 - Q(t), \quad (1)$$

где $P(t)$ – вероятность безотказной работы; $Q(t)$ – функция распределения времени безотказной работы, которая представляет собой вероятность появления отказа в течение времени t .

Очевидно, $0 < P(t) < 1$, $P(0) = 1$, $P(\infty) = 0$.

Следует отметить, что функция $P(t)$ является монотонно убывающей функцией (надежность в процессе эксплуатации может только убывать), а функция $Q(t)$ – монотонно возрастающей функцией.

Для определения величины $P(t)$ используется следующая статистическая оценка:

$$P^*(t) = \frac{N_0 - n(t)}{N_0}, \quad (2)$$

где N_0 – число изделий, поставленных на испытание или на эксплуатацию; $n(t)$ – число изделий, отказавших в течение времени t .

2. *Вероятность бессбойной работы* – вероятность того, что в заданном интервале времени (будут отсутствовать сбои системы или элементов. Эта характеристика связана с функцией распределения времени бессбойной работы следующим образом:

$$P_c(t) = 1 - Q_c(t), \quad (3)$$

где $P_c(t)$ – вероятность отсутствия сбоя; $Q_c(t)$ – функция распределения времени бессбойной работы, которая представляет собой вероятность появления сбоя в течение времени t .

Для определения величины $P_c(t)$ используется следующая статистическая оценка:

$$P_c^*(t) = \frac{N_0 - n_c(t)}{N_0}, \quad (4)$$

где N_0 – число изделий, поставленных на испытание или на эксплуатацию; $n_c(t)$ – число изделий, у которых произошел сбой в течение времени t .

3. Частота отказов представляет собой плотность распределения времени безотказной работы или производную от вероятности безотказной работы. Поэтому

$$a(t) = Q'(t) = -P'(t). \quad (5)$$

Для определения величины $a(t)$ используется следующая статистическая оценка:

$$a^*(t) = \frac{n(\Delta t)}{N_0 \Delta t}, \quad (6)$$

где $n(\Delta t)$ – число отказавших изделий в интервале времени от $(t - \Delta t/2)$ до $(t + \Delta t/2)$.

Покажем справедливость указанной оценки. Число изделий, отказавших в течение времени Δt , равно

$n(\Delta t) = -[N(t + \Delta t) - N(t)]$, где $N(t)$ и $N(t + \Delta t)$ – число изделий, безотказно проработавших в течение времени t и $t + \Delta t$ соответственно.

При достаточно большом числе изделий, поставленных на испытание или эксплуатацию, можно записать

$$N(t) = N_0 P(t)$$

$$N(t + \Delta t) = N_0 P(t + \Delta t).$$

Тогда

$$a^*(t) = -\frac{N_0 [P(t + \Delta t) - P(t)]}{N_0 \Delta t}.$$

При $\Delta t \rightarrow 0$ получим

$$a(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P(t + \Delta t) - P(t)}{\Delta t} = P'(t) = Q(t). \quad (7)$$

Между частотой отказов, вероятностью безотказной работы и вероятностью появления отказа имеются следующие зависимости:

$$Q(t) = \int_0^t a(x)dx; \quad P(t) = 1 - \int_0^t a(x)dx. \quad (8)$$

Наличие простой зависимости между величиной $a(t)$ и величинами $Q(t)$ и $P(t)$ является достоинством характеристики частоты отказов. Аналогично можно определить и частоту сбоев.

4. *Интенсивность отказов* представляет собой условную плотность распределения времени безотказной работы для момента времени t при условии, что до момента времени t отказ устройства не произошел. Таким образом,

$$\lambda(t) = \frac{a(t)}{P(t)}. \quad (9)$$

Так как $P(t) \leq 1$, очевидно, всегда выполняется соотношение $\lambda(t) \geq a(t)$.

Для определения величины $\lambda(t)$ используется следующая статистическая оценка:

$$\lambda^*(t) = \frac{n(\Delta t)}{N_{cp}\Delta t},$$

где $N_{cp} = (N_i + N_{i+1})/2$ – среднее число исправно работающих изделий в интервале времени Δt .

Отметим важную особенность, вытекающую из формулы (9) для высоконадежных систем. Если $P(t) \geq 0,99$, то $a(t) \approx \lambda(t)$. Допускаемая ошибка составляет не более 1 % и, как правило, не превышает ошибок статистического определения величин $a(t)$ и $\lambda(t)$.

Следует подчеркнуть различие между величинами $a(t)$ и $\lambda(t)$. Вероятность $a(t)dt$ характеризует вероятность отказа системы или элемента за интервал времени $(t, t+dt)$, взятых произвольным образом из группы таких же систем или элементов, причем неизвестно, в каком состоянии (работоспособном или неработоспособном) находится элемент или система. Вероятность $\lambda(t)dt$ характеризует вероятность отказа системы или элемента за интервал $(t, t+dt)$, взятых из группы элементов или систем, которые остались работоспособными к моменту времени t .

Таким образом, в практических расчетах возможна соответствующая замена отдельных величин.

Интегрируя выражение (9), имеем

$$\int_0^t \lambda(x) dx = \ln P(t) \quad \text{или} \quad P(t) = \exp\left[-\int_0^t \lambda(x) dx\right] \quad (10)$$

Если $\lambda(x) = \lambda = \text{const}$, то тогда $P(t) = e^{-\lambda t}$ и $a(t) = \lambda e^{-\lambda t}$.

Рассмотренный случай достаточно широко встречается на практике, и приведенное соотношение (10) характеризует экспоненциальное распределение времени безотказной работы.

Сравнение формул (8) и (10) показывает, что взаимная замена величин $a(t)$ и $\lambda(t)$ основана на разложении функции e^{-x} в степенной ряд и использовании только двух первых членов разложения.

Аналогично можно определить интенсивность сбоев λ_c .

5. *Средняя наработка до отказа* (среднее время безотказной работы) представляет собой математическое ожидание наработки до первого отказа. Таким образом,

$$T = \int_0^{\infty} t a(t) dt. \quad (11)$$

Это выражение путем интегрирования по частям может быть преобразовано следующим образом:

$$T = \int_0^{\infty} t a(t) dt = -\int_0^{\infty} t P'(t) dt = t P(t) \Big|_0^{\infty} + \int_0^{\infty} P(t) dt.$$

Учитывая, что $t \geq 0$, $P(0) = 1$ и $P(\infty) = 0$, окончательно получим

$$T = \int_0^{\infty} P(t) dt. \quad (12)$$

Для экспоненциального закона распределения времени безотказной работы имеем

$$T = \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda}.$$

Для определения средней наработки до отказа используется следующая статистическая оценка:

$$T^* = \frac{\sum_{i=1}^{N_0} t_i}{N_0},$$

где t_i – время безотказной работы i -го изделия.

6. *Вероятность восстановления* – вероятность того, что отказавшее изделие будет восстановлено в течение заданного времени t . Указанная характеристика представляет собой функцию распределения времени восстановления и равна

$$S(t) = Q_v(t). \quad (13)$$

Очевидно, что $0 \leq S(t) \leq 1$, $S(0) = 0$, $S(\infty) = 1$.

Для определения величины $S(t)$ используется следующая статистическая оценка:

$$S^*(t) = \frac{N_g}{N_{ог}},$$

где $N_{ог}$ – число изделий, поставленных на восстановление; N_g – число изделий, время восстановления которых было меньше заданного времени t .

7. *Частота восстановления* – плотность распределения времени восстановления. Таким образом, $a_v(t) = S'(t)$.

Для определения величины $a_v(t)$ используется статистическая оценка

$$a_v^*(t) = \frac{n_g(\Delta t)}{N_{ог}(\Delta t)},$$

где $n_e(\Delta t)$ – число восстановленных изделий на интервале времени $(t - \Delta t/2, t + \Delta t/2)$.

8. *Интенсивность восстановления* – условная плотность распределения времени восстановления для момента времени t при условии, что до этого момента восстановления изделия не произошло. Таким образом,

$$\mu(t) = \frac{a_e(t)}{1 - S(t)}. \quad (14)$$

Из этого уравнения, учитывая, что $a_e(t) = S'(t)$, $S(0) = 0$, получим

$$S(t) = 1 - \exp \left[- \int_0^t \mu(x) dx \right].$$

Если $\mu(x) = \mu = \text{const}$, то получаем экспоненциальное распределение для времени восстановления:

$$S(t) = 1 - e^{-\mu t}.$$

Для определения величины $\mu(t)$ используется следующая статистическая оценка:

$$\mu^*(t) = \frac{n_e(\Delta t)}{N_{e.cp}(\Delta t)},$$

где $N_{e.cp}$ – среднее число изделий, которые не были восстановлены в интервале времени $(0, t)$.

9. *Среднее время восстановления* представляет собой математическое ожидание времени восстановления.

$$\theta = \int_0^{\infty} t a_e(t) dt = \int_0^{\infty} [1 - S(t)] dt. \quad (15)$$

Для определения величины θ используется следующая статистическая оценка:

$$\theta^* = \frac{\sum_{i=1}^{N_{ог}} t_{ig}}{N_{ог}},$$

где t_{ig} – длительность восстановления i -го изделия.

10. *Параметр потока отказов* – математическое ожидание числа отказов, происшедших за единицу времени, начиная с момента t . Величина $1/\omega$ представляет собой среднюю наработку на отказ.

Для определения величины $\omega(t)$ используется следующая статистическая оценка:

$$\omega^*(t) = \frac{n_i(\Delta t)}{N_0 \Delta t}, \quad (16)$$

где $n_i(\Delta t)$ – число изделий, отказавших в интервале времени $(t - \Delta t/2, t + \Delta t/2)$ при условии, что отказавшее изделие немедленно заменяется новым.

Установим зависимость между средней частотой отказов и другими характеристиками надежности. Предположим, в момент $t=0$ на испытании находилось N_0 изделий. Тогда среднее число изделий, отказавших за время Δt , равно

$$n_1(\Delta t) = N_0 \omega(t) \Delta t, \quad (17)$$

причем $n_1(\Delta t) = n_3(\Delta t) + n_4(\Delta t)$, где $n_3(\Delta t)$ – число отказавших изделий из числа тех, которые были поставлены в момент $t = 0$; $n_4(\Delta t)$ – число отказавших изделий из числа тех, которые были поставлены в процессе испытаний.

Очевидно, $n_3(\Delta t) = N_0 a(t) \Delta t$.

Далее рассмотрим некоторый интервал $(\tau, \tau + \Delta \tau)$, предшествующий (Δt) . В течение этого интервала выйдет из строя $U(\tau)N_0 A \tau$ изделий. Из числа замененных за время $(\Delta \tau)$ выйдут из строя $\omega(\tau) N_0 a(t) \Delta t$ изделий. Суммируя по всем промежуткам, получим:

$$n_4(\Delta t) = N\Delta t \int_0^t \omega(\tau) a(t-\tau) d\tau.$$

Окончательно после подстановки и преобразований имеем:

$$\omega(t) = a(t) + \int_0^t \omega(\tau) a(t-\tau) d\tau. \quad (18)$$

Уравнение (18) является интегральным уравнением Вольтера второго рода с разностным ядром, которое обычно решается численными методами с использованием метода последовательных приближений. В соответствии с этим методом осуществляются вычисления по формуле:

$$\omega_{i+1}(t) = a(t) + \int_0^t \omega_i(\tau) a(t-\tau) d\tau$$

до тех пор, пока $\omega_{i+1}(t)$ и $\omega_i(t)$ не будут совпадать. В качестве нулевого приближения следует использовать значение интенсивности отказов $\lambda(t)$.

Для определения свойств характеристики средней частоты отказов используем преобразование Лапласа. Второй член выражения (18) представляет собой свертку двух функций. Поэтому:

$$\omega(s) = \frac{a(s)}{1-a(s)}; \quad a(s) = \frac{\omega(s)}{1-\omega(s)}.$$

Воспользуемся известным соотношением операционного исчисления:

$$\lim_{s \rightarrow \infty} \omega(t) = \lim_{s \rightarrow \infty} s \omega(s).$$

Тогда:

$$\lim_{s \rightarrow \infty} s \omega(s) = \lim_{s \rightarrow \infty} \frac{s \int_0^{\infty} a(t) e^{-st} dt}{1 - \int_0^{\infty} a(t) e^{-st} dt}.$$

Раскрывая неопределенность, получим:

$$\lim_{s \rightarrow \infty} s\omega(s) = \lim_{s \rightarrow \infty} \frac{\int_0^{\infty} a(t)dt}{\int_0^{\infty} ta(t)dt} = \frac{1}{T}.$$

Таким образом,

$$\lim_{s \rightarrow \infty} \omega(t) = \frac{1}{T}. \quad (19)$$

Предел, к которому стремится средняя частота отказов при $t \rightarrow \infty$, равен величине, обратной среднему времени безотказной работы.

Можно указать следующие свойства характеристики средней частоты отказов: 1) для любого момента времени независимо от закона распределения времени безотказной работы $a(t)$; 2) если $\lambda(t)$ возрастающая функция времени, то $\lambda(t) > \omega(t) > a(t)$; если же $\lambda(t)$ убывающая функция, то $\omega(t) > \lambda(t) > a(t)$.

Рассмотрим экспоненциальный закон времени безотказной работы, для которого

$a(t) = \lambda e^{-\lambda t}$, где $\lambda = \text{const}$. Преобразование Лапласа имеет вид $a(s) = \lambda/(\lambda + s)$.

Тогда $\omega(s) > \lambda/s$. Переходя к оригиналу, получим $\omega(t) = \lambda = 1/T = \text{const}$.

Таким образом, при экспоненциальном законе распределения времени безотказной работы средняя частота отказов равна интенсивности отказов и обратно пропорциональна среднему времени безотказной работы.

11. *Функция готовности* $K_r(t)$ – вероятность того, что в момент времени t ТС работоспособна.

Для определения величины $K_r(t)$ используется следующая статистическая оценка:

$$K_r^*(t) = \frac{N_t}{N_0},$$

где N_0 – общее число изделий; N_t – число изделий, находящихся в исправном состоянии в момент времени t .

12. Коэффициент готовности K_r – вероятность того, что ТС работоспособна в произвольный момент времени. Таким образом, $K_r = \lim_{t \rightarrow \infty} K_r(t)$.

Для определения величины K_r отдельного изделия используется следующая статистическая оценка:

$$K_r = \frac{\sum_{i=1}^n t_{pi}}{\sum_{i=1}^n t_{pi} + \sum_{i=1}^n t_{Bi}},$$

где t_{pi} – i -й интервал времени исправной работы изделия; t_{Bi} – i -й интервал времени восстановления изделия; n – число отказов изделия.

13. Коэффициент оперативной готовности – вероятность того, что ТС будет работоспособна в произвольный момент времени t и безотказно проработает заданное время τ . Таким образом,

$$R(t, \tau) = K_r(t)P(\tau). \quad (20)$$

Для определения величины $R(t, \tau)$ используется следующая статистическая оценка:

$$R^*(t, \tau) = \frac{N_t(\tau)}{N_0},$$

где $N_t(\tau)$ – число изделий, исправных в момент t и безотказно проработавших в течение времени τ .

14. Коэффициент технического использования K_u – относительная доля времени в цикле $T_{ц}$, когда ТС выполняет заданные функции. Полное время $T_{ц}$ может быть разделено на следующие составляющие: t_p – время, затрачиваемое на выполнение заданных функций; t_B – время, затрачиваемое на восстановление после появления отказов; t_n – время, затрачиваемое на

проведение профилактических мероприятий; t_k – время, затрачиваемое на проведение контроля.

Для определения этого коэффициента используется следующая статистическая оценка:

$$K_u^* = \frac{t_p}{t_p + t_B + t_n + t_k}. \quad (21)$$

15). *Вероятность появления ошибки* – вероятность того, что в результате сбоя или отказа одного или нескольких элементов информация в системе будет иметь ошибку.

В табл. 2 приведены основные соотношения, устанавливающие функциональную связь между показателями безотказности.

Таблица 2

Соотношение между показателями безотказности

Известный показатель	Формулы для определения остальных показателей			
	$P(t)$	$Q(t)$	$a(t)$	$\lambda(t)$
$P(t)$	–	$1 - P(t)$	$-\frac{dP(t)}{dt}$	$-\frac{1}{P(t)} \frac{dP(t)}{dt}$
$Q(t)$	$1 - Q(t)$	–	$\frac{dQ}{dt}$	$\frac{1}{1 - Q(t)} \frac{dQ(t)}{dt}$
$a(t)$	$\int_t^{\infty} a(x) dx$	$\int_0^t a(x) dx$	–	$\frac{a(t)}{\int_t^{\infty} a(x) dx}$
$\lambda(t)$	$\exp\left(-\int_0^t \lambda(x) dx\right)$	$1 - \exp\left(-\int_0^t \lambda(x) dx\right)$	$\lambda(t) \exp\left(-\int_0^t \lambda(x) dx\right)$	–

1.4. Основные законы, используемые в теории надежности

Время между соседними отказами для элементов аппаратуры является непрерывной случайной величиной, которая характеризуется некоторым законом распределения. В теории надежности встречаются следующие законы:

1. Экспоненциальный закон. Для него имеем следующие зависимости:

$$\begin{aligned} Q(t) &= 1 - e^{-\lambda t}; & P(t) &= 1 - e^{-\lambda t}; \\ a(t) &= \lambda e^{-\lambda t}; & T &= \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda}. \end{aligned}$$

где λ – параметр экспоненциального распределения.
Дисперсия времени безотказной работы равна:

$$D = \int_0^{\infty} t^2 a(t) dt - T^2 = \int_0^{\infty} t^2 \lambda e^{-\lambda t} dt - \frac{1}{\lambda^2} = \frac{1}{\lambda^2}. \quad (22)$$

Если $\lambda t \leq 1$, то $Q(t) \approx \lambda t = t/T$ и $P(t) \approx \lambda t = 1 - t/T$.

Важным свойством экспоненциального распределения является следующее: вероятность безотказной работы на интервале $t, t+\tau$ не зависит от времени предшествующей работы t , а зависит только от длины интервала τ .

Рассмотрим интервалы времени $(0, t)$ и $(0, t+\tau)$. Для них можно записать:

$$P(t+\tau) = P(t)P(\tau),$$

где $P(t+\tau)$ – вероятность безотказной работы системы или элемента за время $t+\tau$ $P(t)$ – вероятность безотказной работы системы или элемента за время t ; $P(\tau)$ – вероятность безотказной работы системы или элемента за время τ при условии, что система или элемент безотказно проработали время t .

В случае экспоненциального закона $P(t+\tau) = e^{-\lambda(t+\tau)}$ и $P(t+\tau) = e^{-\lambda t}$. Подставляя указанные выражения, получим, что $P(t+\tau) = e^{-\lambda t}$. Таким образом, условная плотность вероятности равна безусловной плотности вероятности, что подтверждает справедливость данного свойства.

В дальнейшем экспоненциальный закон времени безотказной работы будем называть экспоненциальным законом надежности. Графики, характеризующие экспоненциальное распределение, показаны на рис. 2. Опыт эксплуатации ТС пока-

зывает, что во многих случаях характеристики надежности систем и элементов подчиняются экспоненциальному закону.

2. *Распределение Рэлея.* Для него основные характеристики имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} Q(t) &= 1 - \exp\left(-\frac{t^2}{2\sigma^2}\right); & P(t) &= \exp\left(-\frac{t^2}{2\sigma^2}\right); \\ a(t) &= \frac{1}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{t^2}{2\sigma^2}\right), \end{aligned} \quad (23)$$

где σ – параметр распределения Рэлея.

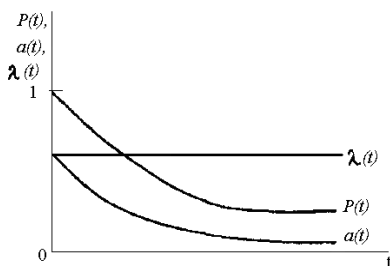


Рис. 2. Экспоненциальное распределение

Используя ранее приведенные формулы, можно получить другие характеристики данного распределения:

$$\begin{aligned} T &= \int_0^{\infty} P(t) dt = \int_0^{\infty} \exp\left(-\frac{t^2}{2\sigma^2}\right) dt = \sqrt{2}\sigma \int_0^{\infty} e^{-x^2} dx = \sqrt{\frac{\pi}{2}}\sigma; \\ D &= \frac{\sigma^2}{2}(4 - \pi); & \lambda(t) &= \frac{a(t)}{P(t)} = \frac{t}{\sigma^2}. \end{aligned}$$

Графики, характеризующие распределения Рэлея, показаны на рис. 3.

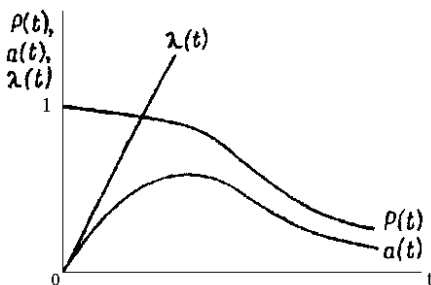


Рис.3. Распределение Рэлея

Пример. Определим характеристики надежности ТС для некоторых законов появления отказов.

Экспоненциальное распределение. Предположим, что $\lambda = 0,01 \text{ ч}^{-1}$. Определим для $t = 50 \text{ ч}$ величины $P(t)$, $Q(t)$, $a(t)$, T .

Решение:

$$P(50) = e^{-0,01 \cdot 50} = e^{-0,5} = 0,607;$$

$$Q(50) = 1 - P(50) = 0,393;$$

$$T = 1/\lambda = 100 \text{ ч}; \quad a(50) = 0,01 \cdot e^{-0,01 \cdot 50} \approx 0,00607 \text{ ч}^{-1}.$$

2. *Распределение Рэлея.* Предположим, что $\sigma = 100 \text{ ч}$. Определим для $t = 50 \text{ ч}$ величины $P(t)$, $Q(t)$, $a(t)$, $\lambda(t)$, T .

Решение:

$$P(50) = e^{-\frac{2500}{20000}} = e^{-0,125} \approx 0,88;$$

$$Q(50) = 1 - P(50) \approx 0,12;$$

$$a(50) = \frac{50}{10000} e^{-\frac{2500}{20000}} \approx 0,005 \cdot 0,88 = 0,0044 \text{ ч}^{-1};$$

$$\lambda(50) = \frac{50}{10000} = 0,005 \text{ ч}^{-1};$$

$$T = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \cdot 100 \approx 126 \text{ ч}.$$

3. *Нормальное распределение.* В случае, если $a \ll T_1$ (практически, если T_1), что соблюдается в большинстве случаев для элементов, используемых в ТС, получим:

$$\begin{aligned}
 Q(t) &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_0^t \exp\left[-\frac{(x-T_1)^2}{2\sigma^2}\right] dx; \\
 P(t) &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_0^t \exp\left[-\frac{(x-T_1)^2}{2\sigma^2}\right] dx; \\
 a(t) &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{(x-T_1)^2}{2\sigma^2}\right],
 \end{aligned} \tag{24}$$

где T_1 и σ – параметры нормального распределения.

Можно показать, что величина $\lambda(t)$ для нормального распределения монотонно возрастает и после значения $t=T_1$ начинает приближаться к асимптоте $y = (t - T_1)/\sigma$; $T = T_1$, $D = \sigma^2$. В случае, если неравенство $\sigma \ll T_1$ не соблюдается, следует использовать усеченное нормальное распределение. Графики, характеризующие нормальное распределение, показаны на рис. 4.

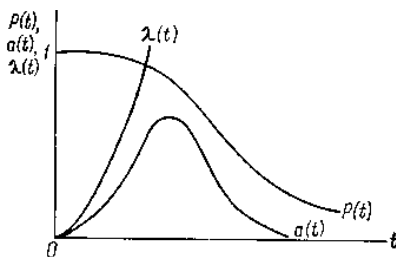


Рис. 4. Нормальное распределение

4. Гамма-распределение.

Для него имеем:

$$\begin{aligned}
 Q(t) &= \frac{\lambda_0^k}{\Gamma(k)} \int_0^t x^{k-1} e^{-\lambda_0 x} dx; \\
 P(t) &= 1 - \frac{\lambda_0^k}{\Gamma(k)} \int_0^t x^{k-1} e^{-\lambda_0 x} dx = e^{-\lambda_0 t} \sum_{i=0}^{k-1} \frac{(\lambda_0 t)^i}{i!};
 \end{aligned} \tag{25}$$

$$a(t) = \lambda_0 \frac{(\lambda_0 t)^{k-1}}{\Gamma(k)} e^{-\lambda_0 t},$$

где λ_0 и k – параметры гамма-распределения; $\Gamma(k)$ – гамма-функция.

После подстановки в соответствующие формулы получим:

$$\lambda(t) = \frac{a(t)}{P(t)} = \frac{\lambda_0 (\lambda_0 t)^{k-1}}{\Gamma(k) \sum_{i=0}^{k-1} \frac{(\lambda_0 t)^i}{i!}};$$

$$T = \int_0^{\infty} P(t) dt = \int_0^{\infty} e^{-\lambda_0 t} \sum_{i=0}^{k-1} \frac{(\lambda_0 t)^i}{i!} dt = \frac{k}{\lambda_0};$$

$$D = \frac{k}{\lambda_0^2}.$$

Графики, характеризующие гамма-распределение при различных k , показаны на рис. 5.

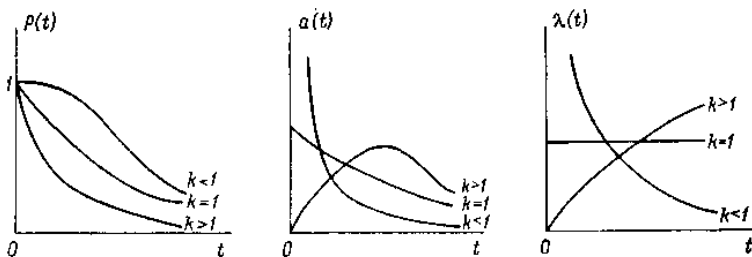


Рис. 5. Гамма-распределение

При $k = 1$ гамма-распределение переходит в экспоненциальное, а при целочисленных k – в распределение Эрланга. Кроме того, при $k = m/2$ и $\lambda_0 = 1/2$ имеем χ^2 -распределение.

5. Распределение Вейбулла. Для него имеем:

$$Q(t) = 1 - e^{-\lambda_1 t^m};$$

$$P(t) = 1 - e^{-\lambda_1 t^m} \quad (26)$$

$$a(t) = \lambda_1 m t^{m-1} e^{-\lambda_1 t^m},$$

где λ_1 и m – параметры распределения Вейбулла.

После подстановки в соответствующие формулы получим:

$$\lambda(t) = \frac{a(t)}{P(t)} = \lambda_1 m t^{m-1};$$

$$T = \int_0^{\infty} P(t) dt = \int_0^{\infty} e^{-\lambda_1 t^m} dt = \frac{\Gamma\left(\frac{1}{m} + 1\right)}{\lambda_1^{\frac{1}{m}}};$$

$$D = \frac{\Gamma\left(\frac{2}{m} + 1\right) - \Gamma^2\left(\frac{1}{m} + 1\right)}{\lambda_1^{\frac{2}{m}}}.$$

Графики, характеризующие распределение Вейбулла для различных значений m , показаны на рис. 6. При $m = 1$ распределение Вейбулла переходит в экспоненциальное, а при $m = 2$ – в распределение Рэлея.

В ряде случаев удобно представлять теоретическое распределение в виде суперпозиции двух или более распределений. Тогда частота отказов суммарного распределения будет представлять собой сумму частот отказов составляющих случайных величин. Таким образом,

$$a(t) = c_1 a_1(t) + c_2 a_2(t),$$

где c_1 и c_2 – весовые коэффициенты.

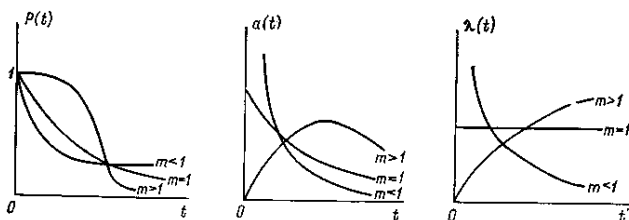


Рис. 6. Распределение Вейбулла

Очень часто встречаются суперпозиции двух экспоненциальных распределений:

$$Q(t) = 1 - c_1 e^{-\lambda_1 t} - c_2 e^{-\lambda_2 t};$$

$$P(t) = c_1 e^{-\lambda_1 t} + c_2 e^{-\lambda_2 t};$$

$$a(t) = c_1 \lambda_1 e^{-\lambda_1 t} + c_2 \lambda_2 e^{-\lambda_2 t}.$$

Очевидно, что $c_1 + c_2 = 1$. После подстановки в соответствующие формулы получим:

$$\lambda(t) = \frac{a(t)}{P(t)} = \frac{c_1 \lambda_1 e^{-\lambda_1 t} + c_2 \lambda_2 e^{-\lambda_2 t}}{c_1 e^{-\lambda_1 t} + c_2 e^{-\lambda_2 t}};$$

$$T = \int_0^{\infty} P(t) dt = \frac{c_1}{\lambda_1} + \frac{c_2}{\lambda_2}.$$

Приведенные выше распределения характеризуют непрерывные случайные величины, например, время безотказной работы или время восстановления. Наряду с этим возникает необходимость оценки дискретных случайных величин, например, числа отказов в течение заданного промежутка времени.

Наиболее часто встречаются следующие распределения дискретных случайных величин.

6. *Биноминальное распределение*. Возможные значения случайной величины для него $0, 1, \dots, n$. Вероятность появления m благоприятствующих событий из общего числа n событий равна:

$$P_n(m) = C_n^m p^m q^{n-m}. \quad (27)$$

Математическое ожидание и дисперсия соответственно равны:

$$M[m] = np; \quad D[m] = npq,$$

где p – вероятность осуществления события при однократном испытании; $q = 1 - p$.

7. *Распределение Пуассона*. Возможные значения случайной величины для него $0, 1, \dots, n$. Вероятность появления m событий равна:

$$P_m = \frac{\lambda^m}{m!} e^{-\lambda}. \quad (28)$$

Математическое ожидание и дисперсия соответственно равны:

$$M[m] = \lambda; \quad D[m] = \lambda,$$

где λ – параметр распределения.

8. *Геометрическое распределение.* Возможные значения случайной величины для него 0, 1, ..., n . Вероятность появления события точно при m испытаниях равна $P_m = pq^{m-1}$.

Математическое ожидание и дисперсия равны:

$$M[m] = \frac{1}{p}; \quad D[m] = \frac{q}{p^2}, \quad (29)$$

где p – вероятность появления события при однократном испытании; $q = 1 - p$.

Процессы появления отказов и сбоев можно рассматривать в виде некоторых потоков требований, которые необходимо обслуживать. Для потока отказов обслуживание заключается в определении места отказавшего элемента и замене его. Для потока сбоев обслуживание предполагает использование совокупности методов временной и аппаратурной избыточности, позволяющих исправить полученный неверный результат.

Широкое применение в теории надежности находит простейший поток, который характеризуется следующими свойствами:

1) стационарностью, когда вероятность появления n отказов в промежутке времени Δt зависит только от n и Δt и не зависит от положения промежутка Δt на оси времени;

2) *отсутствием последовательности*, когда вероятность наступления n отказов в течение промежутка времени Δt не зависит от того, сколько было отказов и как они распределились до момента начала промежутка Δt ;

3) *ординарностью*, когда появление в один и тот же момент времени более одного отказа невозможно. При выполнении этих условий вероятность появления n отказов в течение времени Δt определяется из следующего выражения:

$$P_n(\Delta t) = \frac{(\lambda \Delta t)^n}{n!} e^{-\lambda \Delta t}. \quad (30)$$

Очевидно, что вероятность отсутствия отказов в течение времени Δt равна:

$$P_0(\Delta t) = e^{-\lambda \Delta t}. \quad (31)$$

При оценке надежности устройств, входящих в состав ТС, необходимо учитывать следующие особенности эксплуатации.

1. В большинстве случаев устройства ТС являются восстанавливаемыми, поэтому после появления внезапного или постепенного отказа отказавший элемент заменяется на новый и эксплуатация устройства продолжится. Как показано ранее, в этом случае средняя частота отказов стремится к постоянному значению, что характеризует стационарность потока отказов.

2. Для отдельной схемы или отдельного элемента свойство ординарности очевидно, однако свойство отсутствия последействия, как правило, не соблюдается.

3. Так как после замены отказавшего элемента процесс функционирования нового элемента не зависит от предыдущего периода, то промежутки времени между отказами можно рассматривать как независимые величины, что характеризует поток отказов как поток с ограниченным последствием. В соответствии с предельной теоремой массового обслуживания суммарный поток, состоящий из стационарных, ординарных потоков с ограниченным последствием, стремится к простейшему потоку (при $k \rightarrow \infty$) с параметром $\Lambda = \sum_{i=1}^k \lambda_i$ при условии, что

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \frac{1}{\Lambda} \sum \lambda_i \varphi_{oi}(t) = 1, \quad (32)$$

где λ_i – параметры слагаемых потоков; $\varphi_{oi}(t)$ – функция Пальма – условная вероятность того, что будут отсутствовать отказы в промежутке времени (t_o, t_o+t) , если известно, что в момент t_o наступил отказ.

Условие (32) означает, что число элементов в устройствах должно быть достаточно велико, а интенсивность отказов – достаточно мала.

В результате экспериментальных исследований установлено, что интенсивность внезапных отказов элементов составляет 10^{-6} – 10^{-8} 1/ч, а интенсивность постепенных отказов схем 10^{-5} – 10^{-6} 1/ч, т. е. они являются достаточно малыми величинами. Но, с другой стороны, число элементов в ТС велико, поэтому и отказы могут быть частыми, что и определяет справедливость (32).

Таким образом, в ТС соблюдаются необходимые и достаточные условия существования простейшего потока как для внезапных, так и для постепенных отказов. Указанное обстоятельство позволяет при оценке надежности отдельного элемента использовать экспоненциальный закон надежности.

В тех же случаях, когда число схем и элементов небольшое или интенсивности их отказов достаточно велики, необходимо использовать фактически имеющийся закон надежности.

Практически поток можно считать простейшим, если будет выполнено следующее неравенство:

$$\frac{\sum_{i=1}^k \lambda_i^2}{\left(\sum_{i=1}^k \lambda_i\right)^2} \leq 0,1. \quad (33)$$

Рассмотрим вопрос о законе появления сбоев. Каждая схема, входящая в состав ТС, может характеризоваться некоторым набором параметров. Если каждый параметр рассматривать как одну из координат n -мерного пространства, то состояние схемы в любой момент времени может быть представлено точкой в этом пространстве. Совокупность всех точек, для которых схема выполняет свои функции, образует область работоспособно-

сти схемы. В процессе эксплуатации Тс имеет место изменение параметров, которые можно представить в виде суперпозиции следующих независимых друг от друга процессов. В результате старения элементов происходит медленное изменение параметров, и рабочая точка перемещается внутри области работоспособности.

Наряду со старением элементов происходят и так называемые флуктуационные колебания. Эти колебания зависят от изменения нагрузки, внешней температуры и т. д.

Если распределение единиц и нулей в числовой информации подчиняется равновероятному закону, то характер работы любой схемы остается примерно постоянным. Учитывая, что изменение параметров элементов происходит относительно медленно, можно считать, что поток сбоев является стационарным. Свойство ординарности для потока сбоев одной схемы очевидно.

Таким образом, поток сбоев является простейшим. Вероятность появления k сбоев в i -й схеме за время t равна:

$$P_{ki}(t) = \frac{(\lambda_{ci}t)^k}{k!} e^{-\lambda_{ci}t}.$$

Если в устройстве имеется n схем и появление сбоев в каждой схеме является событием независимым, то вероятность появления k сбоев за время t равна:

$$P_k(t) = \frac{(\lambda_c t)^k}{k!} e^{-\lambda_c t}; \quad \lambda_c = \sum_{i=1}^n \lambda_{ci}. \quad (34)$$

Очевидно, что вероятность отсутствия сбоев равна:

$$P_0(t) = e^{-\lambda_c t}.$$

Если рабочая точка подходит достаточно близко к границе области работоспособности, то флуктуационные колебания оказывают значительное влияние на интенсивность сбоев. Это при-

водит к появлению последствия в потоке сбоев, в результате чего интенсивность сбоев λ_{ci} становится случайной величиной. В этом случае поток сбоев может в значительной степени отличаться от простейшего.

Особенностью появления сбоев в ТС является наличие в отдельных случаях факторов, одновременно воздействующих на все схемы. Таким фактором, например, могут быть либо помехи по цепи питания, либо электромагнитные помехи от внешнего источника. Очевидно, что появление сбоя и устройстве произойдет в том случае, если хотя бы одна из схем окажется в состоянии сбоя. В этом случае поток сбоев может отличаться от простейшего и будет подчиняться другим законам.

Исследования, проведенные для элементов и устройств цифровой вычислительной техники, показали, что существует определенная зависимость между интенсивностями отказов и сбоев [1].

1.5. Надежность человека как звена технической системы

В аварийных ситуациях эмоциональное состояние человека характеризуется повышенной напряженностью (стрессом), сопровождающейся понижением работоспособности, координации движений и устойчивости психологических функций. Поведение человека в аварийных ситуациях подчиняется определенным фазовым закономерностям, наступающим в следующем порядке.

Гипермобилизация. При встрече с определенной опасностью у человека наступает мобилизация сил, когда все органы чувств находятся в напряженном состоянии. При этом снижается точность движений, что может вызвать ошибки или неверные реакции.

Потеря ориентации – неверная оценка информации, искажение процесса контроля и оценки действительных причин ошибок.

Нарушение соотношения между основными и второстепенными действиями. Для выхода из аварийной ситуации необходимы четкие действия, направленные на уменьшение или ли-

квидацию основной опасности, но при столкновении с трудностями у человека снижается внимание к главным в данной ситуации задачам, и он начинает заниматься мелочами.

Распад структур операций – усиление ошибок предыдущей фазы, т. к. практически все технологические процессы или операции имеют определенный алгоритм. При этом нарушение последовательности операций, сосредоточение внимания человека-оператора на выполнение отдельной операции не способствуют поиску выхода из аварийной ситуации.

Обострение оборонительных реакций и отказ. При наложении трудностей и неудач человек начинает больше внимания уделять поискам искусственных оправданий, обвинению других участников в невыполнении своих обязанностей. При длительном интенсивном процессе преодоления трудностей и выполнении тяжелой работы возможен отказ, когда мобилизация сил сменяется апатией.

В реальных условиях из-за дефицита времени четкое проследивание названных закономерностей может быть затруднено.

Предупреждение аварийной ситуации и правильные в смысле снижения опасности действия человека-оператора достигаются прогнозированием возможных аварийных ситуаций, их возможных последствий и необходимых действий человека. Другим важным условием является соответствующая тренировка умения работать в режиме, близком к аварийному, однако следует знать, что данное условие трудновыполнимо в длительном промежутке времени, т. к. человек не может долго работать на пределе своих психофизиологических возможностей.

Поведение человека в экстремальных условиях деятельности является проявлением и результатом психологической готовности к деятельности.

В психологической готовности выделяют: заблаговременную, общую (или длительную) готовность и временную, ситуативную (состояние готовности). Первое представляет собой ранее приобретенные установки, задания, навыки, умения, мотивы деятельности. На основе их возникает состояние готовности к выполнению тех или иных текущих задач деятельности. Временное состояние готовности – это актуализация, приспособле-

ние всех сил, создание психологических возможностей для успешных действий в данный момент. Ситуативная готовность — это динамичное целостное состояние личности, внутренняя настроенность на определенное поведение, мобилизованность всех сил на активные и целесообразные действия. Готовность человека к успешным действиям в аварийной ситуации складывается из его личностных особенностей, уровня подготовленности, полноты информации о случившемся, наличии времени и средств для ликвидации аварийной ситуации, наличия информации об эффективности предпринимаемых мер. Анализ поведения человека в аварийной ситуации показывает, что наиболее сильным раздражителем, приводящим к ошибочным действиям, является именно неполнота информации. Нужна предварительная и достаточно высокая психологическая готовность, которая позволила бы компенсировать недостаток информации. Для этого необходимы тренировки, развивающие быстроту мышления, подсказывающие, как использовать прежний опыт для успешных действий в условиях неполной информации, формирующие способность переключения с одной установки на другую и способность к прогнозированию и предвосхищению. В ходе таких тренировок необходимо увеличить объем и распределяемость внимания и подготовить человека к тому, чтобы в аварийной ситуации он воспринимал не все элементы производственной ситуации, а только необходимые.

Предупредить скованность, связанную с переоценкой возникающего усложнения решаемой задачи, помогает планирование своих действий: воображаемое их «проигрывание», предварительная обработка возможных вариантов действий при возникновении тех или иных положений в работе вплоть до аварийных.

У каждого человека есть свой «набор» приемов выхода из трудной ситуации. Но самоуправление всегда предполагает умение вводить в поле сознания нужные в данный момент мысли, представления, впечатления и блокировать или ограничивать с их помощью отрицательных воздействий и переживаний. Возможности самоуправления увеличиваются, если специалист внутренне и внешне активен в критической ситуации. В этом

случае у него повышается способность владеть собой, преодолевать напряженность, более правильно использовать свои знания, умения и навыки.

Способами самомобилизации и регуляции своего управления являются: самоубеждение, самоприказ, самоободрение (например, сохранить стойкость и готовность к действию некоторым специалистам помогало чувство личной удачливости, основанное на предшествующем опыте успешного преодоления сложных препятствий), самоанализ (снять эмоциональную напряженность помогает анализ вызвавших ее причин), отвлечение сознания с помощью «умственного действия» (концентрация внимания не на исходе дела, а на технике решения задачи, технических приемах); наконец, устранение признаков эмоциональной напряженности.

Профотбор. Задача профотбора – определение пригодности человека к данной работе. При этом следует различать готовность и пригодность к работе по той или иной профессии. Профессиональная готовность определяется исходя из уровня образования, опыта и подготовки исполнителя. Профессиональная пригодность устанавливается с учетом степени соответствия индивидуальных психофизиологических качеств данного человека конкретному виду деятельности.

Профотбор представляет собой специально организуемое исследование, основанное на четких качественных и количественных оценках с помощью ранжированных шкал, позволяющих не только выявить, но и измерить присущие человеку свойства с тем, чтобы сопоставить их с нормативами, определяющими пригодность к данной профессии. Для изучения профессионально важных качеств человека используют анкетный, аппаратный и тестовый методы.

Анкетный метод заключается в том, что с помощью определенным образом сформулированных и сгруппированных вопросов получают информацию о профессиональных интересах и некоторых свойствах человека. Анкеты могут быть самооценочными, когда испытуемый сам дает оценку своих качеств, и внешнеоценочными, когда оценку дает эксперт на основе обоб-

щения данных, получаемых от лиц, длительное время наблюдавших за испытуемым.

Аппаратурный метод состоит в том, что отдельные психофизиологические факторы выявляют и оценивают с помощью специально сконструированных приборов и аппаратуры. Наряду с приборами, обеспечивающими общее исследование психофизиологических свойств, на предприятиях конструируются установки, имитирующие тот или иной трудовой процесс. Они служат для определения наличия у испытуемого качеств, важных для данной работы, а также как тренажеры при обучении соответствующей профессии.

Тестовый метод располагает наборами тестов, предлагаемых испытуемому, в процессе решения которых выявляются те или иные психофизиологические свойства. Этот метод в настоящее время активно используется за рубежом.

Тесты делятся на следующие группы:

- тесты определения способностей, которые служат для установления общего уровня интеллекта, пространственного воображения, точности восприятия, психомоторных способностей;
- тесты проверки зрения и слуха, назначение которых вытекает из самого названия;
- личностные тесты, ставящие цель оценить такие качества, как импульсивность, активность, чувство ответственности, уравновешенность, общительность, осторожность, уверенность в себе, оригинальность мышления;
- тесты определения уровня квалификации, применяемые для проверки профессиональных навыков.

Исходным материалом для проведения работы по профессиональному подбору (отбору) являются профессиограммы, которые составляются на соответствующие профессии на основе всестороннего изучения трудового процесса, проведения необходимых исследований, опроса самих работников, использования литературных источников. Профессиограммы представляют собой описание профессионально важных свойств и качеств. В них объективные особенности трудового процесса – технические, технологические, организационные – находят выражение

в физиологических, психических и социально-психологических показателях. Перечень этих показателей приведен в табл. 3.

Таблица 3

Профессиональные показатели важных свойств и качеств личности

Группы показателей	Виды показателей	
I	Физические	Затраты мышечной энергии. Выносливость к физическим усилиям. Динамическая и статическая нагрузки. Выносливость к климатическим изменениям. Сила рук
II	Психосенсорные	Острота и точность зрения, слуха, тактильных и кинестетических ощущений. Чувствительность к различию ощущений. Восприятие предметов в статическом положении и движении. Восприятие пространства и времени.
III	Психомоторные	Темп движения. Скорость двигательной реакции. Ритм. Координация движений. Устойчивость движений. Точность движений
IV	Интеллектуальная сфера	Особенность внимания. Наблюдательность. Зрительная, слуховая и двигательная память. Воображение. Особенности мышления. Понимание технических устройств и существа техпроцессов

Продолжение табл. 3

V	Темперамент и характер	Тип наивысшей нервной деятельности. Эмоционально-волевые качества. Целеустремленность. Настойчивость. Старательность. Инициативность. Активность. Организованность
VI	Социально-психологические	Способность к сотрудничеству. Чувство товарищества и коллективизма. Отношение к труду

По своим психофизиологическим свойствам люди различаются, и эти различия необходимо учитывать. Причем большинство свойств в силу масштабности человеческого организма развивается и изменяется в процессе индивидуальной жизни. Направление воспитания и обучения дает положительный эффект, однако степень его может быть неодинакова, т. к. имеются относительные ограничения изменчивости и психофизиологических свойств человека, таких как пороги ощущения, объем оперативной памяти. Поэтому профессиональный психологический отбор операторов ставит задачу выявить людей, у которых процесс обучения дает максимальный эффект при минимальном времени обучения. Ниже приведены психофизиологические признаки, которые учитываются при отборе операторов.

Профессиональная пригодность: положительная мотивация к данной специальности; порог ощущения опасности; хороший глазомер; устойчивость, концентрация, распределение внимания; нормальное состояние двигательного аппарата; высокая пропускная способность.

Профессиональная непригодность: наличие хронического заболевания и травм; низкий порог ощущения опасности; плохое зрение; невнимательность, рассеянность; отсутствие положительных мотивов к данной работе и т. д.

Взаимодействие человека с техническими системами.

Технические системы становятся взаимосвязанными только благодаря наличию такого основного звена, как человек. Согласно данным, примерно 20–30 % отказов прямо или косвенно связаны с ошибками человека; 10–15 % всех отказов непосредственно связаны с ошибками человека.

Ввиду этого, анализ надежности реальных систем должен обязательно включать и человеческий фактор.

Надежность работы человека определяется как потребность успешного выполнения им работы или поставленной задачи на заданном этапе функционирования системы в течение заданного интервала времени при определенных требованиях к продолжительности выполнения работы.

Ошибка человека определяется как невыполнение поставленной задачи (или выполнение запрещенного действия), которое может явиться причиной повреждения оборудования или имущества либо нарушения нормального хода запланированных операций.

В реальных условиях в большинстве систем независимо от степени их автоматизации требуется в той или иной мере участие человека.

Можно утверждать, что там, где работает человек, появляются ошибки. Они возникают независимо от уровня подготовки, квалификации или опыта. Поэтому прогнозирование надежности оборудования без учета надежности работы человека не может дать истинной картины.

Ошибки по вине человека могут возникнуть в тех случаях, когда оператор или какое-либо лицо стремится к достижению ошибочной цели; поставленная цель не может быть достигнута из-за неправильных действий оператора; оператор бездействует в тот момент, когда его участие необходимо.

Виды ошибок, допускаемых человеком на различных стадиях взаимодействия в системе «человек – машина» можно классифицировать следующим образом:

1. Ошибки проектирования: обусловлены неудовлетворительным качеством проектирования. Например, управляющие устройства и индикаторы могут быть расположены настолько

далеко друг от друга, что оператор будет испытывать затруднения при одновременном пользовании ими.

2. Операторские ошибки: возникают при неправильном выполнении обслуживающим персоналом установленных процедур или в тех случаях, когда правильные процедуры вообще не предусмотрены.

3. Ошибки изготовления: имеют место на этапе производства вследствие (а) неудовлетворительного качества работы, например неправильной сварки, (б) неправильного выбора материала, (в) изготовления изделия с отклонениями от конструкторской документации.

4. Ошибки технического обслуживания: возникают в процессе эксплуатации и обычно вызваны некачественным ремонтом оборудования или неправильным монтажом вследствие недостаточной подготовленности обслуживающего персонала, неудовлетворительного оснащения необходимой аппаратурой и инструментами.

5. Внесение ошибок: как правило, это ошибки, для которых трудно установить причину их возникновения, т. е. определить, возникли они по вине человека или же связаны с оборудованием.

6. Ошибки контроля: связаны с ошибочной приемкой как годного элемента или устройства, характеристики которого выходят за пределы допусков, либо с ошибочной отбраковкой годного устройства или элемента с характеристиками в пределах допусков.

7. Ошибки обращения: возникают вследствие неудовлетворительного хранения изделий или их транспортировки с отклонением от рекомендаций изготовителя.

8. Ошибки организации рабочего места: теснота рабочего помещения, повышенная температура, шум, недостаточная освещенность и т. п.

9. Ошибки управления коллективом: недостаточное стимулирование специалистов, их психологическая несовместимость, не позволяющие достигнуть оптимального качества работы.

Свойства человека ошибаться является функцией его психологического состояния. Интенсивность ошибок во многом

определяется параметрами внешней среды, в которой человек работает.

Ошибки человека можно распределить по трем уровням и на каждом уровне возможно предвидение ошибок. Например, на уровне 1 можно предотвратить ошибки человека; на уровне 2 можно избежать нежелательных последствий ошибок, корректируя неправильное функционирование системы вследствие ошибок, внесенных по вине человека; на уровне 3 можно исключить повторное возникновение тех или иных ситуаций, приводящих к ошибкам человека.

Зависимость эффективности работы человека от уровня нагрузок. Соотношение между качеством работы человека и действующими нагрузками показывает, что зависимость частоты появления ошибок от действующих нагрузок является нелинейной. При очень низком уровне нагрузок большинство операторов работают неэффективно (так как задание кажется скучным и не вызывает интереса) и качество работы далеко от оптимального. При умеренных нагрузках качество работы оператора оказывается оптимальным, и поэтому умеренную нагрузку можно рассматривать как достаточное условие обеспечения внимательной работы человека-оператора, при дальнейшем увеличении нагрузок начинает ухудшаться, что объясняется, главным образом, такими видами физического стресса, как страх, беспокойство и т. п.

ГЛАВА II. КРИТЕРИИ НАДЕЖНОСТИ

2.1. Влияние климатических факторов на надежность

Климатические факторы в своей совокупности образуют ту внешнюю среду, в которой эксплуатируются технические системы. Без изучения и исследования этой среды невозможно создавать надежные машины и системы, эксплуатируемые на открытом воздухе, как невозможно бороться с болезнью, не исследовав ее возбудителей.

Климат на территории Республики Казахстан весьма разнообразен, что определяет различную картину его количественного и качественного влияния на надежность технических систем.

На формирование климата определенной территории влияет комплекс климатообразующих факторов и климатических элементов. Рассмотрим это влияние.

Под климатическими факторами внешней среды или просто под климатическими факторами понимаются климатообразующие факторы, климатические элементы и атмосферные явления, рассматриваемые в климатологии и оказывающие влияние на свойства материалов и надежность машин.

Известно, что формирование климата определенной достаточно большой территории обуславливается воздействием следующих климатообразующих факторов: режима солнечной радиации, циркуляции атмосферы, влагооборота, местных физико-географических особенностей (рельеф, подстилающая поверхность) и воздействия человека на климат (создание крупных водохранилищ и другие).

С климатообразующими факторами тесно связаны следующие основные климатические элементы: температура воздуха и почвы, влажность воздуха, осадки, облачность и солнечное сияние, снежный покров, испарение и испаряемость и др.

К атмосферным явлениям, оказывающим влияние на надежность машин, относятся: туманы, метели, иней, изморозь, гололед, пыльные бури и некоторые другие.

На свойства конструкционных и эксплуатационных материалов машин и, следовательно, на их надежность оказывают

существенное влияние далеко не все климатические элементы, распространяемые в климатологии. К таким элементам относятся: облачность, формы и состав облачности, число ясных и пасмурных дней, температура верхних слоев почвы и другие.

Наиболее существенное влияние на технические системы оказывают: солнечная радиация, низкие и высокие температуры воздуха, суточные амплитуды температуры воздуха, влажность воздуха, скорость ветра, туманы, метели, пыльные бури и другие. Качественные и количественные изменения свойств материалов зависят от интенсивности и продолжительности, воздействия перечисленных факторов и их наиболее неблагоприятные сочетания. Общая схема комплексного воздействия основных климатических факторов внешней среды на свойства материалов и надежности показано на рис. 7.

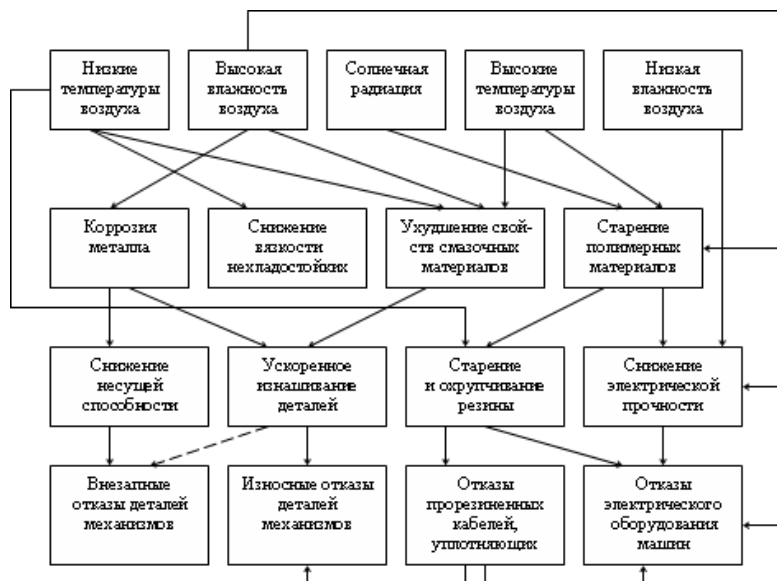


Рис. 7. Схема комплексного воздействия основных климатических факторов внешней среды на свойства материалов и виды отказов машин

Воздействие климатических факторов определяет появление определенного вида отказов и, кроме того, интенсифицирует потоки отказов, определяемых появлением случайных перегрузок, усталостными явлениями в металле, действием сил трения и др. Чем интенсивнее воздействуют климатические факторы на свойства материалов и надежность машин, тем жестче (суровее) климат и погода. Интенсивность воздействия комплекса климатических факторов внешней среды на свойства материалов и на надежность технических устройств удобно характеризовать как техническую жесткость климата и погоды.

Схема комплексного воздействия основных климатических факторов внешней среды на свойства материалов и виды отказов машин представлена на рис.7.

Необходимо, прежде всего, проанализировать характер влияния климатических факторов на свойства конструкционных и эксплуатационных материалов машин.

Солнечная радиация является основным фактором формирования теплового режима атмосферы и поверхности земли. Поэтому влияние на свойства материалов низких и высоких температур воздуха определяется, в конечном счете, влиянием солнечной радиации на тепловой режим воздуха.

Непосредственное влияние солнечной радиации на свойства материалов и надежность машин проявляется в двух формах:

1) воздействие солнечной радиации на полимерные материалы, используемые в конструкциях машин, вызывающее старение этих материалов;

2) воздействие прямой и рассеянной солнечной радиации на металлические элементы машин, вызывающее повышение температуры, как самих элементов, так и объемов воздуха, заключенного внутри этих элементов (кузовах, кабинах управления, корпусах редукторов и др.).

На старение полимерных и олигомерных материалов солнечная радиация (особенно ее ультрафиолетовая часть) оказывает определяющее влияние: энергия ультрафиолетового излучения солнца достаточна для разрушения многих связей в макромолекулах полимеров и олигомеров.

В связи со значительным и всевозрастающим внедрением полимерных материалов в конструкции современных машин (изоляционные материалы, детали из резины и резиноасбестовых композиций и другие) солнечная радиация, воздействуя на эти материалы, вызывает определенные отказы машин.

На старение полимерных и олигомерных материалов кроме солнечной радиации также оказывают влияние тепло, влага, кислород воздуха и другие (атмосферное и озонное старение), однако эти факторы только ускоряют процесс старения, определяемый воздействием солнечной радиации. В свою очередь, скорость старения полимеров под воздействием солнечной радиации зависит от ее интенсивности, доли ультрафиолетового излучения в солнечном спектре и лучепоглощающей способности полимеров.

Исследованиями установлено, что старение большинства полимеров натурального цвета происходит при интенсивности радиации, превышающей $0,4 \text{ кал/}(\text{см}^2 \cdot \text{мин})$. Интенсивность солнечной радиации в летнее время, даже в самых северных районах нашей страны, значительно превосходит это критическое значение, опасность старения полимерных материалов под действием солнечной радиации существует на всей территории Республики Казахстан.

Известно, что в основе старения полимерных материалов лежат два одновременно протекающих процесса: процесс деструкции – разрыва связей между атомами и образованием осколков молекул полимера и процесс структурирования образования новых связей между образовавшимися осколками молекул и целыми молекулами. В результате старения полимерных материалов изменяются (ухудшаются) их механические и электрические свойства, цвет и др. В результате старения уменьшаются показатели электрической прочности полимерных изоляционных материалов, что вызывает увеличение параметра потока отказов электрического оборудования машин. Скорость старения полимерных материалов можно значительно снизить путем изменения лучепоглощающей способности (повышения светостойкости и теплостойкости) и введения в полимеры специальных веществ (стабилизаторов), замедляющих процесс деструк-

ции и стабилизирующих процесс старения. Однако стабилизаторы только замедляют, а не прекращают процесс старения полимерных материалов.

Низкие и высокие температуры наружного воздуха оказывают наиболее существенное влияние на физические свойства конструкционных и эксплуатационных материалов, на надежность элементов, механизмов и технических систем.

Низкие температуры (рис. 8) воздуха воздействуют на ТС непосредственно, изменяя (главным образом ухудшая) основные физико-механические свойства материалов, использованных в конструкции машин (сталей, полимерных материалов и других) или используемых при ее работе (смазочных материалов, технических жидкостей и других, и косвенно изменяя (ухудшая) условия работы машины вследствие попадания снега в открытые механизмы, образования инея, наледей и др.

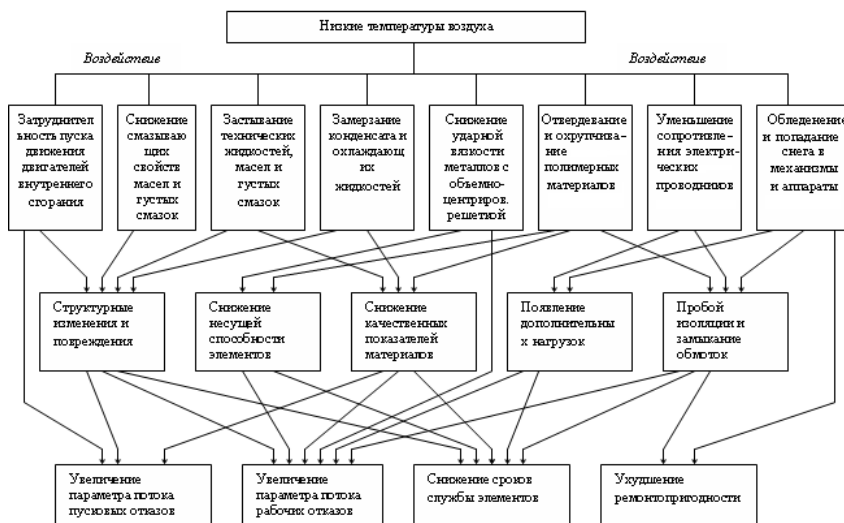


Рис. 8. Общая схема влияния низких температур воздуха на свойства материалов и надежность машин

Одной из главных причин увеличения параметра потока отказов машин в зимние месяцы является учащенные хрупкие разрушения стальных деталей и элементов металлических конструкций. Эти разрушения являются следствием перехода металла из вязкого состояния в хрупкое, следствием хладноломкости сталей. Наибольшую склонность к низкотемпературной хрупкости имеют стали с объемной центрированной металлической решеткой.

Наибольшее влияние низкие температуры воздуха оказывают на хладостойкие необработанные – обычно углеродистые, термические необработанные стали и наименьшее – на легированные термически обработанные стали.

При низких температурах и высокой влажности воздуха на поверхностях фрикционных накладок и шкивов разомкнутых тормозов образуются тонкие слои инея, которые при замыкании тормоза снижают его начальный тормозной момент. Такое снижение может вызывать отказы тормозов машин в начальный период торможения.

Низкие температуры воздуха вызывают многократное увеличение вязкости смазочных материалов, технических жидкостей и жидкого топлива двигателей. Загустевшие смазки в значительной степени теряют свои смазывающие свойства (прилипаемость, вязкость), что ухудшает условия работы узлов трения и может привести к их отказу. Применение низкотемпературных смазочных материалов и технических жидкостей способно в значительной мере ослабить неблагоприятное воздействие низких температур воздуха.

Вследствие увеличения вязкости дизельного топлива и масел и общего охлаждения двигателей внутреннего сгорания их пуск в работу при низких температурах оказывается весьма затруднительным или невозможным: появляются особые виды отказов – пусковые отказы машин. Системы повышения пусковой надежности машин путем применения специальных пусковых жидкостей, предварительного подогрева двигателей и другие не всегда эффективны и достаточно дороги. Схема влияния высоких температур воздуха на свойства материалов и условия работы агрегатов и надежность машин показана на рис. 9. На-

более неблагоприятно воздействие низких температур воздуха на электрические машины, двигатели внутреннего сгорания, компрессоры и электроаппаратуру. В результате воздействия главным образом высоких температур воздуха параметры потока отказов электрооборудования экскаваторов, электровозов и других машин в летние месяцы значительно увеличиваются.

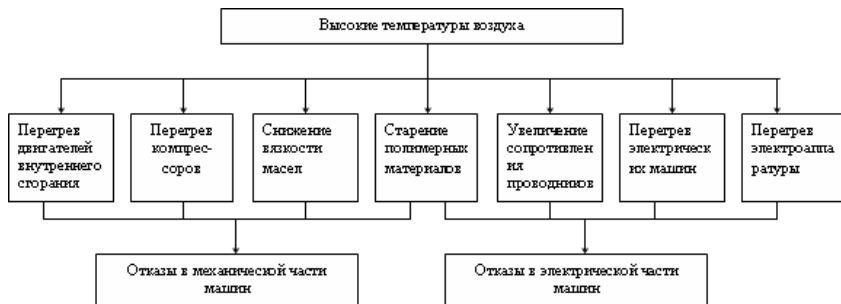


Рис. 9. Схема влияния высоких температур воздуха на свойства материалов, условия работы агрегатов и надежность машин

В зонах высокой континентальности климата действуют как весьма низкие температуры воздуха зимой, так и достаточно высокие температуры воздуха летом. Для надежного функционирования машин в условиях резко континентального климата необходимо, чтобы они были рассчитаны для работы как в условиях весьма низких, так и высоких температур воздуха. Районы наивысшей и резкой континентальности климата характеризуются также высокими суточными амплитудами температур воздуха. Высокая континентальность климата неблагоприятно влияет на надежность машин, определяя необходимость сезонной переналадки электрооборудования экскаваторов, сезонной замены смазочных материалов и технических жидкостей и др.

При работе машин в резко континентальном климате температура проводника (обмоток машин) может изменяться (с учетом электроподогрева) от -50°C до $+70^{\circ}\text{C}$, что значительно изменяет характеристику электрических двигателей. При низких температурах электрические двигатели, приобретая дополнительную

мощность за счет уменьшения сопротивления проводников, позволяют сократить время разгона механизма до значений ниже расчетных. При этом создаются значительные инерционные нагрузки, вызывающие поломки (стрел и рукоятей экскаваторов и др.). При высоких температурах (летом) двигатели теряют мощность, машина вынуждена работать на пониженных нагрузках, что снижает ее производительность.

Для устранения влияния температур на сопротивление обмоток электрических машин необходимо регулировать сопротивление в цепях их управления (сезонная переналадка электрически машин), которое, к сожалению, не всегда производится.

При большом суточном изменении температуры воздуха скорость ее достигает значительных величин (до 20 °С/ч).

На технические системы ветер оказывает двойное влияние: как нагрузочный фактор, создающий ветровые нагрузки на элементы машин, и как фактор, ускоряющий или замедляющий неблагоприятные процессы в машинах. Ветровые нагрузки, воздействуя на металлические конструкции, могут создавать напряжения в элементах вплоть до разрушения. Влияние ветра как фактора, ускоряющего или замедляющего вредные процессы в машинах, неоднозначно и зависит от температуры наружного воздуха. При высоких температурах воздуха ветер благотворно влияет на охлаждение электрических двигателей внутреннего сгорания, компрессоров и др. В то же время при высоких температурах ветер ускоряет процессы высыхания изоляции обмоток электрических машин и аппаратов.

При низких температурах ветер ускоряет процессы охлаждения элементов машин. Такое охлаждение наиболее неблагоприятно для устройств, являющихся источниками или проводниками тепла – двигателей внутреннего сгорания, подогревающих устройств и др. Ветер интенсифицирует процесс охлаждения смазочных материалов, технических жидкостей, сжатого воздуха, конденсата и др. Наиболее существенно влияние ветра в сочетании с низкими температурами на пусковую надежность двигателей внутреннего сгорания и надежность двигателей гидравлических и пневматических устройств машин. При охлаждении или нагреве металлических конструкций вследствие изме-

нений температуры воздуха ветер ускоряет процессы их охлаждения или нагрева и, таким образом, косвенно влияет на величины напряжений в элементах машин. При установившейся температуре воздуха ветер не оказывает заметного влияния на напряжения в элементах металлоконструкций (без учета его силового воздействия).

Ветер в районах холодного климата вызывает метели, неблагоприятно влияющие на надежность машин вследствие заноса снега в токоприемные устройства, механизмы и др.

Ветер в условиях пустынь и полупустынь вызывает пыльные и песчаные бури, что весьма неблагоприятно влияет на надежность машин. Выделяемая при работе машин пыль заносится в механизмы и устройства машин, при этом в наименее благоприятных условиях оказываются устройства, расположенные с подветренной стороны.

Следует отметить, что ветер в сочетании с низкими температурами оказывает исключительно неблагоприятное воздействие на человека вследствие резкого увеличения теплоотдачи организмом. В этих условиях система человек–машина может претерпеть значительные изменения: снижается совершенство управления машиной, увеличивается вероятность случайных ошибок и др.

Влага, содержащаяся в воздухе, оказывает неблагоприятное влияние на свойства материалов и надежность машин (рис. 10). При высокой влажности воздуха ускоряется процесс коррозии металлов, ухудшается электрическая прочность изоляционных материалов, происходит обводнение смазочных материалов, старение полимерных материалов, рост плесени и др. В табл. 4 приведены данные влияния типа атмосферы на скорость атмосферной коррозии углеродистых и слаболегированных сталей.



Рис. 10. Схема влияния влажности воздуха на процессы в материалах и надежность машин

Таблица 4

Влияние типа атмосферы на скорость атмосферной коррозии

Атмосфера	Скорость коррозии, мк/год
Чистая сухая	0–5
Чистая влажная	0–30
Влажная загрязненная	100
Приморье	100
Побережье (до 1 км)	100–200

Осаждаясь на изоляционных материалах, влага снижает их поверхностное и объемное сопротивления. При увеличении влажности воздуха (во время дождя, утреннего тумана и др.) влага, попадая в трещины, вызывает снижение электрической прочности изоляции, что может приводить к пробое изоляции. Высокая влажность воздуха изменяет характеристику тормозных устройств в сторону снижения тормозного момента. Повы-

шение относительной влажности воздуха с 70 до 97 % увеличивает время торможения на 25 %. При низкой влажности воздуха происходят процессы высыхания изоляции, густых смазок, уплотняющих устройств (манжет) из кожи и ее заменителей и др.

Дополнительные внешние нагрузки на металлоконструкции и детали ТС создают такие атмосферные явления как гололед, обледенение, изморось, иней и метель. Обледенение, изморось и иней, образуясь на неизолированных токоведущих элементах, могут вызывать короткое замыкание. При тумане так же, как и при дожде и снегопаде, свободная влага, попадая на контактирующие поверхности не укрытых тормозов механизмов напора и хода экскаваторов и другие, значительно снижает развиваемый тормозом тормозной момент и увеличивает время торможения. Последнее может служить причиной недостаточно надежного торможения или отказа тормозов. Во время пыльных бурь пыль и песок, попадая между тормозным шкивом и фрикционными накладками, увеличивают коэффициент трения и тормозной момент, развиваемый тормозом. При неизменной характеристике тормоза и инерционных масс это приводит к уменьшению времени торможения.

На физические свойства значительной части конструкционных эксплуатационных материалов, и надежность машин влияет продолжительность воздействия таких климатических факторов, как солнечная радиация, влажность воздуха, температура воздуха и др. Так, например, процессы естественного старения полимерных материалов зависят не только от интенсивности солнечной радиации, температуры и влажности воздуха, но и от продолжительности воздействия этих факторов. Снижение электрических свойств изоляционных материалов также зависит от продолжительности воздействия влаги, тепла и др.

В результате длительного воздействия низких температур происходит устойчивое обледенение элементов машин, замерзание вытекающей смазки и др. В результате длительных метелей и пыльных бурь снег и пыль проникают в токоприемные устройства, открытые зубчатые передачи, тормоза и другие, что снижает безотказность их функционирования. Из характеристик годового хода радиации, температур воздуха, влажности возду-

ха и других видно, что продолжительность воздействия этих факторов в различных пунктах территорий Республики Казахстан различна. Так, например, воздействия прямой солнечной радиации при ясном небе интенсивностью более 1 кал/(см²/мин) в г. Актау происходит в течение 11 мес., а на севере Республики – в течение 6 мес.

Кроме прямого воздействия на элементы ТС климатообразующие факторы и климатические элементы неблагоприятно действуют в сочетании с другими факторами, и в первую очередь с горно-геологическими факторами.

При ветре пыль поднимается в воздух, образуя черные пыльные бури. Такие ситуации создаются, например, на Ангренском угольном карьере. Анализ образцов пыли, взятых на этом карьере, показал, что в ней содержится до 60 % угля. Кроме снижения видимости (до 100 м) такие пыльные бури заносят пыль с высоким содержанием угля в токоприемные устройства, электрические машины и аппараты, вызывая короткие замыкания в электрических цепях.

Пыльные бури на большей части территории Средней Азии представляют собой песчаные бури. Высокоабразивная пыль и песок, попадая в смазку и через нее на контактирующие поверхности подвижных соединений, интенсифицируют процессы их механического, и в первую очередь абразивного, изнашивания.

Низкие температуры, действуя на влажные грунты, вызывают их смерзание, вследствие чего увеличивается предел прочности мерзлых грунтов. Воздействие низких температур на влажные грунты может приводить к примерзанию гусениц и опорных баз экскаваторов.

Воздействие влаги на вязкие породы вызывает их налипание в ковше, что снижает производительность экскаваторов.

Климатические факторы внешней среды, оказывая весьма неблагоприятное влияние на свойства конструкционных и эксплуатационных материалов, оказывают тем самым влияние на параметры потока отказов и общую надежность машин, эксплуатируемых на открытом воздухе. Комплекс климатических факторов внешней среды районов холодного климата наиболее интенсивно воздействуют в зимние месяцы, а комплекс районов

жаркого климата – в летние месяцы. Это определяет увеличение параметра потока отказов механического оборудования машин – в зимние месяцы и электрического оборудования – в летние месяцы. На рис. 11 приведены графики распределения по месяцам параметра потока отказов ω механического и электрического оборудования экскаваторов.

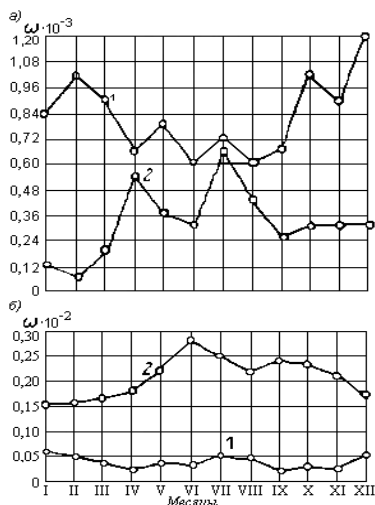


Рис. 11. Графики распределения по месяцам параметров потока отказов оборудования экскаваторов ЭКГ-4 и ЭКГ-4,6 при эксплуатации

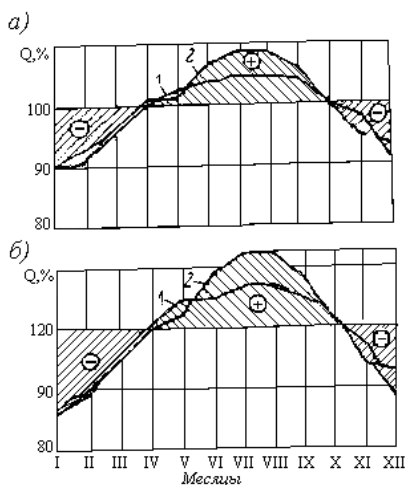


Рис. 12. График изменения по месяцам производительности: а – железнодорожный транспорт; б – экскаваторов, работающих на железнодорожном транспорте

Увеличение параметра потока отказов горно-транспортного оборудования в зимние и летние месяцы оказывает влияние на производительность этого оборудования и карьеров, себестоимость продукции и др. На карьерах, расположенных в зоне холодного климата, в зимние месяцы, как правило, происходит снижение производительности машин. На рис. 12 в качестве примера приведены графики изменения по месяцам производи-

тельности железнодорожного транспорта и экскаваторов, работающих на железнодорожном транспорте.

2.2. Критерии надежности

Надежность машины или детали зависит от многих факторов, большинство из которых являются случайными.

Основными критериями надежности являются: а) вероятность безотказной работы в течение заданного отрезка времени $p(t)$; б) частота отказов $a(t)$; в) интенсивность отказов $\lambda(t)$; г) параметр потока отказов $\omega(t)$ и д) среднее время безотказной работы $T_{\text{ср}}$.

Определение критерия надежности как функции отношения действительной и идеальной характеристик позволяет делать сравнительную оценку надежности деталей и узлов в очень широких пределах.

При анализе надежности элементов и систем в каждом конкретном случае используют тот критерий, который наиболее полно отражает условия эксплуатации и наличие отказов.

В различных областях техники получили широкое распространение и другие количественные характеристики надежности.

Критерий надежности – это признак, по которому оценивается надежность аппаратуры.

Надежность зависит от многих факторов, большинство из которых являются случайными. Надежность трудно измерить, т. к. не существует прибора, который мог бы указать величину надежности данного конкретного образца. Отсюда следует, что достаточно полно оценить такое свойство системы, как надежность, можно только с помощью большого числа критериев.

Количественное значение критерия называют *количественной характеристикой* или просто *характеристикой* надежности. Количественная характеристика надежности является техническим параметром элемента, прибора, системы и т. п.

Надежность ТС зависит от количества и качества элементов, входящих в аппаратуру, от режимов работы элементов, от схемного и конструктивного выполнения. Надежность элементов ТС в свою очередь зависит от технологии изготовления, качества материалов и т. п.

Существенное влияние оказывают также условия и качество эксплуатации. Так как большинство факторов являются случайными, то надежность ТС целесообразно оценивать статистически. Поэтому критерии и количественные характеристики надежности, широко используемые в настоящее время, имеют вероятностный характер. Такими критериями и количественными характеристиками могут быть: вероятность безотказной работы, среднее время безотказной работы, интенсивность отказов, частота отказов, различные коэффициенты надежности и т. д.

Эти и другие количественные характеристики дают представление о надежности всей ТС какого-то типа. В силу своих вероятностных свойств они не позволяют оценить (предсказать) надежность данного конкретного образца. Тем не менее, указанные критерии и количественные характеристики позволяют сравнивать ТС по надежности, оценивать надежность числом, намечать пути повышения надежности, эффективнее эксплуатировать ТС.

Сохранность есть свойство ТС находиться в исправном состоянии в процессе хранения. Так же, как и надежность, сохранность есть свойство аппаратуры сохранять выходные характеристики в определенных пределах. Если полагать, что хранение есть неотъемлемая часть эксплуатации, то понятие сохранности отождествляется с понятием надежности для специфических условий – хранения ТС.

Сохранность системы зависит от большого числа факторов, большинство из которых являются случайными. Поэтому оценить этот параметр можно с помощью вероятностных методов. Сохранность является достаточно сложным параметром, поэтому никакой одной характеристикой невозможно оценить его полностью. Для достаточно полной оценки сохранности необходимо иметь несколько критериев и количественных характеристик. Такими критериями могут быть все критерии надежности.

Особенность ТС состоит в том, что в условиях ее хранения преобладают постепенные отказы из-за ухудшения характеристик элементов вследствие их старения. При этом даже для однотипных элементов зависимость параметров системы от вре-

мени является случайной функцией. Подобные зависимости для основного параметра элемента приведены на рис. 13.

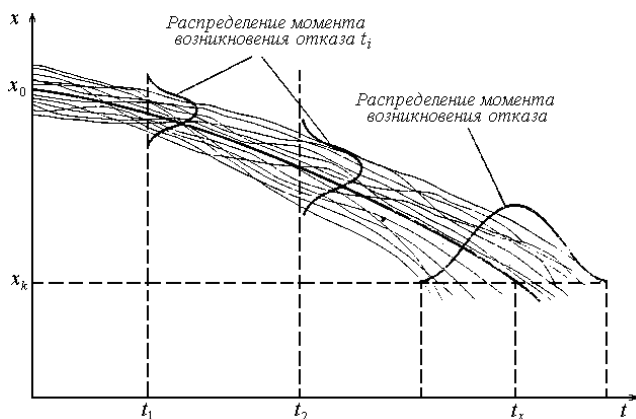


Рис. 13. Рассеивание значений основного параметра и момента возникновения постепенного отказа

Они образуют семейство реализаций случайных кривых, среднее значение которых является убывающей функцией времени хранения и равно x_0 при $t = 0$ и x_k при $t = t_k$.

Как множество реализаций случайных функций $x(t)$, так и среднее их значение могут быть также и возрастающими функциями. Вид этих функций определяется типом элементов и условиями хранения. Однако в большинстве случаев основной определяющий параметр изменяется в одну сторону. В любой момент времени t_i параметры однотипных элементов имеют случайные значения. Закон распределения параметров при идеальных условиях хранения, когда на элементы действует большое число примерно равноценных факторов, можно считать нормальным. Если x_k — такое значение параметра, при котором происходит отказ, то время возникновения отказа при условии, что основной параметр имеет нормальное распределение в любой момент времени t_i , имеет также нормальное распределение. На практике закон распределения параметров, а, следовательно,

и закон распределения времени возникновения отказов могут существенно отличаться от нормального вследствие влияния ограниченного числа преобладающих факторов.

Получить экспериментальным путем законы распределения времени возникновения отказов затруднительно. Это объясняется тем, что для получения достоверных статистических данных необходимо настолько большое время наблюдения, что полученные в результате эксперимента данные теряют свое значение.

Для предсказания сохранности необходимо либо проводить ускоренные испытания сохранности, либо производить экстраполяцию характеристик распределения параметров элементов.

Вследствие невозможности получения в короткий срок закона распределения времени нахождения параметров элементов в определенных пределах и необходимости экстраполяции характеристик распределения параметров, оценить сохранность ТС аналитическими методами бывает более трудно, чем рассчитать надежность системы в процессе ее работы. Однако при хранении ТС старение одних элементов в большинстве случаев не вызывает старения других. Это существенно облегчает оценку сохранности аналитическими способами, т. к. постепенные отказы элементов можно считать событиями независимыми, а их параметры некоррелированными.

Сохранность является важным техническим понятием. Она дополняет понятие надежности и совместно с ним определяет надежность аппаратуры в различных ее состояниях.

Существует большой класс систем, время хранения которых соизмеримо с временем их работы, а иногда во много раз его превосходит. К таким системам относятся системы разового использования (например, системы управления военными объектами) и системы с малым коэффициентом использования (самолетное оборудование, оборудование транспортных средств и т. п.). К подобным ТС относятся также запасные части и приборы, хранящиеся на складе.

При работе сложных систем и комплексов часть системы может находиться в рабочем состоянии в течение малого промежутка времени, хотя система в целом длительно выполняет

свои функции. К такой системе иногда относятся релейные элементы, системы коррекции, самоконтроля и т. п.

Надежность подобной аппаратуры может существенно зависеть от ее сохранности, а иногда и определяться ею. В связи с этим при оценке надежности сложных систем необходимо учитывать потерю ими надежности в процессе хранения.

Техническая система длительного использования в процессе ее эксплуатации требует проведения профилактических мероприятий и устранения отказов. Это приводит к ее вынужденным простоям. Длительность вынужденного простоя не входит в понятия надежности и сохранности, а такие характеристики надежности, как вероятность и среднее время безотказной работы, частота и опасность отказов, не полностью характеризуют эксплуатационные качества ТС.

Для более полного описания процесса эксплуатации вводится понятие ремонтпригодность.

Ремонтпригодность есть приспособленность ТС к обнаружению и устранению отказов, а также к их предупреждению. Характеризовать ремонтпригодность можно временем вынужденного простоя, которое равно суммарному времени, потребному на профилактику, отыскание места отказа и его устранение.

Совместно с надежностью ремонтпригодность характеризует способность системы выполнять заданные функции в любой момент времени. Чем надежнее система и чем выше ее ремонтпригодность, тем реже она отказывает и меньше простаивает, т. е. тем выше вероятность заставить систему в любой момент времени в исправном состоянии.

Стоимость эксплуатации за некоторый промежуток времени определяется зависимостью

$$C_{\Sigma} = C_{\Sigma,1} + C_{\text{отк}}n, \quad (35)$$

$C_{\Sigma,1}$ – стоимость эксплуатации, не зависящая от возникающих отказов, $C_{\text{отк}}$ – средняя стоимость устранения одного отказа, n – число отказов за время, в течение которого определяется C_{Σ} .

Из (35) видно, что C_3 зависит от надежности системы, определяемой числом отказов n , и от ремонтоспособности, характеризующейся средней стоимостью устранения отказа.

Часто бывает легче снизить $C_{отк}$, чем добиться уменьшения n . Это означает, что повышение ремонтпригодности может быть эффективным способом уменьшения стоимости эксплуатации. Таким образом, ремонтпригодность характеризует до некоторой степени стоимость эксплуатации технической системы. Чем выше ремонтпригодность, тем, при прочих равных условиях, ниже стоимость эксплуатации.

Ремонтпригодность совместно с надежностью определяют эффективность действия технической системы. Если система достаточно надежна и редко отказывает, но, имея низкую ремонтпригодность, требует больших затрат времени на профилактику и восстановление, то она не всегда может конкурировать с системой, которая менее надежна, но зато время ее простоя, потребное на профилактику и восстановление, мало. Для выполнения поставленной задачи первая система может потребовать большего резерва, чем вторая.

Ремонтпригодность совместно с надежностью также определяют стоимость эксплуатации, необходимое количество резервных систем, потребных для выполнения задачи, объем ремонтных средств и т. п. В связи с этим понятие ремонтпригодности является важным понятием в теории надежности.

Время, потребное для восстановления, так же, как и время возникновения отказов, является величиной случайной, зависящей от характера отказов, квалификации обслуживающего персонала, организации ремонта и т. д.

Надежность определяется плотностью распределения времени возникновения отказов, а ремонтпригодность – плотностью распределения времени восстановления. Подобно надежности она может оцениваться характеристиками распределения времени восстановления, например, вероятностью восстановления в течение времени t , средним длительностью ремонта и т. п.

Понятие ремонтпригодности относится к системам длительного использования, а также к таким системам, которые могут находиться в состоянии длительного хранения.

Это понятие не имеет смысла для таких систем разового использования, которые не восстанавливаются ни в процессе хранения, ни в процессе работы.

Сложные системы так же, как и простые элементы, не могут эксплуатироваться бесконечно долго. В процессе эксплуатации происходит старение элементов, возникает большое число отказов и наступает время, когда дальнейшая эксплуатация либо невозможна, либо нецелесообразна. Это время характеризуется сроком службы аппаратуры.

Срок службы – это время от начала эксплуатации ТС до ее технической непригодности.

Срок службы ТС нельзя отождествлять с ее надежностью. Сложная система может иметь большое число отказов в течение срока службы, т. е. может иметь низкую надежность, а срок службы – большой. Это объясняется тем, что при установлении срока службы не дается абсолютной гарантии, что в течение этого срока не будет ни одного отказа, а устанавливается лишь вероятность этого события. Срок службы системы не определяется только сроком службы элементов, из которых состоит система, а зависит также от сложности системы, условий эксплуатации, технологии изготовления и т. п. Справедливым является только утверждение, что чем выше срок службы элементов, тем, при прочих равных условиях, выше срок службы системы.

Гарантийный срок службы всегда меньше срока службы. Он не характеризует надежность ТС, а лишь устанавливает взаимоотношения между потребителем и поставщиком. Если в течение гарантийного срока произойдет отказ, то не потребитель, а предприятие, установившее этот срок, несет юридическую ответственность, в частности, оно выполняет ремонт отказавшей аппаратуры или, если это невозможно, заменяет ее исправной. Если гарантийный срок службы системы истек, то это вовсе не означает, что такую систему нельзя эксплуатировать. Система еще может обладать достаточным запасом надежности и быть технически пригодной. Дальнейшая ее эксплуатация возможна, однако вся ответственность за последствия отказов ложится на потребителя.

Срок службы не является определяющим понятием в теории надежности. Однако его введение имеет важное значение для практики, т. к. система обладает такими свойствами, как надежность и сохранность, только в течение времени, которое не превышает ее срока службы.

Техническая система для выполнения заданных ей функций должна иметь определенную структуру. Эта структура вытекает из анализа динамики процесса управления и определяет вес, габариты и стоимость системы. Однако реализованная система, структура которой получена из анализа динамики процесса управления, имеющая определенный вес, габариты и стоимость, может оказаться непригодной, т. к. из-за низкой надежности не сможет выполнить возложенные на нее функции.

В подобных случаях приходится либо упрощать структуру, либо предпринимать специальные методы повышения надежности данной структуры.

Упрощение структуры, в особенности, если она получена в результате синтеза по какому-либо критерию качества, всегда приводит к ухудшению таких важных показателей, как устойчивость, качество переходного процесса и точность. Поэтому часто единственным способом сохранения этих важных характеристик в течение длительного времени является повышение надежности технической системы при заданной ее структуре.

Для повышения надежности в большинстве случаев приходится либо выбирать наиболее качественные элементы, обладающие высокой надежностью, либо облегчать режимы работы элементов, либо вводить резервную аппаратуру. Все это требует увеличения стоимости, веса и габаритов аппаратуры и приводит к некоторой избыточности системы по указанным характеристикам.

Избыточность – есть превышение веса, габаритов или стоимости системы по сравнению с минимально необходимыми для заданной структуры, связанное с обеспечением заданной надежности.

От величины избыточности зависит время работы системы, в течение которого сохраняются ее выходные характеристики в заданных пределах. Чем больше избыточность, тем, при прочих равных условиях, больше это время.

Введение избыточности возможно путем применения резервных элементов или систем, облегчения режимов их работы, выбора высоконадежных элементов и т. д.

Резервирование как средство повышения надежности машин

Резервирование бывает активным и пассивным. При *активном* резервировании в систему вводят элементы, выполняющие в случае отказа основных (рабочих) и при их включении заданные технологические функции системы. Активный резерв бывает ненагруженным (до момента включения элемент находится в нерабочем состоянии), облегченным и нагруженным. При *пассивном* резервировании резервные элементы постоянно включены в работу системы, что является достоинством системы, так как при этом не требуется установка дополнительных включающих устройств. Активное и пассивное резервирования бывают общими (резервируется вся система) и отдельными (в резерве находятся отдельные элементы системы). Выбор резервирования того или другого типа определяется степенью необходимой надежности, конструктивными и технико-экономическими соображениями.

Резервирование – не универсальное средство повышения надежности системы и не всегда оно необходимо, т. к. обычно удорожает и усложняет систему. Поэтому всегда следует оценивать последствия резервирования: величину повышения надежности, возможность восприятия нагрузки резервным элементом при отказе рабочего, трудности переключения с одного элемента на другой; экономическую целесообразность – эти и другие вопросы должны быть выяснены в каждом конкретном случае. В решении этого вопроса могут помочь следующие два простых правила:

1. Если ожидаемые отказы относятся к типу многосвязных, то для сохранности системы в нее следует ввести последовательно с основным дополнительный предохранительный и менее прочный элемент, ломающийся при отказе (срезные шпильки при передаче крутящего момента, предохранительные элементы в узлах металлургического оборудования и др.).

2. Если ожидаемые отказы создают вредные обрывы технологической цепи, то следует параллельно вводить дополнительный элемент, автоматически включающийся в работу при отказе заменяемого. Например, в случае электропривода важного металлургического агрегата предусматривают установку резервного параллельно работающего электродвигателя [2].

2.3. Выбор показателей надежности

Под словом объект будем понимать не просто некоторое техническое изделие, а определенные технические средства, материальные носители, предназначенные для выполнения заданных функций. Именно эта особенность выполняемых функций и рассматриваемых режимов работы определяет – является объект восстанавливаемым или невосстанавливаемым.

При анализе надёжности, особенно при выборе показателей надежности объекта, существенное значение имеет решение, которое должно быть принято при отказе объекта. Если в рассматриваемой ситуации восстановление работоспособности данного объекта в случае его отказа по каким-либо причинам признается нецелесообразным или неосуществимым (например, из-за невозможности прерывания выполняемой функции), то такой объект в данной ситуации является невосстанавливаемым. Таким образом, один и тот же объект в зависимости от особенностей или этапов эксплуатации может считаться восстанавливаемым или невосстанавливаемым.

Более того, один и тот же объект может быть отнесен к тому или иному типу в зависимости от назначения ЭВМ, используемой для неоперативных вычислений, является объектом восстанавливаемым, т. к. в случае отказа любая операция может быть повторена, а та же ЭВМ, используемая для управления сложным технологическим процессом при анализе надежности считается невосстанавливаемым объектом, так как отказ или сбой приводит к непоправимым последствиям.

Под восстановлением объекта понимается не только ремонт той или иной его части, но в ряде случаев и полная его замена или замена частей. Действительно, для пользователя, заин-

тересованного в выполнении определенных заданных функций, совершенно неважно, восстанавливается работоспособность непосредственно ремонтом объекта или заменой его на совершенно другой работоспособный. (В качестве примера можно привести использование транспортного средства из общего парка аналогичных средств для выполнения регулярных рейсов по определенному маршруту.)

Для показателей надежности приводятся две формы представления: вероятностная и статистическая. Вероятностная форма обычно бывает удобнее при априорных аналитических расчетах надежности, статистическая – при экспериментальном исследовании надежности технических объектов. Кроме того, оказывается, что одни показатели лучше интерпретируются в вероятностных терминах, а другие – в статистических.

Показатели безотказности и ремонтпригодности

Наработка до отказа – вероятность того, что в пределах заданной наработки отказа объекта не возникнет (при условии работоспособности в начальный момент времени).

Для режимов хранения и транспортирования может применяться аналогично определяемый термин «вероятность возникновения отказа».

Средняя наработка до отказа – математическое ожидание случайной наработки объекта до первого отказа.

Средняя наработка между отказами – математическое ожидание случайной наработки объекта между отказами.

Обычно этот показатель относится к установившемуся процессу эксплуатации. В принципе средняя наработка между отказами объектов, состоящих из стареющих во времени элементов, зависит от номера предыдущего отказа. Однако с ростом номера отказа (т. е. с увеличением длительности эксплуатации) эта величина стремится к некоторой постоянной, или, как говорят, к своему стационарному значению.

Средняя наработка на отказ – отношение наработки восстанавливаемого объекта за некоторый период времени к математическому ожиданию числа отказов в течение этой наработки.

Этим термином можно назвать кратко среднюю наработку до отказа и среднюю наработку между отказами, когда оба показателя совпадают. Для совпадения последних необходимо, чтобы после каждого отказа объект восстанавливался до первоначального состояния.

Заданная наработка – наработка, в течение которой объект должен безотказно работать для выполнения своих функций.

Среднее время простоя – математическое ожидание случайного времени вынужденного нерегламентированного пребывания объекта в состоянии неработоспособности.

Среднее время восстановления – математическое ожидание случайной продолжительности восстановления работоспособности (собственно ремонта).

Вероятность восстановления – вероятность того, что фактическая продолжительность восстановления работоспособности объекта не превысит заданной.

Показатель технической эффективности функционирования – мера качества собственно функционирования объекта или целесообразности использования объекта для выполнения заданных функций.

Показатель технической эффективности функционирования объекта определяется количественно как математическое ожидание выходного эффекта объекта, т. е. в зависимости от назначения системы принимает конкретное выражение. Часто показатель эффективности функционирования определяется как полная вероятность выполнения объектом задачи с учетом возможного снижения качества его работ из-за возникновения частичных отказов.

Коэффициент сохранения эффективности – показатель, характеризующий влияние степени надежности элементов объекта на техническую эффективность, представляемый в виде отношения, показателя технической эффективности функционирования при реальной надежности к максимальному возможному значению этого показателя (т. е. соответствующему состоянию полной работоспособности всех элементов объекта).

Нестационарный коэффициент готовности – вероятность того, что объект окажется работоспособным в заданный момент

времени, отсчитываемый от начала работы (или от другого строго определенного момента времени), для которого известно начальное состояние этого объекта.

Средний коэффициент готовности – усредненное на заданном интервале времени значение нестационарного коэффициента готовности.

Стационарный коэффициент готовности (для краткости просто коэффициент готовности) – вероятность того, что восстанавливаемый объект окажется работоспособным в произвольно выбранный момент времени в установившемся процессе эксплуатации. (Коэффициент готовности может быть определен и как отношение времени, в течение которого объект находится в работоспособном состоянии к общей длительности рассматриваемого периода.)

Часто используются показатели, характеризующие простой объекта, так называемые коэффициенты простоя соответствующего типа. Каждому коэффициенту готовности можно поставить в соответствие определенный коэффициент простоя, численно равный дополнению соответствующего коэффициента готовности до единицы. В соответствующих определениях работоспособность следует заменить на неработоспособность.

Нестационарный коэффициент оперативной готовности – вероятность того, что объект, находясь в режиме ожидания, окажется работоспособным в заданный момент времени, отсчитываемый от начала работы (или от другого строго определенного момента времени), и, начиная с этого момента времени, будет работать безотказно в течение заданного интервала времени.

Средний коэффициент оперативной готовности – усредненное на заданном интервале значение нестационарного коэффициента оперативной готовности.

Стационарный коэффициент оперативной готовности (для краткости просто коэффициент оперативной готовности) – вероятность того, что восстанавливаемый объект окажется работоспособным в произвольный момент времени, и с этого момента времени будет работать безотказно в течение заданного интервала времени.

Предполагается, что рассматривается установившийся процесс эксплуатации, которому соответствует в качестве математической модели стационарный случайный процесс.

Коэффициент технического использования – отношение средней наработки объекта в единицах времени за некоторый период эксплуатации к сумме средних значений наработки, времени простоя, обусловленного техническим обслуживанием, и времени ремонтов за тот же период эксплуатации.

Интенсивность отказов – условная плотность вероятности отказа невосстанавливаемого объекта, определяемая для рассматриваемого момента времени при условии, что до этого момента отказ не возник.

Параметр потока отказов – плотность вероятности возникновения отказа восстанавливаемого объекта, определяемая для рассматриваемого момента времени. (Параметр потока отказа может быть определен как отношение числа отказов объекта за определенный интервал времени к длительности этого интервала при ординарном потоке отказов.)

Интенсивность восстановления – условная плотность вероятности восстановления работоспособности объекта, определенная для рассматриваемого момента времени, при условии, что до этого момента восстановление не было завершено.

Показатели долговечности и сохраняемости

Гамма-процентный ресурс – наработка, в течение которой объект не достигает предельного состояния с заданной вероятностью $1 - \gamma$.

Средний ресурс – математическое ожидание ресурса.

Назначенный ресурс – суммарная наработка объекта, при достижении которой эксплуатация должна быть прекращена независимо от его состояния.

Средний ремонтный ресурс – средний ресурс между смежными капитальными ремонтами объекта.

Средний ресурс до списания – средний ресурс объекта от начала эксплуатации до его списания.

Средний ресурс до капитального ремонта – средний ресурс от начала эксплуатации объекта до его первого капитального ремонта.

Гамма-процентный срок службы – срок службы, в течение которого объект не достигает предельного состояния с вероятностью $1-\gamma$.

Средний срок службы – математическое ожидание срока службы.

Средний межремонтный срок службы – средний срок службы между смежными капитальными ремонтами объекта.

Средний срок службы до капитального ремонта – средний срок службы от начала эксплуатации объекта до его первого капитального ремонта.

Средний срок службы до списания – средний срок службы от начала эксплуатации объекта до его списания.

Гамма-процентный срок сохраняемости – продолжительность хранения в течение которой у объекта сохраняются установленные показатели с заданной вероятностью $1-\gamma$.

Средний срок сохраняемости – математическое ожидание срока сохраняемости.

Выбор показателей надежности является конкретной задачей, решение которой существенным образом зависит от характера технического объекта, его назначения и общих требованиях к процессу и результатам его функционирования.

Показатели надежности в зависимости от уровня рассматриваемого объекта удобно подразделять на оперативные и технические. Оперативными показателями надежности удобно характеризовать системы – это показатели, характеризующие качество функционирования системы с точки зрения потребителя.

Технические показатели имеют своеобразный «технологический» характер: они нужны для использования в дальнейших расчетах или статистических оценках. Эти показатели назначаются для подсистем (элементов). Например, если дублированную систему удобно характеризовать коэффициентом готовности (оперативный показатель), то каждый из резервных элементов удобнее характеризовать техническими показателями – распределениями наработки и времени восстановления (или их ос-

новными параметрами, например математическими ожиданиями), поскольку именно они позволяют рассчитать показатель надежности системы в целом с учетом особенностей эксплуатации и технической обслуживания. Действительно, знания лишь коэффициентов готовности элементов недостаточно при ограниченном восстановлении.

Выбор вида показателей зависит в основном от общего назначения системы, но на него может влиять также и степень важности или ответственности функций, выполняемых системой.

Выбирая показатели надежности для технического объекта, следует иметь в виду некоторые простые и очевидные рекомендации:

1) общее число показателей надежности должно быть по возможности минимальным;

2) следует избегать сложных комплексных показателей, получаемых в виде каких-либо сверток критериев (например, взвешиванием с различными «весами»);

3) выбранные показатели надежности должны иметь простой физический смысл;

4) выбранные показатели надежности должны допускать возможность проведения подтверждающих (поверочных) оценок на этапе проектирования (аналитических расчетов или имитационного моделирования);

5) выбранные показатели надежности должны допускать возможность статистической (опытной) оценки при проведении специальных испытаний или по результатам эксплуатации;

6) выбранные показатели должны допускать задание норм надежности в количественной форме.

2.4. Задание требований по надежности

При задании требований по надежности следует различать технические объекты трех уровней:

1) системы – технические объекты, выполняющие определенные самостоятельные функции и характеризующиеся оперативно-техническими показателями надежности и эффективности функционирования;

2) подсистемы – технические объекты, входящие в состав системы, выполняющие частные функциональные задачи и характеризующиеся в основном техническими показателями надежности;

3) элементы – технические объекты, представляющие собой элементную базу подсистем.

Задание требований на систему.

1. Экспертное (директивное) задание требований основывается только на общей инженерной интуиции и практическом опыте, а поэтому не требует каких-либо особых комментариев.

2. Задание требований по прототипу основывается на анализе имеющейся статистической информации по надежности уже существующих технических объектов, близких к рассматриваемому по назначению, структуре или элементной базе. Требования по надежности в этом случае задаются с учетом возможного роста надежности элементной базы, масштаба рассматриваемой системы по сравнению с прототипом, условий функционирования и т.п. Такой прогноз в значительной степени также опирается на экспертные оценки, однако подтверждается конкретными фактическими данными.

3. Задание оптимального уровня надежности возникает только в том случае, когда:

- выходной эффект от функционирования системы измерим в тех же (обычно стоимостных) единицах, что и затраты на ее создание;

- достоверно известны исходные данные о надежности элементной базы;

- полностью определены принципы построения, как структуры, так и процессов, функционирования (возможность резервирования, использование различной элементной базы, режим использования, регламент технического обслуживания и т. п.).

В этом случае задание требований сводится к максимизации целевой функции вида

$$F_k(R) = E_k(R) - C_k(R), \quad (36)$$

где R – показатель надежности системы, зависящий от выбранного k -го варианта структуры системы S_k и от надежности элементов i -го типа r_i , т. е.

$$R = R(S_k, r_i, k = 1, \dots, m, i = 1, \dots, n),$$

где, в свою очередь, m – число рассматриваемых вариантов структуры, а n – число различных комплектующих элементов; $E_k(R)$ – выходной эффект от функционирования k -го варианта системы в стоимостном выражении при уровне надежности R ; $C_k(R)$ – затраты на обеспечение уровня надежности, равного R , для k -го варианта системы.

Для всякого фиксированного k решение находится обычным способом из условия:

$$\partial E_k(R) / \partial R = \partial C_k(R) / \partial R,$$

после чего выбирается вариант, для которого достигается наибольшее абсолютное значение из оптимальных решений $E_k(R)$.

Если выходной эффект системы несоизмерим с затратами (объекты обороны, системы безопасности различных транспортных средств и т.п.), то задание требований по надежности на систему возможно только двумя первыми способами.

Задание требований на подсистему. Предполагается, что требования на подсистему задаются при наличии уже каким-то образом заданных требований на систему в целом.

1. Метод равномерного распределения. Если система состоит из N примерно близких по сложности (т.е. по структуре и числу входящих элементов) подсистем, то можно заданный показатель надежности (R) типа вероятности безотказной работы, коэффициента оперативной готовности или коэффициента готовности распределять по правилу:

$$R_i = \sqrt[N]{R}, \quad i = 1, \dots, N. \quad (37)$$

Задаваемая средняя наработка для i -й подсистемы в этом случае приближенно равна

$$T_i = NT, \quad i = 1, \dots, N, \quad T - \text{заданная средняя наработка системы.}$$

2. Метод пропорционального распределения. Если n_i – число элементов в i -й подсистеме, то

$$R_i = \sqrt[a_i]{R}, \quad i = 1, \dots, N, \quad a_i = n_i \left(\sum_{1 \leq i \leq N} n_i \right)^{-1} \quad (38)$$

Под n_i в данном случае следует понимать число в некотором смысле «приведенных» элементов. Если известны интенсивности отказов элементов (или прототипов элементов) j -го типа λ_j , то метод пропорционального распределения можно модифицировать, положив

$$a_i = \sum_{1 \leq j \leq M} \lambda_j n_{ij} \left(\sum_{1 \leq i \leq N} \sum_{1 \leq j \leq M} \lambda_j n_{ij} \right)^{-1}$$

3. Метод оптимального распределения. Если при задании требований по надежности на систему в целом (R) известны структура системы (S) и методы повышения надежности подсистем, т. е. функции $R_i(C_i)$, где C_i – ресурс, затрачиваемый на обеспечение надежности подсистемы, то можно найти оптимальное распределение требований по надежности для двух случаев:

а) максимум показателя надежности системы при ограничениях на суммарный ресурс C^0

$$\max_C \left\{ R(S, R_i(C_i)) \mid \sum_{1 \leq i \leq N} C_i \leq C^0 \right\}, \quad C = (C_1, C_2, \dots, C_N) \quad (39)$$

б) минимум затрат на систему при достижении заданного показателя надежности R^0

$$\min \{ C(S, R_i(C_i)) \mid R^0 \}. \quad (40)$$

Обе задачи решаются обычными способами дискретного программирования, как задачи на условную оптимизацию.

Задание требований на элемент. Если в пределах данного исследования элементом является относительно сложная подсистема, то подход к заданию требований совпадает с тем, который был описан выше.

Если же элементом является технологическая единица типа микроэлемента и радиоэлектронной детали, то в настоящее время существуют лишь экспертные способы задания требований, включая способы задания по прототипу.

ГЛАВА III. ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ

3.1. Сбор статистической информации и методы ее обработки

Успешное решение вопросов надежности ТС возможно лишь при проведении широкой исследовательской работы, связанной с отбором и обработкой достоверной статистической информации об отказах в процессе эксплуатации.

Установление закономерностей количественных показателей надежности невозможно без знания физики явления и закономерностей влияния конкретных условий на характер и причины отказов.

Наиболее объективные данные о надежности исследуемого объекта можно получить при сборе и обработке эксплуатационной информации. В этом случае методика оценки показателей надежности сводится к сбору данных об отказах, установлению вида закона распределения отказов, к оценке соответствия теоретического и эмпирического законов распределения отказов, определению параметров закона отказов и оценке надежности исследуемого объекта.

Оценку эксплуатационной надежности можно осуществлять отчетным, корреспондентским, анкетным способами и способом непосредственного наблюдения.

Отчетный способ заключается в использовании ведомостей отказов за отчетный период, составляемых предприятиями (цехами). В ведомостях отказов приводят данные о времени и характере отказа деталей, систем, агрегатов с указанием времени устранения отказа, а также данные о времени наработки на отказ, о коэффициентах технического использования и трудоемкости устранения отказа.

Корреспондентский способ используется для исследования надежности единичных объектов по результатам обработки письменных ответов эксплуатирующего оборудование предприятия на письма – запросы.

Анкетный способ используется для оценки надежности исследуемого объекта по результатам обработки специальной анкеты со стандартными вопросами, разосланной на возможно

большее число предприятий, эксплуатирующих исследуемый объект.

Способ *непосредственного наблюдения* сводится к обследованию и наблюдению исследуемого объекта по заранее разработанной программе с учетом особенностей его эксплуатации.

Основными источниками информации об отказах ТС являются контрольные замеры и хронометраж, агрегатные и ремонтные журналы, журналы диспетчерской службы, заказов запасных частей, ведомости дефектов, отчетные документы предприятий (цехов).

С целью получения объективной информации о работе исследуемого объекта проводят совместный анализ условий и причин возникновения отказов по результатам анализа технологических особенностей выполнения заданных функций исследуемым объектом.

Данные об отказах систематизируют в виде вариационного ряда. Для этого диапазон значения случайной величины разбивают на интервалы (обычно от 7 до 12 интервалов на выборку). Интервалы для удобства вычислений следует, если возможно, принимать равными.

Для каждого интервала Δt определяют: n_i – число попаданий случайной величины; n_i/n – частность; $\Sigma(n_i/n)$ – накопленную частность (для проверки правильности вычислений должно соблюдаться равенство $\Sigma(n_i/n) = 1$); $f^*(t) = n_i/(n\Delta t)$ – эмпирическая плотность вероятности случайной величины; $N_i(p_i)$ – накопленная частность, где $N_i = n_1 + n_2 + \dots + n_i$.

По данным $f^*(t)$ для каждого интервала Δt строится гистограмма распределения.

На основе сопоставления визуального хода аппроксимированной кривой и модели отказа выдвигается гипотеза теоретического закона распределения.

На основе вычисленных критериев соответствия (Пирсона, Колмогорова и др.) делается вывод о приемлемости теоретического распределения, после чего определяют параметры распределения и необходимые критерии надежности.

По приведенной методике осуществляется обработка результатов экспериментальных данных при оценке режимов на-

гружения и определяется аналитические выражения функций плотности ρ (σ и $M_{кр}$) вероятности распределения нагрузки, используемой для проведения расчетов деталей машин на ограниченную долговечность.

Объектами испытаний могут быть электрорадиоэлементы различных типов, функциональные блоки аппаратуры – так называемые типовые элементы замены, отдельные приборы и целые технические системы. В зависимости от целей, которые ставятся перед испытаниями на надежность, испытания подразделяются на определительные и контрольные.

Определительные испытания проводятся с целью оценки фактической надежности испытываемых изделий. При этом оцениваются либо непосредственно показатели надежности, либо параметры законов распределения случайных величин, определяющих надежность изделия, таких, как время до отказа или между отказами, время до наступления предельного состояния, время восстановления и др.

Мы говорим об оценке надежности, а не об определении истинных значений показателей надежности по следующим причинам: испытания на надежность часто носят выборочный характер и результаты испытаний выборки распространяются на всю партию изготовленных изделий, что вносит элемент случайности в результаты оценки надежности партии; число испытываемых изделий (размер выборки) является ограниченным, а результаты испытаний имеют случайный характер.

В результате определительных испытаний могут быть получены либо точечные, либо интервальные оценки показателей надежности.

Контрольные испытания проводятся с целью оценки соответствия фактического уровня надежности испытываемых изделий заданному. Контроль надежности, как правило, осуществляется при использовании выборочного метода, при котором заключение о надежности партии изделия (например, совокупности всех изделий, изготовленных предприятием за определенное время – сутки, месяц, квартал) делается по результатам испытаний сравнительно небольшому числу этой партии – так называемой выборке. Одна из возможных процедур выборочных

контрольных испытаний на надежность сводится к следующему: выборка размером n изделий из партии размером N изделия ставится на испытания продолжительностью t часов; фиксируется число появившихся отказов r за время испытаний t ; это число отказов r сравнивается с заранее назначенным допустимым или приемочным числом отказов c : в результате сравнения делается один из двух возможных выводов: проверяемый показатель надежности соответствует заданным требованиям и партия принимается (при $r \leq c$) или проверяемый показатель надежности не соответствует требованиям и партия бракуется (при $r > c$).

При проведении контрольных испытаний не оценивается количественно показатель надежности, а определяется лишь, хуже или лучше заданного, уровень надежности испытываемых изделий. Поскольку в результате контрольных испытаний получают меньше информации о надежности изделий, эти испытания менее трудоемки по сравнению с определительными.

Испытания на надежность – один из видов всесторонних испытаний, которым подвергаются технические изделия в процессе производства и сдачи заказчику. Рассмотрим принятую в настоящее время систему испытаний опытных образцов и серийной продукции.

Запуску в серийное производство какого-либо технического изделия предшествует изготовление и тщательная отработка его опытных образцов. Для проверки соответствия эксплуатационных характеристик изделия техническим требованиям опытные образцы подвергаются предварительным (заводским) и государственным испытаниям. *Предварительные испытания* проводятся разработчиками изделия, после чего изделия предъявляются на *государственные испытания*, проводимые заказчиком. В процессе этих испытаний проверяются все технические характеристики изделий при воздействии на них внешних механических и климатических факторов, соответствующих режиму нормальной эксплуатации. Все необходимые виды испытаний и проверок, методика испытаний, правила приемки изделий и оценки результатов испытаний регламентируются программой испытаний. Как в процессе предварительных, так и государственных испытаний проводятся контрольные испытания

на надежность для оценки соответствия фактического уровня надежности заданному.

При положительных результатах государственных испытаний принимается решение о серийном производстве разработанных изделий. Для контроля технологического процесса, а также качества и надежности серийной продукции проводятся приемосдаточные, периодические и проверочные испытания.

Приемосдаточные испытания проводятся с целью проверки соответствия каждого экземпляра изделия основным требованиям технических условий и конструкторской документации. *Периодические испытания* проводятся с целью проверки соответствия изделий всем требованиям технических условий. Эти испытания выборочные, они проводятся на головных экземплярах серии не реже одного раза в год. *Проверочные испытания* проводятся с целью проверки соответствия изделий требованиям технических условий при изменении принципиальной схемы, конструкции или технологии изготовления изделий. Испытывается несколько экземпляров; при этом проверяются те характеристики изделий, на которые могли повлиять произведенные изменения. Оценка количественных показателей надежности производится при периодических испытаниях.

Испытания по определению количественных показателей надежности устройств и технических систем производятся либо на объекте, т. е. в реальных условиях эксплуатации, либо в лабораторных условиях. В последнем случае должны быть искусственно воспроизведены эксплуатационные условия с помощью специального испытательного оборудования, для чего испытуемые изделия помещаются на вибрационные и ударные стенды, в термовлагокамеры и другое испытательное оборудование. Воздействия внешних механических и климатических факторов должны быть циклическими, чередоваться с нормальным режимом работы изделий. Цикл воздействующих факторов формируется так, чтобы имитировались реальные условия эксплуатации.

Испытания могут дать объективную информацию о надежности изделия с учетом комплексного (совместного) влияния всех действующих при работе изделия факторов. Это их главная

положительная черта. Вместе с тем испытания на надежность обладают и отрицательными сторонами. Во-первых, они требуют больших затрат времени и средств. Прибора, позволяющего непосредственно измерить показатель надежности, не существует. Чтобы измерить надежность, необходимо продолжительное время (сотни часов и более) вести непрерывное наблюдение за состоянием изделия. В процессе испытаний на надежность расходуется значительная часть ресурса изделия. Во-вторых, результаты испытаний на надежность часто обращены в прошлое. Об изделиях, которые успешно выдержали испытания, можно сказать, что они до испытаний обладали такой-то надежностью и это подтверждено испытаниями.

Чтобы можно было распространить выводы по результатам испытаний на надежность на период эксплуатации, необходимо выполнение ряда условий. Прежде всего, необходима стабильность технологического процесса изготовления изделий, обеспечивающая устойчивость показателей надежности. Если все изделия, изготавливаемые по определенной технической документации, обладают одинаковой надежностью, то для определения показателей надежности большой совокупности изделия достаточно испытать некоторую выборку изделий из этой генеральной совокупности. Этот способ применим для изделий массового производства. Для изделий мелкосерийного и особенно индивидуального производства возникают серьезные затруднения. Пути преодоления их различны и зависят от конкретных условий производства и особенностей изделий. К таким путям относятся:

- обеспечение устойчивости показателей надежности изделий на значительном интервале времени, с тем, чтобы после проведения испытаний на надежность оставался необходимый интервал времени, на котором сохраняется обнаруженная при испытаниях надежность изделия;

- ускорение испытаний. Ускоренные испытания – испытания в условиях, когда используются некоторые факторы, ускоряющие процесс возникновения отказов. Ускоряющими факторами могут быть температура, нагрузка, вибрации, влажность и т. д. Для проведения таких испытаний предварительно должны быть получены зависимости показателя надежности от изменения уско-

ряющего фактора или связь между значениями показателя надежности, полученные при различных условиях испытаний.

На рис. 14 изображена зависимость интенсивности отказов радиоэлементов от температуры окружающей среды. Если при повышенной температуре T_2 получено значение интенсивностей отказов λ_2 , то из графика рис. 14, а видно, что это соответствует значению λ_1 для температуры T_1 .

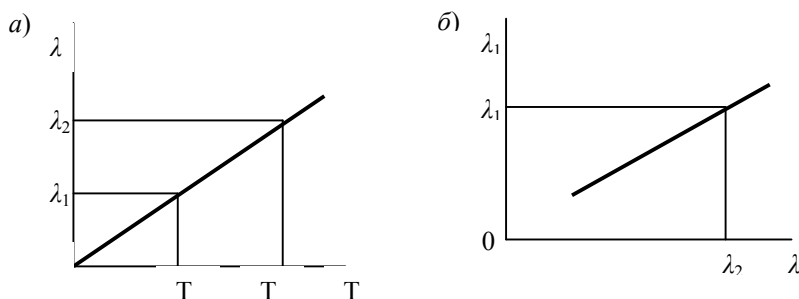


Рис. 14. Графики зависимостей интенсивности отказов радиоэлементов от температуры (а) и интенсивностей, полученных при разных режимах (б).

Аналогично по графику, изображенному на рис. 14, б, по информации о λ_{21} в форсированном режиме можно получить информацию о λ_{11} в нормальном режиме.

Отношение $\lambda_{21}/\lambda_{11} = K_y$ — коэффициент ускорения, который сохраняется постоянным для данного ускоряющего фактора и, естественно, всегда больше единицы. Значение K_y определяется либо экспериментально путем специальных испытаний, либо по статистическим данным из сферы эксплуатации. Значение K_y позволяет существенно сократить продолжительность испытаний. Покажем это на примере.

Пусть при использовании некоторого ускоряющего фактора интенсивность отказов увеличивается в три раза, т. е. $K = 3$. Методикой испытаний по плану NR_r требуется проводить испытания до получения r отказов. Обозначим: t_H — продолжи-

тельность испытаний в нормальных условиях; t_y – продолжительность ускоренных испытаний.

Среднее число отказов за время t равно λt . Поэтому $\lambda_{11}t_y = \lambda_{21}t_y$. Отсюда $t_y = (\lambda_{11}/\lambda_{21})t_u = 1/(K_y t_u) = (1/3)t_u$, т.е. продолжительность испытаний в форсированном режиме в общем случае в $1/K_y$ раз меньше продолжительности испытаний в нормальном режиме.

Чтобы испытания в форсированном режиме сделать еще более эффективными, применяется одновременное воздействие ряда ускоряющих факторов (повышение температуры, влажности, механических воздействий и т. п.).

Исключение «анормальных» результатов измерений. Статистический материал о надежности изделий, входящих в ТС, собирается обычно на разных объектах. Поэтому очень важно обеспечить однородность статистического материала. «Анормальные» результаты испытаний должны исключаться из статистической совокупности по правилам исключения «анормальных» результатов измерений. Существо этих правил заключается в следующем: если, некоторое измерение x_k внушает сомнение в его принадлежности к генеральной совокупности, определяются: а) среднее значение x_{cp} и среднеквадратическое отклонение генеральной совокупности без сомнительных измерений; б) коэффициент k , равный

$$k = (x_k - x_{cp})/\sigma,$$

если k больше допустимого значения, указанного в таблице допустимых значений, то делается вывод о том, что x_k не принадлежит к генеральной совокупности.

Использование косвенных признаков прогнозирования отказов. Отказы в современной технике – столь редкие события, что делать выводы на основе информации о возникших отказах за короткий промежуток времени весьма затруднительно. Для современных технических систем все большее значение приобретает предупреждение отказов, а не их пассивная регистрация. Предупреждать же отказы можно только тогда, когда возможно прогнозирование их возникновения. В настоящее время существ-

вует много различных рекомендаций по использованию прогнозирующих признаков в процессе испытаний. К наиболее распространенным прогнозирующим признакам относятся косвенные признаки – признаки, косвенным образом информирующие о надежности. Связь их с показателями надежности выражена сложными зависимостями. Если эти зависимости обнаружены и зафиксированы в виде графика, таблицы или математических выражений, то нетрудно по изменению косвенного признака определить прогнозируемую вероятность возникновения отказа.

На рис. 15 изображена зависимость показателя надежности (интенсивность отказа резистора λ) от косвенного признака (шумовой ток резистора $I_{ш}$). Из графика видно, что возрастание шумового тока резистора $I_{ш}$ от 1 до 5 мкА/А сопровождается возрастанием интенсивности отказов λ от 10^{-7} до 10^{-4} ч⁻¹. Поэтому сложное, длительное и дорогостоящее определение интенсивности отказов резистора может быть заменено измерением шумового тока с той степенью точности, с которой получена зависимость интенсивности отказов от шумового тока.

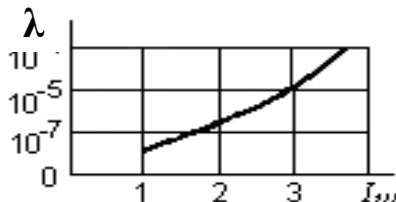


Рис. 15. График типовой зависимости интенсивности отказов резистора от шумового тока

В качестве прогнозирующих косвенных параметров могут также использоваться следующие параметры:

- температура поверхности токопроводящих элементов, зависящая от мощности рассеяния, которая, в свою очередь, зависит от изменения сопротивления элемента. Повышение сопротивления часто предшествует обрыву цепи, поэтому изменение температуры может быть использовано в качестве косвенного параметра, прогнозирующего отказ. Измерение температуры

осуществляется либо непосредственно с помощью термоизмерителей, либо с помощью термокрасок;

- отношение прямого и обратного сопротивлений диодов (отклонение этого отношения от номинального значения прогнозирует наступление отказа);

- низкочастотные составляющие шумового тока, ток базы, длительность спада выходного импульса и время рассасывания (для полупроводниковых транзисторов);

- реакция на ступенчатый или импульсный входной сигнал, характер рабочих процессов при включении и выключении;

- работоспособность изделия при изменении напряжения питания, введение дозированных помех или дополнительной нагрузки.

Наблюдение за этими признаками позволяет задолго до возникновения отказа определить вероятность его возникновения. При существующих в данный момент способах измерения и методах расчета такое решение грубо ориентировочное и приближенное, но позволяющее на первых этапах испытаний за короткий промежуток времени ориентировочно определить надежность исследуемого объекта.

В практике испытаний на надежность находит применение *метод индивидуального прогнозирования* или метод, основанный на теории распознавания образов. В этой теории разрабатываются приемы, позволяющие относить исследуемый объект к той или другой категории объектов на основании некоторых признаков. На основе такой теории созданы методы расшифровки старинных текстов, медицинской диагностики, опознавания объектов и т. п.

Контрольные испытания на надежность так же, по существу, решают задачу распознавания образа – на основании зафиксированного числа отказов или их отсутствия делается вывод о принадлежности изделия к определенной категории.

Но распознавание образа при контрольных испытаниях на надежность можно развить дальше. Предварительно выбирают признак отказа изделия и несколько контролируемых параметров, например электрические напряжения в некоторых контрольных точках, сила тока, выделяемая мощность, коэффициент усиления и т. д. Перед испытаниями проводится изучение

зависимости изменения работоспособности изделия от изменения «контролируемых параметров». Строится распознающая функция, т. е. такая функция, которая позволяет по ее числовому значению или по знаку функции определить, к какой категории относится данное изделие.

Рассмотрим элементарный пример. Пусть электрическое поле образовано двумя зарядами: положительным А и отрицательным В. Требуется найти контролируемый параметр и распознающую функцию, позволившие бы определить, в какой области находится исследуемая точка пространства (в области, расположенной ближе к заряду А, либо в области расположенной ближе к заряду В). Распознающей функцией в данном случае может быть функция, определяющая потенциал в данной точке. Знак функции позволяет определить область, в которой расположена точка. Контрольные испытания на надежность по методу последовательного анализа также основаны на теории распознавания образов.

В методе индивидуального прогнозирования вид распознающей функции значительно сложнее, чем в методе последовательного анализа, так как она учитывает ряд контролируемых параметров. Распознающая функция получается экспериментальным путем в процессе «обучения». Параметры этой функции подбираются такими, чтобы вид функции был приблизительно такой, как показано на рис. 16, т. е. чтобы исключалась неопределенность в определении областей А и В. Распознающая функция обычно задается таблицей.

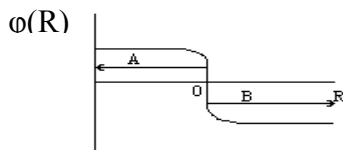


Рис. 16. Схематическое изображение оптимальной распознающей функции:

$\phi(R)$ – числовые значения распознающей функции; R – коэффициенты связи между нормированными параметрами изделия; A и B – области, к которым может быть отнесено испытуемое изделие

ТС обладает следующими особенностями, которые необходимо учитывать при планировании испытаний их на надежность:

1. Процесс разработки и изготовления ТС – длительный процесс, состоящий из нескольких этапов. После того как выбрана структура системы (этот выбор сопровождается испытанием структуры на физических макетах и математическим моделированием), изготавливается аппаратура, входящая в состав системы. Последовательно шаг за шагом происходит наращивание аппаратурных комплексов до создания системы технических средств, выполняющих заданные функции ТС. Эта особенность ТС требует, чтобы испытания также были непрерывным и длительным процессом, состоящим из этапов, дополняющих друг друга.

2. ТС включают в себя разнообразную аппаратуру, состоящую из различных комплектующих элементов. По своему назначению аппаратура подразделяется на средства вычислительной техники, передачи информации, отображения информации, источники питания и так далее.

3.2. Основные вопросы эксплуатационной надежности

Организация эксплуатации изделий существенным образом влияет на их надежность. Существует большое число факторов, влияющих на надежность и возникающих в процессе эксплуатации:

- периодичность и глубина профилактического обслуживания; достаточность и качество запасных элементов, материалов и инструмента;

- полнота и обоснованность инструкции по эксплуатации; достаточность и квалификация обслуживающего персонала, а также тщательность выполнения им всех требований по эксплуатации изделия;

- организация обслуживания (назначение смен, времени работы и отдыха, подбор операторов и их тренировка и т. д.). Профилактическое обслуживание (профилактика) – система предупредительных мер, направленных на снижение вероятности возникновения отказов (технические осмотры, регулировки,

замена комплектующих элементов, восстановление защитных покрытий и токопроводящих контактов и др.).

Профилактика преследует две цели:

- 1) предупредить возникновение отказов;
- 2) обнаружить такие отказы элементов изделия, которые не могли быть обнаружены средствами контроля в процессе эксплуатации или возникли в процессе эксплуатации и остались скрытыми, необнаруженными.

При планировании профилактики решаются два основных вопроса:

- 1) как часто следует проводить профилактику,
- 2) что проверить при проведении профилактики.

Прежде чем ответить на эти вопросы, отметим, что профилактика по глубине проверок и принимаемых предупредительных мер подразделяется на большое число разновидностей. Существуют простейшие виды профилактики (удаление пыли, смазка трущихся деталей, регулировка и др.) и сложные виды профилактики, сопровождаемые измерением электрических и магнитных параметров, проверкой функционирования сложных цепей и отдельных устройств, логическим анализом работоспособности. Поскольку не существует строго аналитических зависимостей, определяющих влияние профилактики, определение ее сроков, объема и глубины, т.е. числа проверяемых объектов и числа проверяемых параметров, осуществляются по весьма приближенным формулам, которые выражают лишь общие тенденции исследуемых процессов. Стратегия профилактики, разработанная на основании ориентировочных предложений о закономерностях отказов и восстановлении, об их влиянии на показатели надежности, должна корректироваться либо на основании опыта эксплуатации данного изделия, либо аналогичных изделий.

Необходимость тех или других видов профилактических работ часто определяется рабочими условиями. Например, удаление пыли и загрязнений, восстановление смазки, регулировка и т.п. зависят от запыленности рабочего помещения, температурных условий и других внешних воздействий.

Для ориентировочных предварительных решений по планированию профилактики можно исходить из следующего. Сро-

ки профилактики и объекты проверки следует назначать в зависимости от того, насколько вероятны отказы изделия. Если отказы носят характер случайных внезапных отказов, интенсивность которых постоянна, то не имеет смысла проводить плановые замены деталей, поскольку заменяемая деталь не будет менее надежна, чем новая, и замена ее может привести не к повышению, а к снижению надежности. Однако это не означает, что профилактика в этом случае не нужна. Целью профилактики в данном случае может быть: а) приспособление изделия к изменившимся внешним условиям (например, переход на зимнюю смазку); б) проверка средств защиты; в) снижение вероятности отказа; г) проверка температурного поля и т. д. Отказы могут быть постепенные (износные и типа старения); существенно повысить надежность изделия при этом может плановая замена деталей. Если известны с достаточной достоверностью сроки службы элементов изделия (блоков, приборов и т. д.), то замену элементов целесообразно организовать по программе замены критических элементов, время использования которых достигает допустимого срока службы. Сроки службы элементов могут быть неизвестны, поэтому необходимо либо измерять непрерывно их технические параметры, либо через небольшие промежутки времени, с тем, чтобы замену элементов производить в моменты времени, когда параметры достигают критических значений. На сроки профилактики влияют также характер возможных последствий отказов и экономическая целесообразность профилактических работ. На профилактику и замену элементов необходимы затраты средств и времени. Иногда целесообразно увеличить межпрофилактические сроки, если появление отказа не связано с катастрофическими последствиями, а экономические потери, вызванные отказом, меньше, чем затраты на проведение профилактического обслуживания, связанного с частыми и длительными перерывами в работе.

Таким образом, разработка стратегии профилактических работ, т. е. выбор сроков, объема, последовательности, глубины и тщательности профилактики, зависит от характера потока отказов и восстановления, видов отказов, заданных требований к надежности и экономической целесообразности. Это положение

можно считать очевидным, и оно принимается за основу профилактики простых изделий. В сложных системах приходится учитывать и требования к обеспечению работоспособности отдельных устройств и работоспособности системы в целом. Эти требования могут оказаться противоречивыми, и тогда главным требованием становится обеспечение работоспособности системы, а не отдельных устройств.

Профилактическое обслуживание может быть организовано по принципу обслуживания регламентного, календарного, а также комбинированного использования регламентного и календарного обслуживания.

Регламентное обслуживание – обслуживание, которое проводится по достижении параметрами изделия некоторых регламентированных показателей. Этот вид обслуживания применяется тогда, когда известна связь работоспособности и показателей некоторых технических параметров (силы тока, напряжения, сопротивления, яркости и т. д.). Если же главный параметр, определяющий работоспособность изделий, – время, в течение которого изделие эксплуатируется или хранится, то профилактическое обслуживание назначается в строго определенные календарные сроки вне зависимости от состояния изделия. Такое обслуживание называется календарным. В инженерной практике обычно связь работоспособности с показателями технических параметров так же, как и со временем использования, известна с некоторым приближением.

В существовании любой ТС можно выделить три основных периода: проектирование, изготовление и эксплуатацию. Каждый из этих периодов по-разному влияет на долговечность и надежность оборудования, которые, однако, проявляются только в последнем периоде – эксплуатации. На надежность и долговечность оборудования влияют также условия его эксплуатации.

Проектирование. При проектировании ТС нового типа трудно точно предсказать нагрузки, которые будут возникать в процессе работы новой системы. Экспериментальных данных бывает недостаточно, а расчетным способом нагрузки определяют с различными допущениями, что снижает их достоверность. Очень важно при проектировании ТС учесть все динами-

ческие явления в ней, обусловленные наличием массивных деталей, движущихся с переменными скоростями, зазоров и упругих связей между этими деталями. Существенное значение имеет устранение лишних связей в структурной схеме системы. Оценка динамических особенностей работы реальной машины требует использования весьма сложного математического аппарата и также не может обойтись без различных допущений.

Отдельные узлы и детали ТС проектируют на основании экспериментальных или расчетных данных о нагрузках и при этом составляют расчетные схемы нагружения деталей и определяют напряжения в различных сечениях их или, наоборот, задаваясь допустимыми напряжениями, определяют размеры сечений деталей. Эти расчеты также ведутся с допущениями и неравномерно распределенные силы принимают или равномерно распределенными, или сосредоточенными.

Реальные детали часто имеют сложную форму, и аналитическое определение напряжений в них методами сопротивления материалов затруднено. При расчетах приходится упрощать, идеализировать форму таких деталей и привлекать сложный математический аппарат теории упругости, часто дающий приближенное решение.

Из сказанного следует, что с ростом правильности принимаемых допущений и точности выполненных расчетов растут и надежность, и долговечность машины. При этом, однако, следует иметь в виду, что завышение расчетных напряжений и как следствие размеров деталей не всегда ведет к повышению надежности машин, если они работают в условиях неустановившегося движения (частые пуски, реверсы, торможения), так как с ростом размеров и веса деталей растут силы инерции этих деталей и поэтому напряжения от действия этих сил могут значительно превосходить напряжения, обусловленные действием сил технологического сопротивления, и в результате этого приводить к поломкам машины. Увеличение размеров деталей вызывает отрицательное влияние масштабного фактора, удорожание стоимости машины и увеличение мощности ее привода, что связано с дополнительными затратами.

Большое значение при конструировании машины имеет правильный выбор материала деталей. Обычно чем прочнее металл, тем он менее пластичен, более склонен к образованию трещин при циклических и особенно ударных нагрузках. Однако если деталь работает в условиях высоких контактных давлений, прикладываемых статически, или в условиях интенсивного износа, то высокие прочность и твердость материала являются его положительными свойствами. В случаях же, когда деталь подвергается циклическим нагрузкам или ударным нагрузкам, должен быть применен металл, характеризующийся оптимальным соотношением прочности и пластичности, обеспечивающим при данных габаритах детали необходимую ее прочность ввиду способности металла противостоять ударным нагрузкам. Для обеспечения надежной и долговечной работы детали важно правильно назначать способ ее изготовления и последующую термическую или другую упрочняющую обработку.

Рациональный выбор степени надежности машины должен базироваться на использовании оптимального соотношения свойств, принимаемого для изготовления материала, прочности конструкции и зависящих от этого технико-экономических показателей.

Изготовление. На этой стадии на надежность ТС в значительной степени влияют такие факторы, как качество отливок и поковок, из которых изготавливают детали, отсутствие раковин, неметаллических включений и других пороков металла, которые могут оказаться очагами зарождения усталостных трещин, обеспечение точности получаемых после механической обработки размеров детали и соблюдение необходимых допусков и посадок, чистота поверхности детали (отсутствие царапин, следов клейма, лунок) после механической обработки, повышающая ее усталостную прочность и понижающая чувствительность к различного рода концентраторам напряжений.

Не менее важным является достижение необходимых свойств материала детали после той или иной упрочняющей обработки термической или пластической, основанной на пластическом деформировании поверхностного слоя детали (накатка роликом, обработка стальной дробью, чеканка бойком, исполь-

зованием энергии взрыва и другие способы), а также обеспечение защиты деталей от корродирующего воздействия агрессивных сред, что приводит к повышению коррозионной усталостной прочности деталей. Для борьбы с вредным воздействием агрессивных сред применяют различные антикоррозионные покрытия, защищающие поверхностный слой металла.

Эксплуатация. Надежная и обеспечивающая долговечность машин эксплуатация их требует соблюдения следующих основных условий: выполнение обслуживающим персоналом установленных для данного вида машин правил технической эксплуатации; допуск к обслуживанию машин хорошо подготовленного персонала, который не допускал бы работы машины с нагрузками, превышающими установленные правилами технической эксплуатации своевременное и квалифицированное выполнение осмотров и соответствующих ремонтов машины с заменой изношенных и поврежденных деталей.

Усталостным поломкам, возникающим под действием вредных растяжений, сжатий, кручений, изгибов, срезов, а также различных комбинаций этих нагрузок, вызываемых несвоевременным обнаружением отклонений от правил технической эксплуатации, ошибками проекта, дефектами исходных заготовок, несвоевременным обнаружением повреждений деталей, неправильной смазкой и другими причинами, подвергаются главным образом такие детали металлургических машин, передающие и воспринимающие самые разные нагрузки, как, валы, оси, муфты, зубчатые колеса, прокатные валки, станины прокатных станов, корпуса и основания машин, детали и металлоконструкции многообразных грузоподъемных машин.

Ремонт значительной части вышедших из строя деталей осуществляется на самих металлургических заводах. На них перетачиваются на специальных вальцетокарных или перешлифовываются на вальцешлифовальных станках изношенные валки до тех пор, пока диаметр их не достигнет минимальной величины, допустимой по условиям прочности или технологии прокатки, восстанавливаются изношенные поверхности наплавкой при помощи электросварки. Наплавляются калибры прокатных валков, проводки прокатных станов, керны клещевых и стриппер-

ных кранов, колеса подъемных кранов, головки хоботов за-валочных машин и много других деталей. После наплавки детали подвергаются обточке или шлифовке в зависимости от твердости наплавленного слоя. При обнаружении на крупных деталях трещин их заваривают.

Для предупреждения поломки деталей механизмов металлургического оборудования в эти механизмы встраивают механические предохранительные устройства, представляющие собой детали, устанавливаемые в кинематической цепи, прочность которых ниже прочности остальных деталей. При перегрузках эти детали ломаются первыми, в результате чего механизм выключается. К числу этих деталей относятся предохранительные стаканы, устанавливаемые под нажимными винтами и предохраняющие детали клетки стана от действия чрезмерных усилий прокатки; срезные муфты, срезные шпиндели, предохраняющие детали механизмов от чрезмерных крутящих моментов.

В электрических схемах приводов предусматриваются максимальная и тепловая защиты, предохраняющие электродвигатель от перегрева в процессе работы.

Из изложенного следует, что на долговечность и эксплуатационную надежность ТС оказывают большое влияние многочисленные случайные факторы, которые должны быть учтены на стадиях создания и эксплуатации оборудования.

Совокупность свойств машины, сообщаемых ей на стадиях проектирования и изготовления, характеризует ее качество. Показатели качества любой машины подразделяют на две группы – производственно-технические и эксплуатационные. Показатели первой группы характеризуют машину как объект изготовления в реальных условиях машиностроительного завода. Показатели второй группы характеризуют эксплуатационные свойства машины. В их состав входят показатели технического уровня, надежности и долговечности, эстетическая и эргономическая характеристики [3].

3.3. Экспериментальная оценка надежности

Правильная организация эксплуатации является основным рычагом по повышению эффективности использования систем и устройств. Она состоит из системы мероприятий по сбору и обработке статистических данных эксплуатации, планированию регламентных проверок и профилактических работ, снабжению запасными элементами (ЗИП) и расходными материалами.

Сбор данных о надежности в процессе эксплуатации по всем видам техники может регламентироваться межведомственной системой сбора, распределения и реализации информации и надежности. Основными задачами этой системы являются следующие: сбор первичной информации об отказах и наработке изделий при эксплуатации; распределение информации о надежности по заинтересованным предприятиям и организациям; обработка и последующая реализация информации.

Предприятия и организации-поставщики информации, а также предприятия и организации, ответственные за изготовление образцов техники, контролирующих элементов и материалов в указанной системе, используют информацию, характер которой приведен в табл. 5.

Таблица 5

Виды и периодичность передачи информации

Вид передаваемого сообщения	Периодичность передачи
Первичные или обобщенные сообщения о надежности образца	Первичные – 1 раз в квартал; обобщенные – 1 раз в полугодие
Итоговые данные о надежности	Не реже 1 раза в год по запросам
Сообщения о принятых мерах по повышению надежности	
Рекомендации и требования по повышению надежности	
Сообщения о принятых мерах по повышению качества материалов	По запросам

Рекомендации и требования по повышению качества материалов	
Справочные данные комплектующих элементов о надежности	Не реже 1 раза в 3 года или по требованию министерств и ведомств

Сбор данных надежности элементов и устройств ТС в процессе ее эксплуатации требует высокой квалификации обслуживающего персонала и неукоснительного соблюдения всех организационных форм эксплуатации, в том числе сроков осмотров, профилактических работ и ремонтов. Поскольку в реальных условиях это не всегда достижимо, используются другие формы получения информации, в частности такие, как опытная и подконтрольная эксплуатация.

Опытная эксплуатация – это эксплуатация в естественных условиях специально выделенной техники, проводимая подготовленным обслуживающим персоналом, осуществляющим тщательный контроль технического состояния каналов, блоков и элементов ТС с учетом всех мероприятий технической эксплуатации системы. Этот вид эксплуатации обычно организуется и ведется с целью изучения эксплуатационно-технических показателей установочной или головной партии вновь разрабатываемых или модернизируемых изделий, а также для выработки рекомендаций по улучшению их технических характеристик. Отличие опытной эксплуатации от обычной состоит в более интенсивном, чем обычно, использовании опытной техники, а также в более качественном наблюдении за ней в процессе работы.

Подконтрольная эксплуатация серийной техники в естественных условиях проводится с участием специально подготовленного обслуживающего персонала, осуществляющего более подробный, чем при обычной эксплуатации, контроль и учет технического состояния элементов, блоков и устройств ТС. Цели и задачи подконтрольной и опытной эксплуатации аналогичны. Поскольку основной целью опытной и подконтрольной эксплуатации является определение степени соответствия показателей надежности, объем испытаний может быть определен по заданным требованиям к точности и достоверности таких пока-

зателей, как схемно-конструктивное построение и технология производства.

Характеристики исследуемого процесса могут быть получены либо по результатам эксплуатации нескольких образцов усреднением по множеству, либо одного образца усреднением по времени.

Для получения доверительных оценок по одному образцу наблюдение ведется в течение длительного отрезка времени эксплуатации. Истинное (теоретическое) значение оценки будет получено при времени эксплуатации, стремящемся к бесконечности. Математическое ожидание наработки на отказ в этом случае определится из выражения:

$$\frac{\sum_{j=1}^n t_j^k}{n} \rightarrow M[T_0^*] \text{ при } n \rightarrow \infty, \quad (41)$$

где n – число отказов; t_j^k – временной интервал между $(j-1)$ -м и $(j-m)$ отказами; T_0^* – исследуемый поток интервалов.

Поскольку время и опытной и подконтрольной эксплуатации ограничено, математическое ожидание определяется по среднему арифметическому наработки на отказ:

$$T_0^* = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n T_j^*. \quad (42)$$

Оценка математического ожидания при данном времени опытной или подконтрольной эксплуатации или при определенном числе отказов должна удовлетворять соотношению:

$$\gamma = P\{|T_0^* - T_0| \leq \Delta\}. \quad (43)$$

В этом соотношении γ определяет точность оценки T_0 по величине T_0^* , а P – достоверность оценки – вероятность того, что при данном числе отказов n (данной длительности эксплуатации) оценка T_0 будет иметь точность Δ . Если известен закон

распределения случайной величины T , то, задаваясь любыми двумя из величин γ , n , Δ можно найти третью.

Очевидно, что для рассматриваемой задачи должны быть заданы величины γ и Δ и определено соответствующее им число отказов n , по которому и устанавливается число контролируемых образцов и время их эксплуатации.

Соотношение (43) можно использовать для определения n , если известен закон распределения случайной величины T . Предполагая поток отказов простейшим, выражение (43) можно записать в следующем виде:

$$\gamma = P \left[\frac{T_0^*}{\sigma_2} \leq T_0 \leq \frac{T_0^*}{\sigma_1} \right] = P [T_H \leq T_0 \leq T_B] . \quad (44)$$

Коэффициенты σ_1 и σ_2 характеризуют меру отклонения случайной величины T_0^* от значения параметра T_0 и точность оценки. Величины $T_H = T_0 - \Delta_1$; $T_B = T_0 + \Delta_2$ определяют нижнюю и верхнюю границы значения наработки на отказ, соответствующие допустимым погрешностям в сторону занижения $-\Delta_1$, и в сторону завышения $+\Delta_2$.

Из выражения (44) следует, что γ определяет вероятность попадания параметра T_0 в некоторый интервал от $T_H = T_0^* / \sigma_2$ до $T_B = T_0^* / \sigma_1$.

Учитывая, что коэффициенты точности σ_1 и σ_2 зависят от n или длительности эксплуатации, для решения рассматриваемой задачи целесообразно получить зависимость σ_1 , и σ_2 от числа отказов для наиболее часто используемых значений достоверностей $\gamma = \gamma_1 - \gamma_2$.

На рис. 17 изображены зависимости $\sigma_1(n)$ и $\sigma_2(n)$ при постоянных значениях γ . Анализируя характер кривых $\sigma(n, \gamma)$, убеждаемся в том, что чем больше объем статистики, тем точнее оценка (при $\gamma = const$). При заданном значении γ , когда $n \rightarrow \infty$, имеем $\sigma(n) \rightarrow 1$.

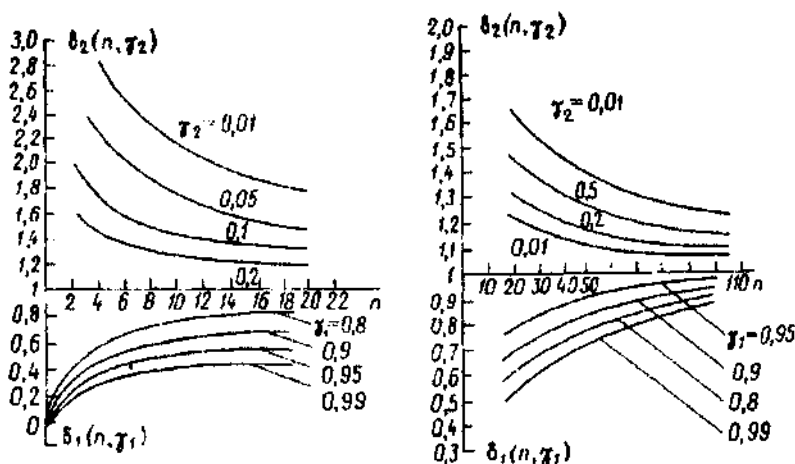


Рис. 17. Зависимости доверительных интервалов от объема статистики

Располагая зависимостями $\sigma_1(n, \gamma_1)$ и $\sigma_2(n, \gamma_2)$, можно решить задачу определения длительности опытной и подконтрольной эксплуатации, обеспечивающей оценку параметра T_0 с заданной точностью и достоверностью. Нарботка на отказ относится к таким показателям, при оценке которых можно ограничиться односторонним допуском, а именно погрешностью в сторону занижения, что упрощает дальнейшее решение рассматриваемой задачи.

В технической документации на любое устройство задается значение наработки на отказ T_0 , которое оно должно иметь. Учитывая вероятностный характер показателей надежности, не имеет смысла предъявлять высокие требования к точности и достоверности оценки наработки на отказ. При планировании опытной и подконтрольной эксплуатации можно считать, что погрешность в пределах 20–30 % от заданной величины T_0 при значении γ , лежащем в интервале от 0,8 до 0,95, является приемлемой.

Таким образом, порядок определения объема испытаний сводится к следующему. Задается допустимая погрешность – Δ и по величинам T_0 и $T_H = T_0 - \Delta$ определяется коэффициент точности

$$\sigma_2 = T_0 / T_H. \quad (45)$$

Выбирается значение доверительной вероятности P и по известному соотношению вычисляется

$$\gamma_2 = 1 - \gamma.$$

По рис. 17 отыскивается значение n , обеспечивающее такую точность и достоверность.

Следует заметить, что при использовании выражения (43) при данных n и γ погрешность оценки наработки на отказ является несимметричной. Абсолютное значение положительной погрешности $\Delta_2 = T_B - T_0$ всегда по модулю больше отрицательной погрешности $\Delta_1 = T_H - T_0$. Поэтому если задаваться симметричной погрешностью $\pm\Delta$ оценки параметра T_0 , то объем испытаний (требуемое число отказов n) для значений σ_1 и γ_1 окажется значительно большим, чем для значений σ_2 и γ_2 .

Интервальная оценка показателей надежности. Поскольку количество статистических данных по надежности, полученных в процессе эксплуатации, принципиально ограничено, точечные оценки могут оказаться весьма приближенными. Причем отклонения этих оценок от истинного значения показателей надежности являются случайными величинами. С увеличением числа наблюдений случайная ошибка оценки показателей уменьшается. Рассмотрим методику оценки показателей надежности в определенном интервале возможных их значений.

Пусть в результате наблюдения за системой в процессе ее эксплуатации получена выборка, характеризующая интервалы времени наработки на отказ t_i ($i = 1, n$). В соответствии с известными положениями теории надежности наработка на отказ и среднее квадратичное $\wedge$ отклонение могут быть найдены по соответствующим выражениям. После установления вида закона распределения приступают к определению точечной оценки ко-

личественных показателей надежности. Так, например, если интенсивность отказов и интенсивность восстановления постоянны во времени, т.е. $\lambda(t) = \lambda = const$ и $\mu(t) = \mu = const$, то точечные оценки количественных показателей надежности при данном законе распределения можно получить из выражений:

$$\begin{aligned} P(t) &= e^{-\lambda t}; & T_0 &= \frac{1}{\lambda}; \\ G(t) &= 1 - e^{-\mu t}; & T_B &= \frac{1}{\mu}; \\ P_r(t) &= k_r + (1 - k_r)e^{-t/(k_r/T_0 + T_B)}; & k_r &= T_0 / (T_0 + T_B) \end{aligned}$$

Если в результате опыта мы получим выборку времени наработки на отказ t_i ($i = 1, 2, \dots, n$), то оценку среднего времени безотказной работы и среднего квадратичного отклонения найдем по формулам математической статистики:

$$T^* = \bar{t} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i; \quad \sigma^* = s = \sqrt{\frac{1}{1-n} \sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t})^2}. \quad (46)$$

Истинные значения оцениваемых величин обозначим через T_0 и σ . Так как объем выборки n ограничен, неизбежно должны иметь место случайные ошибки:

$$\begin{aligned} \pm \sigma &= T^* - T_0; \\ \pm \eta &= \sigma^* - \sigma. \end{aligned} \quad (47)$$

распределение которых полностью определяется законом распределения выборки t_i . Выражения (47) можно записать иначе:

$$\begin{aligned} T^* - \delta &\leq T_0 \leq T^* + \delta; \\ \sigma^* - \eta &\leq \sigma \leq \sigma^* + \eta. \end{aligned} \quad (48)$$

Из (48) следует, что истинное значение оцениваемой величины лежит в некотором интервале. Для наработки на отказ оно находится в интервале $T_H = T^* - \delta$ и $T_B = T^* + \delta$ между нижним и верхним значениями наработки на отказ. Аналогично может быть

найден интервал и для оценки величины σ . Приведенная оценка случайных величин носит название интервальной оценки.

Найти точные границы интервала, в который попадает истинное значение исследуемой величины, не представляется возможным. Однако можно определить интервал ее возможных значений с некоторой доверительной вероятностью $P_d = a$. При этом, чем больше доверительная вероятность a , тем шире границы интервала, и наоборот. В общем виде эта зависимость имеет вид:

$$a = P(Q_H \leq Q \leq Q_B), \quad (49)$$

где Q_H и Q_B нижняя и верхняя границы параметра Q .

Вероятность того, что значение Q выйдет из интервала (Q_H , Q_B) называется уровнем значимости β :

$$P = P(Q_H > Q > Q_B) = 1 - a.$$

Значения доверительных вероятностей обычно принимают равными 0,9; 0,95; 0,99. Соответствующие им уровни значимости составят 0,1; 0,05; 0,01.

Доверительная вероятность a , определяемая выражением (49), характеризует степень достоверности результатов двусторонней (т. е. с определением верхней и нижней границ) оценки.

Интервальная оценка показателей надежности при экспоненциальном законе распределения. Как известно, при экспоненциальном законе распределения плотность вероятности отказов определяется выражением

$$a(t) = \lambda^{-\lambda t}, \quad (50)$$

в котором $\lambda = 1/T_0$ – интенсивность отказов (параметр закона) определяется экспериментально.

Для закона распределения этого типа получены выражения для определения показателей надежности при различных планах испытаний.

Планом испытаний называется установленный разработчиком и заказчиком порядок проведения испытаний аппаратуры на надежность. Существует несколько типов планов испытаний. Есть, например, планы с восстановлением и без восстановления элементов выборки. В этом случае образцы, поставленные на испытания или под наблюдение и отказавшие, могут в ходе испытаний и в процессе эксплуатации восстанавливаться и включаться вновь в работу. Они могут и исключаться из эксплуатации. Кроме того, испытания могут проводиться до выхода из строя всех образцов выборки либо до появления d -го отказа и т. п. Выбор плана определяется несколькими факторами, например числом образцов, которое может быть поставлено на испытания или под наблюдение. План зависит также от объема выборки n , отводимого срока наблюдения, допустимой наработки на отказ и др. Каждый план имеет свой шифр, состоящий из трех букв, которые расшифровываются следующим образом. Первая буква n – объем выборки; вторая буква Б или В – план без восстановления или с восстановлением выборки; третья буква n , t_0 или d – признак окончания наблюдения (испытания), причем n – после отказа всех образцов, t_0 – после истечения заданного времени, d – после появления установленного числа отказов.

Например, символом $[n, B, t_0]$ обозначается план с восстановлением выборки объема n и окончанием испытаний по истечении времени t_0 .

Методика расчета необходимого количества ЗИП

ЗИП – запасное имущество и приборы, придаваемые системам и устройствам с целью обеспечения их ремонта в процессе эксплуатации.

В существующих системах технического снабжения используются два основных принципа создания запасных частей: поставкой комплектов ЗИП и россыпью. Комплект ЗИП включает в себя запасные части (элементы и приборы), инструменты, принадлежности, материалы и другое имущество, необходимое для технического обслуживания и ремонта изделий и скомплектованное в зависимости от их назначения и особенностей использования.

Модель работы системы с ЗИП соответствует модели работы системы, резервированной методом замещения. Вероятность безотказной работы аппаратуры системы в этом случае определяется выражением:

$$P_c(t) = e^{-\lambda_c t} \sum_{i=0}^m \frac{(\lambda_c t)^i}{i!}, \quad (51)$$

где m – число резервных элементов; λ_t – интенсивность отказов системы; t – заданное время эксплуатации.

Выражение (51) можно использовать для расчета необходимого количества ЗИП, если под m понимать число элементов в ЗИП, а под временем t – время, на которое рассчитывается ЗИП.

Система состоит из n групп элементов. Каждая j -я группа $j = 1, 2, \dots, n$, в свою очередь, состоит из N_j элементов, причем λ_j – интенсивность отказов элементов j -й группы.

Поскольку в групповом ЗИП все группы равнонадежны и имеют основное соединение, т. е. отказ элемента в каждой группе приводит к отказу системы, то:

$$P_c(t) = P_j^n(t).$$

Таким образом, если вероятность безотказной работы системы задана, то можно рассчитать вероятность безотказной работы j -й группы элементов, используя выражение:

$$P_c(t) = \sqrt[n]{P_j(t)} \approx 1 - \frac{[1 - P_j(t)]}{n}. \quad (52)$$

Интенсивность отказов элементов j -й группы с учетом числа элементов в группе равна

$$\lambda_{гп} j = N_j \lambda_j.$$

Из вероятности безотказной работы j -й группы равна:

$$P_j(t) = e^{-N_j \lambda_j t} \sum_{i=1}^m \frac{(N_j \lambda_j t)^i}{i!}. \quad (53)$$

Значения $P_j(t)$ известны, известна и величина $N_j \lambda_j t$ в правой части (53), следовательно, может быть найдено и то количество элементов, которое необходимо иметь в ЗИП для обеспечения эксплуатации системы с заданной вероятностью в течение заданного промежутка времени.

3.4. Организационные вопросы обеспечения надежности ТС

Чтобы объект был надежным в работе, необходимо провести в определенной последовательности комплекс мероприятий на всех стадиях его разработки, изготовления и использования. Содержание таких мероприятий и их последовательность различны для разных видов объектов, так как при разработке мер по обеспечению надежности должны учитываться особенности объекта, способы его изготовления и условия использования.

Типовая структура программы обеспечения надежности проектируемого объекта состоит из 3-х основных этапов:

Этап 1. Это этап предварительных исследований объекта; на нем анализируются требования к объекту, изучается объем и характер информации, а также форма ее представления, выбирается техническое обеспечение с учетом возможности удовлетворения заявок на оборудование; изучаются характеристики надежности изделий, предназначенные для оборудования объекта; в случае необходимости проводятся специальные испытания материалов, комплектующих элементов и аппаратуры с целью проверки характеристик, влияющих на надежность (сопротивляемость износу и старению, устойчивость работы при воздействии неблагоприятных факторов и т. п.).

Этап 2. Это этап технического проектирования объекта, на нем решаются следующие вопросы обеспечения надежности: обоснование выбора структуры объекта и математического обеспечения; выбор методов контроля за правильностью работы объекта и его техническим состоянием; обеспечение рабочих режимов работы элементов аппаратуры в пределах заданных ТУ; защита элементов от неблагоприятных воздействий; выбор способа резервирования. Решение этих вопросов сопровождается

ся расчетами, испытаниями, математическим и физическим моделированием.

Этап 3. Это этап производства и эксплуатации объекта; на нем продолжается работа по обеспечению надежности, основы которой положены на этапе проектирования. К таким работам относятся выбор оптимальной технологии и программы производственных испытаний, оптимизация обслуживания объекта, обеспечение запасными изделиями, организация ремонта, сбора информации о надежности объекта в процессе эксплуатации.

Для координации деятельности в системе сбора, распределения и реализации информации о надежности создаются или назначаются головные организации. В их задачи входят: контроль достоверности и полноты сведений, поступающих о надежности техники с объектов эксплуатации; накопление, систематизация сведений и передача их соответствующим министерствам; распределение первичной и обработанной (итоговой) информации между организациями своего министерства и ведомства; составление обобщенных сведений о надежности комплектующих блоков, устройств и элементов и передача этих сообщений в головные организации; анализ поступающей информации по отказам, вызванным нарушениями правил эксплуатации, а также разработка планов мероприятий по устранению отказов; контроль соответствия показателей надежности требованиям технических условий (ТУ) и оценка эффективности принятых соответствующими министерствами мер, а также разработка требований и рекомендаций по повышению надежности и передача их в эти министерства; методическое руководство сбором информации по надежности на местах и подготовка предложений по установлению перечня объектов, подлежащих наблюдению при эксплуатации.

Характерным для рассматриваемой системы сбора, распределения и реализации информации о надежности является наличие развитых связей со всеми организациями, решающими задачи обеспечения заданной надежности, а также использование линий, осуществляющих обратные информационные связи между ними.

Порядок организации работ по сбору и распределению первичной информации о надежности соответствующих образцов, устройств и приборов ТС определяется государственным стандартом. Для упорядочения сбора и распределения первичной информации соответствующим министерством устанавливается вид контроля техники (сплошной контроль всех видов эксплуатируемых образцов либо выборочный контроль части эксплуатируемых образцов), а также общее число эксплуатируемых образцов и их размещение по климатическим поясам в соответствии с государственным стандартом.

Перечень мероприятий по обеспечению надежности объекта на всех этапах его разработки, изготовления и эксплуатации с указанием сроков и исполнителей называется программой обеспечения надежности объекта. Особенность такой программы в том, что она объединяет усилия большого числа исполнителей и выполняется на, протяжении значительного отрезка времени. Поэтому возникает необходимость в создании специальных служб надежности, в обязанности которых должны входить:

а) координация действий различных подразделений, обеспечивающих надежность;

б) методическое и организационное обеспечение выполнения всех работ, предусмотренных программой.

Служба надежности в научно-исследовательских институтах и на промышленных предприятиях

Служба надежности НИИ: Служба надежности включает в себя ряд производственных подразделений НИИ или предприятия.

Рассмотрим службу надежности НИИ (рис. 18).

Центральное подразделение службы надежности – отдел (лаборатория) надежности ОН. Он является научно-исследовательским самостоятельным подразделением и относится к основным структурным подразделениям института. Руководство этим отделом (лабораторией) осуществляют руководитель института и его заместитель по научной части. В состав отдела надежности ОН входят лаборатории испытаний, ЛИ сбора и обработки информации о надежности ЛСОИ, расчетов и моделирования ЛРМ, разработки методических материалов и контроля технической документации ЛТД и др.

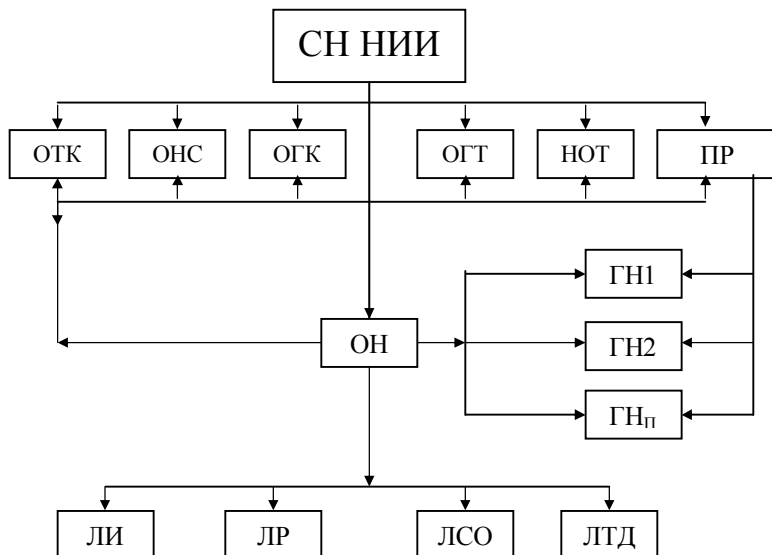


Рис. 18. Структура службы надежности:
 где *ОТК* – отдел технического контроля; *ОНС* – отдел нормализации и стандартизации; *ОГК* – отдел главного конструктора;
ОГТ – отдел главного технолога

Основные задачи и обязанности отдела надежности ОН следующие:

- а) координация работы всех подразделений института по вопросам обеспечения надежности разрабатываемых изделий (с этой целью отдел надежности разрабатывает методические материалы, обеспечивающие единство подхода и целенаправленность действий различных подразделений);
- б) проведение научно-исследовательских работ, связанных с обеспечением надежности и анализом отечественных и зарубежных материалов по вопросам надежности;
- в) разработка рекомендаций по повышению надежности разрабатываемых объектов;

г) организация сбора и обработки информации о надежности изделий, используемых при проектировании и проектируемых на предприятии;

д) проведение расчета и моделирования для оценки надежности различных вариантов изделия с целью обоснованного выбора оптимального варианта при проектировании;

е) разработка методов испытаний на надежность и проведение таких испытаний на стадии отработки опытного образца;

ж) контроль за обеспечением надежности и контроль технической документации в части обеспечения надежности.

Выполнение этих задач отдел надежности осуществляет в тесном взаимодействии с другими подразделениями предприятия.

Служба надежности промышленного предприятия. Эта служба организуется и работает по такой же схеме, как и служба надежности НИИ. Ее структура и задачи определяются главным направлением работ – обеспечение производственно-технологической надежности изделий, т. е. создание таких условий производства, которые обеспечивали бы требуемые показатели надежности изделий в процессе их производства.

Отдел надежности предприятия не должен подменять отдел технического контроля, отдел главного технолога и других подразделений завода, а должен работать в тесном с ними контакте. Его главными задачами являются:

а) методическое руководство и координация усилий всех служб предприятия, направленных на обеспечение надежности;

б) изучение и анализ документации на изготовление, сборку и контроль изделий с целью принятия своевременных мер по обеспечению заданной надежности;

в) участие в разработке и проведении производственных испытаний;

г) анализ результатов испытаний и разработка предложений по совершенствованию технологии изготовления и методов контроля;

д) сбор и обработка информации о надежности изделий, выпускаемых предприятием, организация подконтрольной эксплуатации изделий.

Права и обязанности подразделений служб надежности определяются положением о подразделениях надежности в НИИ, конструкторских бюро и на промышленных предприятиях.

Документация для сбора первичной информации. Для обеспечения единства исходных данных о надежности первичная информация, об отказе в соответствии с существующей нормативно-технической документацией должна содержать следующие информационные признаки: дату возникновения отказа или неисправности; общую наработку изделия с начала его эксплуатации до момента установления отказа (определения неисправности); внешние признаки и характер проявления отказа или неисправности; условия эксплуатации и вид работы, при которых был обнаружен отказ или установлена неисправность; уровень функциональной структуры системы (канал, тракт, блок и т. д.), на котором приняты или могут быть приняты меры по устранению неисправности; способ устранения неисправности; принятые или рекомендованные меры по предупреждению возникновения отказов или неисправностей.

Сбор информации и заполнение первичной документации о надежности проводится в обычных условиях обслуживающим ТС персоналом, а при опытной и подконтрольной эксплуатации – либо дежурным персоналом, занимающимся обслуживанием исследуемой аппаратуры, либо представителями службы надежности, организованной специально для сбора информации о надежности.

Основными видами документации при сборе первичной информации об отказах аппаратуры ТС являются журналы, формуляры, карточки. В журналах фиксируется информация о надежности всей аппаратуры исследуемой системы. Обычно использование журналов предпочтительно при значительном объеме аппаратуры. К преимуществу журналов следует отнести их компактность. Формуляры ведутся на каждое отдельное устройство. Их преимуществом является то, что они содержат всю информацию о работе устройства с момента его установки. Карточки заполняются при каждом отказе. Они являются, во-первых, наиболее оперативной формой информации, во-вторых,

информация, отраженная в карточках, лучше всего подготовлена для ее автоматической обработки.

В том случае, когда сбор информации ведется специально выделенным для этой цели обслуживающим персоналом или представителями службы надежности, обязанности по сбору информации распределяются следующим образом. Контроль и запись данных об условиях работы, последствиях отказов производятся представителями службы надежности. Остальная документация ведется непосредственно обслуживающим персоналом. Обработка экспериментальных данных производится методами математической статистики на основе данных, полученных в результате наблюдения за работой образцов.

Методика обработки данных по отказам невосстанавливаемых изделий не отличается от рассматриваемой ниже методики для восстанавливаемых ТС. Исходными данными (случайными величинами), которые подвергаются обработке, являются время наработки на отказ, время наработки на восстановление и число отказов ТС. После того, как такой материал собран, его обработка позволяет установить законы распределения показателей надежности, таких, как вероятность безотказной работы, интенсивность отказов и др. Знание законов распределения дает возможность определить все остальные количественные показатели надежности. Таким образом, основная задача статистической обработки состоит в определении одного из законов распределения исходных случайных величин. В ряде случаев вид закона распределения известен заранее, до опыта.

Например, для аппаратуры ТС обычно справедлив экспоненциальный закон распределения показателей надежности. Он находится из опыта эксплуатации систем. В этом случае опытным путем находится только оценка параметров этого закона. При определении закона распределения целесообразен следующий порядок: подготовка опытных данных; построение гистограммы оцениваемого количественного показателя надежности; аппроксимация гистограммы теоретическим законом распределения и определение его параметров; проверка допустимости предлагаемого закона распределения на основе использования того или иного критерия согласия (Колмогорова, Пирсона и др.).

Успешность всех работ по анализу надежности объектов в значительной мере зависит от состояния системы сбора информации о надежности. Исходными данными для расчетов и моделирования являются данные, собранные в процессе испытаний и эксплуатации. Достоверность оценки надежности, определяемой расчетом и моделированием, проверяется испытаниями и эксплуатацией. Информация о надежности, полученная из сферы эксплуатации, является своеобразной обратной связью в системе анализа надежности. На основании этой информации производится доработка объектов и корректируются оценки надежности. Поэтому организация сбора и обработки информации о надежности имеет чрезвычайно большое значение.

Сбор информации о надежности осуществляется следующим образом.

На предприятии при проведении испытаний заполняются карточки учета неисправностей на каждую неисправность, обнаруженную при испытаниях. В карточке фиксируются: а) наименование объекта; б) форма проявления неисправности (отказа); в) продолжительность работы до отказа и условия работы; г) классификация неисправности (отказа); д) причины неисправности (отказа); е) способ и продолжительность устранения неисправности (отказа); ж) дополнительные сведения и предложения. Карточка заполняется лицом, ответственным за проведение испытаний, и визируется начальником отдела надежности. Далее карточка обрабатывается отделом надежности с целью определения наработки на отказ, среднего времени восстановления, действующих причин, приводящих к отказам, и других данных, необходимых для анализа надежности. Эти данные используются для совершенствования разрабатываемых изделий, сбора статистических данных о надежности, определения необходимого объема и состава ЗИП, планирования профилактических работ, внесения корректив в прогнозирующие оценки надежности.

Данные о надежности объектов, полученные в результате обработки карточек учета неисправностей, пересылаются в информационный центр ведомства и отрасли промышленности. В информационных центрах информация о надежности подвер-

122

гается анализу и обобщению. На основании такого анализа разрабатываются мероприятия по повышению надежности объектов и издаются справочные материалы о показателях надежности.

Информационный центр организует службу сбора информации о надежности объектов в сфере ее эксплуатации (использования).

Карточки учета неисправностей, заполняемые в сфере эксплуатации, по своему содержанию похожи на карточки, заполняемые в сфере производства, за исключением большей полноты сведений об условиях, в которых произошел отказ, его последствиях, затратах и способах устранения, причинах возникновения.

Сбор и обработка информации о надежности становятся эффективными только тогда, когда приобретают характер системы, а не отдельных разрозненных мероприятий. Это обеспечивается строгим выполнением стандартов и других руководящих материалов (положений, инструкций, методических материалов), устанавливающих единство понятий и методов, последовательность работ и ответственность исполнителей.[4]

3.5. Системы диагностирования устройств вычислительной техники

Рассмотренные вопросы позволяют выделить основные направления работ по повышению надежности технических устройств.

В первую очередь надежность устройств достигается за счет использования высоконадежных элементов.

За последние 40 лет интегральные схемы (ИС) развивались бурными темпами и последовательно были созданы ИС малой, средней и большой степени интеграции. В настоящее время создаются сверхбольшие ИС, содержащие десятки тысяч и даже сотни тысяч элементов. Так как технология ИС непрерывно совершенствовалась, то указанное обстоятельство привело к тому, что, несмотря на резкое увеличение числа элементов на одном кристалле, надежность отдельного кристалла оставалась преж-

ней, причем интенсивность отказов схемы, размещенной на кристалле, составляла примерно $10^{-6} - 10^{-8} \text{ ч}^{-1}$.

Дальнейшее развитие элементов автоматики и вычислительной техники будет направлено по пути повышения степени интеграции в ИС, использования оптических элементов, а также внедрения новых типов печатных плат, контактных соединений и т. д.

Особое внимание при создании устройств уделяется подбору стандартизованных и унифицированных элементов, использование которых значительно повышает надежность, так как эти элементы отработаны наилучшим образом в схемном, конструктивном и технологическом отношении.

Вторым направлением повышения надежности является обеспечение оптимальных режимов работы элементов. В первую очередь это касается электрических режимов. Опыт эксплуатации элементов показывает, что оптимальные значения коэффициента нагрузки, при которых интенсивность внезапных отказов наименьшая, находятся в пределах 0,2-0,4. Одновременно установлено, что при этих же значениях коэффициента нагрузки параметры элементов медленнее отклоняются от номинальных. Большое значение имеет выбор коэффициента нагрузки по тепловому, механическому и радиационному режиму. Указанные режимы в большой мере зависят от конструкции устройств, а также от принятых технических решений, и это должно учитываться в процессе проектирования.

Эффективным средством повышения надежности является резервирование.

Резервирование – метод повышения надежности объекта введением дополнительных элементов и функциональных возможностей сверх минимально необходимых для нормального выполнения объектом заданных функций.

Структурное резервирование – метод повышения надежности объекта, предусматривающий использование избыточных элементов, входящих в физическую структуру объекта.

Временное резервирование – метод повышения надежности объекта, предусматривающий использование избыточного времени, выделенного для выполнения задач.

Информационное резервирование – метод повышения надежности объекта, предусматривающий использование избыточной информации сверх минимально необходимой для выполнения задач.

Функциональное резервирование – метод повышения надежности объекта, предусматривающий использование способности элементов выполнять дополнительные функции вместо основных или наряду с ними.

Нагрузочное резервирование – метод повышения надежности объекта, предусматривающий использование способности его элементов воспринимать дополнительные нагрузки сверх номинальных.

Основной элемент – элемент основной физической структуры объекта, минимально необходимой для нормального выполнения объектом его задач.

Резервный элемент – элемент, предназначенный для обеспечения работоспособности объекта в случае отказа основного элемента.

Общее резервирование – резервирование, при котором резервируется объект в целом.

Раздельное резервирование – резервирование, при котором резервируются отдельные элементы объекта или их группы.

Скользящее резервирование – резервирование замещением, при котором группа основных элементов объекта резервируется одним или несколькими резервными элементами, каждый из которых может заменить любой отказавший основной элемент в данной группе.

Нагруженный резерв – резервный элемент, находящийся в том же режиме, что и основной.

Облегченный резерв – резервный элемент, находящийся в менее нагруженном режиме, чем основной.

Ненагруженный резерв – резервный элемент, практически не несущий нагрузок.

Восстанавливаемый резерв – резервный элемент, работоспособность которого в случае отказа подлежит восстановлению в процессе функционирования объекта.

Невосстанавливаемый резерв – резервный элемент, работоспособность которого в случае отказа не подлежит восстановлению в рассматриваемых условиях функционирования объекта.

Дублирование – резервирование, при котором одному основному элементу придается один резервный.

Основным параметром резервирования является его кратность. Под кратностью резервирования понимается отношение числа резервных элементов расчета к числу резервируемых (основных) элементов объекта.

В зависимости от метода и кратности резервирования, а также от способа включения и состояния резерва резервирование можно разделить на резервирование с целой и дробной кратностью, общее и раздельное (или поэлементное), с постоянно включенным резервом и с замещением при «холодном», «теплом» и «горячем» его состоянии.

Опыт использования различных методов резервирования в устройствах автоматики и вычислительной техники показывает, что постоянное резервирование может использоваться по отношению к отдельным элементам или схемам. Для сложных конструкций, как правило, применяется резервирование замещением. Оно же используется и для отдельных устройств. Весьма часто в ТС используются мажоритарное резервирование и самокорректирующие коды.

Временное резервирование широко применяется в средствах вычислительной техники. Его конкретная реализация, например, осуществляется способом двойного – тройного счета. Некоторая задача решается дважды, и сравниваются полученные результаты. Если результаты совпадают, то это означает, что отказы и сбои отсутствуют и можно переходить к решению следующей задачи. Если же результаты не совпадают, то в устройстве произошел отказ или сбой во время одного из этапов вычислений.

Временное резервирование используется в устройствах вычислительной техники при тестовом контроле – периодическом решении специальных задач с известными ответами. На основании сравнения полученного результата с известным ответом можно судить о работоспособности устройства. Очевидно, что

чем больше времени выделяется на тестовый контроль и чем чаще он проводится, тем с большей достоверностью можно судить о работоспособности контролируемого устройства.

Эффективным методом повышения надежности является восстановление отказавших устройств. Здесь в первую очередь возникают вопросы, связанные с обнаружением факта отказа и с поиском отказавших элементов. Как показывает опыт проектирования и эксплуатации ТС, эффективность диагностирования повышается при использовании автоматизированных систем контроля. В качестве центрального звена в этих системах используются ЭВМ, что обеспечивает проверку большого числа контрольных точек в течение небольшого промежутка времени. Определенные особенности имеет и диагностирование устройств вычислительной техники. В этих устройствах широкое применение находят методы диагностирования, основанные на использовании различных логических соотношений, информационного и алгоритмического резерва. За последнее время в средствах вычислительной техники все шире используется сигнатурный анализ, который основан на сжатии информации и представлении информационных массивов в виде их специальных образов - сигнатур. Анализ сигнатур при обработке различных массивов информации позволяет сделать выводы о работоспособности устройств. Время восстановления сокращается за счет обеспечения доступности всех узлов устройства для осмотра, т.е. определяется ремонтпригодностью разрабатываемых конструкций. В настоящее время широко используется модульно-блочный принцип построения устройств, при котором замена отказавших элементов осуществляется путем замены целых блоков. Снятые блоки уже вне изделия подлежат восстановлению на специальных стендах с использованием контрольно-измерительных приборов.

В устройствах вычислительной техники приняты четыре конструктивных уровня: 1) ИС и радиоэлементы; 2) типовые элементы замены (ТЭЗ), представляющие собой печатные платы с размещенными на них ИС; 3) рамы, в которых размещаются ТЭЗ; 4) шкафы, в которых крепятся рамы. Как показывает опыт конструирования ТС, подобное деление существует и для дру-

гих видов радиоэлектронной аппаратуры. Замена отказавших элементов осуществляется путем замены ТЭЗ. Отказавшие ТЭЗ затем поступают в ремонт. Большое значение для обеспечения надёжности имеет качество изготовления аппаратуры, которое определяется технологической дисциплиной, организацией контроля на всех стадиях производства, проведением испытаний и качеством комплектующих и материалов. Существенное влияние на показатели надёжности оказывают качество эксплуатации, принятая система технического обслуживания, обеспечение комплектами ЗИП и его пополнение, подготовленность обслуживающего персонала и ряд других факторов. Анализ надёжности аппаратуры показывает, что примерно 40–45 % всех отказов возникает из-за ошибок на этапе проектирования, 20 % – от ошибок, допущенных при производстве, 30 % – от неправильной эксплуатации и 5–10 % – от естественного износа и старения. Одним из специальных методов повышения надёжности ТС является использование самонастраивающихся и самоорганизующихся систем. Особенно важным является принцип самоорганизации. Для реализации его создаются такие ТС, которые способны изменять свою структуру в процессе функционирования. Перестройка структуры осуществляется таким образом, чтобы обеспечить с помощью сохранивших работоспособность звеньев системы требуемое качество регулируемого процесса. Это приводит к необходимости учета при проектировании систем влияния параметров отдельных звеньев на соответствующие показатели исследуемой системы. Таким образом можно видеть что существует достаточно много направлений в повышении надёжности ТС и их составных частей.

Особенности технического диагностирования ЭВМ. ЭВМ является развитой структурой, содержащей большое число дискретных узлов и устройств; поэтому устройства автоматических систем можно рассматривать как частный случай структур, входящих в состав ЭВМ. Таким образом, основные положения диагностирования ЭВМ в полной мере могут быть перенесены на цифровые устройства, входящие в состав автоматических систем. К таким положениям относятся метод диагностирования (функциональное или тестовое), включение аппаратуры диагно-

128

стирования (внешняя или встроенная аппаратура) и характер системы диагностирования (специализированная или универсальная).

Как и для любой технической системы, все неисправности, возникающие в ЭВМ, можно классифицировать по длительности, внешнему проявлению и причинам возникновения. Определяющим в этом случае для выбора методов диагностирования и способов его реализации является разделение неисправностей на отказы и сбои.

В отношении отказов наиболее слабыми звеньями в ЭВМ являются электромеханические устройства, в частности устройства ввода-вывода, накопители. На долю этих устройств приходится основная часть отказов, возникающих в ЭВМ. И хотя процесс поиска неисправности не отличается большой сложностью, время восстановления их значительно больше по сравнению с электронными устройствами (особенно при условии использования ТЭЗ), поскольку операции по замене износившихся узлов или деталей, регулированию люфтов и зазоров трудоемки.

Классификация и общая характеристика средств и методов диагностирования. В последнее время наметилась тенденция унификации ЭВМ. Не отрицая полезности этой тенденции, следует отметить, что в ТС по-прежнему будет необходимым использование специализированных ЭВМ. Все это вместе с разнообразием задач, решаемых однотипными машинами, заставляет использовать различные методы и средства диагностирования. В практике диагностирования в настоящий момент принято деление на программное, аппаратное и программно-аппаратное диагностирование. Диагностирование любого вида может производиться как в процессе работы машины (в оперативном режиме), так и во время технического обслуживания вручную или автоматически. Аппаратура диагностирования может быть внешней или встроенной, причем и для первого и для второго типа могут быть использованы как специализированные, так и универсальные средства контроля.

Аппаратурные средства диагностирования не выполняют операций, свойственных машине. Они вводятся дополнительно в структуру ЭВМ и функционируют независимо от той или иной

основной задачи, решаемой ЭВМ. Поскольку ЭВМ представляет собой быстродействующую техническую систему, для предупреждения существенных ошибок в обработке информации целесообразно непрерывно отслеживать возможные ошибки в машине. С этой целью используются быстродействующие устройства, позволяющие полностью совместить во времени операции обнаружения ошибок с собственно машинными операциями. Таким образом, аппаратурное диагностирование позволяет осуществлять проверку работоспособности ЭВМ без снижения качества ее функционирования. К недостаткам аппаратурного диагностирования следует отнести усложнение машины за счет введения значительного объема сложной аппаратуры, приводящее в конечном итоге к снижению надежности машины. Немаловажным фактором является и удорожание ЭВМ. В наибольшей степени аппаратурное диагностирование эффективно при обнаружении отказов.

Под программным понимается такое диагностирование, при котором установление факта работоспособности ЭВМ, а следовательно, и поиск неисправности в ней осуществляется с помощью специальных программ, составленных на основе предварительного анализа возможных ситуаций, характеризующихся отказами и сбоями. Программное диагностирование разделяется на тестовое и программно-логическое.

Тестовое диагностирование предполагает использование определенных программ, составленных в виде тестов, позволяющих проверить элементы машины в определенном их сочетании, которое содержит максимальную возможную информацию о состоянии элементов.

В этом случае машина выполняет определенные операции над исходными числами, после чего результаты этих операций сравниваются с известными - эталонными. Несовпадение результатов говорит о наличии определенной неисправности, закодированной в тесте.

Программно-аппаратурное диагностирование является комбинацией двух рассмотренных выше способов. Его применение вызвано стремлением использовать положительные стороны аппаратурного и программного способов: сократить время

поиска и устранения неисправностей и снизить общий объем оборудования.

Выбор той или иной системы диагностирования должен быть подчинен критерию эффективности. Очевидно, им должен быть интегральный критерий, объединяющий наиболее важные показатели. К таким показателям относятся следующие:

1. Вероятность обнаружения неисправности (вероятность того, что время обнаружения неисправности будет меньше заданного или равно ему)

$$F = P(t_0 \leq t_3).$$

2. Вероятность правильного диагностирования D – вероятность того, что неисправность будет обнаружена правильно, т. е. неисправный элемент будет соответствовать указанному в разделе диагностического справочника на машину согласно коду останова.

3. Продолжительность однократного диагностирования τ_D , включающая в себя время собственно диагностирования и время выполнения вспомогательных операций диагностирования. Часто в качестве показателя продолжительности однократного диагностирования используется коэффициент продолжительности диагностирования K_D . Он показывает, какая доля заданного времени восстановления остается на восстановительные процедуры:

$$K_D = 1 - \tau_D / T_B,$$

где T_B – среднее время восстановления неисправного элемента.

4. Глубина поиска дефекта – показатель, характеризующий точность определения места дефекта. С учетом использования ТЭЗ глубина поиска дефекта может быть определена по формуле:

$$L = \sum_{i=1}^N n_i / N,$$

где n_i – число неисправных ТЭЗ при 1-й неисправности; N – число возможных дефектов.

Практика диагностирования показывает, что при развитой системе диагностирования ЭВМ для 90 % возможных дефектов число предполагаемых неисправными сменных блоков, указанных в диагностическом справочнике, не превышает трех.

5. Объем диагностического ядра h – это часть аппаратуры ЭВМ, заведомо исправная до начала диагностирования. Наряду с показателем h используется показатель H , причем

$$H = 1 - h.$$

Известно, что для ЭВМ, в которых используются принцип раскрутки и микродиагностирование, $H \geq 0,9$. Заметим, что физически принцип раскрутки, или, что то же самое, принцип расширяющихся областей, состоит в том, что на каждом этапе диагностирования объем диагностического ядра h и проверенная и признанная исправной аппаратура представляет собой средства тестового диагностирования, а аппаратура очередной проверяемой области является объектом диагностирования.

Тестовое диагностирование. Тестовое диагностирование ЭВМ на сегодня является основным видом диагностирования. Оно осуществляется по специальным программам, определяющим последовательность и характер операций, и сводится к действию над определенными числами с последующей проверкой соответствия полученного результата истинному. Если такое соответствие не наблюдается, фиксируется ошибка несовпадения. Тестовое диагностирование позволяет произвести оценку работоспособности и поиск дефекта

3.6. Оценка живучести

Впервые в мире понятие живучести было сформулировано русским адмиралом Степаном Осиповичем Макаровым - это способность судна продолжать бой, имея повреждения в различных боевых частях. В энергетике под живучестью понимается свойство объекта противостоять возмущениям, не допуская

их каскадного развития с массовым нарушением питания потребителей. Толчком к развитию методов оценки и прогнозирования цепочечных аварий в энергосистемах (ЭС) послужила авария, случившаяся 9 ноября 1965 г. в США, которая привела к тому, что на территории с населением около 30 млн. человек более чем на 10 часов была прекращена подача электроэнергии. Ущерб от аварии составил более 100 млн. долларов. Последовавшие после этого десятки мелких (с экономической точки зрения), но подобных аварий по стране завершились 13 июля 1977 г. аварией в Нью-Йорке. В течение 25 ч. была парализована жизнь Нью-Йорка. Ущерб от последствий этой аварии составил более 1 млрд. долларов. Спустя 26 лет, 14 августа 2003 г. в 16 ч. 11 минут по местному времени из-за повреждения на линии Ниагара - Мохок без электричества осталась почти вся восточная часть Северной Америки, т. е. 50 млн. человек. О каждой из перечисленных аварий можно сказать, что данная энергосистема потеряла живучесть. Живучесть электроэнергетической системы (ЭЭС) зависит от ее структуры, конфигурации, надежности электрооборудования, средств релейной защиты и противоаварийной автоматики, а также от квалификации обслуживающего персонала, запаса устойчивости, резерва активной мощности и т. д. При эксплуатации ЭЭС наблюдается появление так называемых цепочных аварий из-за последовательного отказа в срабатывании нескольких выключателей при отключении повреждений. Цепочные аварии наблюдались в 25 ЭЭС и двух ОЭС бывшего СССР. За 5 лет было зафиксировано 75 цепочных аварий. В 81 % случаев цепочные аварии происходили из-за повреждений в сети и отказа в функционировании защитных коммутационных аппаратов. На цепочные аварии приходится 90 % народнохозяйственного ущерба. Под глубиной цепочной аварии понимается уровень расстройства функционирования установок энергосистемы при авариях и нарушениях в работе. Показателем живучести может служить частота появления системных цепочных аварий с различной глубиной нарушения электроснабжения. Поэтому работа, направленная на разработку новых и совершенствование известных математических моделей и методик по оценке живучести узлов нагрузки, является актуаль-

ной. Решение этих проблем позволит практически не допускать появление каскадных аварий в энергосистемах [5].

На современном этапе развития техники и технологии для оценки живучести узлов нагрузки и надежности схем систем электроснабжения (СЭС) широкое распространение получили элементные методы. В этих методах предполагается, что СЭС состоит из отдельных самостоятельных (в смысле анализа надежности) элементов, исключаются из рассмотрения функциональные зависимости между параметрами отдельных элементов устройства. Рассматриваемые СЭС состоят из элементов : линии электропередачи, трансформаторы, выключатели, отделители, разъединители, автоматические выключатели и т.д. Под узлами схемы понимают физические пункты СЭС, которые непосредственно связаны не менее чем с тремя направлениями передачи энергии, т.е. обычно это сборные шины или секции распределительных устройств и т. д. Для элементов СЭС в работе введены понятия: отказ типа «обрыв цепи» и отказ типа «короткое замыкание» («КЗ»). Кроме перечисленных видов отказов предлагается учитывать и переход аварии через коммутационный аппарат. Обосновано, что нецелесообразно делить отказы, которым подвергается электрооборудование в процессе эксплуатации более чем на три вида. Для Донбасской электроэнергетической системы за 5 лет была обработана статистическая информация о повреждениях электрооборудования подстанций. Получены функции распределения интервалов времени между выходами из строя оборудования по вине человека. Установлено, что для различных энергосистем число выходов из строя оборудования по вине человека колеблется в пределах от 50 до 54%. В работе рассматриваются следующие виды отказов элементов схемы: отказ типа «короткое замыкание», отказ типа «обрыв цепи» и отказ в срабатывании (скрытый отказ). Все остальные отказы, которые встречались в СЭС промышленных предприятий Украины, появлялись на порядок реже отобранных и поэтому в расчетах не учитывались.

Перечисленные виды отказов следует относить к следующим типам электрооборудования:

1. Отказ типа «короткое замыкание». Такой вид отказа может происходить во всех элементах схемы, через которые проходит ток нагрузки в нормальном режиме работы. Короткие замыкания (КЗ) в таких элементах отключаются основной релейной защитой, в зоне действия которой находится рассматриваемый элемент сети, либо резервной с выдержкой времени. Перекрытие изоляции в самом защитном коммутационном аппарате в этих расчетах не учитываем, т. к. повреждения встречаются на порядок реже, чем КЗ в защищаемых этими коммутационными аппаратами элементах сети.

2. Для защитных коммутационных аппаратов учитываются два вида отказов: а) отказ выключателя типа «обрыв цепи». К таким отказам будем относить ложные и излишние отключения выключателей в результате действия релейной защиты, которые ликвидируются с помощью ручного переключения (т. е. без средств автоматики), а также автоматические отключения выключателей в результате повреждений во вторичных цепях релейной защиты; б) отказ выключателя в срабатывании. Эти отказы выявляются в результате профилактических осмотров выключателей: привода, катушки отключения, дугогасительной камеры, контактной системы, оценивается возможность перекрытия изоляции при внешних и внутренних перенапряжениях, проверяются пути утечки тока. Производится осмотр релейных защит, контактов самих реле, проверяются уставки защит, оперативные цепи питания, работа устройства автоматического повторного включения (АПВ), устройства автоматического ввода резерва (АВР) и т. д. Все выявленные в результате профилактики отказы, которые могли бы привести к отказу в срабатывании выключателя при появлении КЗ в зоне действия его релейной защиты, заносятся в специальный журнал и эта информация используется для определения параметров потока отказов системы отключения выключателя. В качестве показателя живучести узла нагрузки используется частота появления цепочной аварии, т. е. частота отключения узла нагрузки при возникновении КЗ в защищаемом элементе сети и отказе в срабатывании ряда защитных коммутационных аппаратов (ЗКА), через которые прошел сквозной аварийный ток.

Под потерей живучести подстанции будем понимать вероятность наступления такого события в течение времени t , при котором подстанция перестает снабжать электроэнергией всех потребителей.

Телекоммуникационные системы и услуги.

В этом разделе рассматривается живучесть и надежность телекоммуникационных систем. Бурный рост телекоммуникационных услуг (на фоне всеобщего промышленного спада) определил необходимость разделения отдела на два с одновременным усилением направлений, связанных с моделированием систем информатики. Таким образом, новый отдел телекоммуникационных систем был основан с целью разработки новых технологий в области информационных телекоммуникационных систем и доведения этих технологий до реального пользователя.

В связи с этим перед отделом были поставлены следующие задачи:

- разработка математических и имитационных моделей и методов анализа и синтеза информационных сетей, удовлетворяющих заданным требованиям. Например, живучестью, надежностью или качеством функционирования;
- разработка ГИС-технологий проектирования и эксплуатации сетей электросвязи различного назначения;
- разработка новых информационных технологий и систем для предоставления принципиально новых услуг для населения и организаций.

Результаты исследования в области математических моделей связности и соответствующих разделов теории живучести информационных сетей нашли применение в практике проектирования реальных сетей связи специального назначения. Разработанные алгоритмы решения NP-трудных задач теории графов и гиперграфов, потоковых задач, задач составления расписания использовались в процессе моделирования сложных иерархических структур. Решены задачи моделирования ремонтных и регламентных работ и оптимизации их расписания. Проводятся исследования и разрабатываются методы проектирования сетей абонентского доступа на базе ГИС-технологий. Разработана технология описания сети, позволяющая моделировать структуру

136

ру сети и ее анализ с применением цифровой карты и в трехмерном пространстве. Созданы программно-аппаратные средства для интеллектуальных сетей связи и работы в области компьютерной телефонии. В частности, разработан программный комплекс автоматизированного телефонного сервиса, включающий в себя речевую почту, факс по телефону, систему оповещения абонентов и автоматизированную справочную службу. Проводятся исследования экономических и технических предпосылок создания автономных цифровых радиосетей для общественных телекоммуникационных услуг. Разработана концепция автономной цифровой радиосети быстрого развертывания с использованием аэростатов в качестве носителей антенн и части приемо-передающего оборудования. Данный проект финансировался институтом CNET Francs-Telecom и получил одобрение французских специалистов. Такие системы связи могли бы быть полезными при чрезвычайных ситуациях или в районах, где разворачивание обычных средств связи невозможно.

Разрабатываются математические модели, программные системы моделирования и оптимизации цифровых информационных систем для различных режимов их функционирования. В частности – модели катастрофических процессов в информационных сетях [6].

3.7. Оценка безопасности технических систем

Ученый Дунин-Барковский дал такое определение термина «технологическая надежность»: «...свойство технологического оборудования и производственно-технических систем, таких, как станок, система литейного, кузнечно-прессового или другого производственно-технического оборудования или автоматических линий, сохранить на заданном уровне выходные параметры качества производимого изделия в течение требуемого времени». Затем А.С. Проников ввел понятие «надежность технологических процессов». Он пишет, что «большой процент отказов различных машин связан с недостаточной надежностью технологического процесса», что «...«технологический процесс должен быть надежным, т. е. не допускать таких показателей,

которые могут влиять на качество выпускаемых изделий». Вопросы оценки надежности технологических процессов и безотказности рассматриваются также в работах П.И. Бобрика, А. Л. Меерова и других, причем только с точки зрения способности технологических систем, процессов и операций обеспечивать (в течение заданного времени) изготовление продукции с показателями качества в соответствии с установленными требованиями. Но очевидно, что изменение во времени характеристик технологических систем может приводить к изменению не только качества изготовления продукции, но и производительности. Отказы технологических систем в большинстве случаев приводят не к появлению бракованных изделий, а к задержке в выполнении задания, что сказывается на производительности оборудования. Поэтому, характеризуя свойство надежности технологических систем, целесообразно его рассматривать с точки зрения выполнения заданий как по показателям качества, так и по объему изготавливаемой продукции. Таким образом, в технической литературе широкое освещение получили вопросы применения методов теории надежности к анализу свойств технологических систем обеспечивать изготовление продукции в соответствии с требованиями технической документации и в установленном объеме.

Технологическая система – это совокупность средств технологического оснащения, объектов производства и, в общем случае, исполнителей, необходимая и достаточная для выполнения определенных технологических процессов и операций и находящаяся в состоянии готовности к функционированию или в состоянии функционирования в соответствии с требованиями технической документации. Таким образом, можно рассматривать технологическую систему для выполнения одной операции и технологическую систему для выполнения некоторого процесса, состоящего из отдельных операций. В технологическую систему входят элементы, для которых обязательно наличие функциональных связей, обеспечивающих протекание технологических процессов изготовления продукции. Частным случаем таких связей являются кинематические связи между отдельными элементами (например, в системе станок — приспособление –

инструмент – деталь). Надежностью технической системы будем называть свойство системы выполнять заданные функции, сохраняя показатели качества и ритм выпуска годной продукции в течение требуемых промежутков времени эксплуатации или требуемой наработки. Ритм выпуска – это количество изделий определенного наименования, типоразмера и исполнения, выпускаемых в единицу времени. Из определений следует, что техническую систему можно считать надежной в том случае, если она обеспечивает выполнение задания по показателям качества изготавливаемой или изготовленной продукции и по параметрам производительности. Параметры и свойства технической системы и ее элементов изменяются в процессе функционирования, т. е. при протекании технологического процесса или операции. Поэтому техническая система в определенный момент может находиться в работоспособном или неработоспособном состоянии. При проведении исследований можно оценивать работоспособность системы как отдельно — по ее способности обеспечивать требуемый уровень качества изготовленной продукции и по параметрам производительности, так и по обоим свойствам одновременно с учетом зависимости между ними. Техническая система работоспособна по параметрам качества, если обеспечивает изготовление продукции с показателями качества, соответствующими требованиям технической документации, и работоспособна по параметрам производительности, если обеспечивает установленный ритм выпуска. Отдельные нарушения в технической системе будем относить к категории повреждений, если они переводят систему из исправного состояния в неисправное, и к отказам, если они переводят систему из работоспособного состояния в неработоспособное. Таким образом, отказ технологической системы – это событие, заключающееся в потере работоспособности. В дальнейшем постепенные и внезапные отказы будут относиться к категории отказов, обусловленных состоянием системы, т. е. к внутренним отказам. Но технологические системы отдельных операций или процессов могут находиться в состоянии неработоспособности также из-за внешних факторов (нарушение электроснабжения, повреждения помещений, отсутствие материала, заготовок и т.

д.). Очевидно, что внешние факторы приводят к снижению надежности по параметрам производительности. К внешним отказам следует относить также простои технологических систем по организационным причинам. Для того, чтобы решить проблему повышения надежности машин и механизмов, необходимо не просто констатировать факт отказа, но рассматривать каждый случай преждевременного отказа как событие и устанавливать истинную причину нарушения работоспособности. Анализ должен начинаться с установления места отказа. Каждый вид повреждения или отказа имеет различные формы проявления. Все причины отказов могут быть отнесены к одной из следующих трех основных групп: ошибки проектирования и изготовления; ошибки эксплуатации; внешние причины, т.е. причины, непосредственно не зависящие от рассматриваемого изделия или узла.

Типичными дефектами конструирования являются: недостаточная защищенность узлов трения, наличие концентраторов напряжения, неправильный расчет несущей способности, неправильный выбор материалов и др. К наиболее типичным дефектам технологии следует отнести: дефекты из-за неправильного состава материала, дефекты при плавке и изготовлении заготовок, ошибки при механической обработке и др. Основными эксплуатационными причинами отказов и повреждений являются: нарушение условий применения; неправильное техническое обслуживание; наличие перегрузок и непредвиденных нагрузок, обусловленных нарушениями в энергоснабжении, влиянием связанных отказов (вторичные повреждения), влиянием явлений природы, попаданием в механизм посторонних предметов и т. д.

Подобная классификация позволяет только отнести зафиксированный отказ к одной из названных выше причин. Задача заключается в том, чтобы, зная физическую причину разрушения, обеспечить конструирование изделий с установленной долговечностью. Поэтому важно по внешнему виду разрушенной детали сделать правильный предварительный вывод о причинах разрушения.

При решении любой задачи по оценке надежности технологических систем исходят из следующих предпосылок:

1) Надежность технологических систем должна оцениваться только по тем параметрам и показателям качества изготовленной продукции, уровень которых зависит от рассматриваемой операции. Например, при шлифовании вала обработке подлежит только одна поверхность, а остальные не изменяются. Поэтому оценка надежности такой операции шлифования зависит от условий обеспечения необходимого размера и шероховатости только обрабатываемой поверхности.

Многие показатели эргономичности и технической эстетики однозначно определяются конструкцией изделия и не зависят от надежности технологических операций (например, расположение и число точек смазки в изготавливаемом изделии, обзорность и т. д.). Поэтому при расчете надежности технологических операций такие показатели качества готового изделия не должны учитываться.

2) При расчете надежности технологических систем следует исходить из того, что в конструкторской документации однозначно заданы номинальные значения и показатели качества готового изделия. При оценке же надежности технологических операций (как в процессе технологической подготовки производства, так и в серийном изготовлении) следует только учитывать, насколько процесс изготовления обеспечивает соблюдение установленных требований, и не рассматривать при этом соответствия современному уровню показателей, заложенному в конструкторской документации. Это значит, что технологический процесс может обладать высокой надежностью, хотя полученная при его реализации продукция может относиться ко второй категории качества.

3) При оценке надежности технологических систем в условиях серийного производства следует исходить из заданных в технологической документации технологических маршрутов, режимов и средств технологического оснащения.

4) Отработка технологических операции и процессов по показателям надежности на этапе подготовки производства должна проводиться путем отыскания лучшего технологического решения по экономическим критериям и вероятности выпол-

нения задания по показателям качества изготовленной продукции и параметрам производительности.

Оценка надежности технологических систем сводится к дифференцированной оценке показателей безотказности, долговечности и ремонтпригодности или к вычислению, при необходимости, комплексных показателей, характеризующих одновременно все составные свойства надежности.

Оценка безотказности сводится к определению:

- вероятности того, что рассматриваемый технологический процесс (или операция) обеспечит изготовление продукции в соответствии с требуемыми технической документацией показателями качества в течение заданного интервала времени без вынужденных перерывов при одновременном обеспечении заданного объема производства в единицу времени (ритма запуска); средней наработки до отказа; параметра потока отказов.

При оценке показателей безотказности не учитываются вынужденные простои оборудования, обусловленные организационными причинами.

Для непрерывных технологических операций за наработку принимается продолжительность работы (ч); для дискретных технологических операций (обработка резанием, штамповка и т. д.) – число обработанных деталей или число обработанных прутков (при изготовлении деталей из пруткового материала). При оценке безотказности автоматических линий, а также технологических операций, за единицу наработки принимается количество изготовленных деталей после финишной операции. Операция контроля должна рассматриваться как неотъемлемая часть соответствующих технологических операций. Отказом технологической системы по показателям качества не следует считать произошедшее после операции обработки отклонение от требований технической документации по одному из показателей качества, выявленное при контрольной операции, в результате чего дефектная деталь или изолирована или направлена на доработку (переработку). При оценке безотказности по параметрам производительности время изготовления дефектной продукции должно учитываться как время, затраченное на устранение отказа. Для дорогостоящих и трудоемких в изготовлении

изделий безотказность должна оцениваться для операции обработки и отдельно для контрольной операции.

Оценка долговечности сводится к определению: календарной продолжительности функционирования технологической системы до отказа, капитального ремонта, между ремонтами, до полной замены; наработок системы до тех же периодов.

Оценка ремонтпригодности технологической системы сводится: к определению показателей, характеризующих продолжительность и стоимость выявления и устранения отказов; к установлению времени, потребного для приведения системы в рабочее состояние; к устранению показателей, характеризующих трудоемкость и стоимость операций технического обслуживания технологических систем, подналадок, смены инструмента.

Оценка надежности технологических систем проводится путем вычисления показателей надежности на этапах технологической подготовки производства, серийного изготовления, а также после капитального ремонта или модернизации важнейших элементов технологических систем.

Основная цель оценок надежности технологических систем – приведение технологических процессов в такое состояние, при котором обеспечивается изготовление продукции в соответствии с установленными в технической документации параметрами и показателями качества при одновременном обеспечении максимальной производительности и минимуме потерь от брака. В зависимости от этапа проведения оценок могут решаться частные задачи:

- при планировании — установление объемов производства отдельных участков и цехов, определение экономически обоснованных норм точности;

- при технологической подготовке производства – выбор оптимальных технологических процессов (выбор режимов обработки, установление мест контрольных операций в технологическом процессе и планов контроля);

- при серийном производстве — определение соответствия параметров технологической системы установленным требованиям, выявление отрицательных факторов и разработка меро-

приятый по повышению надежности или точности и стабильности технологических процессов;

- после проведения ремонтов технологических систем — оценка качества ремонта.

Эти же методы могут быть использованы для организации приемо-сдаточных испытаний после ремонта основных элементов технологических систем или после их модернизации.

В основу современного развития работ по теории надежности могут быть положены следующие предпосылки:

- большинство отказов, которые появляются при эксплуатации изделий, можно было предвидеть заранее, поэтому их нельзя считать случайными;

- большинство внезапных отказов объясняются недоработкой и ошибками конструирования, изготовления и сборки, поэтому необходимо не просто констатировать факты появления внезапных отказов, а разрабатывать способы, исключающие их возможность;

- большинство методов промышленного контроля в действительности не позволяет обнаружить дефекты; нужны новые методы контроля, дающие возможность прогнозировать моменты появления отказов с целью своевременного принятия необходимых мер, исключающих внезапный характер отказов;

- надежность технических систем должна оцениваться еще на стадии проектирования;

- управление надежностью должно носить комплексный характер и обеспечиваться на этапах проектирования, изготовления, эксплуатации и ремонта.

Поскольку уровень надежности в значительной степени определяет развитие техники по основным направлениям, мы должны стремиться достичь высокой надежности технических средств, применяемых в технологическом процессе.

Но невозможно достичь высокой надежности и долговечности с непрогрессивным рабочим процессом и несовершенной схемой или несовершенными механизмами.

Поэтому первым направлением повышения надежности является обеспечение необходимого технического уровня изделий.

Кроме этого, следует применять агрегаты с высокой надежностью и долговечностью, которые обеспечиваются самой природой, т.е. быстроходных агрегатов без механических передач; деталей, работающих при напряжениях ниже пределов выносливости, и др.

Необходимо отметить, что переход на изготовление машин по строго регламентированной технологии включает в себе резерв повышения надежности. Этап конструирования системы является очень важным, поскольку на нем закладывается уровень надежности систем безопасности. При конструировании и проектировании следует ориентироваться на простые структуры, имеющие наименьшее количество элементов, поскольку сокращение количества элементов является существенной мерой повышения надежности. Но уменьшение количества элементов не следует противопоставлять резервированию как эффективному способу повышения надежности, но приводящему, на первый взгляд, к завышенному количеству элементов конструкции. Очевидно, что следует принимать компромиссное решение между необходимостью сокращения количества элементов и применением резервирования наименее надежных элементов [7].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Пути обеспечения надежности разнообразны и могут быть связаны с повышением стойкости изделия к внешним воздействиям. Например, для механических систем относят методы создания прочных, жестких, износостойких узлов за счет их рациональной конструкции, применение материалов с высокой прочностью, износостойкостью, антикоррозийностью, теплостойкостью и т. д. Другой путь обеспечения достаточной надежности – это их изоляция от вредных воздействий: установка машины на фундамент, защита поверхностей от запыления и загрязнения, создание специальных условий по температуре и влажности, применение антикоррозийных покрытий, виброизолирующих устройств и т. д. Активным средством для решения проблемы надежности и безопасности является применение автоматики для обеспечения длительного выполнения системой своего служебного назначения в различных условиях эксплуатации. Не менее значимым является обучение персонала вопросам безопасной эксплуатации технических систем.

Для недопущения отказов конструктивного, производственного и эксплуатационного характера существуют типовые мероприятия, методы и средства предупредительного, контролирующего и защитного характера, обеспечивающие надежность и безопасность технических систем. Их применяют на различных этапах жизненного цикла системы – в процессе проектирования, на последующих стадиях создания и эксплуатации системы.

Глоссарий

Отказ – любое событие, заключающееся в нарушении работоспособности.

Безотказность – свойство изделия сохранять работоспособность в течение некоторого времени.

Резервирование – метод повышения надежности объекта введением дополнительных элементов.

Надежность – способность системы сохранять свои характеристики в заданных условиях и заданных условиях эксплуатации.

Наработка – продолжительность или объем работы объекта.

Работоспособность – состояние системы, при котором она способна выполнять заданные функции, сохраняя заданные значения параметров.

Интенсивность отказов – условная плотность вероятности отказа невосстанавливаемого объекта, определяемая для момента времени при условии, что до этого момента отказ не возник.

Срок службы – время от начала эксплуатации системы до ее технической непригодности.

Избыточность – дополнительные средства и возможности сверх минимально необходимых для обеспечения заданной надежности.

Риск – количественная характеристика действия опасностей.

Индивидуальный риск – характеризует реализацию опасности определенного вида деятельности для конкретного индивидуума.

Коллективный риск – травмирование или гибель двух и более человек от воздействия опасных и вредных производственных факторов.

Приемлемый риск – это такой низкий уровень смертности, травматизма или инвалидности людей, который не влияет на экономические показатели предприятия.

Авария – нарушение технологического процесса.

Социальный риск – интегральная характеристика последствий реализации опасностей определенного вида.

Валеологический риск – количественный показатель, выражающий вероятность причинения вреда, ущерба здоровью, гибели человека в рассматриваемых условиях жизнедеятельности за определенный период.

Риск-анализ – упорядоченная последовательность этапов научно-практических исследований, направленных и обоснованных характеристик риска, а также на выявление эффективных мер по его сокращению.

Оценка риска – процесс или метод оценки риска, связанного с определенной опасностью.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Глинский Б.А., Грязнов Б.С. и др. Моделирование как метод научного исследования. – М.: Из-во Московского университета. – 1965. – 247 с.
2. Бусленко Н.П. Моделирование сложных систем. – М.: Наука, 1978. – 399 с.
3. Хашиковский А.В., Саларев С.А. Програмное информационное обеспечение ДОЗОРиск // Журнал «БЖД». – № 9. – 2006.
4. Горшков Ю.Г., Юсупов Р.Х., Зайнишев А.В. Прогнозирование состояния производственного травматизма на основе теории информационных цепей // Журнал «БЖД». – № 9. – 2006.
5. Кубарев А.И. Надежность в машиностроении. – М.: Изд-во стандартов, 1977.
6. Решетов Д.Н., Иванов А.С., Фадеев В.З. Надежность машин. – М.: Изд-во стандартов, 1988.
7. Проников А.С. Основы надежности и долговечности машин. – М.: Изд-во стандартов, 1986.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	3
ГЛАВА I. Основные понятия надежности.....	4
1.1. Основные понятия и определения надежности	4
1.2. Классификация отказов технических систем (ТС)	14
1.3. Количественные показатели надежности.....	21
1.4. Основные законы, используемые в теории надежности	32
1.5. Надежность человека как звена технической системы	44
ГЛАВА II. Критерии надежности	54
2.1. Влияние климатических факторов на надежность	54
2.2. Критерии надежности	67
2.3. Выбор показателей надежности	76
2.4. Задание требований по надежности	82
ГЛАВА III. Оценка надежности	86
3.1. Сбор статистической информации и методы ее обработки	86
3.2. Основные вопросы эксплуатационной надежности.....	97
3.3. Экспериментальная оценка надежности.....	105
3.4. Организационные вопросы обеспечения надежности ТС	115
3.5. Системы диагностирования устройств вычислитель- ной техники	123
3.6. Оценка живучести.....	132
3.7. Оценка безопасности технических систем.....	137
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	146
Глоссарий.....	147
Библиографический список.....	149

Учебное издание

Хайрлиева Нурхаят Гарифовна

ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ, ЖИВУЧЕСТИ И БЕЗОПАСНОСТИ
ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Учебное пособие

Нач. РО ИИЦ

З. Губайдулина

Редактор

З. Губайдулина

Компьютерная верстка

Л. Касжанова

Подписано в печать 08.04.2013 г.

Тираж 300 экз. Формат 60х84х 1/16. Бумага типогр. № 1.

Уч.-изд.л. 9,4. Усл. п.л. 8,7. Заказ № 46. Цена договорная.

Издание Казахского национального технического университета

им. К.И. Сатпаева

Информационно-издательский центр КазНТУ,

г. Алматы, ул. Сатпаева, 22

ISBN 978-601-228-498-0



9 786012 284980