

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ АКАДЕМИКА С.П. КОРОЛЕВА
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»

А. В. Зеленский, В. А. Зеленский

**НАДЕЖНОСТЬ СЛОЖНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ
СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ**

Электронное учебное пособие

Самара
2012

УДК 621.396.4
З – 486

Авторы: **Зеленский Анатолий Васильевич,**
Зеленский Владимир Анатольевич

Зеленский, А. В., Надежность сложных электронных систем специального назначения [Электронный ресурс]: электрон. учеб. пособие / А. В. Зеленский, В. А. Зеленский; Минобрнауки России. Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С.П.Королева (нац. исслед. ун-т). – Электрон. текстовые и граф. дан. (690 Кбайт). – Самара 2012, 1 эл. опт. диск (CD-RW).

Режим доступа: <http://rtfmoodle.ssau.ru>

В учебном пособии рассмотрены вопросы расчета надежности сложных электронных систем специального назначения. Область применения подобных систем – энергетика, нефтегазовая промышленность, авиация и космос. Особенностью систем является повышенное воздействие внешних факторов, учет которых и является предметом настоящего учебного пособия.

Учебное пособие «Надежность сложных электронных систем специального назначения» рекомендуется магистрантам РТФ направления 211000.68 «Конструирование и технология электронных средств», изучающим дисциплину «Надежность и испытания электронных средств специального назначения» в 9 семестре.

Электронное учебное пособие разработано на кафедре конструирования и производства радиоэлектронных средств радиотехнического факультета Самарского государственного аэрокосмического университета.

© Самарский государственный
аэрокосмический университет, 2012

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
1. ВЛИЯНИЕ ОБСЛУЖИВАНИЯ НА НАДЕЖНОСТЬ СЛОЖНОЙ ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ.....	12
2. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ.....	24
2.1 Составляющие надёжности систем.....	24
2.1.2 Классификация и характеристики отказов.....	26
2.1.3. Составляющие надёжности.....	30
2.1.4 Основные показатели надёжности.....	32
2.2 Количественные показатели безотказности и математические модели надёжности.....	33
2.2.1 Статистические и вероятностные формы представления показателей безотказности невосстанавливаемых объектов.....	33
2.2.2 Математические модели надёжности.....	40
2.2.3 Расчёт характеристик надёжности невосстанавливаемых объектов при основном соединении элементов.....	45
2.2.4 Показатели надёжности восстанавливаемых объектов.....	47
2.2.5 Резервирование систем.....	50
2.2.6 Типовые структуры расчета надёжности.....	54
2.3 Методы обеспечения надёжности сложных систем.....	57
2.3.1 Конструктивные способы обеспечения надёжности.....	57
2.3.2 Технологические способы обеспечения надёжности изделий в процессе изготовления.....	58
2.3.3 Обеспечение надёжности сложных технических систем в условиях эксплуатации.....	59
2.3.4 Пути повышения надёжности сложных технических систем при эксплуатации.....	60
2.3.5 Организационно-технические методы по восстановлению и поддержанию надёжности техники при эксплуатации.....	62
3. СПЕЦИАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ НАДЕЖНОСТИ СЛОЖНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ.....	65

ВВЕДЕНИЕ

Современные атомные, тепловые и гидроэлектростанции, системы добычи и транспортировки углеводородов, химические и металлургические производства, крупные производственные комплексы являются сложными техническими объектами, функционирующими в условиях значительного износа основного и вспомогательного оборудования. В условиях медленно протекающей модернизации единственной возможностью поддержания работоспособности оборудования является развитие и применение систем мониторинга объекта с целью своевременного и всестороннего анализа происходящих технологических процессов, диагностики состояния и прогнозов поведения в будущем. Необходимость мониторинга подтверждается Концепцией федеральной системы мониторинга критически важных объектов и (или) потенциально опасных объектов инфраструктуры и опасных грузов (принята распоряжением Правительства РФ № 1314-р от 27.08.2005 г.). Другим правоустанавливающим документом является Федеральная целевая программа «Снижение рисков и смягчение последствий чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в Российской Федерации до 2010 года, принятая постановлением №1 Правительства РФ от 06.01.2006 г.

Применяемые в промышленности мониторинговые системы, построенные на основе классических информационно-измерительных систем (ИИС), обладают рядом недостатков. Они разработаны для предприятий определенного профиля, являются узкоспециализированными, ведомственными; подвержены влиянию внешних дестабилизирующих факторов, приводящих к сбоям и отказам; плохо адаптируются к изменению происходящих в объекте процессов, не учитывают влияние человеческого фактора; плохо защищены от несанкционированного преднамеренного или случайного вмешательства в их работу.

Поэтому разработка и исследование ИИС, сочетающих в себе способность надежно работать в жестких условиях эксплуатации с

технологичностью изготовления, гибкостью применения и конкурентной стоимостью, представляет собой серьезную научную проблему, решение которой имеет большое значение для отечественной науки и техники. Повышение безопасности эксплуатации сложных технических объектов является существенным вкладом в развитие экономики страны.

В процессе анализа выявлено, что сложные технические объекты имеют целый ряд особенностей: многоаспектность и неопределенность поведения, иерархическую структуру, избыточность составляющих объект элементов и подсистем, неоднозначность связей между ними, многовариантность реализации функций управления, территориальную распределенность. Поэтому в современных условиях весьма актуальной становится разработка способов, алгоритмов и технических средств постоянного наблюдения за состоянием сложного объекта, анализа происходящих в нем процессов, диагностики и предсказания поведения объекта в будущем.

Среди промышленных разработок в данной области можно отметить систему ДАКР-1 НПО «Прочность», мониторинговые системы серии FD компании Fiber SenSys Inc, систему IntelliFIBER компании Senstar-Stellar, систему INNO-FENCE фирмы Magal, систему SabreLine фирмы Remsdaq, систему F-8000-Marinet фирмы TSS, систему MSL компании FFT.

Однако, не смотря на очевидные преимущества работы в оптическом диапазоне, широкому применению мониторинговых ИИС препятствуют следующие факторы:

- сложность интеграции отдельных элементов в единую ИИС, а также интеграции самой системы с объектом мониторинга;

- ограниченное применение мультиплексирования каналов передачи данных ввиду сложности данной процедуры в случае использования аналоговых волоконно-оптических датчиков;

- отсутствие гибкой логики, адаптируемости к изменению условий работы, недостаточная развитость механизмов прогнозирования;

- сложность масштабирования системы без принципиального изменения

структуры системы;

недостаточная надежность ИИС .

Таким образом, существующие ИИС мониторинга сложных технических систем не отвечают в полной мере предъявляемым к ним требованиям. Поэтому разработка и исследование таких систем, сочетающих в себе способность надежно и эффективно работать в жестких условиях эксплуатации с технологичностью изготовления, гибкостью применения и конкурентной стоимостью, представляет собой актуальную и важную техническую задачу.

Обеспечение надежности, одной из важнейших проблем при создании, отработке и эксплуатации сложных систем является государственной проблемой. Большой круг проблем обеспечения надежности связан с вопросами оптимизации различных решений. При определении неисправности, выявлении причин недоработок в сложной технической системе нельзя действовать только интуитивно или перебирать элементы устройства, ибо это непроизводительно и дорого. Хорошо известно, что реальные устройства несут в себе элементы неопределенности и случайности. Это связано с тем, что создаваемые и эксплуатируемые системы изнашиваются, стареют, что приводит к разбросу сроков их службы, а неграмотная эксплуатация — и к авариям. В силу «неидеальных» производственных процессов и применяемых материалов качество изделий оказывается неоднородным и также имеет случайные разбросы.

Многие задачи, связанные с надежностью техники, такие, как резервирование, определение запасных узлов и деталей, проблемы профилактического обслуживания, методы оптимального конструирования и испытаний, влияние человека на эксплуатацию системы, оказались взаимосвязанными со многими разделами математики, физики, механики, химии и другими фундаментальными науками.

Особое место в надежности занимают теория массового обслуживания, математическая статистика. Это связано с тем, что полученные при испытаниях, эксплуатации, экспериментальных исследованиях данные еще

сами по себе ни о чем не говорят. Ими еще надо умело распорядиться, т. е. проанализировать, сделать правильные выводы и обобщения, соответствующие реальному течению процессов, а без научных методов это выполнить невозможно. Следует также разработать рациональные методы проведения испытаний и эксплуатации для последующей обработки данных. Важны также контроль и управление качеством и надежностью как в производстве, так и в эксплуатации. Цель контроля и управления качеством в производстве — не допустить выхода некачественной продукции, а в эксплуатации — не дать развиться аварийным ситуациям. Ряд методов, которые излагаются применительно к эксплуатации технических систем и отработке в процессе их создания, позволяют выяснить физическую сущность рассматриваемых явлений, установить количественную взаимосвязь между отдельными элементами процесса эксплуатации и отработки. Эти вопросы пока еще не до конца решены, и их решение должно способствовать прогрессу фундаментальных наук. Знание и понимание того, что сделано и на что способна наука в настоящее время, являются предпосылкой дальнейшего развития и совершенствования других научных направлений и их приложений.

В данном пособии рассмотрены некоторые теоретические и практические положения, а также методы, которые могут быть применены для обеспечения надежности технических систем в процессе эксплуатации и отработки.

Широта охвата материала — от оценок надежности устройств и их элементов и решения задач предэксплуатационных испытаний, выбора параметров технического обслуживания до рассмотрения вопросов организации эксплуатации, ремонта устройств — отличает это пособие от уже изданных по эксплуатации технических систем. В книге выдерживается математически строгое и достаточно доступное изложение материала, объясняются физические трактовки и приводятся практические приложения полученных решений, рассматриваются некоторые задачи, имеющие самостоятельный научный интерес.

В решении проблемы надежности технических систем существенное

значение имеет использование математических методов. Математическое обеспечение является неотъемлемой частью управления качеством и надежностью устройств на этапах их проектирования, изготовления и эксплуатации.

Наиболее перспективным путем внедрения математической теории надежности в практику является алгоритмизация расчетов обеспечения надежности, иными словами — разработка таких математических методов, которые позволили бы единообразно решать в соответствии с заданным алгоритмом широкие классы задач теории надежности. С расчетами по обеспечению надежности технических устройств повседневно соприкасаются разработчики, эксплуатационники, специалисты по контролю. Им приходится перебирать большое число конструктивных вариантов и возможных режимов работы создаваемых и эксплуатируемых устройств. Поэтому при любых целях расчета надежности необходимо иметь гибкий аппарат, с помощью которого можно было бы составлять характеристики большого числа вариантов устройств единообразно, т. е. с помощью одного и того же набора алгоритмов.

Конечной целью расчета обеспечения надежности технических устройств на этапе их проектирования является нахождение оптимальных конструктивных решений и параметров, наилучших режимов эксплуатации, стратегии обслуживания. Если при этом учесть наметившуюся тенденцию ко все более широкому использованию при расчетах надежности методов статистического моделирования, то становится понятной важность решения оптимизационных задач теории надежности методом стохастического программирования. По своей математической формулировке оптимизационные задачи теории надежности относятся к различным областям математического программирования. Например, в области эксплуатации — это задача выбора оптимального числа ремонтных устройств, объема запасных частей, периодичности проведения профилактических мероприятий и т. д. Задача оптимальной кратности резервирования является типичной задачей дискретного программирования. Для многих задач теории надежности

характерно наличие определенной монотонности их структуры, поэтому для их решения используется метод последовательного анализа вариантов. В частности, метод динамического программирования и последовательного анализа вариантов позволяет проводить оптимальное распределение средств между отдельными компонентами сложных систем для обеспечения их надежности.

Используя идею последовательного отсеивания вариантов, можно создать эффективную вычислительную схему решения задачи оптимального резервирования и на основе ее обобщать результаты в тех случаях, когда резервные элементы подсистем характеризуются различными надежностными и эксплуатационными показателями. Другой класс оптимизационных задач теории надежности возникает при выборе оптимальных значений параметров системы:

выбор оптимального периода контроля и профилактики, оптимальных характеристик надежности элементов системы, когда повышение их надежности сопряжено с материальными затратами;

выбор оптимальных вероятностей смены режимов работы системы в процессе эксплуатации.

В пособии используются понятия сложной динамической системы (или устройства) или элемента, входящего в ее состав. Под сложностью обычно понимается не сумма узлов, агрегатов, элементов, составляющих систему (устройство), а их взаимодействие. Сложность взаимодействия составляющих определяется количеством связей между самими элементами и между системой и средой.

Сложная динамическая система, образованная из элементов различной природы, обладает некоторыми функциями и свойствами, отсутствующими у каждого отдельного элемента и способна функционировать, статистически коррелируя в некотором диапазоне с окружающей средой. Благодаря этому она сохраняет свою структуру в ходе непрерывного изменения взаимодействующих элементов по динамическим законам. Сложные динамические системы яв-

ляются нелинейными системами, математическое описание которых на современном этапе не всегда возможно.

В связи с ухудшением свойств системы в процессе эксплуатации возникает потребность в периодическом ее обслуживании, цель которого — сохранить способность системы выполнять свои функции. Поэтому основополагающее значение здесь имеют информационные процессы, цикличность которых обеспечивается механизмом обратных связей. На основании информации организуется управление состоянием устройства, т. е. процессы управления определяются их связью с информацией. Создание адаптивных, самообучающихся динамических устройств позволяет повысить эффективность усвоения информации в целях управления их состоянием.

Можно спроектировать систему, отвечающую заданным техническим требованиям, но не удовлетворяющую требованиям экономическим, обслуживания и функционирования в звене «человек — машина».

В пособии рассматривается решение частных задач обеспечения надежности при создании и обслуживании технических систем и их элементов аналитическими методами.

Основными признаками сложной технической системы (или устройства) являются:

обладание определенным единством цели и способствование выработке оптимальных выходов из имеющегося множества входов. Оптимальность выходов должна оцениваться по заранее разработанному критерию эффективности;

выполнение большого количества различных функций, которые осуществляются множеством входящих в систему частей или элементов;

сложность функционирования (изменение одной переменной влечет за собой изменение многих переменных и, как правило, нелинейным образом);

высокая степень автоматизации;

возможность статистического описания поступающего в систему возмущения.

Это означает, что невозможно предсказать точное значение внешних нагрузок, а применение альтернативных методов определения пиковых нагрузок в производственных условиях затруднительно. Входные возмущения могут быть множественными и, как правило, различных типов.

Эксплуатация технической системы — непрерывный процесс, который требует планового и регулярного воздействия на систему в целом или на ее составляющие, что должно обеспечивать поддержание системы в рабочем состоянии с определенной надежностью. Плановое техническое обслуживание, восстановление работоспособности после отказа, хранение, подготовка к работе и другие работы по обеспечению надежности не охватывают всех мероприятий, которые составляют процесс эксплуатации систем. Поэтому под эксплуатацией системы в широком смысле следует понимать процесс использования системы по назначению и поддержания ее в исправном состоянии с высокой степенью надежности. Для того, чтобы управлять процессом эксплуатации системы, необходимо предвидеть возможные состояния, которые определяются совокупностью значений технических характеристик. В общем случае в процессе эксплуатации технические характеристики изменяются непрерывно, поэтому и состояний системы может быть бесконечное множество.

1. ВЛИЯНИЕ ОБСЛУЖИВАНИЯ НА НАДЕЖНОСТЬ СЛОЖНОЙ ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

1.1. Влияние обслуживания на надежность электронных средств технических устройств

Поддержание надежности технических устройств на заданном уровне требует постоянного контроля и вмешательства обслуживающего персонала в их работу. Это и определяет комплекс и объем работ, направленных на обеспечение надежности устройства в эксплуатации.

В процессе эксплуатации принято говорить об эксплуатационной надежности системы (устройства), т. е. ее свойстве безотказно работать в течение определенного времени в заданных условиях при соблюдении установленных нормами мер обслуживания и текущего ремонта. Следовательно, определение надежности только на основании данных о разбросе параметров элементов систем и среднего времени между отказами является недостаточным. Перечислим эксплуатационные факторы, позволяющие получить более полную характеристику надежности систем:

- квалификация обслуживающего персонала;
- качество и количество проводимых работ по обслуживанию и поддержанию ее надежности;
- наличие запасных частей;
- использование измерительной и проверочной аппаратуры, своевременный ее ремонт и проверка;
- наличие технических описаний, инструкций об эксплуатации систем и измерительных приборов, условиях погрузки и транспортировки систем;
- рекомендаций по их распаковке и упаковке.

При оценке надежности также нельзя не учитывать эффективность системы, ее стоимость, массу, условия хранения, возможную модернизацию деталей и миниатюризацию блочной конструкции, усовершенствование методов нахождения отказов и т. д. Важно знать запас надежности системы,

какие блоки, узлы, элементы требуют предупредительных замен, регулировок или доработок. Исследовать влияние столь большого числа факторов, позволяющих получить информацию для предсказания уровня надежности и оценки эффективности системы в эксплуатации можно только, используя компьютеры.

Отказы систем принято подразделять на две основные категории: внезапные и постепенные. Внезапные отказы приводят к скачкообразному изменению допустимых значений одного или нескольких из определяющих работу системы выходных параметров. Многолетней практикой доказано, что внезапные отказы происходят главным образом в следующих системах: нуждающихся в тщательной и хорошо разработанной методике сведения отказов к минимуму, работающих в трудных условиях окружающей среды, в системах, элементы которых имеют различную стойкость по отношению к действию вредных факторов, и т. п. Внезапные отказы также могут быть вызваны причинами конструктивного характера, наличием дефектных элементов, ошибками обслуживающего персонала.

В технических системах, как показывает статистический анализ, большинство внезапных отказов происходит приблизительно с постоянной интенсивностью в течение всего периода эксплуатации. Известно, что в таких системах есть узлы, блоки, обладающие наибольшим диапазоном стойкости по отношению к условиям окружающей среды, а также и такие, износостойкость которых со временем ухудшается, но они эксплуатируются вплоть до отказа. Для своевременной замены элементов в процессе эксплуатации важно знать критические значения интенсивностей отказов. Кроме того, цель так называемых доработок техники, проводимых по единым указаниям,— уменьшить интенсивность отказов (в том числе и внезапных) наиболее ненадежных элементов. Мнение о том, что внезапные отказы не поддаются прогнозированию, не имеет достаточного обоснования. На самом же деле резкие скачкообразные изменения параметров всегда связаны с предшествующим им постепенным изменением физико-химических,

механических и биологических свойств материалов, из которых изготовлен тот или иной элемент (правда, в большинстве случаев определить эти изменения пока трудно удастся). Внезапно отказавшие элементы необходимо подвергнуть механическому вскрытию, а затем химическому, спектрографическому, фотографическому и другим анализам. Изготовление новых элементов аналогичного назначения с учетом результатов проведенных анализов позволяет увеличить надежность системы в целом. Для прогнозирования внезапных отказов в некоторых случаях перспективно проведение проверок на вибрацию (аналогичных испытаниям на вибрацию, но с обязательной окончательной регулировкой системы после таких проверок), которые хотя и являются «грубыми», но зачастую очень ценны. Например, из всех повреждений радиоприемных устройств, возникающих в течение 200 ч заводских испытаний, 49,2% обнаруживается при испытании на вибрацию уже в течение 48 ч .

Постепенные отказы систем обусловлены постепенными изменениями параметров тех или иных блоков, узлов, элементов, входящих в их состав. Постепенные отказы могут быть вызваны либо большими отклонениями параметров элементов, либо ошибками в определении допусков на эти параметры. В конструкции любого технического устройства имеются элементы, которые влияют на определенный выходной параметр. Причем эти элементы могут непосредственно не влиять друг на друга, если же существует прямая зависимость между двумя (или более) элементами, то принято их рассматривать как один элемент. Влияние окружающих условий в случае постепенных отказов не учитывается. Однако, несмотря на это, закон произведения вероятностей времени безотказной работы элементов здесь неприменим: отклонения выходного параметра от своего номинального значения, вызванные влияющими на них элементами, взаимозависимы. Таким образом, выходной параметр системы может оказаться близким к своему номинальному значению, даже если отклонения параметров отдельных элементов вызывали бы изменения выходного параметра. С другой стороны,

отклонения параметров двух (или более) элементов в одном и том же направлении могут привести к отказу системы, даже если отклонение параметра каждого из них в отдельности не ведет к отказу. Например, причина преждевременной замены электронных устройств до израсходования их ресурса иногда заключается в несогласованности допусков на выходные параметры цепей с допусками на реальные разбросы параметров устройств и их изменением во времени.

Отказы устройств по названным причинам учитываются статистически, т. е. определяется группа элементов, сочетания изменений параметров которых, оставаясь в пределах допусков, вызывают отклонение хотя бы одного из рабочих параметров систем за пределы допустимых значений. Сбор подобной статистики значительно ускоряется, если пользоваться моделированием. Каждое из состояний параметров группы элементов, приводящих систему в процессе эксплуатации к отказу, может повторяться (имеет свою интенсивность отказов). Вероятность таких состояний параметров равносильна вероятности отказа системы. Отказы, обусловленные пребыванием той или иной группы элементов в определенных состояниях, можно считать независимыми, так как после каждого отказа система возвращается в исходное состояние.

Строго говоря, постепенные изменения параметров элементов системы должны приводить к изменению (перераспределению) вероятностей отказов элементов, подверженных внезапным выходам из строя. Однако подобная зависимость является довольно слабой. Поэтому общая надежность всей системы при предположении независимости отказов разных видов у элементов, составляющих ее, равна

$$P_{\text{общ}} = P_k P_m P_n \quad (1)$$

где P_k — вероятность безотказной работы системы по непрогнозируемым внезапным отказам; P_m — вероятность безотказной работы системы при постепенном изменении параметров, выход которых за допустимые границы не всегда удастся предупредить; P_n — вероятность безотказной работы системы, обусловленная наличием элементов, отказы которых являются внезапными и

могут быть предотвращены высоким качеством обслуживания.

Заметим, что все введенные вероятности являются функциями времени t .

Для вычисления общей вероятности безотказной работы системы применяют правило произведения вероятностей времени безотказной работы элементов, полагая при этом, что отказы являются независимыми событиями. Это правило можно использовать и в случае зависимых отказов нескольких элементов, если исключить прямую зависимость отказов двух (и более) элементов (рассматривая их как один элемент). Однако правило произведения вероятностей применять нельзя, если отказ элементов вызван изменением условий эксплуатации. При работе в изменяющихся климатических условиях элементы системы подвергаются действию различных внешних нагрузок: температуры, давления, влажности, удара и т. д. В свою очередь, каждая из таких нагрузок может иметь несколько параметров. Например, рассматривая вибрации, надо учитывать частоту колебаний, амплитуду и время их действия; удар характеризуется не только максимальным ускорением, но и продолжительностью действия. Параметр времени является составляющим каждого вида нагрузки окружающих условий.

Обозначим через $j(x_1, x_2, \dots, x_n)$ многомерную плотность вероятности появления нагрузок разных величин в 1-м, 2-м, ..., n -ом испытании. Пусть $p_j(x_1, x_2, \dots, x_q)$ — вероятность того, что внезапный отказ элемента j не произойдет при окружающих условиях $x_1, x_2, \dots, x_q$. Величина $p_j(x_1, x_2, \dots, x_q)$ зависит от конструкции элемента. Тогда составляющую P_k в формуле (1) можно вычислить следующим образом:

$$P_k = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} (q_{\text{раз}}) \int_{-\infty}^{\infty} f(x_1, x_2, \dots, x_q) \left[\prod_{j=1}^k p_j(x_1, x_2, \dots, x_q) \right] dx_1 dx_2 \dots dx_q \quad (2)$$

На практике, однако, отказ большинства элементов (вызывающих общий отказ устройства) происходит в основном только из-за одного, главного для этого элемента воздействия. Пусть элементы с номерами $1, 2, \dots, k_1$ таковы, что отказ их зависит от нагрузки x_1 , тогда вероятность безотказной работы этой

группы элементов равна

$$P_{k_1} = \int_{-\infty}^{\infty} f(x_1) \left[\prod_{j=1}^{k_1} p_j(x_1) \right] dx_1 \quad (3)$$

а вероятность безотказной работы одного элемента j , отказ которого в основном зависит от этой же нагрузки, равна

$$P_{x_{1j}} = \int_{-\infty}^{\infty} f(x_1) p_j(x_1) dx_1 \quad (4)$$

Из (3), (4) следует, что вероятность P_{kl} не всегда является произведением вероятностей $p_{x_{1j}}$. Реальная конструктивная вероятность безотказной работы системы P_k равна или меньше вероятности безотказной работы самого ненадежного элемента. Отсюда следует важный вывод: при оценке вероятностей безотказной работы системы как произведения оценок вероятностей безотказной работы элементов необходимо брать статистику только по отказам, происшедшим при примерно одинаковых условиях работы систем по отношению к воздействиям внешней окружающей среды.

Величина $P_m(t)$ есть вероятность того, что процесс, определяющий изменение параметров, ни разу не вышел за время $(0, t)$ из области работоспособности. Величина этой функции зависит от свойств процесса. Например, для марковских процессов можно использовать метод построения поглощающего экрана.

В выражении (1) осталось найти значение вероятности P_n .

При определении причины отказа элементов системы необходимо иметь в виду, что причиной отказа элемента следует считать качество обслуживания в том случае, если происшедший отказ можно было предотвратить своевременным вмешательством обслуживающего персонала. Обозначим через p_i вероятность безотказной работы i -го элемента, связанную с качеством обслуживания. Тогда вероятность безотказной работы системы, обусловленная качеством обслуживания, равна

$$P_n = \prod_{j=1}^n p_j \quad , \quad (5)$$

т. е. P_n — вероятность того, что не появится отказ, вызванный нарушением правил эксплуатации.

Так как вероятность отказа элемента i равна $q_i = 1 - P_i$ и система имеет вероятность безотказной работы, практически приемлемую для их эксплуатации (следовательно, $P_n \sim 1$, величина $1 - P_n = q_n \ll 1$), то формулу (5) можно упростить:

$$P_n = \exp \left[- \sum_{j=1}^n q_j \right] \quad (6)$$

Если обозначить $\bar{q}_j = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n q_j$, то

$$P_n = \exp \left[- n \bar{q}_j \right] \quad (7)$$

Таким образом, выражение (1) с учетом (2), (6) и (7) определяет в общем виде вероятность безотказной работы системы. По мере совершенствования обслуживания значения вероятностей безотказной работы P_m и P , могут быть близки к 1. Таким образом, вероятность безотказной работы системы не может быть больше величины $P_k(2)$.

Представим отказы элементов системы при некоторых предположениях как поток без последствия случайных однородных событий. Ординарность потока отказов выражает практическую невозможность совмещения двух (или более) событий в один и тот же момент. Нестационарность потока отказов свидетельствует об изменении интенсивности отказов систем. Отсутствие последствия означает взаимную независимость протеканий потока в непересекающихся между собой промежутках времени. Иногда отказы элементов не вызывают непосредственно отказа системы, а приводят к перераспределению вероятности отказов элементов в последующие моменты времени. Кроме того, вероятность появления отказов в произвольно выбранные промежутки времени зависит в некоторых случаях от количества и моментов появления отказов в промежутках времени, предшествовавших выбранным (например, в случаях замены элементов, имеющих возрастающую интенсивность отказов). Практика показывает, что в системах имеется незначи-

тельная часть элементов, отказ которых перераспределяет вероятности отказов других элементов, причем этим перераспределением можно пренебречь, в противном случае несколько зависимых элементов рассматривают как один.

Замена элементов с возрастающей интенсивностью отказов во времени встречается чаще, и ее следует учитывать соответствующим изменением интенсивности отказов системы после такой замены. Наконец, деятельность специалистов, обслуживающих системы, изменяет вероятности отказов систем и их элементов в последующие моменты времени, т. е. изменяет интенсивность отказов после вмешательства. На основании сказанного утверждаем, что поток отказов сложных систем в течение всего периода их эксплуатации с учетом работы по обслуживанию является потоком отказов с конечной интенсивностью и с последствием. Однако если элементов в системе много и поток отказов каждого элемента мал, то поток отказов системы можно считать пуассоновским нестационарным потоком. Таким образом, вероятность безотказной работы системы на участке $(t_q, t_q + \tau_1)$, где $\tau_1 = t_{q+1} - t_q$, равна

$$P_{\text{общ}}(t_q, \tau_1) = \exp \left[- \int_{t_q}^{t_q + \tau_1} \Lambda(\tau) d\tau \right]. \quad (8)$$

Здесь $\Lambda(\tau)$ — мгновенная интенсивность отказов системы на промежутке времени $(t_q, t_q + \tau_1)$, значение которой определяется, в частности, результатами предшествующей эксплуатации системы.

В процессе эксплуатации и деятельности обслуживающего персонала интенсивность отказов технических устройств, с одной стороны, имеет тенденцию к увеличению, а с другой стороны, к уменьшению, которые зависят от соотношения между техническим обслуживанием и надежностью устройства. Как уже отмечалось, после выполнения очередных работ по обслуживанию интенсивность отказов меняется, причем величина этого изменения зависит от объема и качества этих работ и может быть определена лишь экспериментально.

Очевидно, в рассматриваемом промежутке времени $(t_q, t_q + \tau_1)$ существует также вероятность появления одного, двух, в общем случае μ отказов системы,

тогда

$$P_{\mu}(t_q, \tau_1) = \frac{\left(\int_{t_q}^{t_q + \tau_1} \Lambda(\tau) d\tau \right)^{\mu}}{\mu!} e^{-\int_{t_q}^{t_q + \tau_1} \Lambda(\tau) d\tau}; \quad (9)$$

$$\sum_{\mu=0}^{\infty} P_{\mu}(t_q, \tau_1) = 1, \quad (10)$$

где $P_{\mu}(t_q, \tau_1)$ —вероятность того, что за промежуток времени $(t_q, t_q + \tau_1)$ произойдет μ отказов. Если обозначить через $\mu(t_q, t)$ число отказов, появляющихся в системе за промежуток времени $t > 0$, то $\mu(t_q, t)$ представляет собой случайную величину для каждой фиксированной пары значений t_q, t . При фиксированном t_q и переменном t число отказов $\mu(t_q, t)$ является однопараметрическим семейством случайных величин, которое представляет собой случайный процесс, или случайную функцию. Функция $\mu(t_q, t)$ может принимать только целые неотрицательные значения и с возрастанием t не убывает.

В настоящее время перспективна разработка методики моделирования технических систем с использованием случайных чисел, которая позволяет получать нужные соотношения между сроками проведения и объемом мероприятий по обслуживанию, обеспечивающих максимальный уровень надежности систем. Поэтому становится важным получение машинной реализации случайного процесса $\mu(t)$.

Рассмотрим два способа задания потока отказов как случайного процесса. Для задания потока отказов как случайного процесса необходимо задать при любом $n > 0$ для каждой группы положительных чисел $t_1, t_2, \dots, t_n$ и каждой группы целых неотрицательных чисел $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n$ вероятности выполнения равенства $\mu(t_1) = \mu_1; \mu(t_2) = \mu_2; \dots; \mu(t_n) = \mu_n$, причем при $t_1 < t_2 < \dots < t_n$ выполняются неравенства $\mu_1 \leq \mu_2 \leq \dots \leq \mu_n$, где $\mu_i \in \{0, 1, 2, \dots\}$.

В частном случае при $n=1$ для любого $t > t_i$ и любого целого неотрицательного μ должна быть известна вероятность выполнения равенства $\mu(t) = \mu$ [обозначим ее через $P_{\mu}(t)$]. Система функций $P_{\mu}(t)$ входит как

обязательный элемент в описание потока отказов. Эта функция для стационарного потока без последствия однозначно определяет вероятность вида $P\{\mu(t_i)=\mu_i, 1 \leq i \leq n\}$, а следовательно, полностью характеризует такой поток как случайный процесс. В общем случае задание этой системы функций для полной характеристики потока отказов систем недостаточно.

Однако поток отказов систем имеет (как случайный процесс) уже известные нам особенности: величина $\mu(t)$ всегда монотонна и принимает лишь целые неотрицательные значения. Именно поэтому предложим более простой способ задания потока отказов как случайного процесса. Обозначим начальный момент $t_0 = 0$ и $t_i (i=1, 2, \dots)$ — момент появления i -го отказа в системе, так что $t_{i-1} < t_i (i=1, 2, \dots)$. Пусть $z_1 = t_1$ и при $i > 1$ означает величину промежутка времени между $(i-1)$ -м и i -м моментами появления отказа в системе (время восстановления системы не учитываем, считаем его равным нулю). Тогда все t_i и $z_i (i=1, 2, \dots)$ являются случайными величинами, которые принимают лишь неотрицательные значения. В данном случае поток отказов системы задан, если для любого $n > 0$ задана n -мерная функция распределения вектора $(z_1, z_2, \dots, z_n)$. Очевидно, в основе этого способа описания потока отказов лежит представление о потоке не как о случайном процессе общего вида, а как о последовательности случайных величин.

Если для вероятности безотказной работы в интервале $(t_q, t_q + \tau_1)$ (9) считать, что отказы в системе могут зависеть от конструкций, от изменения параметров тех или иных элементов, а также от причин, обусловленных качеством обслуживания в процессе эксплуатации, и что потоки отказов — независимые, нестационарные пуассоновские, то

$$P_{обш}(t_q, \tau_1) = \exp \left[- \int_{t_q}^{t_q + \tau_1} \sum_{i=k, m, n} \Lambda_i(\tau) d\tau \right], \quad (11)$$

где $\Lambda_i(\tau)$ — интенсивность отказов либо по причинам конструкционного

характера ($i=k$), либо в результате постепенного изменения параметров элементов ($i=m$), либо по причинам, обусловленным качеством обслуживания ($i=n$).

Таким образом, в формуле (11) имеются все сомножители формулы (1). Каждый элемент может отказать по любой из трех перечисленных причин. Например, выход из строя радиоэлектронного элемента может произойти в результате замыканий, обрыва соединений или других подобных причин (причина типа k), уменьшения (увеличения) тока (причина типа m), поломки штырьков при установке разъемов в панель (причина типа n). В свою очередь, каждая из причин обусловлена многими факторами. Например, причина типа k обусловлена недостатками проектирования, технологии изготовления элементов, в организации испытаний систем при приемке и т. д. Если в системе N элементов, которые можно разбить на N_1 независимых функционирующих групп, отказ каждой из которых приводит к отказу системы, то интенсивность отказов равна

$$\Lambda_{\text{общ}}(t_q, \tau_1) = \sum_{s=1}^{N_1} \sum_{i=k,m,n} \lambda_{si}(t_q, \tau_1), \quad (12)$$

где λ_{si} — интенсивность i -го вида отказов элемента s системы, а вероятность безотказной работы которого в промежутке $(t_q, t_q + \tau_1)$ запишем с учетом (12):

$$P_{\text{общ}}(t_q, \tau_1) = \exp \left[- \int_{t_q}^{t_q + \tau_1} \sum_{s=1}^{N_1} \sum_{i=k,m,n} \lambda_{si}(\tau) d\tau \right], \quad (13)$$

Процесс эксплуатации систем должен быть организован так, чтобы интенсивность отказов, а следовательно, и вероятность безотказной ее работы стремились к своим предельным значениям, равным соответственно

$$\Lambda_{\text{общ}}(t_q, \tau_1) = \sum_{s=1}^{N_k} \lambda_{sk}(t_q, \tau_1), \quad (14)$$

и

$$P_{\text{общ}}(t_q, \tau_1) = \exp \left[- \int_{t_q}^{t_q + \tau_1} \sum_{s=1}^{N_k} \lambda_{sk}(t_q, \tau_1) d\tau \right], \quad (15)$$

где N_k — количество элементов, которые отказывают только по причине типа k ;
 λ_{sk} — интенсивность отказов s -го элемента по той же причине.

Следует подчеркнуть, что если значение величины $\sum_{s=1}^{N_k} \lambda_{sk}(\tau)$ таково, что вероятность безотказной работы системы за промежуток времени $(t_q, t_q + \tau_l)$ меньше приемлемого для эксплуатации уровня, то в этом случае имеет смысл говорить о необходимости существенной перестройки системы, так как никакими организационными мероприятиями достичь необходимого уровня надежности системы нельзя.

Профилактические работы изменяют интенсивность отказов второго и третьего вида и должны быть направлены на минимизацию интенсивности отказов $\Lambda_m(t_q, \tau_l) + \Lambda_n(t_q, \tau_l)$.

Обычно сложные системы должны выполнять задания за время $\tau_1 \ll \tau_l$ на заданном уровне вероятности безотказной работы (надежности), который обозначим через $P_{общ.э}(\tau_1) = P_{общ.э}$. Интенсивность отказов, как правило, вырастает со временем, поэтому если вероятность безотказной работы на интервале $(t_{q+1} = \tau_1, t_{q+1})$ больше $P_{общ.э}$, то она больше при любом интервале длины τ_1 принадлежащем (t_q, t_{q+1}) . Таким образом, из равенства $P_{общ.э}(t_q - \tau_1, t_{q+1}) = P_{общ.э}$ можно определить t_{q+1} — момент проведения следующего обслуживания, гарантирующего заданный уровень вероятности безотказной работы. Можно ставить и обратную задачу: если система должна проработать заданное время $t_{q+1} - t_q$ с заданной вероятностью то уровень интенсивности отказов в момент t_q должен быть меньше некоторого $\Lambda(\Lambda(t_q) < \Lambda)$, т. е. можно выбирать объемы работ при соблюдении неравенства $\Lambda(t_q) < \Lambda$ и тем самым гарантировать вероятность безотказной работы устройства на (t_q, t_{q+1}) не ниже заданной $P_{общ.э}$.

Используя накопленный опыт и предложенную методику, можно всегда выбрать тот или иной объем работ, выполнение которого: обеспечит функционирование системы до заданного момента очередных профилактических работ на определенном уровне надежности. Наоборот,

задаваясь последовательностью объемов работ можно определить приемлемые сроки проведения очередного обслуживания, обеспечивающего работу системы на заданном уровне надежности. Необходимо отметить, что все предшествовавшие моменту t_{q+1} работы обуславливают в определенной степени значение $\Lambda_{m,n}(t_q, \tau_1)$ для системы в целом, хотя определяющими являются работы в момент t_q . Значение $\Lambda_{m,n}(t_q, \tau_1)$ находится экспериментально для различных объемов работ. В некоторых частных случаях эта величина может быть определена, если известны законы распределения замененного числа элементов и интенсивность отказов этих элементов.

2. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ

2.1. Составляющие надёжности систем

Надёжность объекта характеризуется следующими основными состояниями и событиями.

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

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.

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 том числе 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.

Отказ – событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния объекта.

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

2.1.2 Классификация и характеристики отказов

По *типу* 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.

Отказы элементов систем могут возникать в результате (рис. 1): первичных отказов; вторичных отказов; ошибочных команд (инициированные отказы).

Отказы всех этих категорий могут иметь различные причины, приведенные в наружном кольце. Когда точный вид отказов определен и данные по ним получены, а конечное событие является критическим, то они рассматриваются как исходные отказы.

Первичный отказ элемента определяют как нерабочее состояние этого элемента, причиной которого является он сам, и необходимо выполнить ремонтные работы для возвращения элемента в рабочее состояние. Первичные отказы происходят при входных воздействиях, значение которых находится в пределах, лежащих в расчетном диапазоне, а отказы объясняются естественным старением элементов. Разрыв резервуара вследствие старения

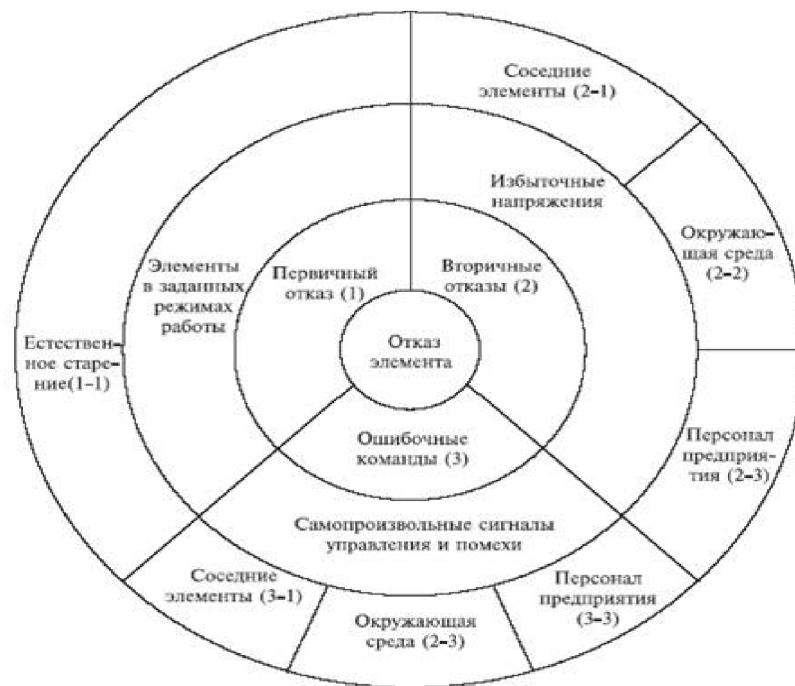


Рис. 1. Диаграмма отказов элементов сложной системы

Вторичный отказ - такой же, как первичный, за исключением того, что сам элемент не является причиной отказа. Вторичные отказы объясняются воздействием предыдущих или текущих избыточных напряжений на элементы. Амплитуда, частота, продолжительность действия этих напряжений могут выходить за пределы допусков или иметь обратную полярность и вызываются различными источниками энергии: термической, механической, электрической, химической, магнитной, радиоактивной и т.п. Эти напряжения вызываются соседними элементами или окружающей средой, например - метеорологическими (ливень, ветровая нагрузка), геологическими условиями (оползни, просадка грунтов), а также воздействием со стороны других технических систем.

Примером вторичных отказов служит "срабатывание предохранителя от повышенного электрического тока", "повреждение емкостей для хранения при землетрясении". Следует отметить, что устранение источников повышенных напряжений не гарантирует возвращение элемента в рабочее состояние, так как предыдущая перегрузка могла вызвать необратимое повреждение в элементе, требующее в этом случае ремонта.

Инициированные отказы (ошибочные команды). Люди, например, операторы и обслуживающий технический персонал, также являются возможными источниками вторичных отказов, если их действия приводят к выходу элементов из строя. Ошибочные команды представляются в виде элемента, находящегося в нерабочем состоянии из-за неправильного сигнала управления или помех (при этом лишь иногда требуется ремонт для возвращения данного элемента в рабочее состояние). Самопроизвольные сигналы управления или помехи часто не оставляют последствий (повреждений), и в нормальных последующих режимах элементы работают в соответствии с заданными требованиями. Типичными примерами ошибочных команд являются: "напряжение приложено самопроизвольно к обмотке реле", "переключатель случайно не разомкнулся из-за помех", "помехи на входе контрольного прибора в системе безопасности вызвали ложный сигнал на остановку", "оператор не нажал на аварийную кнопку" (ошибочная команда от аварийной кнопки)

Таблица 1. Основные признаки классификации отказов

характер возникновения:	<i>внезапный отказ</i> – отказ, проявляющийся в резком (мгновенном) изменении характеристик объекта; · <i>постепенный отказ</i> – 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.

Таблица 2. Основные признаки классификации отказов

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).

Таблица 3. Основные признаки классификации отказов

дальнейшее использование объекта:	· полные отказы, исключающие 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; · износосовые отказы, вызванные необратимыми процессами износа деталей, старения матер. и пр.

2.1.3. Составляющие надёжности

В соответствии с ГОСТ 27.002-89 под надёжностью понимают свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, ремонтов, хранения и транспортировки.

Надёжность - важный показатель качества объекта. Его нельзя ни противопоставлять, ни смешивать с другими показателями качества. Явно недостаточной, например, будет информация о качестве установки очистки, если известно только то, что она обладает определенной производительностью и некоторым коэффициентом очистки, но неизвестно, насколько устойчиво сохраняются эти характеристики при ее работе. Бесполезна также информация о том, что установка устойчиво сохраняет присущие ей характеристики, но неизвестны значения этих характеристик. Вот почему в определение понятия надёжности входит выполнение заданных функций и сохранение этого свойства при использовании объекта по назначению.

1. Надёжность - свойство объекта сохранять во времени способность выполнять требуемые функции. Например: для электродвигателя - обеспечивать требуемые момент на валу и скорость; для системы электроснабжения - обеспечивать электроприемники энергией требуемого качества.

2. Выполнение требуемых функций должно происходить при значениях параметров в установленных пределах. Например: для электродвигателя - обеспечивать требуемые момент и скорость при температуре двигателя, не превышающей определенного предела, отсутствии выделения источника взрыва, пожара и т.д

3. Способность выполнять требуемые функции должна сохраняться в заданных режимах (например, в повторно-кратковременном режиме работы); в заданных условиях (например, в условиях запыленности, вибрации и т.д.).

4. Объект должен обладать свойством сохранять способность выполнять требуемые функции в различные фазы его жизни: при рабочей эксплуатации, техническом обслуживании, ремонте, хранении и транспортировке.

Надёжность 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 надёжность может определяться всеми перечисленными свойствами или частью их. Например, надёжность колеса зубчатой передачи, подшипников определяется их долговечностью, а станка – долговечностью, безотказностью и ремонтпригодностью.

2.1.4 Основные показатели надёжности

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

Рассмотрим показатели составляющей надёжности - долговечность.

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 том числе, хранение, ремонт и т. п.) от ее начала до наступления предельного состояния. На рис. 2 приведена графическая интерпретация перечисленных показателей, при этом:



Рис.2. Срок службы электронного средства

$t_0 = 0$ – начало эксплуатации; t_1, t_5 – моменты отключения по технологическим причинам; t_2, t_4, t_6, t_8 – моменты включения объекта; t_3, t_7 – моменты вывода объекта в ремонт, соответственно, средний и капитальный; t_9 –

момент прекращения эксплуатации; t_{10} – момент отказа объекта.

Технический ресурс (наработка до отказа)

$$TP = t_1 + (t_3 - t_2) + (t_5 - t_4) + (t_7 - t_6) + (t_{10} - t_8).$$

Назначенный ресурс

$$TH = t_1 + (t_3 - t_2) + (t_5 - t_4) + (t_7 - t_6) + (t_9 - t_8).$$

Срок службы объекта $TC = t_{10}$.

Для большинства объектов электромеханики в качестве критерия долговечности чаще всего используется технический ресурс.

2.2 Количественные показатели безотказности и математические модели надёжности

2.2.1 Статистические и вероятностные формы представления показателей безотказности невосстанавливаемых объектов

Наиболее важные показатели надёжности невосстанавливаемых объектов – *показатели безотказности*, к которым относятся:

вероятность безотказной работы; плотность распределения отказов; интенсивность отказов; средняя наработка до отказа.

Показатели надёжности представляются в двух формах (определениях):

статистическая (выборочные оценки);

вероятностная.

Статистические определения (выборочные оценки) показателей получаются по результатам испытаний на надёжность.

Допустим, что в ходе испытаний какого-то числа однотипных объектов получено конечное число интересующего нас параметра – наработки до отказа. Полученные числа представляют собой выборку некоего объема из общей «генеральной совокупности», имеющей неограниченный объем данных о наработке до отказа объекта.

Количественные показатели, определённые для «генеральной совокупности», являются *истинными*

(вероятностными) показателями, поскольку объективно характеризуют случайную величину – наработку до отказа.

Показатели, определённые для выборки, и, позволяющие сделать какие-то выводы о случайной величине, являются *выборочными (статистическими) оценками*. Очевидно, что при достаточно большом числе испытаний (большой выборке) оценки *приближаются* к вероятностным показателям.

Вероятностная форма представления показателей удобна при аналитических расчетах, а статистическая - при экспериментальном исследовании надежности.

В дальнейшем для обозначения статистических оценок будем использовать знак $\hat{}$ сверху.

В дальнейших рассуждениях будем исходить из того, что испытания проходят N одинаковых объектов. Условия испытаний одинаковы, а испытания каждого из объектов проводятся до его отказа. Введем следующие обозначения:

$$T = \{t, t_1, \dots, t_N\} = \{t\} \quad (16)$$

- случайная величина наработки объекта до отказа; $N(t)$ - число объектов, работоспособных к моменту наработки t ; $n(t)$ - число объектов, отказавших к моменту наработки t ; $\Delta n(t, t + \Delta t)$ число объектов, отказавших в интервале наработки $[t, t + \Delta t]$; Δt - длительность интервала наработки.

Вероятность безотказной работы и вероятность отказа (ВО)

Статистическое определение вероятности безотказной работы (эмпирическая функция надёжности) определяется по формуле:

$$\hat{P}(t) = \frac{N(t)}{N} \quad (17)$$

т.е. вероятность безотказной работы есть отношение числа объектов ($N(t)$), безотказно проработавших до момента наработки t , к числу объектов, исправных к началу испытаний ($t=0$), т.е. к общему числу объектов N . Вероятность безотказной работы можно рассматривать как показатель доли работоспособных объектов к моменту наработки t .

Поскольку $N(t) = N - n(t)$, то вероятность безотказной работы можно

определить как

$$\hat{P}(t) = 1 - \frac{n(t)}{N} = 1 - \hat{Q}(t), \quad (18)$$

где $\hat{Q}(t) = \frac{n(t)}{N}$ - вероятность отказа.

В статистическом определении вероятность отказа представляет эмпирическую функцию распределения отказов. Так как события, заключающиеся в наступлении или ненаступлении отказа к моменту наработки t , являются противоположной

$$\hat{P}(t) + \hat{Q}(t) = 1 \quad (19)$$

Нетрудно убедиться, что вероятность безотказной работы является убывающей, а вероятность отказа – возрастающей функцией наработки.

Справедливы следующие утверждения:

1. В момент начала испытаний при $t=0$ число работоспособных объектов равно общему их числу $N(t)=N(0)=N$, а число объектов отказавших равно $n(t)=n(0)=0$. Поэтому

$$\hat{P}(t) + \hat{P}(0) = 1,$$

а

$$\hat{Q}(t) + \hat{Q}(0) = 0,$$

2. При наработке $t \rightarrow \infty$ все объекты, поставленные на испытания, откажут, т.е. $N(\infty)=0$, а $n(\infty)=N$.

Поэтому,

$$\hat{P}(t) + \hat{P}(\infty) = 0,$$

а

$$\hat{Q}(t) + \hat{Q}(\infty) = 1.$$

При большом числе элементов (изделий) N_0 статистическая оценка $\hat{P}(t)$ практически совпадает с вероятностью безотказной работы $P(t)$, а $\hat{Q}(t)$ - с $Q(t)$

Вероятностное определение вероятности безотказной работы описывается формулой

$$P(t) = \text{Вер} \{E \geq t\} = P \{T \geq t\}, \quad (20)$$

т.е. вероятность безотказной работы есть вероятность того, что случайная величина наработки до отказа T окажется больше некоторой заданной

наработки t .

Очевидно, что вероятность отказа будет являться функцией распределения случайной величины T и представляет из себя вероятность того, что наработка до отказа окажется меньше некоторой заданной наработки t :

$$Q(t) = \text{Вер}\{T < t\} = P\{T < t\}. \quad (21)$$

Графики вероятности безотказной работы и вероятность отказа приведены на рис. 3.

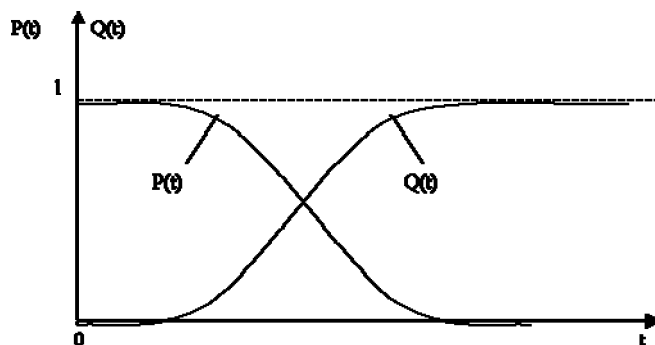


Рис. 3. Вероятности безотказной работы и вероятности отказов

Плотность распределения отказов

Статистическое определение плотности распределения отказов :

$$\hat{f}(t) = \frac{\Delta n(t, t + \Delta t)}{N \cdot \Delta t} [\text{еед.наработки}^{-1}], \quad (22)$$

т.е. плотность распределения отказов есть отношение числа объектов, отказавших в интервале наработки $[t, t + Dt]$ к произведению общего числа объектов n на длительность интервала наработки Dt . *Наработка* – продолжительность или объем работы объекта, измеряемая в любых неубывающих величинах (единица времени, число циклов нагружения, километры пробега и т. п.).

Поскольку D - число объектов, отказавших к моменту наработки $t + Dt$

$$D n(t, t + Dt) = n(t + Dt) - n(t),$$

где $n(t + Dt)$, то плотность распределения отказов можно представить:

$$\hat{f}(t) = \frac{n(t + \Delta t) - n(t)}{N \cdot \Delta t} = \frac{1}{\Delta t} \left[\hat{Q}(t + \Delta t) - \hat{Q}(t) \right] = \frac{\hat{Q}(t, t + \Delta t)}{\Delta t}, \quad (23)$$

где $\hat{Q}(t, t + \Delta t)$ - оценка вероятности отказа в интервале наработки, т.е. приращения вероятности отказа за плотность распределения отказов

Плотность распределения отказов по смыслу представляет частоту отказов, т.е. число отказов за единицу наработки, отнесенное к первоначальному числу объектов. Вероятностное определение плотности распределения отказов следует из (23) при стремлении интервала наработки $Dt \rightarrow 0$ и $N \rightarrow \infty$

$$f(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\hat{Q}(t, t + \Delta t)}{\Delta t} = \frac{dQ(t)}{dt} = \frac{d[1 - P(t)]}{dt} = -\frac{dP(t)}{dt} \quad (24)$$

Плотность распределения отказов по существу является плотностью распределения случайной величины T наработки до отказа объекта. Один из возможных видов графика $f(t)$ приведен на рис. 4.

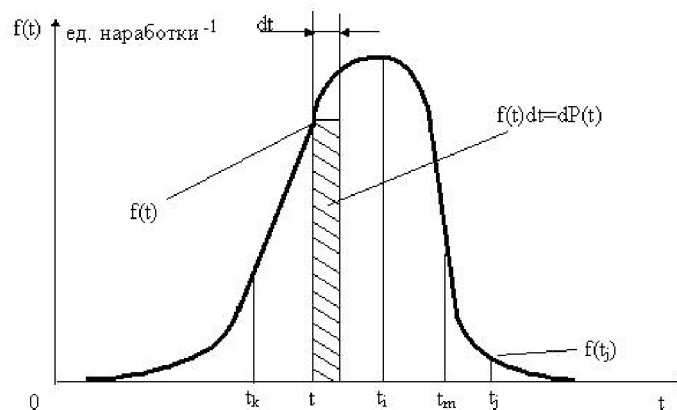


Рис 4. График плотности распределения отказов.

Интенсивность отказов

Статистическое определение интенсивности отказов описывается формулой

$$\hat{\lambda}(t) = \frac{\Delta n(t, t + \Delta t)}{N(t) \cdot \Delta t} [\text{ед. наработки}^{-1}], \quad (25)$$

т.е. интенсивность отказов есть отношение числа объектов $Dn[t, t + Dt]$,

отказавших в интервале наработки $[t, t+Dt]$ к произведению числа исправных объектов на момент t на длительность интервала наработки Dt .

Сравнивая (22) и (25) можно отметить, что интенсивность отказов несколько полнее характеризует надежность объекта на момент наработки t , т.к. показывает частоту отказов, отнесенную к фактически работоспособному числу объектов на момент наработки t .

Вероятностное определение интенсивности отказов получим, умножив и поделив правую часть выражения (25) на N

С учетом (23), $\hat{P}(t) = \frac{N(t)}{N}$,

$\hat{\lambda}(t)$ можно представить

$$\hat{\lambda}(t) = \frac{\hat{Q}(t, t + \Delta t)}{\Delta t} \cdot \frac{1}{\hat{P}(t)},$$

откуда получим:

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\hat{Q}(t, t + \Delta t)}{\Delta t} \cdot \frac{1}{\hat{P}(t)} = \frac{dQ(t)}{dt} \cdot \frac{1}{P(t)} = \frac{f(t)}{P(t)} \quad (26)$$

Возможные виды графиков $\lambda(t)$ приведены на рис. 5

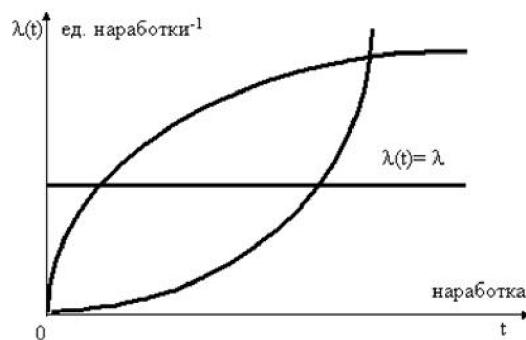


Рис. 5.

Средняя наработка до отказа

Рассмотренные выше показатели надежности $P(t)$, $Q(t)$, $f(t)$ и $\lambda(t)$ полностью описывают случайную величину наработки до отказа $T=\{t\}$. В тоже время для решения ряда практических задач бывает достаточно знать

некоторые числовые характеристики этой случайной величины и, в первую очередь, среднюю наработку до отказа. Статистическое определение средней наработки до отказа

$$T_0 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_i \quad (27)$$

где t_i - наработка до отказа i -го объекта.

При вероятностном определении средняя наработка до отказа представляет собой математическое ожидание (МО) случайной величины T , и поэтому, как всякое МО, определяется:

$$T_0 = M\{T\} = \int_0^{\infty} t \cdot f(t) dt \quad (28)$$

Очевидно, что с увеличением выборки испытаний средняя арифметическая наработка (оценка) T_0 сходится по вероятности с МО наработки до отказа

В то же время средняя наработка не может полностью характеризовать безотказность объекта. Так при равных средних наработках до отказа T_0 надежность объектов 1 и 2 может весьма существенно различаться (рис. 6). $f(t)$ – плотность распределения отказов

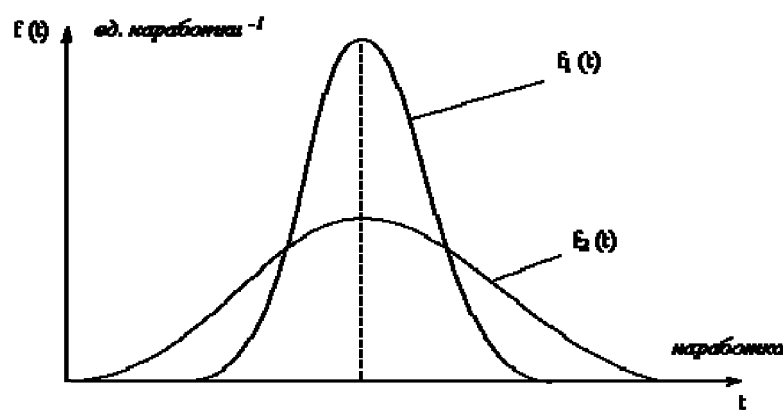


Рис. 6. Различие кривых плотности распределения отказов при одинаковой средней наработке до отказа

2.2.2 Математические модели надёжности

Для решения задач по оценке надёжности и прогнозированию работоспособности объекта необходимо иметь математическую модель, которая представлена аналитическими выражениями одного из показателей: $P(t)$ или $f(t)$ или $\lambda(t)$. Основным путь для получения модели состоит в проведении испытаний, вычислении статистических оценок и их аппроксимации аналитическими функциями. Опыт эксплуатации показывает, что изменение интенсивности отказов $\lambda(t)$ подавляющего большинства объектов описывается U -образной кривой (рис. 7).

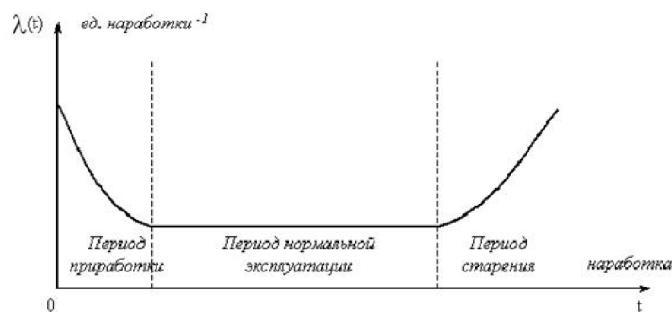


Рис. 7. – Кривая изменения интенсивности отказа объекта

Эту кривую можно условно разделить на три характерных участка: первый - период приработки объекта, второй – нормальная эксплуатация, третий - старение.

Период приработки объекта имеет повышенную плотность распределения отказов, вызванную приработочными отказами, обусловленными дефектами производства, монтажа, наладки. Иногда с окончанием этого периода связывают *гарантийное обслуживание* объекта, когда устранение отказов производится изготовителем.

В *период нормальной эксплуатации* интенсивность отказов уменьшается и практически остается постоянной, при этом отказы носят случайный характер и появляются внезапно, прежде всего, из-за несоблюдения условий эксплуатации, случайных изменений нагрузки, неблагоприятных

внешних факторов и т. п. Именно этот период соответствует основному времени эксплуатации объекта.

Возрастание интенсивности отказов относится к *периоду старения* объекта и вызвано увеличением числа отказов от износа, старения и других причин, связанных с длительной эксплуатацией.

Вид аналитической функции, описывающей изменение показателей надежности $P(t)$, $f(t)$ или $\lambda(t)$, определяет *закон распределения случайной величины*, который выбирается в зависимости от свойств объекта, его условий работы и характера отказов.

Экспоненциальное распределение

Экспоненциальный (показательный) закон распределения называемый также основным законом надёжности, часто используют для прогнозирования надежности в период нормальной эксплуатации изделий, когда *постепенные отказы* еще не проявились и надежность характеризуется *внезапными отказами*. Эти объекты можно отнести к «не стареющим», поскольку они работают только на участке с $\lambda(t)=l = \text{const}$ (рис.7). Отказы вызываются неблагоприятным стечением многих обстоятельств и поэтому имеют постоянную *интенсивность*. Экспоненциальное распределение описывает наработку на отказ тех объектов, у которых в результате сдаточных испытаний (выходного контроля) отсутствует период приработки, а назначенный ресурс установлен до окончания периода нормальной эксплуатации.

Плотность распределения экспоненциального закона описывается соотношением

$$f(t)=\lambda e^{-\lambda(t)} \quad (29)$$

функция распределения этого закона — соотношением

$$F(t)=1-e^{-\lambda(t)} \quad (30)$$

функция надёжности

$$P(t)=e^{-\lambda(t)} \quad (31)$$

математическое ожидание случайной величины T

$$T_0 = \int_0^{\infty} t \cdot \lambda \cdot e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda}, \quad (32)$$

дисперсия случайной величины T

$$D_0 = \int_0^{\infty} t^2 \cdot \lambda \cdot e^{-\lambda t} dt - \frac{1}{\lambda^2} = \frac{1}{\lambda^2}. \quad (33)$$

Экспоненциальный закон в теории надёжности нашел широкое применение, так как он прост для практического использования. Почти все задачи, решаемые в теории надёжности, при использовании экспоненциального закона оказываются намного проще, чем при использовании других законов распределения. Основная причина такого упрощения состоит в том, что при экспоненциальном законе вероятность безотказной работы зависит только от длительности интервала и не зависит от времени предшествующей работы.

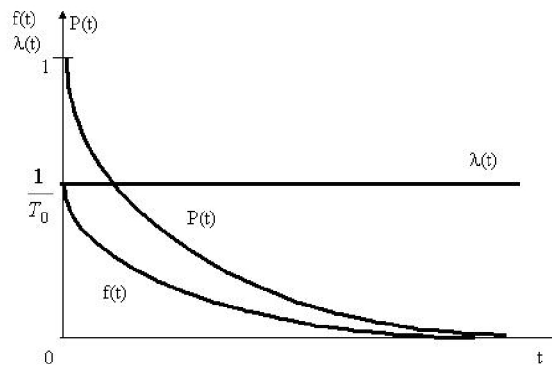


Рис.8. График изменения показателей надежности при экспоненциальном распределении.

Экспоненциальное распределение широко применяется для оценки надежности энергетических объектов.

Графики изменения показателей надёжности при экспоненциальном распределении приведены на рис. 8.

Нормальное распределение

Нормальное распределение является наиболее универсальным, удобным и широко применяемым. Считается, что наработка объекта подчинена

нормальному распределению (нормально распределена), если плотность распределения отказов

описывается выражением:

$$f(t) = \frac{1}{b\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{(t-a)^2}{2b^2}\right\}, \quad (34)$$

где a и b -параметры распределения, соответственно, МО и СКО, которые по результатам испытаний принимаются:

$$a \equiv \hat{T}_0; \quad b \equiv \sqrt{\hat{D}} = \sqrt{\sigma^2} = \sigma, \quad (35)$$

где $\hat{T}_0$ и σ - оценки средней наработки до отказа и дисперсии (σ - СКО).

Таким образом, плотность распределения отказов имеет вид

$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{(t-T_0)^2}{2\sigma^2}\right\}. \quad (36)$$

($\hat{T}_0$ - МО наработки).

Колоколообразная кривая плотности распределения приведена на рис.

9.

Интегральная функция распределения имеет вид

$$F(t) = \int_{-\infty}^t f(t)dt = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^t \left(\exp\left\{-\frac{(t-T_0)^2}{2\sigma^2}\right\} \right) dt \quad (37)$$

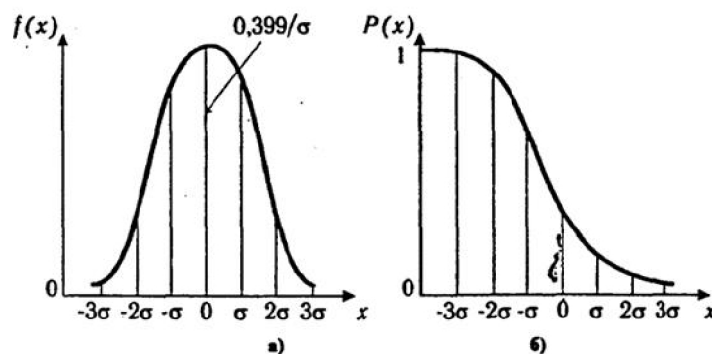


Рис. 9 Кривые плотности вероятности (а) и функции надежности (б) нормального распределения

Вычисление интегралов заменяют использованием таблиц нормального распределения, при котором $T_0 = 0$ и $s = 1$. Для этого распределения функция плотности распределения отказов имеет одну переменную t и выражается зависимостью

$$f_0(t) = \frac{1}{2\pi} \exp\left\{-\frac{t^2}{2}\right\}, \quad (38)$$

Величина t является центрированной (так как $T_0 = 0$) и нормированной (так как $\sigma_t = 1$). Функция распределения соответственно запишется в виде:

$$F_0(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^t \exp\left\{-\frac{t^2}{2}\right\} dt. \quad (39)$$

Значение функции распределения определяется формулой

$$F(t) = 0,5 + \Phi(u) = Q,$$

(где Φ – функция Лапласа, $u = (tT_0)/s$ - квантиль нормированного нормального распределения. Т.е. функция распределения представляет собой вероятность отказа.

При использовании функции Лапласа вместо интегральной функции распределения $F_0(t)$ имеем

$$\Phi(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^t \exp\left\{-\frac{t^2}{2}\right\} dt, \quad (40)$$

Вероятность отказа и вероятность безотказной работы, выраженные через функцию Лапласа, имеют вид

$$Q(t) = 0,5 + \Phi\left(\frac{t - T_0}{\sigma}\right),$$

$$P(t) = 0,5 - \Phi\left(\frac{t - T_0}{\sigma}\right).$$

Вероятность попадания случайной величины X в заданный интервал значений от α до β вычисляют по формуле

$$P(\alpha < X < \beta) = \Phi\left(\frac{\beta - T_0}{\sigma}\right) - \Phi\left(\frac{\alpha - T_0}{\sigma}\right). \quad (41)$$

Значения функции Лапласа Φ и u табулированы.

Общий характер изменения показателей надёжности при нормальном

распределении приведён на рис. 10.

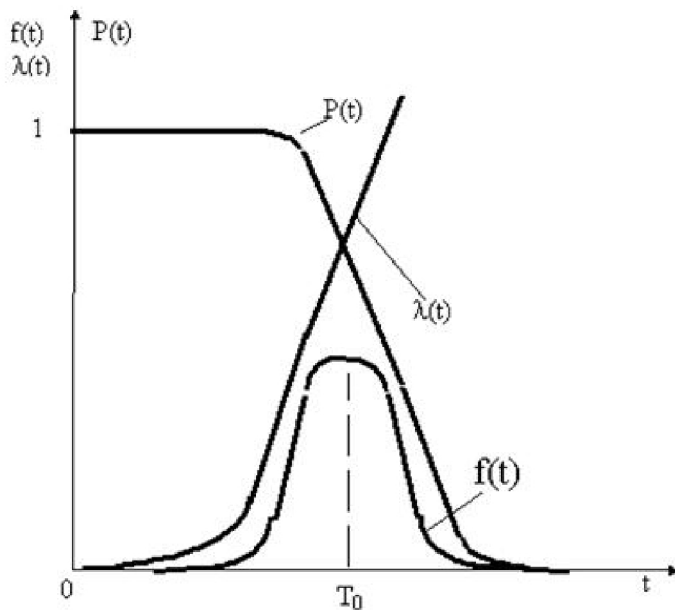


Рис. 10. Кривые надежности для нормального закона распределения

Нормальный закон распределения часто называют законом Гаусса. Этот закон играет важную роль и наиболее часто используется на практике по сравнению с другими законами распределения.

Основная особенность этого закона состоит в том, что он является *предельным законом*, к которому приближаются другие законы распределения. В теории надежности его используют для описания постепенных отказов, когда распределение времени безотказной работы в начале имеет низкую плотность, затем максимальную и далее плотность снижается.

Распределение всегда подчиняется нормальному закону, если на изменение случайной величины оказывают влияние многие, примерно равнозначные факторы.

2.2.3 Расчёт характеристик надёжности невосстанавливаемых объектов при основном соединении элементов

Если отказ системы наступает при отказе одного из элементов, то

считают, что такая система имеет основное соединение элементов. Тогда ВБР изделия в течение времени t равна произведению ВБР её элементов в течение того же времени

$$P_c(t) = \prod_{i=1}^N P_i(t) \quad (42)$$

Если значения вероятности безотказной работы близки к 1, то с достаточной для практики точностью можно использовать следующую приближённую формулу:

$$P_c(t) = P_1(t) \cdot P_2(t) \cdot \dots \cdot P_N(t) \approx 1 - \sum_{i=1}^N Q_i(t) \quad (43)$$

Если все элементы равнонадёжны, интенсивность отказов системы будет

$$\lambda_c = \sum_{i=1}^{N_m} N_i \cdot \lambda_i, \quad (44)$$

где m - число типов элементов.

Если система состоит из нескольких элементов с различными значениями интенсивность отказов, то среднее значение определяют по формуле

$$\lambda_{\Sigma} = \lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_N \dots \quad (45)$$

Если элементы функционируют в различных условиях или в различной степени подвержены влиянию внешних воздействующих факторов, то интенсивность отказов элемента вычисляется по формуле

$$\lambda_i = \lambda_{i0} \prod_{i=1}^N k_i \alpha_i, \quad (46)$$

где λ_{i0} - интенсивность отказов элемента, работающего в нормальных условиях, k_i, α_i - поправочные коэффициенты, зависящие от различных факторов.

Поправочный коэффициент k_i позволяет учесть внешние воздействия, главным образом механические перегрузки и влажность, поправочный коэффициент α_i - влияние температуры и внутренних напряжений (как

электрических, так и механических).

Если элементы имеют не постоянную интенсивность отказов, но существуют чётко выраженные временные интервалы, в течение которых интенсивность отказов элемента в основном постоянна, то для расчёта используется т.н. эквивалентная интенсивность отказов.

2.2.4 Показатели надёжности восстанавливаемых объектов

Большинство сложных технических систем с длительными сроками службы являются *восстанавливаемыми*, т.е. возникающие в процессе эксплуатации отказы систем устраняют при ремонте. Технически исправное состояние изделий в процессе эксплуатации поддерживают проведением профилактических и восстановительных работ.

Для осуществляемых в процессе эксплуатации изделий работ по поддержанию и восстановлению их работоспособности характерны значительные затраты труда, материальных средств и времени. Как правило, эти затраты за время эксплуатации изделия значительно превышают соответствующие затраты на его изготовление. Совокупность работ по поддержанию и восстановлению работоспособности и ресурса изделий подразделяют на *техническое обслуживание*, и *ремонт*, которые, в свою очередь, подразделяют на *профилактические работы*, осуществляемые в плановом порядке и *аварийные*, проводимые по мере возникновения отказов или аварийных ситуаций.

Свойство ремонтпригодности изделий влияет на материальные затраты и длительность простоев в процессе эксплуатации. Ремонтпригодность тесно связана с безотказностью и долговечностью изделий. Так, для изделий, с высоким уровнем безотказности, как правило, характерны низкие затраты труда и средств на поддержание их работоспособности.

Показатели безотказности и ремонтпригодности изделий являются составными частями комплексных показателей, таких как коэффициенты

готовности K_r , оперативной готовности $K_{ог}$ и технического использования $K_{т.и.}$. К показателям надёжности, присущим только восстанавливаемым элементам, следует отнести среднюю наработку на отказ, наработку между отказами, вероятность восстановления, среднее время восстановления, коэффициент готовности, коэффициент оперативной готовности и коэффициент технического использования.

Средняя наработка на отказ — наработка восстанавливаемого элемента, приходящаяся, в среднем, на один отказ в рассматриваемом интервале суммарной наработки или определенной продолжительности эксплуатации:

$$T_0 = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m t_i, \quad (47)$$

где t_i — наработка элемента до i -го отказа; m — число отказов в рассматриваемом интервале суммарной наработки.

Нарработка между отказами определяется объемом работы элемента от i -го отказа до $(i + 1)$ -го, где $i = 1, 2, \dots, m$.

Среднее время восстановления одного отказа в рассматриваемом интервале суммарной наработки или определенной продолжительности эксплуатации

$$T_{\text{ср}} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m t_{\text{ср}i}, \quad (48)$$

где $t_{\text{ср}i}$ — время восстановления i -го отказа.

Коэффициент готовности K_r представляет собой вероятность того, что изделие будет работоспособно в произвольный момент времени, кроме периодов выполнения планового технического обслуживания, когда применение изделия по назначению исключено. Этот показатель является комплексным, так как он количественно характеризует одновременно два показателя: безотказность и ремонтпригодность.

В стационарном (установившемся) режиме эксплуатации и при любом виде закона распределения времени работы между отказами и времени восстановления коэффициент готовности определяют по формуле

$$K_{\Gamma} = T_0 l(T_0 + T_{\text{в}}) \quad (49)$$

(T_0 — средняя наработка на отказ; $T_{\text{в}}$ — среднее время восстановления одного отказа).

Таким образом, анализ формулы показывает, что надёжность изделия является функцией не только безотказности, но и ремонтпригодности. Это означает, что низкая надёжность может быть несколько компенсирована улучшением ремонтпригодности. Чем выше интенсивность восстановления, тем выше готовность изделия. Если время простоя велико, то готовность будет низкой.

Другой важной характеристикой ремонтпригодности является коэффициент технического использования, который представляет собой отношение наработки изделия в единицах времени за некоторый период эксплуатации к сумме этой наработки и времени всех простоев, обусловленных устранением отказов, техническим обслуживанием и ремонтами за этот период. Коэффициент технического использования представляет собой вероятность того, что изделие будет работать в надлежащем режиме за время T . Таким образом, $K_{\text{т.и.}}$ определяется двумя основными факторами — надёжностью и ремонтпригодностью.

Коэффициент оперативной готовности $K_{\text{ог}}$ определяется как вероятность того, что объект окажется в работоспособном состоянии в произвольный момент времени (кроме планируемых периодов, в течение которых применение объекта по назначению не предусматривается) и, начиная с этого момента, будет работать безотказно в течение заданного интервала времени.

Из вероятностного определения следует, что

$$K_{\text{ог}} = K_{\Gamma} * P(t) \quad (50)$$

Коэффициент технического использования характеризует долю времени нахождения элемента в работоспособном состоянии относительно рассматриваемой продолжительности эксплуатации. Период эксплуатации, для которого определяется коэффициент технического использования, должен

содержать все виды технического обслуживания и ремонтов. Коэффициент технического использования учитывает затраты времени на плановые и неплановые ремонты, а также регламенты, и определяется по формуле

$$K_{\text{ти}} = t_{\text{н}} / (t_{\text{н}} + t_{\text{с}} + t_{\text{р}} + t_{\text{о}}), \quad (51)$$

где $t_{\text{н}}$ — суммарная наработка изделия в рассматриваемый промежуток времени; $t_{\text{с}}$, $t_{\text{р}}$ и $t_{\text{о}}$ — соответственно суммарное время, затраченное на восстановление, ремонт и техническое обслуживание изделия за тот же период времени.

2.2.5 Резервирование систем

Резервирование - метод повышения надёжности объекта введением дополнительных элементов и функциональных возможностей сверх минимально необходимых для нормального выполнения объектом заданных функций. В этом случае отказ наступает только после отказа основного элемента и всех резервных элементов.

Систему можно представить из ряда ступеней, выполняющих отдельные функции. Задача резервирования состоит в нахождении такого числа резервных образцов оборудования на каждой ступени, которое будет обеспечивать заданный уровень надёжности системы при наименьшей стоимости.

Выбор наилучшего варианта зависит главным образом от того увеличения надёжности, которое можно достичь при заданных расходах

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.

Виды резервирования

Структурное (элементное) резервирование - метод повышения

надёжности объекта, предусматривающий использование избыточных элементов, входящих в физическую структуру объекта. Обеспечивается подключением к основной аппаратуре резервной таким образом, чтобы при отказе основной аппаратуры резервная продолжала выполнять ее функции.

Резервирование функциональное - метод повышения надёжности объекта, предусматривающий использование способности элементов выполнять дополнительные функции вместо основных, и наряду с ними.

Временное резервирование - метод повышения надёжности объекта, предусматривающий использование избыточного времени, выделенного для выполнения задач. Другими словами, временное резервирование - такое планирование работы системы, при котором создается резерв рабочего времени для выполнения заданных функций. Резервное время может быть использовано для повторения операции, либо для устранения неисправности объекта.

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

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

С позиций расчёта и обеспечения надёжности технических систем необходимо рассматривать структурное резервирование.

Способы структурного резервирования

По способу подключения резервных элементов и устройств различают следующие способы резервирования (рис. 11).



Рис. 11. Классификация способов структурного резервирования

Резервирование раздельное (поэлементное) с постоянным включением резервных элементов (рис.12).

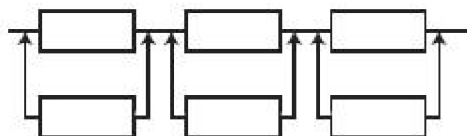


Рис. 12. Резервирование раздельное с постоянным включением резервных элементов

Такое резервирование возможно тогда, когда подключение резервного элемента не существенно изменяет рабочий режим устройства. Достоинство его - постоянная готовность резервного элемента, отсутствие затраты времени на переключение. Недостаток - резервный элемент расходует свой ресурс так же, как основной элемент.

Резервирование раздельное с замещением отказавшего элемента одним резервным элементом (рис. 13). Это такой способ резервирования, при котором резервируются отдельные элементы объекта или их группы.

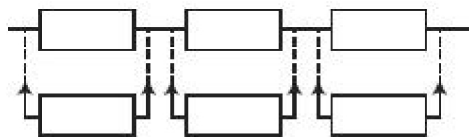


Рис. 13 Резервирование раздельное с замещением отказавшего элемента

В этом случае резервный элемент находится в разной степени готовности к замене основного элемента. Достоинство этого способа - резервный элемент сохраняет свой рабочий ресурс, либо может быть использован для выполнения самостоятельной задачи. Рабочий режим основного устройства не искажается. Недостаток - необходимость затрачивать время на подключение резервного элемента. Резервных элементов может быть меньше, чем основных.

Отношение числа резервных элементов к числу резервируемых называется кратностью резервирования - m . При резервировании с целой кратностью величина m есть целое число, при резервировании с дробной кратностью величина m есть дробное несокращаемое число. Например, $m=4/2$ означает наличие резервирования с дробной кратностью, при котором число резервных элементов равно четырем, число основных - двум, а общее число элементов равно шести. Сокращать дробь нельзя, так как если $m=4/2=2/1$, то это означает, что имеет место резервирование с целой кратностью, при котором число резервных элементов равно двум, а общее число элементов равно трём.

При включении резерва по способу замещения резервные элементы до момента включения в работу могут находиться в трёх состояниях:

- нагруженном («горячем») резерве;
- облегченном («тёплом») резерве;
- ненагруженном («холодном») резерве.

Нагруженный («горячий») резерв - резервный элемент, находящийся в том же режиме, что и основной.

Облегченный («тёплый») резерв - резервный элемент, находящийся в менее нагруженном режиме, чем основной.

Ненагруженный («холодный») резерв - резервный элемент,

практически не несущий нагрузок

2.2.6 Типовые структуры расчета надёжности

Под структурной схемой надёжности понимается наглядное представление (графическое или в виде логических выражений) условий, при которых работает или не работает исследуемый объект (система, устройство, технический комплекс и т.д.). Типовые структурные схемы представлены на рис. 14.

Простейшей формой структурной схемы надёжности является параллельно-последовательная структура. На ней параллельно соединяются элементы, совместный отказ которых приводит к отказу. В последовательную цепочку соединяются такие элементы, отказ любого из которых приводит к отказу объекта.

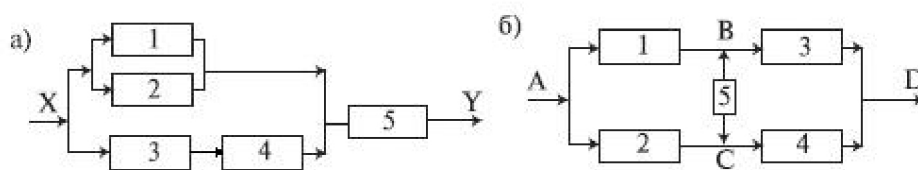


Рис. 14 - Типовые структуры расчёта надёжности

На рис. 14,а представлен вариант параллельно-последовательной структуры. По этой структуре можно сделать следующее заключение. Объект состоит из пяти частей. Отказ объекта наступает тогда, когда откажет или элемент 5, или узел, состоящий из элементов 1-4. Узел может отказать тогда, когда одновременно откажет цепочка, состоящая из элементов 3,4 и узел, состоящий из элементов 1,2. Цепь 3-4 отказывает, если откажет хотя бы один из составляющих ее элементов, а узел 1,2 - если откажут оба элемента, т.е. элементы 1,2. Расчёт надёжности при наличии таких структур отличается наибольшей простотой и наглядностью.

В тех случаях, когда условие работоспособности не удаётся представить в виде простой параллельно-последовательной структуры используют или логические

функции, или графы и ветвящиеся структуры, по которым оставляются системы уравнений работоспособности.

Расчёт надёжности, основанный на использовании параллельно-последовательных структур

На рис. 15 представлено параллельное соединение элементов 1, 2, 3. Это означает, что устройство, состоящее из этих элементов, переходит в состояние отказа после отказа всех элементов при условии, что все элементы системы находятся под нагрузкой, а отказы элементов статистически независимы.

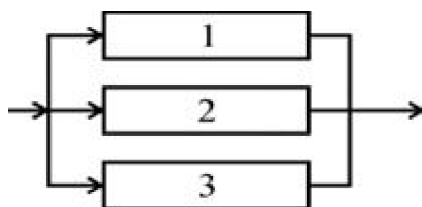


Рис. 15. Блок-схема системы с параллельным соединением элементов

Условие работоспособности устройства можно сформулировать следующим образом: устройство работоспособно, если работоспособен элемент 1 или элемент 2, или элемент 3, или элементы 1 и 2, 1; и 3, 2; и 3, 1; и 2; и 3.

Вероятность безотказного состояния устройства, состоящего из n параллельно соединённых элементов определяется по теореме сложения вероятностей совместных случайных событий как

$$P_c = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_i) \quad (52)$$

т.е. при параллельном соединении независимых (в смысле надёжности) элементов их ненадёжности ($Q_i = 1 - P_i$) перемножаются.

Интенсивность отказов (при интенсивности отказов элементов λ_i), определяется как

$$\lambda_c = \frac{dQ(t)dt}{P(t)} = \frac{n + \lambda_t + Q(t)^n}{P(t)^n}. \quad (52)$$

В случае, когда интенсивности отказов всех элементов одинаковы, среднее время безотказной работы системы T_0

$$T_0 = \frac{1}{\lambda} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{1}{i}. \quad (53)$$

Включение резервного оборудования системы замещением

В данной схеме включения n одинаковых образцов оборудования только один находится все время в работе (рис. 16). Когда работающий образец выходит из строя, его непременно отключают, и в работу вступает один из резервных (запасных) элементов. Этот процесс продолжается до тех пор, пока все резервные образцы не будут исчерпаны.

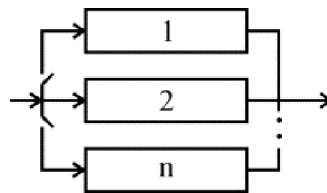


Рис. 16 - Блок-схема системы включения резервного оборудования замещением

Примем для этой системы следующие допущения:

1. Отказ системы происходит, если откажут все n элементов.
2. Вероятность отказа каждого образца оборудования не зависит от состояния остальных $(n-1)$ образцов (отказы статистически независимы).
3. Отказывать может только оборудование, находящееся в работе, и условная вероятность отказа в интервале $(t, t+dt)$ равна λdt ; запасное оборудование не может выходить из строя до того, как оно будет включено в работу.
4. Переключающие устройства считаются абсолютно надёжными.
5. Все элементы идентичны. Резервные элементы имеют характеристики как новые.

Система способна выполнять требуемые от нее функции, если исправен

по крайней мере один из n образцов оборудования. В этом случае при экспоненциальном законе и «холодном» резерве надёжность равна просто сумме вероятностей состояний системы, исключая состояние отказа, т.е.

$$P_c(t) = e^{-\lambda t} \sum_{i=0}^m \frac{(\lambda t)^i}{i!} \quad (54)$$

m – кратность резервирования.

$$T_c = T_0(m+1), \quad (55)$$

где λ и T_0 – ИО и средняя наработка до первого отказа основного устройства.

При «горячем» резерве –

$$P_c(t) = 1 - [1 - e^{-\lambda t}]^{m+1}, \quad T_c = T_0 \sum_{i=0}^m \frac{1}{i+1}. \quad (56)$$

2.3 Методы обеспечения надёжности сложных систем

2.3.1 Конструктивные способы обеспечения надёжности

Одной из важнейших характеристик сложных технических систем является их надёжность. Требования к количественным показателям надёжности возрастают тогда, когда отказы технической системы приводят к большим затратам материальных средств, либо угрожают безопасности (например, при создании атомных лодок, самолётов или изделий военной техники). Один из разделов технического задания на разработку системы – раздел, определяющий требования к надёжности. В этом разделе указывают количественные показатели надёжности, которые необходимо подтверждать на каждом этапе создания системы.

На этапе разработки технической документации, являющейся комплектом чертежей, технических условий, методик и программ испытаний, выполнение научно-исследовательских расчётов, подготовки эксплуатационной документации и обеспечение надёжности осуществляют способами рационального проектирования и расчётно- экспериментальными методами

оценки надёжности.

Существуют несколько методов, с помощью которых можно повысить конструктивную надёжность сложной технической системы. Конструктивные методы повышения надёжности предусматривают создание запасов прочности металлоконструкций, облегчение режимов работы электроавтоматики, упрощение конструкции, использование стандартных деталей и узлов, обеспечение ремонтпригодности, обоснованное использование методов резервирования.

Анализ и прогнозирование надёжности на стадии проектирования даёт необходимые данные для оценки конструкции. Такой анализ проводят для каждого варианта конструкции, а также после внесения конструктивных изменений. При обнаружении конструктивных недостатков, снижающих уровень надёжности системы, проводят конструктивные изменения и корректируют техническую документацию.

2.3.2 Технологические способы обеспечения надёжности изделий в процессе изготовления

Одним из основных мероприятий на стадии серийного производства, направленных на обеспечение надёжности технических систем, является стабильность технологических процессов. Научно обоснованные методы управления качеством продукции позволяют своевременно давать заключение о качестве выпускаемых изделий. На предприятиях промышленности применяют два метода статистического контроля качества: текущий контроль технологического процесса и выборочный метод контроля

Метод статистического контроля (регулирования) качества позволяет своевременно предупреждать брак в производстве и, таким образом, непосредственно вмешиваться в технологический процесс.

Выборочный метод контроля не оказывает непосредственного влияния на производство, так как он служит для контроля готовой продукции, позволяет

выявить объём брака, причины его возникновения в технологическом процессе или же качественные недостатки материала.

Анализ точности и стабильности технологических процессов позволяет выявить и исключить факторы, отрицательно влияющие на качество изделия. В общем случае, контроль стабильности технологических процессов можно проводить следующими методами: графоаналитическим с нанесением на диаграмму значений измеряемых параметров; расчётно-статистическим для количественной характеристики точности и стабильности технологических процессов; а также прогнозирования надёжности технологических процессов на основе количественных характеристик приведенных отклонений.

2.3.3 Обеспечение надёжности сложных технических систем в условиях эксплуатации

Надёжность технических систем в условиях эксплуатации определяется рядом эксплуатационных факторов, таких как, квалификация обслуживающего персонала, качество и количество проводимых работ по техническому обслуживанию, наличие запасных частей, использование измерительной и проверочной аппаратуры, а также наличие технических описаний и инструкций по эксплуатации.

В первом приближении можно принять, что все отказы, возникающие в процессе эксплуатации, являются независимыми. Поэтому надёжность всей системы при предположении независимости отказов равна:

$$P = P_1 * P_2 * P_3 \dots \quad (57)$$

где P_1 ; P_2 ; P_3 - вероятности безотказной работы системы соответственно по непрогнозируемым внезапным отказам, внезапным отказам, которые могут быть предотвращены при своевременном техническом обслуживании, и постепенным отказам.

Одной из причин отсутствия отказов элементов системы является качественное техническое обслуживание, которое направлено на

предотвращение прогнозируемых внезапных отказов. Вероятность безотказной работы системы, обусловленная качеством обслуживания, равна:

$$P_{об} = \prod_{i=1}^n p_i^{об}, \quad (58)$$

где $P_i^{об}$ – вероятность безотказной работы i -го элемента, связанная с техническим обслуживанием.

По мере совершенствования обслуживания значение вероятности безотказной работы $P_{об}$ приближается к единице.

Замена элементов с возрастающей во времени интенсивностью отказов возможна во всех сложных технических системах. С целью уменьшения во времени интенсивности отказов вводят техническое обслуживание системы, которое позволяет обеспечить поток отказов у сложных систем с конечной интенсивностью в течение заданного срока эксплуатации, т.е. сделать близким к постоянному.

В процессе эксплуатации при техническом обслуживании интенсивность отказов системы, с одной стороны, имеет тенденцию к увеличению, а с другой стороны, - тенденцию к уменьшению в зависимости от того, на каком уровне проведено обслуживание. Если техническое обслуживание проведено качественно, то интенсивность отказов уменьшается, а если это обслуживание проведено плохо, то увеличивается.

Используя накопленный опыт, можно всегда выбрать тот или иной объем функционирования, который обеспечит нормальную работу системы до очередного технического обслуживания с заданной вероятностью безотказной работы. Можно определить приемлемые сроки проведения технического обслуживания, обеспечивающего работу системы на заданном уровне надёжности.

2.3.4 Пути повышения надёжности сложных технических систем при эксплуатации

Для повышения надёжности сложных технических систем в условиях эксплуатации проводят ряд мероприятий, которые можно подразделить на следующие четыре группы:

- 1) разработку научных методов эксплуатации;
- 2) сбор, анализ и обобщение опыта эксплуатации;
- 3) связь проектирования с производством изделий;
- 4) повышение квалификации обслуживающего персонала.

Научные методы эксплуатации включают в себя научно обоснованные методы подготовки изделия к работе, проведения технического обслуживания, ремонта и других мероприятий по повышению надёжности сложных технических систем в процессе их эксплуатации. Порядок и технологию проведения этих мероприятий описывают в соответствующих руководствах и инструкциях по эксплуатации конкретных изделий. Более качественное выполнение эксплуатационных мероприятий по обеспечению надёжности изделий машиностроения обеспечивается результатами статистического исследования надёжности этих изделий. При эксплуатации изделий большую роль играет накопленный опыт. Значительную часть опыта эксплуатации используют для решения частных организационно-технических мероприятий. Однако накопленные данные необходимо использовать не только для решения задач сегодняшнего дня, но и для создания будущих изделий с высокой надёжностью.

Большое значение имеет правильная организация сбора сведений об отказах. Содержание мероприятий по сбору таких сведений определяется типом изделий и особенностями эксплуатации этих изделий. Возможными источниками статистической информации могут быть сведения, полученные по результатам различных видов испытаний и эксплуатации, которые оформляются периодически в виде отчетов о техническом состоянии и надёжности изделий.

Изучение особенностей их поведения дает возможность использовать накопленные данные для проектирования будущих изделий. Таким образом,

сбор и обобщение данных об отказах изделий - одна из важнейших задач, на которую должно быть обращено особое внимание.

Эффективность эксплуатационных мероприятий во многом зависит от квалификации обслуживающего персонала. Однако влияние этого фактора неодинаково. Так, например, при выполнении в процессе обслуживания довольно простых операций влияние высокой квалификации работника сказывается мало, и наоборот, квалификация обслуживающего персонала играет большую роль при выполнении сложных операций, связанных с принятием субъективных решений.

2.3.5 Организационно-технические методы по восстановлению и поддержанию надёжности техники при эксплуатации

Известно, что в процессе эксплуатации изделие определенное время используют по назначению для выполнения соответствующей работы, некоторое время она транспортируется и хранится, а часть времени идет на техническое обслуживание и ремонт. При этом для сложных технических систем в нормативно-технической документации устанавливают виды технических обслуживаний (ТО-1, ТО-2,...) и ремонтов (текущий, средний или капитальный).

На стадии эксплуатации изделий проявляются технико-экономические последствия низкой надёжности, связанные с простоями техники и затратами на устранение отказов и приобретение запасных частей. С целью поддержания надёжности изделий на заданном уровне в процессе эксплуатации необходимо проводить комплекс мероприятий, который может быть представлен в виде двух групп — мероприятия по соблюдению правил и режимов эксплуатации; мероприятия по восстановлению работоспособного состояния.

К первой группе мероприятий относятся обучение обслуживающего персонала, соблюдение требований эксплуатационной документации, последовательности и точности проводимых работ при техническом

обслуживании, диагностический контроль параметров и наличие запасных частей, осуществление авторского надзора и т.п.

К основным мероприятиям второй группы относятся корректирование системы технического обслуживания, периодический контроль за состоянием изделия и определение средствами технического диагностирования остаточного ресурса и предотказного состояния, внедрение современной технологии ремонта, анализ причин отказов и организация обратной связи с разработчиками и изготовителями изделий.

Многие изделия значительную часть времени эксплуатации находятся в состоянии хранения, т.е. не связаны с выполнением основных задач. Для изделий, работающих в таком режиме, преобладающая часть отказов связана с коррозией, а также воздействием пыли, грязи, температуры и влаги. Для изделий, находящихся значительную часть времени в эксплуатации, преобладающая часть отказов связана с износом, усталостью или механическим повреждением деталей и узлов. В состоянии простоя интенсивность отказов элементов существенно меньше, чем в рабочем состоянии. Так, например, для электромеханического оборудования это соотношение соответствует 1:10, для механических элементов это соотношение составляет 1:30, для электронных элементов 1:80.

Необходимо отметить, что с усложнением техники и расширением областей её использования возрастает роль этапа эксплуатации техники в суммарных затратах на создание и использование технических систем. Затраты на поддержание в работоспособном состоянии за счет технических обслуживания и ремонтов превышают стоимость новых изделий в следующее число раз: тракторов и самолетов в 5...8 раз; металлорежущих станков в 8...15 раз; радиоэлектронной аппаратуры в 7...100 раз.

Техническая политика предприятий должна быть направлена на снижение объемов и сроков проведения работ по техническому обслуживанию и ремонту техники за счет повышения надёжности и долговечности основных узлов.

Консервация машины в состоянии поставки помогает сохранить её работоспособность, как правило, в течение 3-5 лет. Для поддержания надёжности машины в процессе эксплуатации на заданном уровне объем производства запасных частей должен составлять 25...30 % стоимости машин.

3. СПЕЦИАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ НАДЕЖНОСТИ СЛОЖНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ

Надежность и безопасность структурно-сложных систем

Большинство реальных систем относятся к классу структурно-сложных систем (ССС). Из-за трудностей математического характера и сложностей структурирования задач подобного рода они, как правило, изучаются описательным путем, что явно недостаточно для сегодняшнего уровня развития техники. Специальная часть современного математического аппарата — логико-вероятностные методы (ЛВМ) позволяет более простым и удобным способом решать задачи обеспечения надежности и безопасности СССР при их проектировании и эксплуатации.

Феномен сложности современных технических систем (отраслевых и региональных информационно-вычислительных систем, робототехнических комплексов, атомных электростанций и ледоколов, АПЛ и надводных кораблей, пилотируемых орбитальных станций и космических кораблей, и др.), не познан до конца в научном плане и не решен удовлетворительно в прикладном смысле.

Не смотря на то, что вероятности аварий на больших технических системах меньше, чем у простых систем, их последствия более масштабны и ликвидируются тяжелее. А работа таких больших систем подчас зависит от нескольких операторов, их квалификации и мастерства. Поэтому в условиях дальнейшего нарастания сложности и числа больших СССР, вопросы надежности и безопасности техники, порядка и организованности приобретают всё большее значение в мировом масштабе.

Единственным практически реальным путем для проектирования и исследования СССР является моделирование. СССР описываются сценариями сетевого типа, а при решении задач используются логико-вероятностные модели. Логико-вероятностные методы предоставляют большие возможности при анализе влияния любого элемента на надежность и безопасность

структурно-сложной системы.

Становление теории надежности, живучести, безопасности

Математический аппарат логико-вероятностного метода (ЛВМ), разработанный на базе теоретических трудов Дж. Буля, увидевшего связь между логикой и вероятностью, и К. Э. Шеннона, создателя теории информации и связи.

Таким образом, удалось донести до заинтересованных специалистов новые методы решений проблем надёжности и живучести таких структурно-сложных систем, как ПЛА.

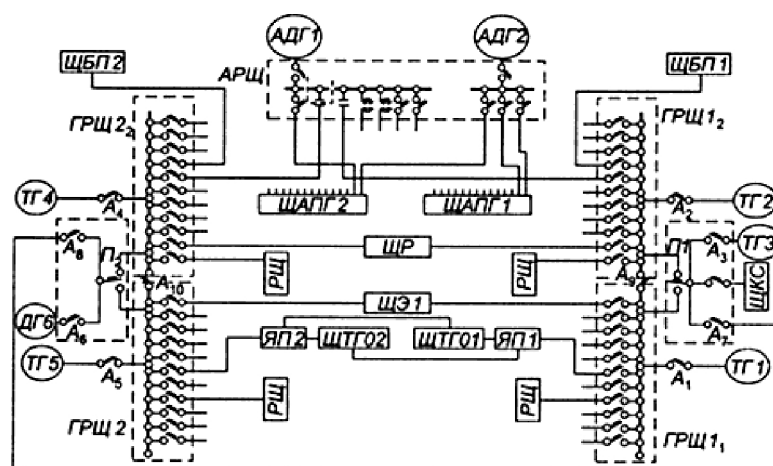


Рис. 16. Принципиальная схема генерирования и распределения электроэнергии атомного ледокола Ленин

На рисунке приведены следующие сокращения: ГРЩ1 и ГРЩ2 — носовой и кормовой главные распределительные щиты; АРЩ — аварийный распределительный щит; ТП—ТГ5 — турбогенераторы мощностью 1000 кВт; ДГ6 — дизель-генератор мощностью 1000 кВт. АДГ1 и АДГ2 — аварийные дизель-генераторы мощностью по 100 кВт; ЩАПГ1. ЩАПГ2 — щиты атомной парогенераторной установки правого и левого бортов; ЩР — щит рулевого устройства; ЩЭ1 — щит системы электродвижения среднего винта; ЩТГО1 и ЩТГО2 — щиты носового и кормового турбогенераторных отделений: ЯП1.

ЯП2 — ящики с переключателями; Р1Ц — вторичные распределительные щиты; 1ЦПБ1 и 1ЦПБ2 — щиты питания с берега (носовой и кормовой); ЩКС — щит креновой системы.

Логико-вероятностная теория безопасности

К разработке логико-вероятностной теории безопасности (ЛВТБ) вплотную я приступил в середине 1970-х гг. Большинство учёных в то время отвергало само понятие «безопасность», пытаясь приспособить теорию надёжности к оценке безопасности. Последующее десятилетие с Чернобыльской трагедией 1986 г. подтолкнуло человечество к пониманию того, что надёжная и живучая система может быть весьма опасной. До неё это казалось принципиально невозможным.

Понятия надёжность и живучесть характеризуют свойства системы сохранять работоспособность при штатных и форс-мажорных воздействиях на неё. Безопасность же определяет способность системы не причинять ущерба большого масштаба окружающей среде и самой себе, в том числе .

Кроме смешения понятий надёжность и безопасность, проектировщики зачастую за безопасность системы выдают её отказоустойчивость. Повышение надёжности элементов, введение структурной и временной избыточности, применение взаимозаменяемости и восстановления, а также другие меры повышения надёжности систем, гарантируют только отказоустойчивость системы, то есть её способность правильно функционировать при отказах нескольких элементов.

Но для структурно-сложных систем характерна возможность сложных (многократных) комбинаций событий, вероятность каждого из которых мала, а в сумме таких «невероятных» событий набирается немало. Усилия, направленные на повышение отказоустойчивости системы, необходимы, но недостаточны для обеспечения её безопасности. Даже специальные системы контроля и защиты, ориентированные на простой перебор возможных опасных

ситуаций, не могут гарантировать защиты системы от произвольных комбинаций отказов, нарушений правил эксплуатации и иных неблагоприятных воздействий.

ЛВМ для решения проблем надежности и безопасности

В теории надежности, насчитывающей уже более 40 лет, по-прежнему сохраняются «белые пятна», связанные с проблемой получения объективных исходных данных о безотказности элементов, статистическая информация о которых ввиду малого объема выборки принципиально не может быть достаточной для стандартной обработки.

Но даже при полном отсутствии статистической информации (из-за новизны разрабатываемых образцов, принципиально новых режимов работы, отсутствия прототипов), проведение сравнительных расчетов надежности вариантов ССС весьма полезно. То же самое относится и к случаю, когда элементы используются в необычном режиме работы и, следовательно, статистическая информация о надежности отдельных элементов практически отсутствует. В большинстве случаев даже проведение чисто параметрических расчетов позволяет выявить предпочтительный вариант системы при определенных значениях параметров, установить допустимую область применения того или иного варианта построения системы.

Современная прикладная математика позволяет в большинстве случаев корректно поставить задачу, четко сформулировать условия и допущения, в которых она решается. А её специальный раздел -- логико-вероятностные методы, связанный с логико-вероятностным исчислением (ЛВИ), дает возможность эффективно исследовать структурные проблемы надежности и безопасности ССС. Привлекательность математической логики, ЛВМ для инженеров заключается в их четкости, однозначности и больших возможностях при анализе влияния любого элемента на надежность и безопасность системы в целом.

Использование математического аппарата теории надежности необходимо уже на этапе задания требований по надежности ССС вследствие сложности структуры и алгоритмов её функционирования. Но задание требований по надежности системы в целом задача весьма сложная, требующая глубоких знаний особенностей функционирования системы в целом. На первом этапе проектирования ССС требуется построить рациональную структуру, определить алгоритмы функционирования.

Исходными данными для логико-вероятностных моделей надежности и безопасности ССС являются вероятности истинности отдельных аргументов в функциях алгебры логики (ФАЛ), описывающих работоспособность системы (в теории надежности) или ее опасное состояние (в теории безопасности).

Исходные данные для ЛВМ получают из длительных наблюдений за работой элементов в реальных условиях эксплуатации или за случаями инициирующих событий, которые могут привести к опасности.

Оценка количественных характеристик надежности и безопасности производится либо по результатам специальных испытаний на надежность (безопасность), либо по результатам работы элементов в реальных условиях эксплуатации. Проведение испытаний на надежность связано с трудностями имитации внешних условий, большой стоимостью и длительностью испытаний. Во втором случае стоимость работ минимальна, а длительность наблюдения и массив статистической информации определяются продолжительностью процесса эксплуатации и количеством действующих объектов.

Математическая модель работоспособности системы в виде логической ФРС и полученная на ее основе вероятностная функция позволяют оценить степень участия каждого элемента в общей характеристике системы.

Математическое моделирование аварий

Научный подход к проблеме безопасности требует проведения комплексного анализа, классификации аварий и катастроф с учетом характера и

размера их последствий, основных поражающих факторов, учета предельных физических параметров, надежности, риска и живучести технических объектов, персонала и окружающей среды. Для решения этих вопросов необходимы соответствующие методы математического моделирования, физические модели возникновения и развития катастроф.

Анализ произошедших аварий показывает, что независимо от географии, времени и типа производства они подчиняются определенным закономерностям. Как правило, аварии предшествует фаза накопления дефектов в оборудовании или отклонений от номинальных процедур ведения процесса, продолжительность которой может измеряться минутами или даже годами. Сами по себе дефекты и отклонения угрозы еще не представляют, но в критический момент они могут сыграть роковую роль. Накопление отклонений от нормы связано с ненаблюдаемостью работы отдельных элементов (из-за отсутствия соответствующей диагностики) и с привыканием обслуживающего персонала к подобного рода отклонениям.

На второй фазе — фазе иницирующего события система быстро (взрывным образом) переходит в опасное состояние, наносящее ущерб большого масштаба. У личного состава не оказывается ни времени, ни средств для эффективных действий в эти мгновения. И, наконец, в фазе развития аварии человеческий фактор может сыграть как положительную, так и отрицательную роль. Опуская элементарное технологическое невежество, некомпетентность и безответственность лиц, причастных к авариям, принципиальными причинами неблагополучия в этой области являются:

- недопустимая подмена понятий живучести и безопасности понятием надежность. Рассмотрение безопасности как одного из свойств надежности приводит к тому, что безопасности исходно не уделяется должного и специального внимания, не формируются обязательные требования к анализу безопасности проектов создаваемых комплексов;

- вера в «абсолютную» безопасность, бытовавшая в свое время, например, относительно АЭС;

- отсутствие новых методов и технических средств комплексной оперативной диагностики аварийных ситуаций.

В моделях надежности сложных технических систем, в основном, элементный состав системы, связи между ними, режимы работы системы и пр.

А в проблеме безопасности на первом плане должны быть не учитываемые в теории надежности компоненты, такие как: среда, в которой функционирует система; защитные сооружения; неблагоприятные внешние воздействия; умышленные или безответственные действия людей. Специалист по безопасности должен иметь психологию «диверсанта», т. е. продумывать, как проще всего привести систему в опасное состояние, в отличие от специалиста по надежности, думающего о сохранении ее работоспособности.

При проектировании ССС, разработке алгоритмов управления ими должно быть тщательно рассмотрено все множество опасных состояний, логика их возникновения, необходимо точно знать, как могут возникнуть пожар, взрыв, разгерметизация и прочие разрушения объекта. Знание условий возникновения неблагоприятных воздействий позволяет разработать безопасный алгоритм управления системой, заблаговременно принять соответствующие меры защиты.

Поскольку проведение полноценных экспериментов для оценки безопасности ССС невозможно, решением проблемы является проигрывание вариантов развития аварийной ситуации на математических моделях. Разработка сценариев вероятного развития аварийных ситуаций и потенциальных последствий производится, как правило, при недостатке или отсутствии полной и достоверной информации.

Любой риск представляет собой многокритериальную величину и не может оцениваться по одной компоненте. И чем больше информации поступает о каком-либо процессе, тем большее число факторов необходимо учесть при анализе риска. Тем более сложным становится процесс анализа, повышая значение разработки концептуальной основы выбора факторов, подлежащих приоритетному учету.

Теория безопасности ССС

Теорию безопасности ответственных объектов и сложных технических систем для случаев возникновения аварий и катастроф с серьезными последствиями целесообразно разрабатывать с учетом не только стандартных (проектных) условий их функционирования, но и обязательным учетом запроектных разрушающих воздействий и грубых (непреднамеренных или сознательных) нарушений правил их эксплуатации.

Первоочередной задачей теории безопасности ССС является разработка методов количественной оценки риска возникновения аварии и прогнозирования ее возможных последствий. Для ограничения числа ситуаций, которые могут привести систему в опасное состояние, необходимо четко представлять суть опасного состояния. Если это авария от взрыва, требуются знания всей химии и физики возможного взрыва. Если оценивается риск гибели судна, необходимо быть специалистом по кораблестроению, навигации, судовождению и пр. Конкретизация и дифференциация исследуемого опасного состояния позволяют существенно сократить множество вариантов возможных опасных состояний системы.

Объект исследования следует ограничивать разумными пределами не только в пространственных границах, но, что ещё более важно, в пределах дробления системы на отдельные элементы.

При составлении сценария развития событий, приводящих систему в опасное состояние, важно следовать строгой логике перебора возможных ситуаций. Целесообразно двигаться не «снизу вверх» (от отдельной поломки, отказа, нежелательного иницирующего события), а «сверху вниз» (от исследуемого опасного состояния к причинам, способным его вызвать). То есть в первую очередь разработать логическую часть теории безопасности, не пренебрегая при этом другими областями знаний (физики, химии, механики, электротехники и пр.), объясняющих причинно-следственные связи в каждой веточке сценария событий. Особенно трудно поддаются учету так называемые

«поперечные» связи (в отличие от «продольных», идущих от опасного состояния системы к конкретному инициирующему событию), которые образуются в результате совместного взаимодействия факторов через явные и неявные перемишки (поля, структуры). Именно эти факторы чаще всего упускаются из виду в расчете на их отсутствие или несущественность.

Литература

1. Легасов В.А. Проблемы безопасного развития техносферы. Коммунист №8 1987.
2. Руденко Ю.Н., Ушаков И.А. Надежность систем энергетики. Москва, наука, 1986.
3. Рябинин И.А. Надежность и безопасность структурно-сложных систем. Издание второе, дополненное и переработанное. СПб, изд. СПбГУ, 2007.
4. Рябинин И.А. Логико-вероятностный анализ и его современные возможности. «Биосфера» т.2, №1 2010.
5. А.В. Зеленский, В.А. Зеленский, Г.Ф. Краснощекова, А.А. Нюхалов. Основы проектирования электронных средств: Учебное пособие. Под общ. ред. А.В. Зеленского. – Самара: «Изд-во СНЦ РАН», 2007.- 243 с.