

Министерство сельского хозяйства Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ-МСХА
ИМЕНИ К.А. ТИМИРЯЗЕВА

Журавлева Л.А.



НАДЕЖНОСТЬ И БЕЗОПАСНОСТЬ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ И ТЕХНОГЕННЫЙ РИСК

Учебное пособие
для обучающихся по направлению подготовки
20.03.01 Техносферная безопасность

Москва 2022

УДК 62.
ББК 30
Ж91

Рецензенты:

Есин А. И., док. техн. наук, профессор кафедры техносферной безопасности и транспортно-технологических машин ФГБОУ ВО Саратовской ГАУ;

Мавзовин В. С., канд. техн. наук, доцент кафедры прикладной математики НИУ МГСУ

Надежность и безопасность технических систем и техногенный риск: учебное пособие для направления подготовки 20.03.01 Техносферная безопасность / Сост.: Л.А. Журавлева, // ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева – Москва, 2022 – 92с.
ISBN 978-5-00207-055-8

Учебное пособие «Надежность и безопасность технических систем и техногенный риск» составлено в соответствии с рабочей программой дисциплины и предназначен для студентов направления подготовки 20.03.01 «Техносферная безопасность». Учебное пособие содержит материал по основным разделам теории надежности элементов и устройств на стадиях проектирования, изготовления и эксплуатации. Изложена методика расчета надежности невосстанавливаемых и восстанавливаемых изделий при основном и резервном соединении элементов.

УДК 62
ББК 30

© ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева, 2022

	ВВЕДЕНИЕ.....	4
1	ТЕХНИЧЕСКАЯ СИСТЕМА. НАДЕЖНОСТЬ И БЕЗОПАСНОСТЬ.....	6
2	ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ...	11
3	НАДЕЖНОСТЬ – КОМПЛЕКСНОЕ СВОЙСТВО.....	14
4	КЛАССИФИКАЦИЯ ОТКАЗОВ.....	23
5	ОБЗОР МЕТОДОВ РАСЧЕТА НАДЕЖНОСТИ.....	28
6	МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ.....	36
7	ДОЛГОВЕЧНОСТЬ. СВОЙСТВА И ПОКАЗАТЕЛИ ОЦЕНКИ.....	39
8	РЕМОНТОПРИГОДНОСТЬ. СВОЙСТВА И ПОКАЗАТЕЛИ ОЦЕНКИ.....	45
9	МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И КОМПЛЕКСНОЙ ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ.....	48
10	НАДЕЖНОСТЬ ПЕРСОНАЛА.....	52
11	ИСПЫТАНИЯ НА НАДЕЖНОСТЬ.....	55
12	ОСНОВЫ ТЕОРИИ РИСКА.....	62
13	ЛОГИКО-ГРАФИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ АНАЛИЗА НАДЕЖНОСТИ И РИСКА.....	74
14	ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ.....	82
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	90
	СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	91

ВВЕДЕНИЕ

Теория надежности – молодая наука, ее около 50 лет. Надежность как отдельное требование при проектировании, производстве и эксплуатации сформировалось недавно, хотя изучение последствий отказов той или иной системы началось вместе с зарождением промышленности.

Понятие «надежность» тогда не использовалось, однако изобретателей первого парохода интересовала способность котлов и двигателей выдерживать длительные трансатлантические рейсы. На случай отказа паровой машины предусматривался резерв в виде парусов.

Фирма «Додж Бразерз», придумав много лет назад лозунг «Доверие к Доджу», имела в виду надежность. Несмотря на то, что в автомобилях американского производства давно применялся электростартер, они еще долго снабжались ручным стартером (автомобили выпуска 1960 года).

Хотя еще в 19 веке и в первой четверти 20 века, для которых был характерен неторопливый ритм жизни, проблемы теперь называемой надежности являлись весьма серьезными. Однако последствия отказов не были столь драматичны и столь катастрофичны, как в настоящее время.

Появление мощной скоростной авиации и очень сложной военной техники, а также необходимость сокращения сроков разработки означают, что нет времени на то, чтобы действовать старыми способами проектирования и повторной проверки до тех пор, пока не будет получена вполне удовлетворительная продукция.

В период с 1945 по 1951 г.г. стало очевидно, что существующие методы проектирования, производства необходимо изменить. Так как исключительно сложные системы, зачастую требующие принципиально новых научно-технических решений, нужно было проектировать и изготавливать в относительно короткие сроки, обеспечивая при этом высокую вероятность удовлетворительного выполнения требуемых функций.

Показатели безопасности определяют способность системы обуславливать при ее эксплуатации безопасность обслуживающего персонала и населения.

К показателям безопасности следует отнести вероятность безопасной работы человека в конкретных условиях в течение определенного времени, времени срабатывания блокировочных и защитных устройств и т.д.

Хотя безопасность рассматривается как одно из свойств надежности, оно выходит за рамки надежности, поскольку неполнота безопасности может проявляться и в нормальных условиях работы объекта. Примером может служить работа теплоэлектроцентралей на органическом топливе (угле, сланце, мазуте) с нормальным режимом функционирования котлов, но с выбросами в атмосферу вредных продуктов сгорания в дозах, превышающих допустимые из-за несоответствия качества топлива режимам горения. Этот случай также можно рассматривать как отказ системы, при котором следует изменить режимы сжигания или режимы работы фильтров.

Таким образом, безопасность обуславливается практической необходимостью.

Безопасность технических систем тесно связана с современной прикладной математикой, широко использует разнообразные ее методы, как для решения своих задач, так и для точной формулировки основных своих понятий.

Объем и глубина использования математического аппарата в теории надежности и безопасности не превращает ее в ветвь прикладной математики. Она остается инженерной дисциплиной, поскольку основными для нее являются те реальные задачи, которые выдвигаются практикой, а не методы, которые к ним применяются.

Учебное пособие «Безопасность и надежность технических систем и техногенный риск» предназначен для студентов по направлению подготовки 20.03.01 «Техносферная безопасность». Курс нацелен на формирование ключевых компетенций, необходимых для эффективного решения профессиональных задач и организации профессиональной деятельности, а так же при выполнении курсового проектирования и выпускной квалификационной работы.

1 ТЕХНИЧЕСКАЯ СИСТЕМА. НАДЕЖНОСТЬ И БЕЗОПАСНОСТЬ

Что же такое техническая система? Существует классическое определение системы, основанное на переводе с греческого: система (целое, составленное из частей) – множество элементов, находящихся в отношениях и связях друг с другом, которое образует определенную целостность, единство.

В теории надежности под технической системой понимают совокупность взаимодействующих и функционально взаимосвязанных частей, называемых элементами.

Система может рассматриваться как составная часть более крупной системы, и тогда она выступает в качестве элемента. Со своей стороны, если элемент может быть разбит на составные части, он рассматривается как система.

Например, зерноуборочный комбайн состоит из нескольких агрегатов: жатка, молотилка, копнитель, двигатель, ходовая часть и др., а каждый агрегат, в свою очередь, состоит из определенных составных частей. С точки зрения теории надежности комбайн – это система, а составляющие его агрегаты – элементы. Но в тоже время каждый агрегат – система, а его составные части – элементы. В дальнейшем будем часто использовать термин «объект», понимая под ним как техническую систему, так и элемент.

Надежность

Надежность – одно из основных свойств качества объекта. А качество объекта – совокупность свойств, обуславливающих его способность удовлетворять определенные потребности в соответствии с его назначением. К таким свойствам можно отнести стабильность выполнения заданных функций, удобство в применении и обслуживании, экономическую эффективность, эстетические свойства и т. д. Особая роль принадлежит надежности.

Например, зерноуборочный комбайн. Его основные функции – скосить хлебную массу, обмолотить, выделить зерно и переместить его в некоторую емкость. При этом весь технологический процесс должен быть стабильным, т.е. уровень потерь зерна, степень дробления, засоренность не должны превышать установленных значений. Условия работы комбайнера должны быть удобными и достаточно комфортными. Используемый комбайн должен приносить прибыль.

Автомобиль предназначен для перемещения пассажиров и (или) грузов из одной точки пространства в другую с определенной скоростью. Можно назвать много свойств, которыми, на наш взгляд, должен обладать автомобиль: комфортность условий работы и отдыха водителя, комфортность пассажиров, размеры легкового автомобиля (престижно иметь очень длинный легковой автомобиль), его цвет, экологичность и т.д., грузоподъемность и маневренность для грузового автомобиля, эффективность использования и т.д. Но, самое главное, в

течение всего периода эксплуатации от её начала и до списания все свойства и, в первую очередь, основные функции должны сохраняться в определенных, заранее оговоренных пределах. Это и будет характеризовать надежность автомобиля.

Надежность технической системы - это её свойство 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 транспортирования.

Из определения видно, что способность технической системы выполнять требуемые функции, т.е. её надежность оговаривается соблюдением ряда условий: работе в заданных режимах и условиях применения, проведение через определенные периоды времени установленных видов технического обслуживания, применение установленной техдокументацией методов ремонта, соблюдение правил хранения и транспортирования. И только в этом случае мы вправе ожидать, что приобретенный нами автомобиль прослужит нам верой и правдой установленный ему срок службы.

Значение проблемы надежности

Надежность – это один из основных показателей качества изделий, проявляющийся во времени и отражающий изменения, происходящие в машине на протяжении всего времени её эксплуатации.



Рисунок1–Элементы надежности

Увидеть и оценить надежность машины всесторонне или достаточно полно можно только в эксплуатации.

Видеть легко, трудно предвидеть. (Бенджамен Франклин).

Но создатели машины должны уметь рассчитывать и прогнозировать надежность создаваемой техники на стадии проектирования.

Чем дальше от доски конструктора обнаруживается ненадежность, тем дороже она обходится. (А.Н. Туполев)

Решение проблемы осложняется следующими факторами:

- во всех закономерностях участвует фактор времени;
- физически закономерности, определяющие изменения характеристик машин, сложны и разнообразны;
- процессы изменения параметров изделий являются случайными;
- все стадии создания и эксплуатации машин вносят свой вклад в формирование показателей надежности.

Краткая историческая справка. Формирование науки о надежности

Мы должны иметь в виду, что все технические объекты (машины, приборы, инструменты, приспособления) во все времена изготавливались в расчете на некоторый достаточный для практических целей период использования.

Создатели технических устройств всегда стремились к тому, чтобы их изделия были прочными, долговечными, могли быть ремонтируемыми, а если сказать одним словом – надежными. Но долгое время надежность не могла быть оценена количественными показателями. Говорили: менее надежное изделие или более надежное, т.е. существовала качественная оценка. И только с возникновением количественных показателей начала развиваться теория надежности. Надежность стала наукой. На первых этапах развития теории основное внимание уделялось сбору и обработке статистических данных об отказах изделий. На основе анализа полученной информации можно было оценить степень надежности наблюдаемых объектов.

Развитие теории сопровождалось совершенствованием вероятностных методов исследования, а именно: определение законов распределения наработки изделий до отказа, разработка методов расчета и испытаний с учетом случайного характера возникновения отказов. В это же время возникали новые направления в развитии теории:

- поиск принципиально новых путей повышения надежности;
- прогнозирование надежности;
- анализ физико-химических процессов, оказывающих влияние на надежность;
- установление количественных связей между характеристиками этих процессов и показателями надежности;
- совершенствование методов испытаний на надежность. Вначале проводились ускоренные и натурные неразрушающие испытания.

Затем возникли методы математического моделирования, которые при современном уровне вычислительной техники получили широкое развитие. Можно утверждать, что к середине XX века сформировались основы общей теории надежности.

Основные факторы, определившие главные направления в развитии надежности как науки:

- возрастающая сложность технических устройств;

- возрастание ответственности функций, которые выполняют технические устройства;
- повышение требований к качеству изделий и условиям их работы;
- стремление к всё более полной автоматизации производственных и других процессов.

Техническим средствам отводят все более ответственные функции на производстве и в сфере управления. Все больше насыщение техническими устройствами окружающего мира, постоянно убыстряющийся темп жизни увеличивают зависимость человека от техники: отказ технического устройства зачастую может привести к катастрофическим последствиям. В последние годы ученые ввели понятие «техногенная сфера», разрабатываются методы определения техногенного риска и его разновидностей.

Математические методы теории надежности

Надежность является прикладной наукой и поэтому как всякая прикладная отрасль знаний опирается в своем развитии на фундаментальные математические и естественные науки. В связи с тем, что количественные показатели надежности носят случайный характер, математическую основу теории надежности на начальном этапе её возникновения составляют теория вероятностей и математическая статистика. В дальнейшем получили применение аналитические методы теории случайных процессов. Расчеты надежности изделий, для которых возникает необходимость их ремонта, причем как продолжительность эксплуатации до ремонта, так и длительность ремонта носят случайный характер, подобны в ряде случаев расчету систем массового обслуживания. При анализе надежности сложных структурных систем находят применение метод логических схем с использованием алгебры логики (алгебры Буля). Возможно, мы рассмотрим пример применения этого метода. И, наконец, все более широкое применение получают методы расчета, сочетающиеся с методами математического моделирования.

Физические основы теории надежности

Второй составной частью фундамента науки надежности являются результаты исследования естественных наук, в первую очередь тех из них, которые изучают физико-химические процессы разрушения старения, и изменения свойств материалов из которых изготовлены технические объекты или которые необходимы для их функционирования.

Все результаты исследований этих наук, используемые в теории надежности, формируются в область знаний, объединяемую термином физика отказов. Физика отказов изучает, исследует протекающие во времени процессы, приводящие к потере материалов первоначальных свойств при эксплуатации изделий.

Экономический аспект надежности

При организации и проведении работ по созданию технического объекта с заданным уровнем надежности часто возникает необходимость проработки (рассмотрение, оценка) нескольких вариантов решения поставленной задачи. При этом необходимо постоянно помнить о необходимости экономической оценки каждого варианта, т.к. в большинстве случаев именно экономический аспект является основополагающим при выборе того или иного варианта.

Дело в том, что современный уровень развития техники позволяет создавать объекты практически с любыми показателями надежности. Однако затраты при этом могут быть настолько высокими, а изделия будут таким дорогим, что не заинтересует не одного заказчика, потому что экономический эффект от его применения за весь период эксплуатации не окупит расходы на его приобретение.

Отметим некоторые возможности создания изделий с требуемым уровнем надежности:

- широкий диапазон конструктивных решений;
- наличие достаточно большого разнообразия конструкционных материалов;
- использование материалов с заданными характеристиками;
- возможность выбора того или иного технологического процесса при изготовлении изделия;
- применение той или иной системы технического обслуживания и ремонта;
- и т. д.

Следует отметить, что при сравнении вариантов для принятия решения исходят из условия получения наибольшего экономического эффекта, оценка которого предполагает учет всех затрат, связанных с изготовлением, эксплуатацией, техническим обслуживанием и ремонтом изделия, а также той прибыли, которую потребитель получает при использовании данного изделия.

2 ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Известные основные определения качества продукции принципиально не отличаются друг от друга.

Качество – наличие существенных признаков, свойств, особенностей, отличающих один предмет или явление от других.

Качество продукции, совокупность свойств и мера полезности продукции, обуславливающая ее способность все более полно удовлетворять, общественные и личные потребности.

Классификация и методы определения свойств качества технических систем постоянно пополняются и уточняются.

В настоящее время классификация описывает следующее множество свойств:

- функционального назначения;
- надежности;
- безопасности;
- экологическое;
- эргономическое;
- технологическое;
- транспортабельности;
- стандартизации и унификации;
- патентно-правовое;
- эстетическое;
- экономическое.

Показатели качества

Состав показателей функционального назначения достаточно объемный, в связи с этим данное свойство рассматривается как возможное для оценки качества технической системы:

- мощность,
- расход топлива,
- тяговое усилие.

Надежность, является **комплексным свойством**, которое включает:

- безотказность,
- долговечность,
- ремонтпригодность
- сохраняемость.

Свойство безопасности определяет способность технической системы обуславливать при ее эксплуатации безопасность оператора. Безопасность технической системы характеризуется, например следующими показателями:

– вероятность безопасной работы оператора в конкретных условиях в течение определенного времени,

– время срабатывания блокировочных и тормозных устройств.

Нормативные значения показателей безопасности определяются государственными стандартами, нормами и правилами по технике безопасности, пожарной безопасности, производственной санитарии и т.д.

Экологическое свойство технической системы определяет уровень вредных воздействий на окружающую среду при производстве, эксплуатации и ремонте.

Экологическими показателями могут быть следующие:

– содержание вредных компонентов, выбрасываемых в окружающую среду,

– вероятность выбросов вредных компонентов (газов и жидкостей).

Нормативные значения экологических показателей определяются отечественными стандартами, рекомендациями и правилами, а также международным техническим регламентом.

Эргономическое свойство определяет систему взаимодействия «человек-машина» с целью создания оптимальных условий работы. Данное свойство состоит из показателей:

– гигиенические показатели,

– антропометрические,

– физиологические,

– психологические.

Значения физиологических и психологических показателей характеризуют соответствие технической системы возможностям человека воспринимать и перерабатывать информацию, а также соответствие технической системы закрепленным и вновь приобретенным навыкам человека.

Значения **антропометрических показателей** определяют соответствие конструкции технической системы размерам человеческого тела и его отдельных частей.

Гигиенические показатели используются при определении соответствия условиям жизнедеятельности и работоспособности человека при его взаимодействии с технической системой. Состав показателей достаточно велик, в связи с этим укажем наиболее часто встречающиеся, такие как:

– температура,

– влажность,

– запыленность,

– шум,

– вибрация.

Свойство технологичности характеризует эффективность конструктивно-технологических решений для высокой производительности труда при изготовлении и ремонте технической системы. К основным показателям технологичности относятся:

– коэффициент сборности (блочности),

– коэффициент использования материалов,

– удельная трудоемкость,

– удельная материалоемкость.

Приспособленность технической системы к транспортированию, а также к подготовительным и другим операциям, связанным с транспортированием, оценивается свойством **транспортабельности**.

Транспортабельность наиболее полно определяется стоимостным показателем, который учитывает затраты основных видов ресурсов (материальных, трудовых, временных), а также квалификацию и число операторов, выполняющих работы по транспортированию.

Свойство **стандартизации и унификации** определяет насыщенность технической системы стандартными, унифицированными и оригинальными составными частями, а также уровень унификации технической системы с другими марками.

Стандартными составными частями являются части соответствующие государственным или отраслевым стандартам. **Унифицированными** составными частями являются те, которые используются не менее чем в двух различных типах технических систем, выпускаемых одним предприятием. **Оригинальными** составными частями являются те, которые разработаны только для данной технической системы.

Степень стандартизации и унификации характеризуется показателями:

- коэффициент применяемости по типоразмерам,
- коэффициент применяемости по составным частям,
- коэффициент повторяемости составных частей,
- коэффициент взаимной унификации для группы технических систем.

Патентно-правовое свойство качества определяет патентную защиту и патентную чистоту, а также характеризует конкурентоспособность технической системы на рынке.

Патентно-правовой уровень технической системы оценивается:

- показателем патентной защиты и
- показателем патентной чистоты.

Показатель патентной защиты характеризует количество и весомость новых отечественных изобретений, реализованных в данной технической системе.

Показатель патентной чистоты характеризует возможность беспрепятственной реализации технической системы, как в России, так и за рубежом.

Эстетическое свойство определяется следующими показателями:

- информационная выразительность,
- рациональность формы,
- целостность композиции,
- совершенство исполнения технической системы,
- стабильность товарного вида.

Экономическое свойство оценивается показателями, определяющими затраты на разработку, производство, эксплуатацию и ремонт. К ним относятся затраты денежные, трудовые, материальные и временные; себестоимость и трудоемкость производства продукции.

Указанные экономические показатели являются составляющими эффекта от улучшения качества технической системы, определяемого суммарной экономией в производстве и за весь срок службы.

3 НАДЕЖНОСТЬ – КОМПЛЕКСНОЕ СВОЙСТВО

Прежде, чем приступить к изучению терминологии, используемой в науке о надежности, следует дать определения исправного и неисправного, работоспособного и неработоспособного состояний объекта.

На каждое изделие машиностроительной промышленности разрабатывается нормативно-техническая документация и (или) конструкторская документация. Наиболее широкое применение имеет термин «нормативно-техническая документация» или НТД. Такую аббревиатуру будем использовать, понимая под нею то, что было выше сказано о документации на изделие. В НТД включены, кроме технической характеристики, требования к изделию, при соблюдении которых изготовитель имеет право реализовать изделие.

Рассмотрим схему основных состояний и событий.

Исправное состояние – это состояние изделия, при котором оно соответствует всем, требованиям НТД.

Неисправное состояние – это состояние изделия, при котором оно не соответствует хотя бы одному из требований НТД.

Работоспособное состояние – это состояние изделия, при котором значение всех параметров, характеризующих способность выполнять заданные функции, соответствуют требованиям НТД.

Неработоспособное состояние – это состояние изделия, при котором значение хотя бы одного параметра, характеризующего способность выполнять заданные функции, не соответствует требованиям НТД.

Примеры: 1. Поцарапанный, слегка помятый автомобиль выполняет все основные функции – неисправное состояние.

2. Мощность двигателя автомобиля ниже установленной НТД – неработоспособное состояние.

Предельное состояние – состояние изделия, при котором его дальнейшее применение по назначению недопустимо или нецелесообразно, либо восстановление его исправного или работоспособного состояния невозможно или нецелесообразно.

Повреждение – событие, заключающее в нарушении исправного состояния объекта при сохранении работоспособного состояния.

Отказ – событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния.

Показатели надежности

Безотказность – свойство технической системы непрерывно сохранять работоспособное состояние в течение некоторого времени или некоторой наработки. Под наработкой принять продолжительность или объем работы изделия. Нарботка измеряется в единицах времени или в единицах, характеризующих

объем выполняемой работы. Если представить процесс эксплуатации технического изделия на оси t (рис.2), то тогда t_i – наработка до первого отказа (t_1) и (или) между отказами, а t_{Bi} – время восстановления работоспособного состояния.

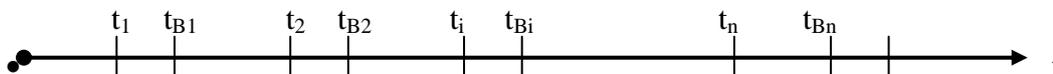


Рисунок 2 – Процесс эксплуатации

Основными показателями безотказности являются **вероятность безотказной работы** – вероятность того, что в пределах заданной наработки отказа объекта не возникнет. Обозначение вероятности безотказной работы в самом общем виде $P(t)$.

Вероятность отказа – $F(t) = 1 - P(t)$.

Когда указывают конкретный интервал времени или объем наработки, то пишут $P(t=t_0)$, что означает вероятность безотказной работы в интервале от 0 до t_0 .

Используются также следующие показатели:

– **средняя наработка до отказа** – математическое ожидание наработки объекта до первого отказа;

– **средняя наработка на отказ** – отношение наработки восстанавливаемого изделия к математическому ожиданию числа его отказов в течение этой наработки.

При обработке статистической информации получают оценку средней наработки на отказ, и тогда применяют обозначение \bar{T} . Для приведенного примера

$$\bar{T} = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{n},$$

где $\sum_{i=1}^n t_i$ – наработка изделия;

n – число отказов за время этой наработки.

Остановимся еще на следующих показателях безотказности: гамма – процентная наработка, параметр потока отказов, интенсивность отказов.

Гамма – процентная наработка – наработка, в течение которой отказ изделия не возникнет с вероятностью γ , выраженной в процентах.

Так, например, если говорят, что $\gamma = 90\%$ – наработка подшипников 1000 часов, то $N = 100$ из подшипников, поставленных на испытание, после наработки в 1000 час может отказать не более 10 подшипников, т.е. сохранить работоспособное состояние должны не менее 90 подшипников.

Параметр потока отказов – отношение среднего числа отказов восстанавливаемого изделия за произвольно малую его наработку к значению этой наработки.

Если за наработку $\Delta t = 200$ час. изделие имело $n = 3$ отказов, то параметр потока отказов определится так $W(t) = \frac{n}{\Delta t} = \frac{3}{200} = 0,015 \text{ час}^{-1}$

Теоретически это выражается формулой:

$$\omega(t) = \frac{M(n(t + \Delta t)) - M(n(t))}{N \cdot \Delta t},$$

где $M(n(t + \Delta t))$ – математическое ожидание M числа отказов n на интервале времени продолжительностью $t + \Delta t$;

$M(n(t))$ – математическое ожидание числа отказов на интервале времени продолжительностью t .

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

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{P(t)} = -\frac{P'(t)}{P(t)} = \frac{F'(t)}{1 - F(t)};$$

где $\lambda(t)$ – интенсивность отказов;

$f(t)$ – плотность вероятности отказов;

$P(t)$ – вероятность безотказной работы.

При определении интенсивности отказов по статистическим данным используют формулу:

$$\bar{\lambda}(t) = \frac{n(\Delta t)}{N_{\text{ср}} \cdot \Delta t};$$

где $\bar{\lambda}(t)$ – оценка интенсивности отказов;

$n(\Delta t)$ – число отказавших объектов n в интервале времени (Δt) ;

$N_{\text{ср}}$ – среднее число изделий, являющихся работоспособными в данный интервал времени Δt .

$$N_{\text{ср}} = \frac{N_{i-1} + N_i}{2};$$

где N_{i-1}, N_i – число работоспособных изделий на начало и конец отрезка времени соответственно.

Долговечность – свойство технической системы сохранять работоспособное состояние до наступления предельного состояния при установленной системе технического обслуживания и ремонта.

Прежде чем назвать показатели долговечности введем термины:

технический ресурс – наработка изделия от начала его эксплуатации или её возобновления после ремонта определенного вида до перехода в предельное состояние.

Срок службы – календарная продолжительность от начала эксплуатации изделия или её возобновления после ремонта определенного вида до перехода в предельное состояние.

Из показателей долговечности остановимся на следующих:

Средний ресурс – математическое ожидание ресурса.

Назначенный ресурс – суммарная наработка изделия, при достижении которой применение по назначению должно быть прекращено.

Средний срок службы – математическое ожидание срока службы.

Назначенный срок службы – календарная продолжительность эксплуатации изделия, при достижении которой применение по назначению должно быть прекращено.

В отношении перечисленных показателей следует отметить, что при их применении следует указывать вид действий после наступления предельного состояния. Например, средний ресурс до капитального ремонта, полный средний ресурс (срок службы), полный назначенный ресурс (срок службы). Употребление термина «полный» означает, что изделие подлежит окончательному снятию с эксплуатации.

Ремонтопригодность – свойство технической системы, заключающееся в приспособленности к предупреждению и обнаружению причин возникновения отказов, повреждений и поддержанию и восстановлению работоспособного состояния путем проведения технического обслуживания и ремонтов.

Основным понятием, используемым при рассмотрении вопросов, связанных с ремонтопригодностью изделия, является время восстановления работоспособного состояния. Под ним понимают продолжительность восстановления работоспособного состояния объекта. К операциям восстановления относятся: определение места и характера отказа, замена, ремонт, регулирование, контроль состояния элементов изделий и изделия в целом.

Основными показателями ремонтопригодности являются следующие.

Вероятность восстановления работоспособного состояния – вероятность того, что время восстановления работоспособного состояния изделия не превысит заданного.

Среднее время восстановления работоспособного состояния – математическое ожидание времени восстановления работоспособного состояния. Оценку среднего времени восстановления определяют по формуле:

$$\bar{T}_B = \frac{\sum t_{Bi}}{n}.$$

При решении экономических вопросов используют в качестве показателя среднюю трудоемкость восстановления работоспособного состояния.

Сохраняемость – свойство технической системы сохранять значения показателей безотказности, долговечности и ремонтопригодности в течение и после хранения и транспортирования изделия в установленных пределах.

Средний срок сохраняемости – математическое ожидание срока сохраняемости.

Комплексные показатели надежности

Рассмотренные выше показатели надежности: вероятность безотказной работы, наработка на отказ, средний ресурс и т.д. – являются единичными показателями.

телями надежности, т.к. характеризуют только одно свойство. Теперь мы рассмотрим комплексные показатели надежности, т.е. те, которые характеризуют более одного свойства.

Коэффициент готовности – вероятность того, что изделие окажется в работоспособном состоянии в произвольный момент времени, кроме планируемых периодов, в течение которых применение объектов по назначению не предусматривается.

Коэффициент готовности (K_r) характеризует количественно два свойства надежности: безотказность и ремонтпригодность. Стационарное значение коэффициента готовности определяют по формуле:

$$K_r = \frac{T}{T + T_B},$$

где T – наработка на отказ;

T_B – среднее время восстановления.

Формула может быть представлена

$$K_r = \frac{\sum t_i}{\sum t_i + \sum t_{Bi}}.$$

Как видно из определения, коэффициент готовности характеризует готовность изделия к применению по назначению только в отношении его работоспособности, т.е. речь идет о вероятности застать изделие в работоспособном состоянии в любой момент времени, причем этот момент выбирается в тех интервалах времени, когда изделие должно выполнять заданные функции.

Коэффициент технического использования – отношение математического ожидания времени пребывания изделия в работоспособном состоянии за некоторый период эксплуатации к сумме математических ожиданий интервалов времени пребывания изделия в работоспособном состоянии, простоев, обусловленных техническим обслуживанием, и ремонтов за тот же период эксплуатации.

$$K_{ТИ} = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{\sum_{i=1}^n t_i + \sum_{i=1}^n t_{Bi} + t_{TO}},$$

где t_{TO} – суммарная продолжительность простоев изделия на проведение технического обслуживания в течение заданного обслуживания в течение заданного периода эксплуатации.

Следует отметить, что для оценки коэффициента технического использования должен выбираться такой период эксплуатации, который содержит все виды технического обслуживания и ремонтов.

Показатели безотказности

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

Наработка это продолжительность или объем работы, выполненный объектом. Она может измеряться в часах, числом циклов нагружения, километрах пробега и других величинах, определяемых специфическими особенностями технической системы.

Основными показателями безотказности технических систем являются:

- Средняя наработка до отказа;
- Средняя наработка на отказ;
- Средняя наработка между отказами;
- Вероятность безотказной работы;
- Параметр потока отказов;
- Интенсивность отказов.

Наработка до отказа вводится как для неремонтируемых (невосстанавливаемых), так и для ремонтируемых (восстанавливаемых) объектов.

Опыт эксплуатации объектов массового производства показывает, что наработка до отказа обнаруживает значительный статистический разброс.

Этот разброс может служить характеристикой технологической культуры и дисциплины, а также достигнутого уровня технологии. Разброс наработки до первого отказа можно уменьшить, а его значение можно увеличить путем надлежащей отработки.

Рассмотрим временную диаграмму, поясняющую статистическое определение наработки до отказа, рис. 3.

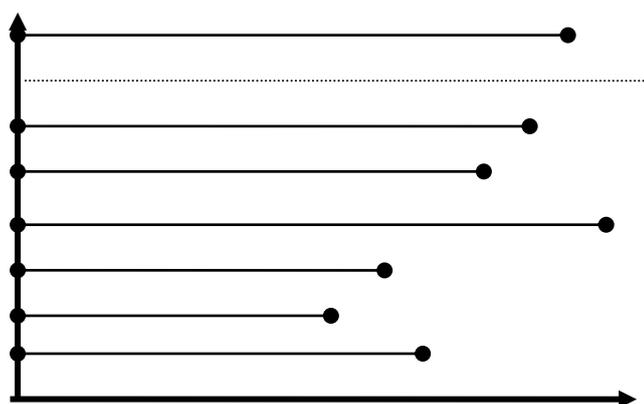


Рисунок 3 – Временная диаграмма наработки до отказа

Показатель наработка на отказ введен применительно к восстанавливаемым объектам, при эксплуатации которых допускаются многократные повторяющиеся отказы.

Очевидно, что это должны быть несущественные отказы, не приводящие к серьезными последствиям и не требующие значительных затрат на восстановление работоспособного состояния.

Эксплуатация таких объектов может быть описана следующим образом: в начальный момент времени объект начинает работать и продолжает работать до первого отказа; после отказа происходит восстановление работоспособного состояния, и объект вновь работает до отказа и т.д. Рассмотрим временную диаграмму, поясняющую статистическое определение наработки на отказ.

Вероятность безотказной работы определяется в предположении, что в начальный момент времени (момент начала исчисления наработки) объект находился в работоспособном состоянии. Вероятность безотказной работы есть вероятность того, что в пределах заданной наработки отказ рассматриваемого объекта не возникает.

Параметр потока отказов – плотность вероятности возникновения отказа восстанавливаемого объекта, определяемая для рассматриваемого момента времени.

Понятие параметр потока отказов выводится из общей схемы отказов машин в эксплуатации, при этом фиксируются только моменты возникновения отказов, время восстановления работоспособности не учитывается.

Моменты отказов формируют поток, называемый потоком отказов, рис.4.

В качестве характеристики потока отказов используется ведущая функция потока.

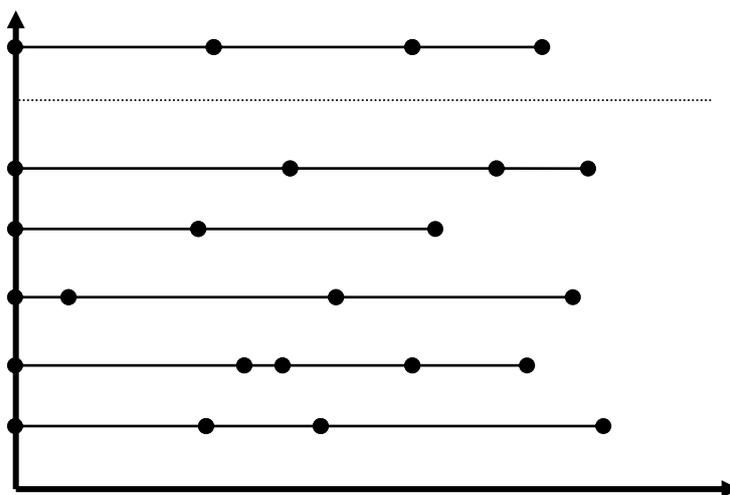


Рисунок 4 – Временная диаграмма наработки на отказ

Отнеся количество отказов за интервал к величине интервала получают характеристику, называемую параметром потока отказов.

Параметр потока отказов представляет собой скорость появления отказов по мере наработки объекта, является функцией наработки и измеряется в отказах на единицу наработки.

Интенсивность отказов – условная плотность вероятности возникновения отказа невосстанавливаемого объекта, определяемая для рассматриваемой величины наработки при условии, что до этого момента отказ не возник.

Показатели долговечности

Долговечность – это свойство технической системы сохранять работоспособное состояние до наступления предельного состояния при установленной норме технического обслуживания и ремонта.

Основными **показателями долговечности** технических систем являются:

- средний ресурс,
- средний срок службы,
- гамма-процентный ресурс.

Ресурс – наработка объекта от определенного момента времени до наступления предельного состояния.

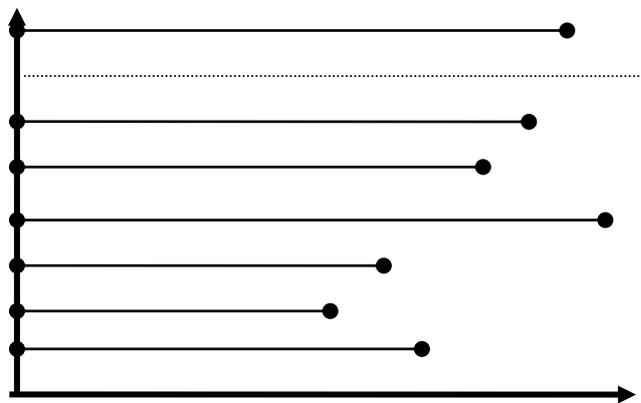


Рисунок 5 – Временная диаграмма ресурса

Срок службы – календарная продолжительность эксплуатации объекта от определенного момента времени до предельного состояния.

Под «определенным моментом» времени понимается начало эксплуатации или ее возобновление после капитального ремонта.

Показатели ремонтпригодности

Ремонтпригодность – это свойство объекта, заключающееся в приспособленности к предупреждению и отображению причин возникновения отказов, повреждений, поддержанию и восстановлению работоспособного состояния путем технического обслуживания и ремонта.

Продолжительность восстановления почти всегда существенно меньше наработки на отказ.

Учитывать продолжительность восстановления необходимо для решения многих задач производства:

- расчет потерь из-за отказов,
- число необходимого ремонтного персонала, расчет материальных и денежных затрат,
- расчет трудоемкости восстановления,

– расчет производственных площадей.

Основными показателями ремонтпригодности являются:

- среднее время восстановления работоспособного состояния,
- вероятность восстановления работоспособного состояния.

Показатели сохраняемости

Сохраняемость – это свойство объекта сохранять в заданных пределах значения параметров, характеризующих способность его выполнять заданные функции в течение и после хранения и (или) транспортирования.

Показателями сохраняемости являются:

- средний срок сохраняемости,
- гамма-процентный срок сохраняемости.

Гамма-процентный срок сохраняемости определяют как срок сохраняемости, который будет достигнут объектом с заданной вероятностью гамма-процентов

4 КЛАССИФИКАЦИЯ ОТКАЗОВ

Внезапные и постепенные отказы

Внезапный отказ – отказ, характеризующийся скачкообразным изменением значений одного или нескольких заданных параметров объекта.

Внезапные отказы возникают в результате сочетания неблагоприятных факторов и случайных внешних воздействий, превышающих возможности объекта к их восприятию.

$$\sigma_a \leq \frac{\sigma_T}{[n]},$$

σ_a – математическое ожидание нормальных напряжений возникающих при эксплуатации конкретной детали.

σ_T – математическое ожидание предела текучести материала, из которого изготовлена деталь.

$[n]$ – допускаемый коэффициент запаса.

Наработка до отказа является величиной случайной. Основным признаком внезапного отказа является независимость вероятности его возникновения от продолжительности предыдущего периода эксплуатации, т.е. $F(t_1-t_2)$ не зависит от продолжительности t_1 . И поэтому прогнозировать момент возникновения внезапного отказа практически невозможно.

В ряде случаев при более глубоком проникновении в сущность процессов, связанных с возникновением отказа, может возникнуть возможность обнаружения постепенных изменений в объекте, которые приведут к постепенному отказу. И тогда можно говорить о прогнозировании.

Примеры:

Прокол камеры автомобильного колеса при наезде на острые предметы.

Излом оси колеса при попадании в яму.

Постепенный отказ – отказ, характеризующийся постепенным изменением значений одного или нескольких заданных параметров объекта и выходом их за пределы, установленные НТД.

Постепенные отказы являются результатом того или иного процесса старения материала, ухудшающего начальные параметры объекта. К процессам старения относят износ, коррозию, усталость, изменение структуры композитных материалов и т.д.

Примеры:

Износ поршневой пары ДВС → увеличение зазоров между поршнем и цилиндром → снижение мощности двигателя ниже установленного значения.

Оси вагонов. Усталостное разрушение. До того, как было изучено явление усталости металла, такие отказы относили к внезапным.

Износы подшипников → повышенные зазоры в сопряжениях → перекосы валов → их поломка.

Признаком постепенного отказа является зависимость вероятности его возникновения t_1-t_2 от продолжительности предыдущей эксплуатации, т.е. $F(t_1-t_2)$ зависит от t_1 . Чем глубже изучен тот или иной процесс старения, тем с большей точностью можно прогнозировать момент возникновения отказа и своевременно принимать профилактические меры. Большая часть отказов технических систем относится к постепенным отказам.

Если эксплуатационник игнорирует процессы старения, не проводит диагностирования, не выполняет профилактических работ, то появление отказов неизбежно. Характер их проявления внезапен.

Зависимый и независимый отказ

Независимый отказ – отказ объекта, не обусловленный отказом другого объекта.

Зависимый отказ – отказ объекта, обусловленный отказом другого объекта.

Если в технической системе происходит отказ элемента, зависящий от отказа другого элемента этой системы, то эти элементы рассматриваются как самостоятельные объекты.

Конструкционный, производственный и эксплуатационный отказы

Конструкционный отказ – отказ, возникший в результате несовершенства или нарушения установленных правил и норм конструирования объекта.

Производственный отказ – отказ, возникший в результате несовершенства или нарушения установленного процесса изготовления объекта.

– применение другого материала с более низкими физико-механическими свойствами;

– применение техпроцессов, приводящих к снижению физико-механических свойств материалов;

– отказ от отдельных элементов техпроцесса.

Эксплуатационный отказ – отказ, возникший в результате нарушения установленных правил и условий эксплуатации и ремонта.

Отказы функционирования и параметрические

При отказе **функционирования** объект прекращает выполнять свои функции. Отказ происходит в результате поломки, деформации, заклинивания и т.д.

Параметрический отказ определяется выходом одного или нескольких параметров, характеризующих способность объекта выполнять заданные функции, за установленные пределы.

Примеры:

Падение мощности двигателя ниже установленного предела.

Повышенный расход топлива.

Величина зазора в сопряжении вышла за установленные пределы.

Параметрические отказы фиксируются при проведении диагностирования. В случае обнаружения отказа должны быть приняты необходимые меры. В противном случае такой отказ может привести к отказу функционирования.

Модели отказов

Моделирование – исследование объектов познания на их моделях: построение и изучение моделей реально существующих предметов и явлений и конструируемых объектов.

Математическая модель – приближенное описание какого-либо класса явлений внешнего мира, выраженное с помощью математической символики.

Формирование модели постепенного отказа

Изменение свойств и состояния материалов является первопричиной потери объектом работоспособности, первопричиной отказа. Дело в том, что все изменения свойств и состояний материалов, протекающие во времени, приводят к ухудшению значений параметров, характеризующих работоспособное состояние объекта.

Очевидно, что чем лучше изучены процессы поведения материалов, тем глубже знания о физико-химических процессах, приводящих к изменениям их свойств, тем достовернее можно судить о времени наступления предельного состояния объекта, о вероятности возникновения отказа.

Рассмотрим выражение

$$\frac{dU}{dt} = \varphi(Z_1, Z_2, \dots, Z_n : t)$$

$\frac{dU}{dt}$ – скорость протекания некоторого процесса поведения материала;

Z_i – входные параметры, характеризующие условия эксплуатации (нагрузки, скорости, температуры и т.д.), состояние материала (твердость, прочность, качество поверхности и т.д.) и др. факторы, влияющие на протекание рассматриваемого процесса.

Если удастся получить функциональную зависимость, следует иметь в виду, что точно предсказать протекание процесса не удастся, т.к. сами аргументы Z_1, Z_2, \dots, Z_n являются величинами случайными.

Невозможно предсказать колебания нагрузок, температур, атмосферных воздействий и т.д. Сами детали выполняются с различными допусками на технологические параметры и т.д. Механические характеристики материалов имеют разброс и т.д.

Вывод. Знание физических закономерностей протекания процесса значительно увеличивает возможности по оценке хода процесса по сравнению с оценкой только на основе статистических данных.

Формирование модели внезапного отказа

Рассмотрим ситуацию.

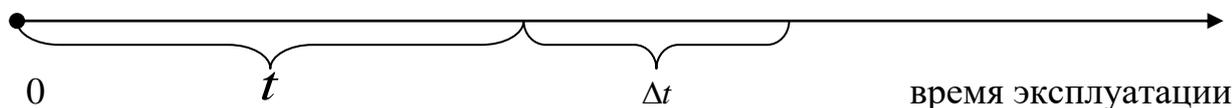


Рисунок 6 – Формирование модели внезапного отказа

Проводим наблюдение за эксплуатацией технического изделия и фиксируем следующие события.

A – случайное событие, заключающееся в отсутствии отказа на участке t;

B/A – случайное событие, заключающееся в отсутствии отказа на участке Δt при условии, что на участке t отказа не было;

AB – случайное событие, заключающееся в отсутствии отказа на участке t+Δt.

$P(A) \equiv P(t)$ – вероятность безотказной работы на участке t.

$P(B/A) \equiv P(\Delta t/t)$ – условная вероятность безотказной работы на участке Δt при условии отсутствия отказа на участке t;

$P(AB) \equiv P(t+\Delta t)$ – вероятность безотказной работы на участке t+Δt.

Из теории вероятностей – $P(AB) = P(A) P(B/A)$.

Таким образом, $P(t+\Delta t) = P(t) P(\Delta t/t)$

Известно, что интенсивность отказов $\lambda(t)$ определяется по формуле:

$$\lambda(t) = \frac{F(\Delta t/t)}{\Delta t}$$

где $F(\Delta t/t)$ – условная вероятность отказа на участке Δt (при отсутствии отказа на участке t). Т.к. $P(\Delta t/t) + F(\Delta t/t) = 1$,

то

$$\lambda(t) = \frac{1 - P(\Delta t/t)}{\Delta t} = \frac{1 - \frac{P(t+\Delta t)}{P(t)}}{\Delta t} = \frac{P(t) - P(t+\Delta t)}{\Delta t \cdot P(t)} = -\frac{1}{P(t)} \cdot \frac{P(t+\Delta t) - P(t)}{\Delta t}$$

Рассмотрим

$$\lambda(t) = \lim \left(-\frac{1}{P(t)} \cdot \frac{P(t+\Delta t) - P(t)}{\Delta t} \right),$$

где $P(t+\Delta t) - P(t)$ – приращение функции $P(t)$,

Δt – приращение аргумента.

Таким образом,

$$\lambda(t) = -\frac{1}{P(t)} \cdot \frac{d(P(t))}{dt} = -\frac{d}{dt} \ln P(t)$$

$$P(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt}$$

$$F(t) = 1 - e^{-\int_0^t \lambda(t) dt}$$

– это выражение, определяемое в теории надежности законом надежности, можно трактовать как модель внезапного отказа.

5 ОБЗОР МЕТОДОВ РАСЧЕТА НАДЕЖНОСТИ

Прогнозирование надежности – расчет на стадии проектирования

Для сложной технической системы рассматривают три основных стадии ее существования: проектирование, изготовление, эксплуатация. На стадии проектирования надежность закладывается, при изготовлении – осуществляется, в эксплуатации – реализуется. Чем дальше от проектирования выявляется ненадежность, тем больший ущерб наносится в результате отказа. Ущерб может быть материальным, но все чаще имеют место травмы и даже гибель людей. В последние десятилетия возросло количество человеческих жертв в результате катастроф, связанных с отказами технических систем. Это обусловлено насыщением среды обитания сложными, энергоемкими машинами. Мы живем в техногенной сфере. Тем самым очевидна необходимость уделять перво-степенное внимание вопросам создания надежной техники. Создание абсолютно надежной техники невозможно.

Анализ проблем, решаемых в теории надежности, показывает, что все методы расчета надежности разработаны для стадии проектирования изделия. Для реализации этих методов формируются сложные структурные схемы, деревья отказов, событий и т.д., выполняются очень сложные расчеты при удовлетворительной достоверности получаемых результатов. Но все это при условии, что проектировщики обладают знаниями о надежности составляющих сложные технические системы элементов. До сих пор определение уровня надежности некоторых элементов в ряде случаев затруднительно. Проводятся сотни экспериментов, и нет конца решению этих проблем. Рекомендации и требования, закладываемые в нормативно-техническую документацию на изготовление и эксплуатацию изделия, также разрабатываются на стадии проектирования.

Поэтому мы рассмотрим некоторые аспекты проблемы надежности на стадии проектирования, познакомимся с некоторыми методами расчета надежности, рассмотрим ряд примеров.

Алгоритм расчета надежности

Формирование понятия отказа. Четкое формирование понятия отказа позволяет ограничивать количество элементов, которые должны учитываться при расчете надежности. Особое внимание уделяется элементам, подверженным износу и другим процессам старения. Кроме того, следует дать полную характеристику параметрическим отказам. На этом этапе определяется номенклатура элементов, для которых рассчитываются показатели надежности. Очевидно, что станины технического оборудования, различные защитные кожухи, рамы и т.д. могут быть исключены из рассматриваемой номенклатуры.

Составление структурной схемы расчета надежности. В сложной технической системе (автомобиль, станок, трактор и т.д.) выделяются агрегаты (блоки), выполняющие самостоятельные функции (двигатель, трансмиссии, си-

стемы управления и т.д.). Здесь бывает целесообразно выделять и группировать в отдельные системы однотипные элементы (например, подшипники или элементы гидросистемы). На схеме указывается продолжительность и режим работы каждого элемента. Здесь же формируется номенклатура показателей надежности, которые должны определяться на этапе проектирования. Это могут быть: $P(t)$, T , K_T , и т.д.

Выбор методики расчета. На данном этапе наиболее важным является выбор расчетных формул и численных значений определяемых показателей надежности. Наиболее часто используемый показатель – интенсивность отказов λ , который является параметром основного закона надежности

$$F(t) = 1 - e^{-\int_0^t \lambda(t) dt}.$$

В том случае, если элемент в различные периоды эксплуатации имеет различные значения λ интенсивности отказов, то для расчетов используют эквивалентную интенсивность отказов.

- Период времени t_1 , интенсивность λ_1 ,
- период времени t_2 , интенсивность λ_2 ,
- период времени t_i , интенсивность λ_i ,
- период времени t_n , интенсивность λ_n .

Тогда эквивалентная интенсивность будет равна:

$$\lambda_{\text{экр}} = \frac{\sum \lambda_i t_i}{\sum t_i}$$

В ряде случаев предпочтение отдают вероятности безотказной работы $P(t)$, но, зная $\lambda(t)$ и $F(t)$, получим

$$P(t) = 1 - F(t)$$

Знание $\lambda(t)$ позволяет определить остальные показатели надежности.

Определение вероятности безотказной работы технической системы при основном соединении элементов

Если отказ технической системы наступает при отказе одного из ее элементов, то такая техническая система имеет **основное соединение элементов**.

Например,

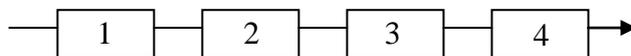


Рисунок 7 – Последовательное соединение элементов

Система состоит из четырех элементов, и, если отказ любого из них означает отказ системы, то такое соединение – основное (последовательное). При расчете надежности таких систем предполагают, что отказ элемента является событием случайным и независимым.

Вероятность безотказной работы такой системы $P_c(t)$ в течение времени t определяется как произведение вероятностей безотказной работы составляющих ее элементов:

$$P_c(t) = \prod_{i=1}^n P_{\text{э}i}(t),$$

Если $P_{\text{э}i}(t) = P_{\text{э}}(t)$, то $P_c(t) = (P_{\text{э}}(t))^n$.

Известно, что в общем случае вероятность безотказной работы

$$P(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt}$$

Если известны интенсивности отказов элементов $\lambda_{\text{э}i}(t)$, то

$$P_c(t) = \prod_{i=1}^n e^{-\int_0^t \lambda_{\text{э}i}(t) dt} = e^{-\sum_{i=1}^n \int_0^t \lambda_{\text{э}i}(t) dt},$$

если $\lambda_{\text{э}i}(t) = \lambda_{\text{э}}(t)$, то

$$P_c(t) = e^{-n \int_0^t \lambda_{\text{э}}(t) dt}.$$

Последующие уточнения законов распределения наработки до отказа элементов, входящих в структуру изделия, позволяют конкретизировать приведенные выше формулы, получить более точные оценки надежности рассматриваемого объекта.

На практике наиболее часто интенсивность отказов является величиной постоянной (в период нормальной эксплуатации), а наработка на отказ не противоречит экспоненциальному закону, тогда

$$P_c(t) = e^{-t \sum_{i=1}^n \lambda_{\text{э}i}},$$

т.е.

$$P_c(t) = e^{-\lambda_c \cdot t},$$

где

$$\lambda_c = \sum_{i=1}^n \lambda_{\text{э}i}$$

Определение вероятности безотказной работы технической системы при параллельном соединении элементов

Параллельное соединение элементов такое, при котором отказ системы наступает при отказе всех элементов, рис. 8.

В этом случае определяют вероятность отказа системы $F_c(t)$ за время t , как произведение вероятностей отказов $F_i(t)$ всех ее элементов, то есть:

$$F_c(t) = \prod_{i=1}^n F_i(t)$$

Тогда вероятность безотказной работы системы

$$P_c(t) = 1 - F_c(t).$$

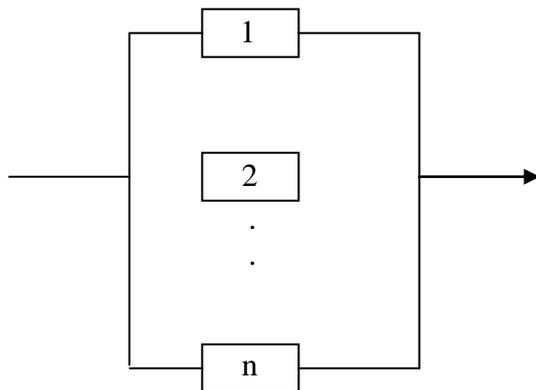


Рисунок 8 – Параллельное соединение элементов

Особенности расчета надежности восстанавливаемых объектов

При расчете надежности восстанавливаемых объектов наряду с определением вероятности безотказной работы, функции распределения наработки на отказ, интенсивности отказов определяют показатели, характеризующие готовность объекта к выполнению требуемых функций в заданное время. К ним относятся коэффициент готовности и коэффициент вынужденного простоя.

Коэффициентом готовности – отношение времени чистой работы к сумме времен чистой работы и простоев по техническим причинам (время восстановления работоспособного состояния объекта после отказа) за один и тот же календарный период.

$$K_{\Gamma} = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{\sum_{i=1}^n t_i + \sum_{i=1}^n t_{Bi}},$$

где t_i – время работы объекта между $(i-1)$ -м и i -м отказом;

t_{Bi} – время восстановления работоспособного состояния после i -го отказа;

n – число отказов.

Если разделить числитель и знаменатель на n , то

$$K_{\Gamma} = \frac{T}{T + T_B},$$

где $T = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{n}$ – среднее время наработки на отказ;

$T_B = \frac{\sum_{i=1}^n t_{Bi}}{n}$ – среднее время восстановления.

Коэффициентом вынужденного простоя – отношение времени простоев по техническим причинам к сумме времен чистой работы и простоев по техническим причинам.

$$K_{\Pi} = \frac{\sum_{i=1}^n t_{Bi}}{\sum_{i=1}^n t_i + \sum_{i=1}^n t_{Bi}} ; \text{ или } K_{\Pi} = \frac{T_B}{T + T_B} .$$

Как видно из формул для определения K_{Γ} и K_{Π} , они связаны между собой зависимостью

$$K_{\Gamma} + K_{\Pi} = 1 .$$

Часто коэффициент готовности, вычисленный по приведенным выше формулам, определяют, как вероятность застать объект в работоспособном состоянии в любой момент времени, кроме тех периодов, когда использование объекта по назначению не предусмотрено. Это может быть справедливо при определенных допущениях.

В связи с тем, что вероятность возникновения отказа восстанавливаемого объекта в начале эксплуатации мала и возрастает с увеличением времени эксплуатации, вероятность застать объект в работоспособном состоянии в начале эксплуатации выше, и с течением времени будет уменьшаться. А на основании приведенных формул коэффициент готовности не зависит от времени.

Для преодоления этого противоречия приводится формула, определяющая зависимость вероятности застать объект в работоспособном состоянии $P_{\Gamma}(t)$ от коэффициента готовности. При этом рассматривается наиболее простой случай, когда интенсивность отказов λ и интенсивность восстановления μ – величины постоянные, и при $t=0$ объект находится в работоспособном состоянии.

$$P_{\Gamma}(t) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} + \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \cdot e^{-(\lambda + \mu)t} ,$$

где $\lambda = \frac{1}{T}$; $\mu = \frac{1}{T_B}$.

После соответствующих преобразований формула принимает вид

$$P_{\Gamma}(t) = K_{\Gamma} + (1 - K_{\Gamma}) \cdot e^{-t/K_{\Gamma}T_B}$$

Эта формула устанавливает зависимость между коэффициентом готовности и вероятностью застать объект в работоспособном состоянии в любой момент времени t .

Из формулы видно, что при $t \rightarrow \infty$, $P_{\Gamma}(t) \rightarrow K_{\Gamma}$, т.е. трактовка коэффициента готовности как вероятности застать объект в работоспособном состоянии имеет смысл при установившемся процессе эксплуатации.

Марковский случайный процесс

Процесс называется марковским, если для каждого момента времени вероятность любого состояния системы в будущем зависит только от состояния системы в настоящий момент и не зависит от того, каким образом система пришла в это состояние.

Пример. Имеется техническое устройство, состоящее из элементов типов а и б, обладающих разной надежностью. Эти элементы в случайные моменты времени и независимо друг от друга выходят из строя.

Время безотказной работы элемента - случайная величина, распределенная по экспоненциальному закону с параметрами λ_a и λ_b . В случае отказа работоспособность устройства восстанавливается.

Время восстановления также является случайной величиной, распределенной по экспоненциальному закону с параметрами μ_a ; μ_b (интенсивность восстановлений элементов а и б соответственно). Имеет место марковский процесс с непрерывным временем и конечным множеством состояний:

x_0 – все элементы исправны, система работает;

x_1 – отказал элемент типа а, система восстанавливается;

x_2 - отказал элемент типа б, система восстанавливается.

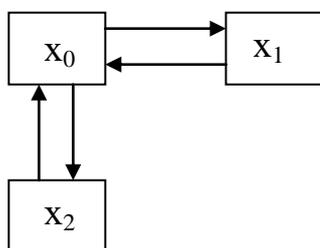


Рисунок 9 – Схема процесса

Необходимое условие. Время работы до отказа и время восстановления случайные величины и распределены по экспоненциальному закону

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

$$g(t) = \mu e^{-\mu t}$$

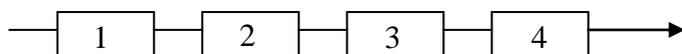
Потому что, только для этого распределения «предыстория» процесса не имеет значения, не влияет на дальнейшее поведение системы.

В теории надежности марковские процессы рассматриваются для определения вероятностей нахождения технической системы в том или ином состоянии в интересующие исследователя моменты времени.

При решении задач составляются системы дифференциальных уравнений, называемых уравнениями Эрланга.

Примеры построения структурных схем и расчета надежности

Рассмотрим техническую систему с основным (последовательным) соединением элементов, состоящую из 4 элементов.



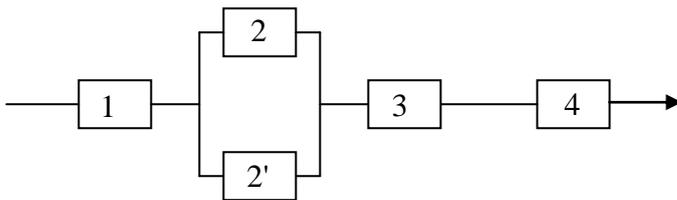
Вероятность безотказной работы каждого элемента равна: $P_1=0,99$; $P_2=0,9$; $P_3=P_4=0,98$.

Поставлена задача: вероятность безотказной работы системы должна быть на уровне 0,92-0,94.

Вероятность безотказной работы системы при основном соединении элементов определяется как произведение вероятностей безотказной работы элементов.

$$P_c = \prod_{i=1}^4 P_i = P_1 \cdot P_2 \cdot P_3 \cdot P_4 = 0,99 \cdot 0,9 \cdot 0,98^2 = 0,855.$$

Полученное значение меньше заданного. Анализ показывает, что самый ненадежный элемент 2. Поэтому применяем операцию резервирования, т.е. параллельно включаем в систему элемент 2', имеющий $P_{2'} = P_2 = 0,9$.



Будем рассматривать объединение элементов 2 и 2' как подсистему. При отказе элемента 2 в работу включается элемент 2', и только после отказа элемента 2' наступает отказ подсистемы и, как следствие, отказ системы. Поэтому для определения вероятности безотказной работы системы определим вероятность безотказной работы подсистемы P_{nc2} .

$$P_{nc2} = 1 - F_{nc2} = 1 - F_2 \cdot F_{2'} = 1 - F_2^2 = 1 - (1 - P_2)^2 = P_2 (2 - P_2).$$

$$P_c = P_1 \cdot P_2 (2 - P_2) \cdot P_3 \cdot P_4 = 0,99 \cdot 0,9 (2 - 0,9) \cdot 0,98^2 = 0,94.$$

Проблема решена, т.к. полученный результат отвечает поставленному условию.

Поставленная задача может быть решена с использованием приемов алгебры логики (алгебры Буля). Для этого строим логическую схему.

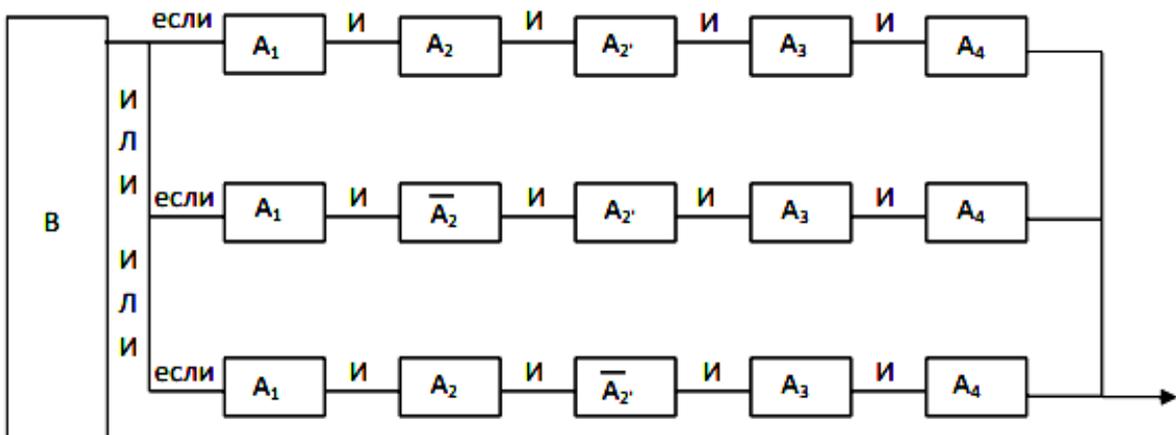


Рисунок 10 – Логическая схема: В – работоспособное состояние системы; A_i – работоспособное состояние системы i -го элемента; \bar{A}_i – неработоспособное состояние i -го элемента; И – логическое произведение; ИЛИ – логическое сложение.

Тогда условие нахождения системы в работоспособном состоянии будет выглядеть так

$$B = A_1 \cdot A_2 \cdot A_{2'} \cdot A_3 \cdot A_4 + A_1 \cdot \bar{A}_2 \cdot A_{2'} \cdot A_3 \cdot A_4 + A_1 \cdot A_2 \cdot \bar{A}_{2'} \cdot A_3 \cdot A_4.$$

Вероятность безотказной работы системы:

$$P_c = P(B) = P_1 \cdot P_2^2 \cdot P_3 \cdot P_4 + P_1 \cdot (1 - P_2) \cdot P_2 \cdot P_3 \cdot P_4 + P_1 \cdot P_2 (1 - P_2) \cdot P_3 \cdot P_4 = P_1 \cdot P_2 \cdot P_3 \cdot P_4 \cdot (P_2 + 1 - P_2 + 1 - P_2) = P_1 \cdot P_2 \cdot P_3 \cdot P_4 (2 - P_2),$$

что аналогично полученному ранее выражению.

Техническая система может находиться в одном из двух состояний: работоспособное и неработоспособное. Логическую схему целесообразно составлять для такого состояния системы, которое описывается меньшим количеством вариантов. Так, при определении вероятности безотказной работы подсистемы P_{nc2} с использованием алгебры логики получим

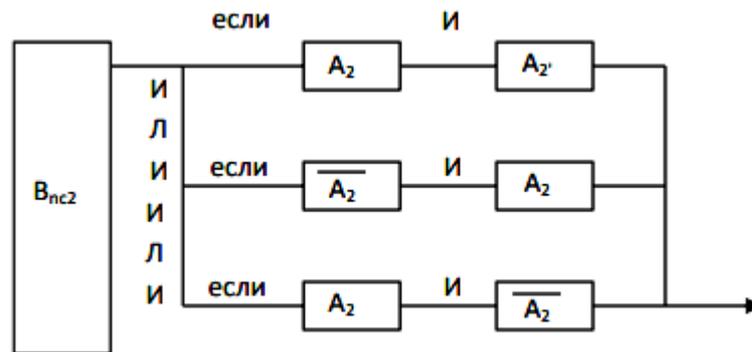


Рисунок 11 – Логическая схема «ИЛИ-ИЛИ»

$$B_{nc2} = A_2 \cdot A_{2'} + \bar{A}_2 \cdot A_{2'} + A_2 \cdot \bar{A}_{2'}$$

$$P(B_{nc2}) = P_{nc2} = P_2^2 + (1 - P_2) \cdot P_2 + P_2 (1 - P_2) = P_2 (2 - P_2).$$

Этот путь более трудоемкий и длительный, чем определение P_{nc2} через F_{nc2} .

6 МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Известно, что надежность закладывается при проектировании, реализуется при изготовлении и расходуется при эксплуатации. Поэтому и методы повышения надежности целесообразно разрабатывать для этих трех этапов жизненного цикла технической системы. Кроме того, надежность является комплексным свойством, включающим такие свойства как безотказность, долговечность, ремонтпригодность и сохраняемость. Следовательно, и методы повышения надежности технической системы могут рассматриваться с позиций повышения каждого из этих свойств.

Факторы, влияющие на надежность технических систем

Прежде чем изучать методы повышения надежности, рассмотрим факторы, влияющие на надежность технических систем, рис.12.

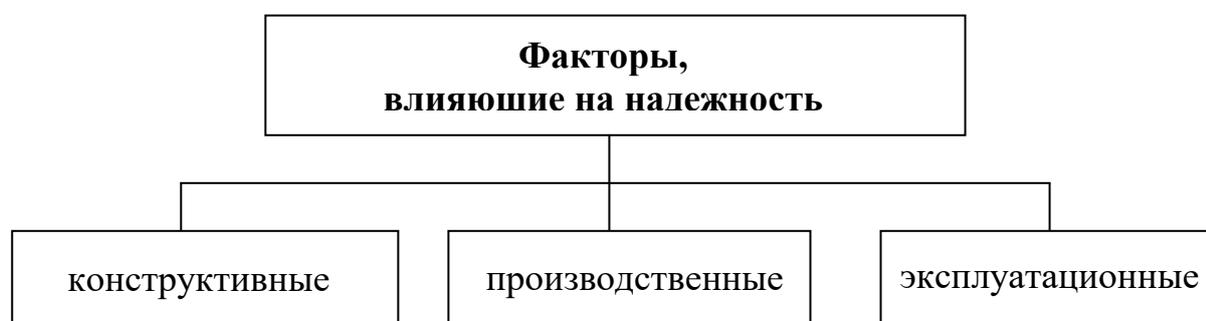


Рисунок 12 – Факторы влияющие на надежность

Конструктивные факторы:

- выбранные конструктивная и структурная схемы;
- применяемые материалы и комплектующие изделия;
- способы резервирования;
- применяемые защитные и предохранительные устройства;
- нормативно-техническая и (или) конструкторская документация (НТД);
- учет при необходимости психофизиологических свойств операторов.

Производственные факторы:

- входной контроль качества и комплектующих изделий на соответствие требованиям, заложенным в НТД;
- уровень организации производства оборудования;
- квалификация и исполнительность персонала;
- контроль качества изготовления на всех этапах производственного цикла.

Эксплуатационные факторы:

- квалификация и исполнительность обслуживающего персонала;

- организация и качество технического обслуживания и ремонта;
- создание условий нормальной эксплуатации машин и оборудования;
- внешние факторы (воздействия климатических условий, электромагнитные и радиационные излучения, агрессивность среды);
- внутренние факторы (старение, износ, коррозия).

Методы повышения надежности на этапе проектирования.

При проектировании сложных технических систем рассматривают два направления повышения надежности: использование схемных и конструктивных методов.

Схемные методы включают:

- создание схем с минимально необходимым числом элементов;
- применение резервирования;
- разработка схем, не допускающих опасных последствий отказов элементов;
- оптимизация последовательности работы элементов.

Уменьшение числа элементов при прочих равных условиях приводит к увеличению вероятности безотказной работы системы.

Резервирование – один из самых эффективных методов повышения надежности, т.к. в конструкции предусматривается заранее замена отказавшего элемента.

При создании систем, в которых предусматривается предотвращение некоторых отказов или ограничение последствий отказов, применяются защитные или предохранительные устройства.

Оптимизация последовательности работы элементов означает согласование периодов автоматической работы не только по времени, но и по достижении тем или иным параметрам заданного значения.

В число конструктивных методов повышения надежности входит:

- использование элементов с малой величиной интенсивности отказов;
- рациональный выбор совокупности контрольных параметров;
- рациональный выбор допусков на изменение основных параметров элементов и систем;
- защита элементов от вибраций и ударов;
- унификация элементов и систем;
- разработка эксплуатационной документации с учетом опыта применения системы, подобной конструируемой;
- обеспечение эксплуатационной технологичности конструкции (применение встроенных контрольных устройств, автоматизация контроля и индикация неисправностей, удобство подходов для обслуживания и ремонта).

Методы повышения надежности в производстве и эксплуатации.

Среди методов повышения надежности при производстве основными являются:

- совершенствование технологии и организации производства, его автоматизация;
- применение инструментальных методов контроля качества продукции;
- тренировка элементов и систем.

К основным мероприятиям, позволяющим повысить надежность технических систем в эксплуатации, относятся:

- повышение квалификации обслуживающего персонала;
- применение инструментальных методов контроля технического состояния систем;
- обоснование объемов и сроков проведения профилактических мероприятий, основанных на применении теории надежности;
- обоснование сроков службы элементов и состава запасных частей;
- разработка и внедрение способов прогнозирования отказов.

В заключение следует еще раз отметить, что надежность закладывается при проектировании, реализуется при изготовлении и расходуется при эксплуатации. Поэтому методы повышения надежности в производстве, в первую очередь, направлены на успешную реализацию надежности, заложенной при проектировании, а в эксплуатации – на разумное ее расходование.

7 ДОЛГОВЕЧНОСТЬ. СВОЙСТВА И ПОКАЗАТЕЛИ ОЦЕНКИ

Понятие физической и моральной долговечности

Долговечность – свойство системы сохранять работоспособность до предельного состояния. Различают физическую, моральную и технико-экономическую долговечность.

Физическую долговечность определяет срок работы системы до ее предельного износа. Лимитирует износ основных деталей, определяющих целевое назначение механизма. В двигателе – износ блока цилиндров, в металлорежущем станке – износ направляющих. При этом вспомогательные детали могут быть заменены без существенного влияния на параметры машины.

Моральную долговечность определяет срок эксплуатации, обусловленный техническим прогрессом в области создания машин данного класса и характеризует срок, после которого машина устареваеt. Различают две формы морального износа (по К. Марксу):

- удешевление стоимости новых машин (продукции) с теми же параметрами и характеристиками;
- появление машин (продукции) с лучшими показателями эффективности и экономичности.

Моральную долговечность можно установить исходя из производительности общественного труда. Если в данной отрасли планируется повышение производительности за N лет на n %, то производительность проектируемого оборудования должна отвечать этому условию. Если оборудование обеспечивает повышение производительности без коренных изменений, только за счет улучшения его использования, проведения модернизации, оно не является морально устаревшим.

Критерием моральной долговечности может быть не только производительность, но и условия труда, коэффициент полезного действия (например, в случае с паровозом).

Моральную долговечность можно спрогнозировать используя формулу В. Трейера. Согласно этой формуле общий проектный срок службы рассчитывается:

$$T_{\text{np}} = \frac{\lg \mu \frac{m_{\text{n}}}{m_0}}{\lg(1 + \frac{k}{100})},$$

где μ – коэффициент, учитывающий возможные повышение качества сырья, уровня обслуживания, модернизацию ($\mu = 1,5-1,6$);

m_0 и m_{n} – техническая норма производительности существующего и проектируемого способа в единицу времени;

k – среднегодовой темп прироста производительности в данной отрасли (%).

Технико-экономическая долговечность

Технико-экономическую долговечность технической системы определяет срок ее службы между физической и моральной долговечностью. Она зависит от культуры производства, в том числе и ремонтного. Чем выше культура, тем ближе технико-экономическая долговечность к моральной, чем ниже – к физической.

Очевидно, следует рассматривать два аспекта долговечности: технический и экономический. Технический аспект заключается в том, что работоспособность средств технологического оснащения целесообразно восстанавливать до тех пор, пока износ базовых деталей не превысит допустимого значения. При достижении предельного состояния ремонт не только нецелесообразен, но, иногда и невыполним.

Рассчитать технико-экономическую долговечность с учетом морального износа сложно. Влияние морального износа выражается в сокращении срока службы. Следовательно, технико-экономическая долговечность с учетом морального износа меньше, чем по физическому износу. Рассматривая технико-экономическую долговечность по физическому износу как верхнюю границу, следует корректировать ее с учетом морального износа.

Определение оптимального срока службы оборудования

Рассмотрим две методики расчета оптимального срока службы по критерию физической долговечности: метод Селиванова А.И. и метод Казарцева В.И. В первом методе рассматриваются суммарные затраты потребителя в процессе эксплуатации средств технологического оснащения

$$C(t) = Q_M + qt + y,$$

где Q_M – затраты на приобретение и монтаж средств технологического оснащения;

qt – затраты на хранение, рабочую силу, материалы (пропорциональны времени использования t и не зависящие от срока службы);

$y=ct$ прогрессирующие во времени затраты и потери, связанные с заменой деталей при отказах и ремонтах;

c – постоянный для данного оборудования коэффициент, определяющий исходную норму затрат и потерь потребителя;

δ – показатель степени роста затрат и потерь по мере старения оборудования.

Задача сводится к отысканию минимума затрат. Поделив выше представленное выражение на t , получим функцию удельных затрат

$$F(t) = \frac{Q_M}{t} + q + \frac{ct^\delta}{t}.$$

Для отыскания минимума функции найдем ее первую производную и приравняем ее к 0.

$$\frac{df(t)}{dt} = -\frac{Q_M}{t^2} + \frac{(\delta-1)ct^\delta}{t} = 0, \text{ откуда}$$

$$-Q_M + (\delta-1)ct^\delta = 0, \text{ тогда}$$

$$T_{ТЭ} = \sqrt[\delta]{\frac{Q_M}{(\delta-1)c}}.$$

С и t параметры кривой определяются аналитическим путем решением функции по способу наименьших квадратов.

По методу Казарцева В.И. технико-экономическая долговечность рассчитывается по критерию физического износа исходя из прироста стоимости запасных частей, расходуемых при каждом ремонте

$$T_{ТЭ} = T_K \sqrt{\frac{2Q_M}{q_3}}$$

где T_K – периодичность капитального ремонта,
 q_3 – усредненная стоимость запасных частей, замененных при капитальном ремонте.

Количественные показатели долговечности

Для оценки долговечности используются две группы единичных (частных) показателей: сроки службы и ресурсы. Срок службы это календарная продолжительность эксплуатации в определенных условиях до разрушения или предельного состояния.

Различают **сроки службы**:

- до капитального ремонта,
- между капитальными ремонтами,
- суммарный (полный).

Срок службы до капитального ремонта – продолжительность эксплуатации до первой полной разборки с заменой или восстановлением ряда элементов, в том числе части основных деталей.

Срок службы между капитальными ремонтами (между первым и вторым и т.д.) зависит от качества ремонта, от того, в какой степени восстанавливается ресурс оборудования.

Суммарный срок службы – это календарная продолжительность от начала эксплуатации до выбраковки (до списания).

Эта группа показателей имеет следующие **достоинства**:

- простота учета;
- удобство использования для планирования сроков замены оборудования, поставки запасных частей, сроков проведения ремонтов.

Основным недостатком таких показателей является то, что они не учитывают интенсивность эксплуатации оборудования, объем выполненной им работы.

От этого недостатка свободна вторая группа показателей – технические ресурсы.

Технический ресурс – это наработка изделия в заданных условиях эксплуатации до капитального ремонта либо до замены. Измеряется объемом выполненной работы. Может измеряться и в часах непрерывной работы.

Например, для автомобильных двигателей в моточасах. Для других видов средств технологического оснащения в часах работы при зафиксированном объеме простоев как организационных и технологических, так и в техническом обслуживании и ремонте.

Ресурс – величина, расходуемая в процессе эксплуатации.

Различают:

- полный технический ресурс,
- использованный технический ресурс,
- остаточный технический ресурс.

Полный – от начала эксплуатации до капитального ремонта или замены. **Использованный** – от начала эксплуатации или от начала работы после капитального ремонта до рассматриваемого момента.

Остаточный – от рассматриваемого момента до капитального ремонта или конца эксплуатации.

Ресурс – величина статистическая, подвержена рассеянию. В связи с этим широко используется такой показатель как гарантированный γ % ресурс.

Гамма процентный ресурс – технический ресурс, которым обладают не менее γ % изделий данной модели, где γ – гарантированная вероятность. γ выбирается в зависимости от назначения, масштабов и технологии производства, последствий отказов.

Например, если $\gamma=0,9$ это означает, что 90% всех изделий обладают ресурсом не менее указанного и лишь 10% могут иметь меньший ресурс. Отсюда очевидно, что средний ресурс ($\gamma=0,5$) превышает гарантированный. Для подшипников общего назначения γ принимается равным 0,9.

Следует обратить внимание на то, что нельзя путать понятия гарантированный γ % ресурс и гарантийный срок эксплуатации. Под последним понимается продолжительность эксплуатации, в течение которой завод изготовитель и ремонтные предприятия несут материальную ответственность за неисправности, выявившиеся у потребителя при условии соблюдения им правил эксплуатации.

Гарантийный срок эксплуатации измеряется небольшой долей технического ресурса изделия. Это понятие не только техническое, но и юридическое и не может применяться в качестве показателя долговечности. Однако это понятие в какой-то мере характеризует качество изготовления и контроля, поскольку в этот период выявляются, как правило, дефекты, пропущенные контролем.

Из группы показателей долговечности – ресурсов наибольшее распространение получили гарантированный γ % ресурс, средний ресурс, среднеквадратическое отклонение ресурса от его среднего значения (σ).

Выбор показателей долговечности средств технологического оснащения и их элементов

Выбор показателей долговечности необходимо осуществлять от общего к частному, т.е. от оборудования в целом к его элементам: агрегатам, механизмам, узлам, деталям. Для обеспечения заданной нормы долговечности оборудования долговечность основных деталей должна быть существенно выше. При этом не должна идти речь о равной долговечности деталей. Массовые детали могут заменяться многократно за срок службы оборудования. Для снижения неопределенности надежности, обеспечения возможности групповых замен деталей необходимо стремиться к кратной долговечности. Тогда, например, при двенадцатой замене деталей 1-ой группы, 6-ой раз заменяются детали 2-ой, 4-ый раз третьей, 3-ий раз четвертой и второй пятой группы.

Задача повышения долговечности средств технологического оснащения сложная, поскольку речь идет, по сути, о распределении затрат между производителем и потребителем. Затраты первого повышаются, второго снижаются за счет:

- уменьшения стоимости эксплуатации (сокращение расхода запасных частей, уменьшение частоты ремонтных воздействий),
- сокращения простоев оборудования.

Наиболее приемлемыми показателями долговечности являются:

а) для деталей:

1. γ % ресурс до первого восстановительного ремонта;
2. средний ресурс до первого восстановительного ремонта.

б) для узлов, механизмов:

1. γ % ресурс до первого ремонта с трудоемкой разборкой;
2. γ % ресурс до первого капитального ремонта;
3. средний ресурс до первого капитального ремонта.

в) для агрегатов и оборудования в целом:

1. γ % ресурс до первого ремонта с трудоемкой разборкой;
2. средний ресурс до первого капитального ремонта;
3. средний ресурс до списания.

Кривая распределения ресурса представлена на рисунке 13.

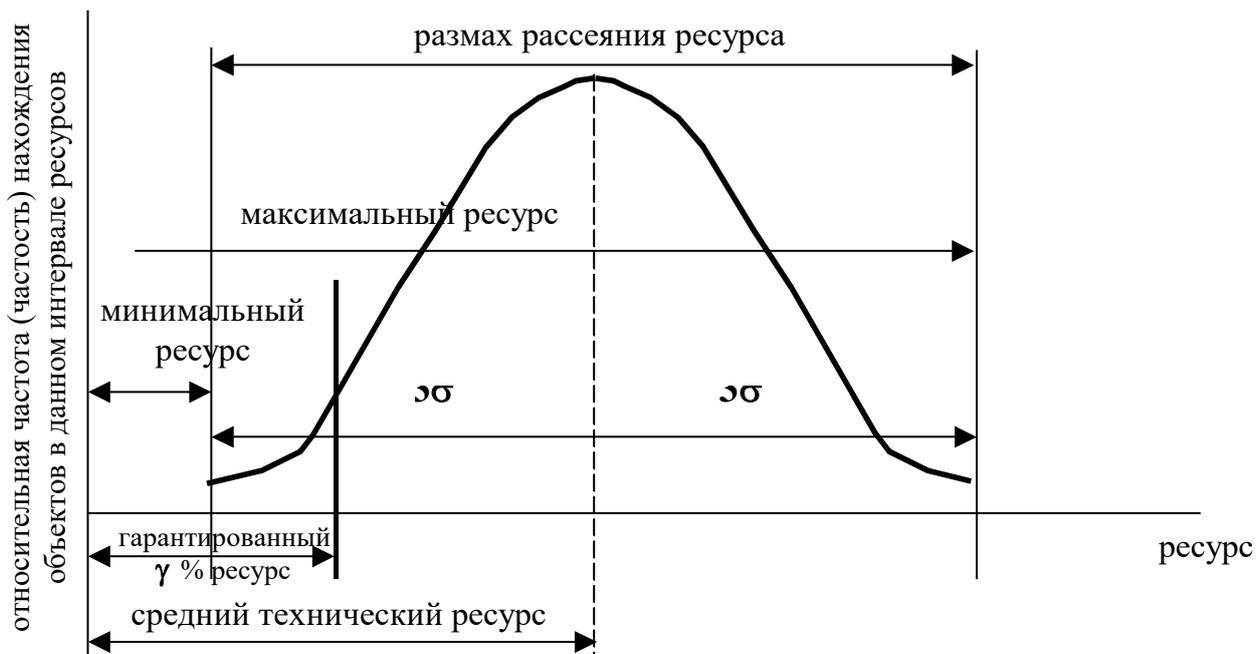


Рисунок 13 – Теоретическая кривая распределения технического ресурса

8 РЕМОНТОПРИГОДНОСТЬ. СВОЙСТВА И ПОКАЗАТЕЛИ ОЦЕНКИ

Понятие и свойства ремонтпригодности

Под ремонтпригодностью технической системы понимается такое ее свойство, которое заключается в приспособленности к предупреждению, обнаружению и устранению неисправностей и отказов путем проведения технического обслуживания и ремонта. Функцию профилактики (предупреждения) несет в себе процесс технического обслуживания, а функцию восстановления работоспособности и ресурса технической системы несет процесс ремонта (текущего или планового).

Ремонтпригодность свойство комплексное, отражаемое следующими первичными составляющими свойствами:

- контролепригодность,
- легкоъемность,
- доступность объектов обслуживанию (доступность),
- регулируемость,
- обслуживаемость,
- досягаемость,
- восстанавливаемость,
- взаимозаменяемость,
- блочность.

В процессе эксплуатации конструктивные особенности машин проявляются в характере реагирования на возможные восстановительные и профилактические работы и отражаются через свойство технологичности технической эксплуатации. Технологичность технической эксплуатации – комплексное свойство, отражающееся в приспособленности к выполнению комплекса работ по технической эксплуатации, разделяется на два свойства: технологичность технической эксплуатации при использовании оборудования по назначению, технологичность его технического обслуживания и ремонта.

Технологичность технической эксплуатации при использовании – приспособленность конструкции к выполнению операций и работ по поддержанию непрерывности технологического процесса при заданных, наивыгоднейших технологических режимах.

Эти свойства: технологичность ликвидации нарушений непрерывности процессов (надежность продукта), технологичность устранения отказов, технологичность обслуживания рабочего места (технического и организационного).

Технологичность при техническом обслуживании и ремонте – такое свойство, которое отражает приспособленность к техническому обслуживанию и ремонту с целью поддержания и восстановления работоспособности.

Характеристики свойств ремонтпригодности

Отдельные составляющие технологичности технической эксплуатации характеризуются разным набором свойств ремонтпригодности. Так, технологичность устранения отказов – всеми свойствами ремонтпригодности, технологичность технического обслуживания – свойствами доступности, обслуживаемости, досягаемости и т.д.

Контролепригодность на нижнем уровне выражается в конструктивном решении механизмов, позволяющем быстро обнаруживать неисправность органолептическими методами. Более высокий уровень контролепригодности обеспечивается применением устройств поиска неисправности. Высший уровень – это автоматическая диагностика места и причины возникновения отказа.

Трудоемкость устранения отказа определяется свойствами доступности и легкоосъемности.

Доступность влияет на производительность труда при выполнении сборно-разборных работ вследствие позы, занимаемой рабочим. Так, если принять производительность при работе в полный рост за 100%, то при работе согнувшись она составит 58-95%, на коленях – 50-60%, вприсядку 36-67%, лежа – всего 30-40%.

Легкоосъемность определяется количеством одновременно снимаемых деталей для открытия доступа к отказавшему элементу. В первом приближении трудоемкость разборно-сборных работ реально спрогнозировать по соотношению количества деталей по назначению.

Например, в машинах прядильного производства крепежные детали составляют от 32 до 49% от общего количества всех деталей. Свойство обслуживаемость определяет как трудоемкость выполнения штатных работ на оборудовании, так и трудоемкость его технического обслуживания (чистки), трудоемкость технического обслуживания рабочего места. Трудоемкость процесса смазки как разновидности технического обслуживания также определяется обслуживаемостью, которая зависит от способа смазки узлов. Если на 75-85% узлов применяются ручные способы смазки (прядильные машины), то это свидетельствует о низком уровне обслуживаемости.

Свойство **досягаемости** влияет на трудозатраты при выполнении штатных работ, определяет удобство выполнения работ оператором оборудования.

Взаимозаменяемость одно из главных свойств ремонтпригодности, поскольку влияет на саму возможность устранения отказов и восстановления работоспособности объектов обслуживания.

Блочность можно рассматривать как форму резервирования надежности и как организационную форму проведения ремонтов (узлового ремонта).

Свойство **восстанавливаемость** рассматривает как саму возможность восстановления работоспособности оборудования и его элементов, так и целесообразность ее реализации.

При устранении отказа или проведении планового ремонта все работы делятся на **две группы**:

– подготовительные сборно-разборные (рассматриваемые как балластные),

– собственно ремонтные.

Трудозатраты первого вида работ определяются свойствами ремонтпригодности: доступностью, легкоосъемностью, обслуживаемостью, достигаемостью. Второго (собственно ремонтных) – контролепригодностью, регулируемостью, восстанавливаемостью. Свойства блочности и взаимозаменяемости определяют трудозатраты как на подготовительные, так и на собственно ремонтные работы.

Частные показатели оценки ремонтпригодности

Наиболее распространенными частными (единичными) показателями оценки ремонтпригодности сложных технических систем выступают:

- вероятность восстановления в заданное время – $P(t_B)$,
- среднее время восстановления работоспособности – T_B ,
- параметр (интенсивность) потока восстановлений – $\omega_B(t)$

Вероятность восстановления в заданное время, вероятность того, что время восстановления t_B не превысит заданного. Вид зависимости определяется законом распределения времени восстановления работоспособности. Для экспоненциального закона

$$P(t_B) = \exp(-\omega_B \cdot t_B) = e^{-\frac{t}{T_B}} \cdot P(t_B)$$

характеризует вероятность того, что до момента времени t отказ изделия не будет устранен. На практике чаще используют альтернативную величину $P(t_B)$, т.е. $Q(t_B) = 1 - P(t_B) = 1 - \exp(-\omega_B t_B)$.

Среднее время восстановления T_B – математическое ожидание времени восстановления работоспособности

$$T_B = \frac{\sum_{i=1}^n t_{Bi}}{m},$$

где m – количество отказов системы за рассматриваемый промежуток времени работы оборудования.

Физический смысл T_B – среднее время вынужденного нерегламентированного простоя оборудования. Для статистической оценки точности определения T_B используется дисперсия.

$$\text{Параметр потока восстановлений } \omega_B(t) = \frac{1}{T_B}$$

характеризует количество восстановлений в среднем за единицу времени, т.е. характеризует пропускную способность ремонтных служб предприятий.

9 МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И КОМПЛЕКСНОЙ ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ

Требования к информации о надежности

В большинстве случаев оценка уровня надежности технологических систем и их элементов (средств технологического оснащения, продукта и персонала) основывается на сборе первичных статистических данных о неисправностях и отказах, возникающих в процессе эксплуатации или испытаний. Случайный характер отказов определяет и специфические особенности требований к информации о них. Эти требования: полнота, достоверность, однородность и сопоставимость, дискретность, своевременность и непрерывность.

Полнота – наличие сведений, позволяющих решать задачи, объяснять явления и давать оценку. Обеспечивается выбором количества объектов под наблюдением, числом наблюдений (временем), учетом всех возникающих отказов.

Достоверность – обеспечивается квалификацией исполнителей, качеством используемых приборов и инструментов, соблюдением требований нормативных документов, объемом выборки.

Однородность и сопоставимость – обеспечивается выбором для оценки и исследования однотипных объектов, близких по срокам изготовления (изготовленных по неизменным технологиям), работающих в типичных и близких условиях и режимах эксплуатации, с использованием единой методики исследования.

Дискретность – требование об обеспечении возможности разделения информации на определенные группы по заданным признакам. Цель – установление причинно-следственных связей различных факторов влияния на надежность по одноаспектным признакам.

Своевременность – определяет возможность и эффективность использования информации для принятия решения. Существенная продолжительность испытаний на надежность осложняет установление быстрой обратной связи для воздействий на процессы изготовления, монтажа, эксплуатации и ремонта оборудования.

Непрерывность – достигается организацией наблюдений за эксплуатацией оборудования и позволяет обеспечивать точность оценки надежности. Это требование особенно существенно при выявлении законов распределения времени безотказной работы средств технологического оснащения, времени восстановления их работоспособности (устранения отказов).

Методы исследования и оценки надежности

Информация о надежности технических систем востребована **тремя группами организаций:**

- организацией разработчиком для постоянного конструктивного совершенствования создаваемого оборудования и технологической оснастки;
- организацией производителем (изготовителем) для усовершенствования технологий изготовления, сборки, контроля и испытаний с целью повышения качества производимой продукции;
- организацией эксплуатантом для повышения эффективности эксплуатации, сокращения простоев, повышения производительности оборудования, сокращения затрат на эксплуатацию.

Проведение исследований и оценки надежности может осуществляться по условиям их выполнения:

- в лабораторных условиях,
- в производственных условиях.

Основные методы исследования и испытания надежности это методы моделирования и статистического исследования.

Различают:

- физическое,
- статистическое и
- имитационное моделирование.

Физическое моделирование проводится при соблюдении следующего условия – сохранения природы процессов, происходящих в исследуемых объектах. При этом должно сохраняться геометрическое подобие, физическое подобие (учитываемые масштабным фактором), подобие режимов испытаний режимам эксплуатации. Такое моделирование осуществляется на стандартных лабораторных установках (например, машинах трения), специальных лабораторных стендах, макетах и стендовых опытных установках.

Статистическое моделирование осуществляется на основе знания закономерностей изменения времени возникновения отказов как случайных величин. Полученные прогнозные расчетные значения показателей надежности могут использоваться для принятия решения.

Имитационное моделирование предполагает использование математических моделей процессов функционирования оборудования для машинного воспроизведения этих процессов со значительным количеством итераций, имитирующих длительную эксплуатацию.

Все методы моделирования воспроизводятся в лабораторных условиях.

Методы статистического исследования используются, главным образом, на основе информации, получаемой с объектов эксплуатации. Хотя в отдельных случаях эта информация может быть получена на основе длительных лабораторных исследований.

Первичная информация с объектов эксплуатации может использоваться для предварительной оценки надежности, для установления степени влияния отдельных элементов на общую надежность системы. В данном случае это может быть:

- анализ рекламаций и замечаний, поступающих от потребителей эксплуатационников,

- анализ замечаний шефмонтеров, осуществляющих руководство монтажом оборудования в различных регионах и различных условиях.

Сбор статистической информации о работе оборудования в условиях эксплуатации может проводиться двумя основными путями:

- проведением определительных испытаний оборудования на надежность, осуществляемых периодически службами надежности разработчика и/или производителя;

- получением учетной информации о работе оборудования с базовых предприятий, осуществляющих непрерывные или периодические наблюдения за работой оборудования.

Во втором случае первичные формы учета информации представляют собой:

- журнал учета отказов и простоев оборудования;
- журнал учета технического обслуживания и ремонта;
- разовые учетные документы (карточки, опросные листы и др.).

Комплексные показатели надежности

К комплексным показателям надежности, оценивающим одновременно несколько свойств надежности, например, безотказность и ремонтпригодность, относятся различные **коэффициенты надежности**:

- коэффициент готовности K_r ,
- коэффициент технического использования $K_{ти}$,
- коэффициент использования планового времени $K_{и.пл}$.

Коэффициент готовности K_r отражает вероятность того, что изделие окажется работоспособным в произвольный момент времени в промежутках между выполнением планового профилактического обслуживания. Он определяет ремонтпригодность и безотказность изделия и рассчитывается как отношение времени исправной работы изделия к сумме времени его исправной работы и суммарного времени восстановления работоспособности за период испытания:

$$K_r = \frac{\sum_{i=1}^m t_{pi}}{\sum_{i=1}^m t_{pi} + \sum_{i=1}^m t_{vi}} = \frac{T_{\Pi}}{T_{\Pi} + T_{\text{в}}},$$

где m – количество отказов, возникших за период испытаний;

T_{Π} – суммарное время безотказной работы за период испытания;

$T_{\text{в}}$ – суммарное время устранения отказов, возникших за период испытания.

Таким образом, коэффициент готовности показывает долю, которую составляет время безотказной работы оборудования, от суммы времени безотказной работы и восстановления работоспособности. Этот показатель целесообразнее всего использовать для оценки надежности систем, работающих в сторожевом режиме (системы сигнализации пожара, системы пожаротушения,

предупреждения взрыва на шахте и т.п.), для которых важно, чтобы в момент востребованности они были в состоянии готовности, а не находились в плановом обслуживании.

Коэффициент технического использования $K_{т.и}$ – отношение наработки изделия в единицах времени за некоторый промежуток эксплуатации к суммарной продолжительности этой наработки и всех видов простоев, вызванных техническим обслуживанием и ремонтом за этот же период эксплуатации:

$$K_{т.и} = \frac{\sum_{i=1}^m t_{pi}}{\sum_{i=1}^m t_{pi} + \sum_{i=1}^m t_{vi} + \sum_{i=1}^m t_{ni}} = \frac{T_{\Pi}}{T_{\Pi} + T_{В} + T_{Р}},$$

где $T_{Р}$ – суммарное время технического обслуживания и планового ремонта за период испытания.

Коэффициент технического использования, являясь комплексным показателем надежности, более полно характеризует ремонтпригодность изделия, чем коэффициент готовности, так как учитывает все виды простоев, связанных с техническим обслуживанием и ремонтом оборудования.

Коэффициент использования планового времени $K_{и.пл}$ – отношение наработки изделия в единицах времени за период эксплуатации к плановому времени его работы за тот же период эксплуатации:

$$K_{и.пл} = \frac{\sum_{i=1}^m t_{pi}}{\sum_{i=1}^m t_{pi} + \sum_{i=1}^m t_{vi} + \sum_{i=1}^m t_{\Pi i}} + \sum_{i=1}^m t_{opi} = \frac{T_{М}}{T_{М} + T_{В} + T_{Р} + T_{ор}} = \frac{T_{М}}{T_{пл}},$$

где $T_{ор}$ – суммарное время простоев оборудования по организационным причинам; $T_{пл}$ – плановое время работы оборудования.

Как правило, расчеты коэффициентов производятся исходя из планового времени работы оборудования ($T_{пл}$). Знаменатель при определении коэффициентов $K_{т.и}$ и $K_{Г}$ находится путем вычитания из планового времени последовательно простоев по организационным причинам ($T_{ор}$) и в техническом обслуживании и ремонте ($T_{Р}$).

10 НАДЕЖНОСТЬ ПЕРСОНАЛА

Понятие и свойства надежности оперативного персонала

Надежность оперативного персонала наряду с надежностью техники является одним из важнейших процессуальных свойств, влияющих на качество, эффективность и безопасность работы сложных систем. Крупные аварии и катастрофы последней четверти XX века, произошедшие непосредственно или косвенно по вине человека, в очередной раз обратили внимание общества на проблему человеческого фактора.

В ГОСТе 26387-84 «Система «человек-машина» под надежностью человека-оператора понимается свойство человека-оператора, характеризующее его способность безотказно осуществлять деятельность в течение определенного интервала времени при заданных условиях. В дается сходное определение понятия надежности функционирования как способности сохранять устойчивость запланированного процесса функционирования, заключающуюся в отсутствии вынужденных прекращений процесса (срывов) и неправильного его исполнения по отношению к запланированному (ошибочных действий).

В общем случае надежность персонала как комплексное свойство определяется следующими первичными составляющими свойствами безошибочностью, готовностью, своевременностью, восстанавливаемостью.

Безошибочность – свойство оператора выполнять работу, не совершая ошибочных действий, в течение определенного промежутка времени.

Основным показателем безошибочности является вероятность безошибочной работы P_j . Эта вероятность может вычисляться как на уровне отдельной операции, так и на уровне алгоритма в целом. Для типовых, часто повторяющихся операций в качестве показателя безошибочности может использоваться также интенсивность ошибок. Эти показатели вычисляются, как правило, в расчете на одну выполненную операцию. По статистическим данным они могут быть вычислены следующим образом:

$$P_j = \frac{N_j - n_j}{N_j}; \lambda_j = \frac{n_j}{N_j T_j}$$

N_j – общее число выполненных операций j -того вида; n_j – допущенное при этом число ошибок; T_j – среднее время выполнения операции j -того вида.

Готовность – свойство оператора включаться в работу в любой произвольный, нужный момент времени.

Своевременность – свойство оператора выполнять задачу, не превышая отведенного лимита времени.

Восстанавливаемость – свойство человека-оператора контролировать свои действия и исправлять допущенные ошибки.

Виды и формы отказов персонала

Согласно ГОСТ 26387-84 «Система «человек-машина» отказ человека-оператора это невыполнение им предписанных действий или снижение качества их выполнения за пределы, необходимые для достижения цели деятельности.

Все отказы подразделяются на две группы: связанные с прекращением или снижением уровня деятельности и не обусловленные уровнем деятельности. Отказы вследствие внешних причин, не позволяющих выполнять рабочие действия, в технической литературе принято относить к организационным. С позиции надежности производственной системы окончательные отказы, связанные с прекращением деятельности (смерть, травма, заболевание) носят разовый характер и не оказывают систематического влияния на результаты функционирования производства. Наибольшее влияние на результаты функционирования производственной системы оказывают отказы, связанные со снижением уровня деятельности: психофизиологические и мотивационные (утомление, стресс, нежелание) и не связанные с прекращением или снижением уровня деятельности. ГОСТ 26387-84 определяет отказ человека-оператора, не связанный с прекращением деятельности как ошибку.

Для промышленного персонала все виды отказов с позиции их влияния на комплексную надежность производства можно свести к 4 основным группам: невыход на работу, прекращение работы, снижение производительности, ошибки. Первые две группы – это отказы, связанные с прекращением деятельности; третья – со снижением уровня деятельности; четвертая группа – отказы, не связанные как с прекращением, так и с уровнем деятельности.

Все отказы, имеющие место в деятельности персонала, возникают под воздействием множества факторов, которые можно объединить в следующие группы: психофизиологические, личностные, социальные, социально-психологические. Степень влияния перечисленных групп факторов на возникновение отказов, а, следовательно, и на надежность персонала, различна.

Классификация ошибок оперативного персонала

ГОСТ 26387-84 Система «человек-машина» определяет отказ человека-оператора, не связанный с прекращением деятельности как ошибку. Ряд авторов также выделяет ошибку как особый вид отказа, не связанного с потерей работоспособности. Например, ошибочное действие - такое, которое не адекватно объективным, социально заданным целям управления. В то же время оно адекватно субъективной цели человека и в этом смысле должно рассматриваться как закономерное. Кроме того, ошибку определяют как кратковременное непроизвольное отклонение от нормы деятельности или однократное неправильное формирование нормы.

Рассматриваются три вида ошибочных действий (или бездействий) оператора: оператор выполнил что-то не то; не так; не вовремя. Согласно другой классификации ошибок присутствует еще неверное целеобразование. Класси-

фикация в инженерной психологии дополнительно рассматривает такой признак различия ошибок, как структурный уровень деятельности, на котором они совершаются.

По разным оценкам по вине оператора происходит от 20 до 80% всех нарушений в работе АС и от 15 до 40% всех аварий. Экспериментальные статистические исследования, проведенные в условиях швейного производства, показали, что из всех проанализированных отказов технологического оборудования 26,4% являются следствием ошибок персонала. Простои оборудования в устранении отказов вследствие ошибок персонала составляют около 28% от общего времени простоев, а неисправимый брак 18,5% от всех случаев возникновения брака.

Анализ различных подходов и классификаций ошибок персонала позволил выделить следующие возможные ошибки операторов:

- неправильная последовательность выполнения рабочих приемов
- неправильное выполнение рабочих приемов;
- неправильный выбор режима работы оборудования;
- неправильная установка режима работы оборудования;
- неправильная ориентация изделия в процессе выполнения операции;
- ошибка выбора инструмента или приспособления;
- ошибка установки (настройки) инструмента и приспособления;
- работа неисправным инструментом или приспособлением;
- работа на неисправном оборудовании;
- неправильная передача обрабатываемого изделия;
- неправильное оформление документов;
- ошибка в оценке технического состояния оборудования;
- несоблюдение технических параметров обрабатываемого изделия;
- неправильная комплектация изделия.

11 ИСПЫТАНИЯ НА НАДЕЖНОСТЬ

Оценка и контроль показателей надежности объектов и их элементов осуществляется по результатам испытаний или наблюдений в процессе эксплуатации. Целью испытаний на надежность является установление уровня надежности. Основная задача испытаний на надежность – получение информации о работоспособности объектов в конкретных условиях эксплуатации, применения или использования.

В зависимости от целей и характера получаемой информации технические объекты подвергаются функциональным испытаниям и испытаниям на надежность. Функциональные испытания проводятся с целью проверки способности объекта выполнять работу, для которой оно предназначено. Испытания на надежность проводятся для определения или оценке показателей надежности, таких как безотказность, долговечность, ремонтпригодность и сохраняемость.

В зависимости от исследуемых свойств надежности испытания делят на:

Испытания на долговечность (ресурсные испытания): по целям и видам испытаний (доводочные, предварительные, приемочные, определительные, контрольные, исследовательские, эксплуатационные), по объектам испытаний (испытания деталей, элементов, узлов, агрегатов, объекта и системы в целом), по темпам и срокам проведения (нормальные и ускоренные), по способу проведения испытаний (стендовые, эксплуатационные, полигонные), по критериям предельного состояния (до полного отказа, до изменения параметров).

Испытания на безотказность – направленные ресурсные испытания, проводимые по специальной методике при специально подобранных режимах с целью вызвать отказы определенного вида.

Испытания на ремонтпригодность проводятся с целью определения показателей ремонтпригодности по трем основным направлениям: техническому обслуживанию, текущему и капитальному ремонтам.

По каждому направлению оцениваются трудоемкость, продолжительность и стоимость операций. Задача решается двумя путями: имитацией и наблюдениями при испытаниях и эксплуатации.

Испытания на сохраняемость проводятся с целью определения показателей сохраняемости.

В зависимости от целей и характера получаемой информации испытания на надежность делятся на определительные и контрольные.

Определительные испытания на надежность

Цель определительных испытаний на надежность – определение количественных численных значений показателей надежности.

По методам и стратегии проведения и способам обработки результатов

нормировано 16 планов испытаний, которые определены в ГОСТ 27.410-87.

Обозначение плана испытаний состоит из трех символов, заключенных в скобках. Например [NUT], [NUT], (NMr) и т.д.

Первый символ обозначения плана определяет объем выборки изделий для испытаний. Второй символ указывает на возможность восстановления или замены отказавших изделий в процессе испытаний. Третий символ указывает на принцип окончания испытаний.

Например: [N = 120, M, r = 16] обозначает испытания 120 изделий с восстановлением после отказов до тех пор, пока число отказов достигнет 16. Квадратные скобки означают одновременное, круглые скобки неодновременное поступление изделий после отказов.

Распространенными планами определительных испытаний являются:

План 1. На испытание ставятся N изделий. Отказавшие изделия не восстанавливаются. Испытания продолжаются до отказа всех изделий. В качестве статистического среднего значения времени работы до отказа:

$$T_0 = \frac{\sum_{i=1}^N Nt_i}{N}$$

где t_i - время работы каждого изделия до отказа.

Недостаток рассмотренного плана испытаний – значительная длительность времени испытаний и необходимость поставить на испытание большое количество изделий.

План 2. На испытание ставятся N изделий. Отказавшие изделия не восстанавливаются. Испытания продолжаются либо до заданного времени t , либо до получения заданного числа отказов n .

План 3. На испытание ставятся N изделий. Отказавшие изделия восстанавливаются. Испытания продолжаются либо до заданного времени t , либо до получения заданного числа отказов n . К таким испытаниям предъявляется требование стабильности показателей надежности до первого и последующего отказов.

Использование среднего значения показателя надежности позволяют решать инженерные задачи – сравнивать оценки надежности, осуществлять расчеты надежности сложных изделий и т.п. Но средние значения содержат мало информации о случайной величине. Это вынуждает искать более информативные способы обработки результатов испытаний. Подробную информацию о надежности получают по доверительному интервалу возможных значений показателя надежности, которым накрывается определяемый показатель с заданной вероятностью (рис. 14).

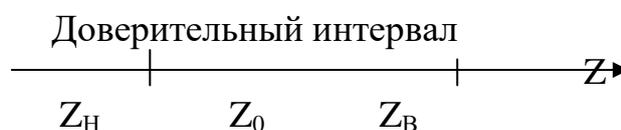


Рисунок 14 Обработка результатов

На рисунке обозначены: Z_H , Z_B – нижняя и верхняя границы двухстороннего доверительного интервала; Z_0 – искомая характеристика надежности. Интервал, заключенный между верхней и нижней границами, называется доверительным. Доверительный интервал с заданной доверительной вероятностью γ накрывает истинное значение искомого показателя. Доверительный интервал характеризует значение ошибки при оценке показателя надежности, доверительная вероятность – достоверность оценки. Кроме двустороннего доверительного интервала могут применяться односторонние доверительные интервалы.

Рассмотрим применение доверительного интервала для оценки средней наработки на отказ, если случайная величина распределена по закону χ^2 – распределения (рис.15).

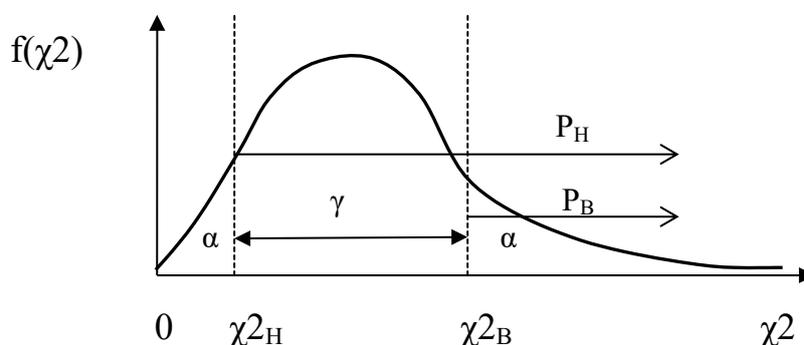


Рисунок 15 – Применение доверительного интервала

Если известно, что случайная величина распределена по закону χ^2 – распределения, то из площади, ограниченной $f(\chi^2)$, «вырезается» площадь, соответствующая заданной доверительной вероятности γ , так, чтобы остающиеся слева и справа части α были одинаковы. Левая и правая границы «вырезанной» площади соответствуют нижнему и верхнему значениям доверительного интервала.

Границы доверительного интервала для средней наработки на отказ определяются выражением $T_{0H} \leq T_0 \leq T_{0B}$, где

Здесь χ^2_H , χ^2_B – нижнее и верхнее значения χ^2 ; $2t_p$ – удвоенное значение суммарной наработки исследуемого изделия. Значения χ^2_H и χ^2_B определяются по таблице χ^2 – распределения.

Входными величинами в таблицу являются:

- k – число степеней свободы при n числе зафиксированных отказов;
- P_H и P_B – вероятности того, что χ^2_H и χ^2_B будут больше значений χ^2 , указанных в таблице.

Значения P_H и P_B определяются из распределения $f(\chi^2)$:

$$P_H = \gamma + (1 - \gamma) / 2 = (1 + \gamma) / 2$$

$$P_B = (1 - \gamma) / 2$$

Значение средней наработки на отказ равно:

$$T_{CP} = 2t_p / \chi^2_{cp} \text{ при } k=2n+2; \gamma=0,5.$$

Контрольные испытания на надежность

Контрольные испытания на надежность служат средством контроля надежности изделий по некоторому заданному косвенному признаку. Такими косвенными признаками могут быть:

- отсутствие отказов при проведении испытаний на протяжении заданного времени. В этом случае контрольные испытания называются испытаниями на числе допустимых отказов равных нулю;

- предельное число допустимых и недопустимых отказов для последовательных интервалов времени. В этом случае контрольные испытания называются испытаниями, основанными на последовательном анализе.

Целью контрольных испытаний на надежность является проверка соответствия фактического уровня надежности партии изделий требованиям, которые установлены в нормативно-технической документации. По результатам испытаний партия изделий объявляется либо годной для приемки, либо браком. В ходе испытаний проверяют и выбирают одну из двух взаимоисключающих гипотез:

- прямая гипотеза – надежность партии соответствует установленным требованиям;

- обратная гипотеза – надежность партии не соответствует установленным требованиям.

Третий возможный исход «допустимая партия» в зависимости от условий испытаний может быть присоединен к любому из ранее приведенных гипотез.

Испытания, основанные на числедопустимых отказов равных нулю

На испытания продолжительностью $t_{И}$ часов ставятся N изделий. Если при испытаниях продолжительностью $t_{И}$ не было отказов $n = 0$, то изделия считаются удовлетворяющими требованиям надежности.

Расчетом определяются либо продолжительность испытаний при заданном числе испытываемых изделий, либо число испытываемых изделий при заданном времени испытаний:

$$t_{И} = t_p / N, \quad N = t_p / t_{И}$$

здесь t_p – общая наработка изделий в период испытаний.

Величину требуемой наработки, если имеет место χ^2 – распределение определяют из выражения:

$$t_p = 0,5 \cdot T_H \cdot \chi^2_B, \text{ при } k = 2; \gamma_H = 1 - \gamma,$$

здесь T_H – нижнее значение наработки, которое подтверждается испытаниями при отсутствии отказов; χ^2 – значение, соответствующее доверительной вероятности при числе отказов, равном нулю, k – число степеней свободы, γ – доверительная вероятность.

Недостатком рассмотренного метода является длительность проведения испытаний, а также необходимость ставить на испытания большое количество однотипных изделий для получения достоверных результатов

Испытания, основанные на последовательном анализе

Этот метод позволяет сократить время на проведение контрольных испытаний, если использовать следующий подход к планированию:

1. Не планировать заранее продолжительность испытаний, а разбить их на ряд последовательных этапов. На каждом этапе проводить анализ полученных результатов и принимать одно из трех решений:

-прекратить испытания, так как есть основания считать, что изделия удовлетворяют требованиям надежности;

-прекратить испытания, так как есть основания считать, что изделия не удовлетворяют требованиям надежности;

-продолжить испытания, так как нет оснований для вывода о надежности изделий.

2. В ходе обработки результатов испытаний в конце каждого этапа проверять гипотезу о принадлежности изделий к той или иной группе по уровню надежности.

При испытаниях на надежность рекомендуется устанавливать две группы изделий по уровню надежности.

Первая. К ней относят изделия, браковка которых может быть произведена с вероятностью α . Эта вероятность получила название ошибки первого рода или риска поставщика. Ошибка первого рода имеет место тогда, когда хорошая партия, изделия которой имеют уровень надежности равный или лучше заданного, бракуется по результатам испытаний.

Вторая. К ней относят изделия, принятие которых может быть допущено с вероятностью β . Эта вероятность получила название ошибки второго рода или риска потребителя. Ошибка второго рода имеет место тогда, когда плохая партия, изделия которой имеют уровень надежности хуже заданного, принимается по результатам испытаний.

Риски α и β назначаются достаточно малыми (от 0,001 до 0,2) по договоренности между изготовителем и заказчиком.

В ходе подготовки испытаний в качестве верхнего уровня надежности принимается уровень, заданный в технических условиях, в качестве нижнего уровня – такой уровень, с которым можно принимать изделия с заданными вероятностями α и β , а также значения нижней T_H и верхней T_B границы доверительного интервала.

Исходя из заданных исходных данных, осуществляется построение графика как функция $n(t_H)$ (рис.16). Линия 1 на графике носит название линии браковки, линия 2 – линии приемки.

Для построения графика используют следующие уравнения

- для линии приемки

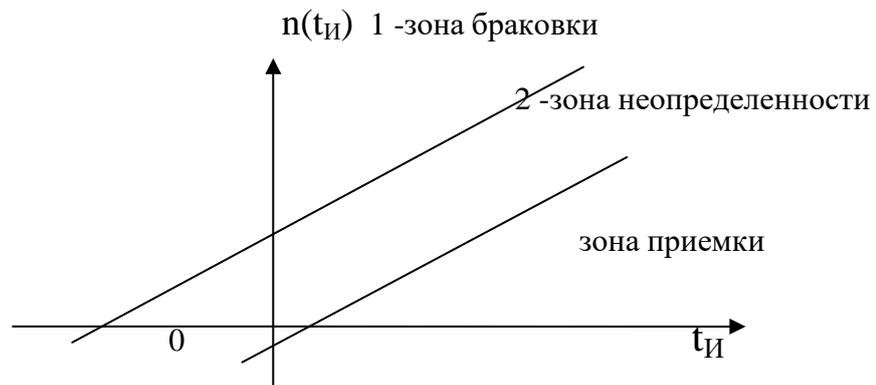


Рисунок 16 График функции

Для построения графика используют следующие уравнения

Линия 1 на графике носит название линии браковки, линия 2 – линии приемки.

В ходе испытаний на график наносят точки, соответствующие количеству отказов n за время $t_{и}$. Если точка располагается в зоне браковки, испытания прекращаются, выносится решение о несоответствии изделия заданным требованиям надежности. Если точка располагается в зоне приемки, испытания прекращаются, выносится решение о соответствии изделия требованиям надежности. При расположении точек в зоне неопределенности испытания продолжаются. Но при этом назначается предельная продолжительность испытаний.

Ускоренные испытания

Продолжительность испытаний на надежность для получения достоверных результатов должна быть не менее наработки изделий i , следовательно, для некоторых из них может достигать нескольких лет. Поэтому в настоящее время широко применяются методы ускоренных испытаний, позволяющие получать сведения о надежности изделий за время, существенно меньшее их наработки до отказа (наработки на отказ).

Наибольшее распространение получили методы ускоренных испытаний: метод линейного возрастания нагружения, метод экстраполяции, метод одноступенчатого нагружения, метод интенсификации приработки, метод эквивалентных испытаний и др.

Метод линейного возрастания нагружения используется при испытаниях объектов с постоянной скоростью деградиационных процессов в нормальных условиях эксплуатации. Ускорение испытаний достигается при линейном увеличении нагрузки во времени.

Метод экстраполяции основан на использовании зависимости параметров распределения наработки от нагрузки. Метод предполагает проведение испытаний при нескольких повышенных уровнях нагрузки и экстраполяции их результатов для нормальных значений нагрузки.

В методе одноступенчатого нагружения используется принцип суммирования повреждений. Объект после периода приработки сначала подвергается обычной нагрузке, а затем повышенной.

Метод интенсификации приработки используется для ускорения исследований объектов с большим периодом приработки.

Метод эквивалентных испытаний строится по принципу ускоренного истощения ресурса объекта на основании анализа зависимостей между нагрузкой и характеристиками надежности по каждому виду нагружения. Ускорение получения информации о надежности достигается за счет проведения испытаний в наиболее тяжелых эксплуатационных режимах.

Форсированные ускоренные испытания можно рассматривать как разновидность физического моделирования, позволяющего оценить надежность при сжатом масштабе времени. Их возможность определена зависимостью надежности от величины внешних эксплуатационных факторов.

12 ОСНОВЫ ТЕОРИИ РИСКА

Термины: **надежность, безопасность, и риск** часто смешивают.

При анализе надежности исследуют отказы технических систем так и процесс их возникновения.

Если требуется определить параметры, характеризующие безопасность, то необходимо в дополнении к отказам технических систем рассмотреть возможность нарушения целостности самого оборудования или вызываемых ими других повреждений.

Если на стадии анализа безопасности предполагается возможность отказов в системе, то проводится анализ риска отказов в смысле ущерба, наносимого оборудованию, и последствий для людей, находящихся вблизи него.

Если в анализ отказов технической системы включить ожидаемую частоту последствий их появления, то можно считать анализ риска выполненным.

Основной целью анализа риска является оценка частоты (вероятности) возможных последствий из-за отказов технической системы.

Результатом изучения риска может быть такое утверждение «Возможное число человеческих жертв в течение года в результате взрыва реактора равно 10^{-4} .»

Таким образом, на каждые 10 тыс. работающих сотрудников, предсказывается гибель одного человека.

Определение термина риск с позиции теории вероятности следующее **«риск – вероятность человеческих и материальных потерь или повреждений»**.

Например, риск любого человека из 200-миллионного населения США погибнуть в течение года в автомобильных катастрофах составляет

$$\frac{50 \text{ тыс. смертельны х исходов в год}}{200 \text{ млн. человек}} = 2,5 \times 10^{-4} \frac{\text{смертельны х исходов}}{\text{в год на каждого}}$$

Это следует из того, что годовое число смертельных случаев в автомобильных катастрофах в США составляет 50 тыс.

Риск любого человека из 140-миллионного населения России погибнуть в течение года в автомобильных катастрофах составляет

$$\frac{37 \text{ тыс. смертельны х исходов в год}}{140 \text{ млн. человек}} = 2,6 \times 10^{-4} \frac{\text{смертельны х исходов}}{\text{в год на каждого}}$$

Это следует из того, что годовое число смертельных случаев в автомобильных катастрофах в России составляет 37 тыс.

Риск может иметь не смертельный исход, поэтому общим выражением является

$$\text{риск} \left[\frac{\text{последствие}}{\text{время}} \right] = \text{частота} \left[\frac{\text{событие}}{\text{время}} \right] \times \text{величина} \left[\frac{\text{последствие}}{\text{событие}} \right]$$

Для примера с автомобильными авариями при общем числе аварий, равном в США 50 млн. в год

$$50\,000 \frac{\text{смертельных исходов}}{\text{год}} = \left(50 \times 10^{-6} \frac{\text{аварий}}{\text{год}} \right) \left(10^{-3} \frac{\text{смертей}}{\text{аварий}} \right)$$

я общества риск понести материальные потери от автомобильных аварий можно выразить так:

$$\text{риск} \left[\frac{\text{потери}}{\text{время}} \right] = \text{частота} \left[\frac{\text{аварий}}{\text{время}} \right] \times \text{величина} \left[\frac{\text{потери}}{\text{аварий}} \right]$$

Полная безопасность не может быть гарантирована никому, независимо от образа жизни.

Каждый из нас живет от одного дня до другого, избегая риска или преодолевая опасности, например

Причина или место несчастного случая	Приблизительный уровень риска
1. Автомобильный транспорт	3×10^{-4}
2. Падение	9×10^{-5}
3. Пожар и ожог	4×10^{-5}
4. Утопление	3×10^{-5}
5. Отравление	2×10^{-5}
6. Станочное оборудование	1×10^{-5}
7. Водный транспорт	9×10^{-6}
8. Воздушный транспорт	9×10^{-6}
9. Падающие предметы	6×10^{-6}
10. Электрический ток	6×10^{-6}
11. Железная дорога	4×10^{-6}
12. Молния	5×10^{-7}

При уменьшении риска ниже уровня 10^{-6} в год общественность не выражает чрезмерной озабоченности, и поэтому редко принимаются специальные меры для снижения степени риска.

Например, мы не проводим свою жизнь в страхе, погибнуть от удара молнии.

Основываясь на этой предпосылке, принимают величину 10^{-6} как тот уровень, к которому следует стремиться, устанавливая степень риска, обусловленную деятельностью промышленных предприятий.

Современный уровень знаний в области анализа риска подтверждают переход от обеспечения «абсолютной безопасности» населения к концепции приемлемого по экономическим, технологическим и социальным соображениям риска.

Концепция приемлемого риска позволяет:

- сформулировать цели безопасности, которые органично вписываются в иерархическую систему развития общества;
- разработать методологию достижения целей безопасности
- определить процесс управления риском в социо-эколого-экономической системе как целенаправленное воздействие на управляющие параметры для достижения оптимальной траектории развития системы.

Рассматривается модель «объект-среда», где в качестве «объекта» могут выступать:

население региона, предприятия, сооружения и т.п., а «среда» характеризуется рисками различной природы (техногенными, социально-экономическими и др.)

В качестве целевой функции безопасности может быть выбрана, средняя продолжительность времени функционирования «объекта», например, жизни населения региона.

В качестве управляющих воздействий используются ресурсы, направляемые на снижение различных видов риска для членов общества, например, денежные средства.

Классификация видов риска

Формирование опасных и чрезвычайных ситуаций – результат определенной совокупности факторов риска, порождаемых соответствующими источниками. В широком смысле слова риск выражает возможную опасность, вероятность нежелательного события. Применительно к проблеме безопасности жизнедеятельности такими событиями являются: авария или катастрофа технической системы или устройства, загрязнение или разрушение экологической системы, гибель людей или возрастание смертности населения, материальный ущерб от реализовавшихся опасностей или увеличение затрат на безопасность.

Каждое нежелательное событие может возникнуть по отношению к определенной жертве – объекту риска. Соотношение объектов риска и нежелательных событий позволяет различать индивидуальный, технический, экологический, социальный и экономический риск. Каждый вид его обуславливает характерные источники и факторы, которые приведены в таблице 1.

Аналитически риск выражает частоту реализации опасностей по отношению к возможному их числу,

$$R = \frac{N(t)}{Q_f},$$

R – риск определенного вида,

N(t) – число нежелательных событий за время t,

Q_f – число объектов, подверженных определенному фактору риска.

Таблица 1 Виды риска

Вид риска	Объект риска	Источник риска	Нежелательное событие
Индивидуальный	Человек	Условия жизнедеятельности человека	Заболевание, травма, инвалидность, смерть
Технический	Технические системы	Техническое несовершенство, нарушение правил эксплуатации технических систем и объектов	Авария, взрыв, катастрофа, пожар, разрушения
Экологический	Экологические системы	Антропогенное вмешательство в природную среду, техногенные чрезвычайные ситуации	Антропогенные экологические катастрофы, стихийные бедствия
Социальный	Социальные группы	Чрезвычайная ситуация, снижение качества жизни	Групповые травмы, заболевания, гибель людей, рост смертности
Экономический	Материальные ресурсы	Повышенная опасность производства или природной среды	Увеличение затрат на безопасность, ущерб от недостаточной защищенности

Индивидуальный риск

Индивидуальный риск обусловлен вероятностью реализации потенциальных опасностей при возникновении опасных ситуаций. Его можно определить по числу реализовавшихся факторов риска:

$$R_u = \frac{P(t)}{L(t)},$$

где R_u – индивидуальный риск,

$P(t)$ – число пострадавших за период времени t ,

$L(t)$ – число людей, подверженных риску за тот же период времени t .

Из источников индивидуального риска отметим социальную экологию, профессиональную деятельность, транспортные сообщения и т.д.

Наиболее распространенные факторы риска смерти: некачественные воздух, вода, продукты питания, опасные и вредные производственные факторы, аварии и катастрофы транспортных средств.

Индивидуальный риск может быть добровольным, если он обусловлен деятельностью человека на добровольной основе, и вынужденным, если человек подвергается риску в составе части общества (например, проживание в экологически неблагоприятных районах, вблизи источников повышенной опасности и т.д.).

Технический риск

Технический риск – комплексный показатель надежности элементов техносферы. Он выражает вероятность аварии или катастрофы при эксплуатации машин, механизмов, реализации технологических процессов, строительстве зданий и сооружений.

$$R_T = \frac{A(t)}{T(t)},$$

где R_T – технический риск,

$A(t)$ – число аварий технологических систем данного вида за период времени t ,

$T(t)$ – число технических систем данного вида, находившихся в эксплуатации за период времени t .

Источники технического риска:

- Низкий уровень НИР,
- Низкий уровень ОКР,
- Опытное производство новой техники,
- Серийный выпуск небезопасной техники,
- Нарушение правил безопасной эксплуатации технических систем.

Источники и факторы технического риска приведены в таблице 2.

Таблица 2 Источники риска

Источники риска	Наиболее распространенные факторы технического риска
Низкий уровень научно-исследовательских работ	Ошибочный выбор по критериям безопасности направлений развития техники и технологий
Низкий уровень опытно-конструкторских работ	Выбор потенциально-опасных, конструктивных схем и принципов действия технических систем. Ошибки в определении эксплуатационных нагрузок. Неправильный выбор конструкционных материалов. Недостаточный запас прочности. Отсутствие в проектах технических средств безопасности.
Опытное производство новой техники	Некачественная доводка конструкции, технологии, документации по критериям безопасности.
Серийный выпуск небезопасной техники	Отклонения от заданного химического состава конструкционных материалов. Недостаточная точность конструктивных размеров. Нарушение режимов термической и химико-термической обработки деталей. Нарушение регламентов сборки и монтажа конструкций и машин.
Нарушение правил безопасности эксплуатации технических систем	Использование техники не по назначению. Нарушение режимов эксплуатации, предусмотренных нормативно-технической документацией, несвоевременные профилактические осмотры и ремонты. Нарушение требований транспортировки и хранения.

Экологический риск

Экологический риск выражает вероятность экологического бедствия, катастрофы, нарушения дальнейшего нормального функционирования и существования экологических систем и объектов в результате антропогенного вмешательства в природную среду или стихийного бедствия

$$R_o = \frac{K(t)}{I(t)},$$

где R_o – экологический риск,

$K(t)$ – число антропогенных экологических катастроф и стихийных бедствий за определяемый период времени t ,

$I(t)$ – число потенциальных источников экологических разрушений на рассматриваемой территории за тот же период времени t .

К источникам экологического риска относят антропогенное вмешательство в природную среду, техногенное влияние на окружающую природную среду и природное явление. Наиболее распространенными факторами экологического риска являются: разрушение ландшафтов при добыче полезных ископаемых, образование искусственных водоемов, истребление лесных массивов, загрязнение водоемов, атмосферного воздуха вредными веществами, энергетическое загрязнение атмосферы.

Социальный риск

Социальный риск характеризует масштабы и тяжесть негативных последствий чрезвычайных ситуаций, а также различного рода явлений и преобразований, снижающих качество жизни людей. По существу – это риск для группы или сообщества людей. Оценить его можно, например, по динамике смертности, рассчитанной на 1000 человек соответствующей группы:

$$R_c(t) = \frac{1000(C_2 - C_1)}{L},$$

$R_c(t)$ – социальный риск,

C_1, C_2 – число умерших (на 1000 чел.) в начале и в конце периода времени t соответственно,

L – общая численность исследуемой группы.

К источникам социального риска относят: урбанизация экологически неустойчивых территорий, промышленные технологии и объекты повышенной опасности, социальные и военные конфликты, эпидемии, снижение качества жизни. Наиболее распространенными факторами социального риска являются: поселение людей в зоне возможного затопления, повышенной сейсмичности, аварии на АЭС, ТЭС, продуктопроводах, транспортные катастрофы, техногенное заражение окружающей среды, боевые действия, ухудшение медицинского обслуживания, неудовлетворительные жилищно-бытовые условия.

Экономический риск

Экономический риск определяется соотношением пользы и вреда, получаемых обществом от рассматриваемого вида деятельности:

$$R_э = \frac{B}{П} \cdot 100\% ,$$

где $R_э$ – экономический риск, %,

B – вред обществу от рассматриваемого вида деятельности,

$П$ – польза.

$$B = Z_б + Y ,$$

где $Z_б$ – затраты на достижение заданного уровня безопасности,

Y – ущерб, обусловленный недостаточной защищенностью человека и среды его обитания от опасностей.

Формула экономически обоснованной безопасности жизнедеятельности имеет вид:

$$Y < D - (Z_n + Z_б).$$

Возникает вопрос о поиске оптимального соотношения затрат на безопасность и возможного ущерба от недостаточной защищенности. Существует много методических разработок решения этой проблемы. Достаточно наглядной является следующая. Вводится понятие уровня безопасности, который характеризуется 5-балльным коэффициентом $K_б$.

На рисунке 17 показан один из вариантов анализа ущерба и затрат на безопасность. Чем меньше затраты на безопасность, тем больше ущерб, и наоборот. Оптимальные соотношения находятся в заштрихованной зоне правее точки пересечения кривых $Y=Z_б$. Это значит, что затраты на безопасность должны превышать возможный ущерб от недостаточной защищенности.

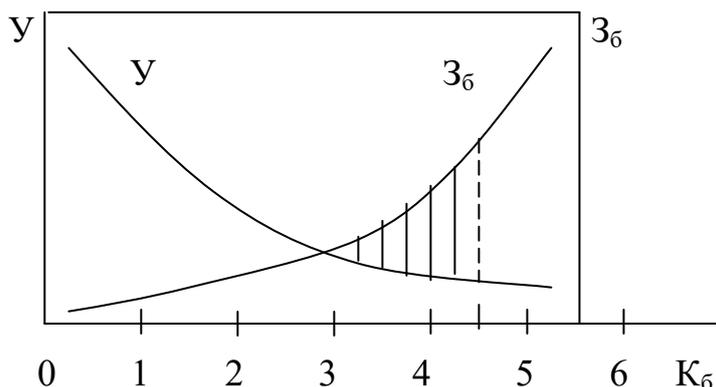


Рисунок 17 – Анализ ущерб и затрат

Планирование и организация работ

Анализ риска проводится для того, чтобы обеспечить вход в процесс управления риском, однако, более точный выбор задач, средств и методов анализа риска обычно не регламентируется. В нормативно-правовых актах под-

черкивается, что анализ опасности должен соответствовать сложности рассматриваемых процессов, наличию необходимых данных и квалификации специалистов, проводящих анализ. При этом более простые и понятные методы анализа следует предпочитать более сложным и не до конца ясным и методологически обеспеченным. Поэтому на первом этапе необходимо:

- указать причины и проблемы, вызывающие необходимость проведения анализа риска;
- определить анализируемую систему и дать ее описание;
- подобрать соответствующую команду для проведения анализа;
- установить источники информации о безопасности системы;
- указать исходные данные и ограничения, обуславливающие пределы анализа;
- четко определить цели анализа и критерии приемлемого риска.

Во всех нормативах содержится требование документального оформления этого этапа анализа риска.

Идентификация опасностей

Основная задача – выявление (на основе информации о данном объекте, результатов экспертизы и опыта работы подобных систем) и четкое описание всех присущих системе опасностей. Это – ответственный этап, так как не выявленные на этом этапе опасности не подвергаются дальнейшему рассмотрению, что может привести к весьма нежелательным последствиям. Существует целый ряд формальных методов выявления опасностей. Один из них – метод анализа видов отказов и их последствий. С помощью этого метода последовательно рассматривается каждый элемент, и анализируются все возможные виды отказов и (или) аварийных ситуаций и выявляются их результирующие воздействия на систему. Отдельные аварийные ситуации и виды отказов элементов выявляются и анализируются для того, чтобы определить их воздействие на другие элементы и систему в целом. Для каждого вида отказа анализируются последствия, намечаются меры по их устранению. Дополнительно для каждого вида отказов должен быть составлен перечень необходимых проверок.

Другой метод – метод анализа критичности. Он предусматривает классификацию элементов в соответствии со степенью влияния каждого из них на выполнение системой общей задачи. Устанавливаются группы критичности для различных видов отказов.

Например:

- 1 – отказ, приводящий к дополнительному техобслуживанию;
- 2 – отказ, приводящий к остановкам в работе или потере трудоспособности;
- 3 – отказ, который может привести к невыполнению основной задачи;
- 4 – отказ, потенциально приводящий к жертвам.

Данный метод не дает количественной оценки возможных последствий, но позволяет ответить на вопросы:

- какой элемент следует подвергнуть детальному анализу с целью исключения аварий;
- каковы нормативы входного контроля;
- где дополнительно следует вводить специальные процедуры, правила безопасности и другие защитные мероприятия;
- как наиболее эффективно затратить средства для предотвращения аварий.

Но прежде проводится предварительная оценка опасностей для выбора дальнейшего направления деятельности:

- прекратить дальнейший анализ ввиду незначительности опасностей;
- провести более детальный анализ риска;
- выработать рекомендации по уменьшению опасностей.

Результаты предварительной оценки опасностей также документируются.

Процесс анализа риска может закончиться этим этапом.

Оценка риска

Если есть необходимость, переходят к этому этапу оценки риска. На этом этапе идентифицированные опасности должны быть оценены на основе критериев приемлемого риска, чтобы идентифицировать опасности с неприемлемым уровнем риска, что является основой для разработки рекомендаций и мер по уменьшению опасностей. При этом и критерии приемлемого риска, и результаты оценки риска могут быть выражены как качественно, так и количественно.

Оценка риска включает в себя анализ частоты и последствий. Понятие риска всегда включает два элемента: частоту, с которой осуществляется опасное событие, и последствия опасного события. Анализ риска заключается в выявлении (идентификации) опасностей и оценке риска, когда под опасностью понимается источник потенциального ущерба или вреда, а под идентификацией опасности – процесс выявления опасности и определения ее характеристик. Для анализа частоты обычно используют:

- имеющиеся данные, соответствующие типу системы, объекта или вида деятельности;
- методы анализа деревьев событий или деревьев отказов;
- экспертная оценка с учетом мнения специалистов в данной области.

Анализ последствий включает оценку воздействий на людей, имущество или окружающую среду. Для прогнозирования последствий необходимы модели и сущности поражающих факторов, так как нужно оценить физические эффекты нежелательных событий.

Имеется много неопределенностей, связанных с оценкой риска. Анализ неопределенностей – необходимая составная часть оценки риска. Как правило, основные источники неопределенностей – информация по надежности оборудования и человеческим ошибкам, а также допущения применяемых моделей аварийного процесса. Чтобы правильно интерпретировать величины риска, надо понимать неопределенности и их причины. Анализ неопределенности – это перевод неопределенности исходных параметров и предположений, использованных при оценке риска, в неопределенность результатов. Источники не-

определенности должны по возможности идентифицироваться. Основные параметры, к которым анализ является чувствительным, должны быть представлены в результатах.

Важно подчеркнуть, что сложные и дорогостоящие расчеты зачастую дают значение риска, точность которого не велика. Для сложных технических систем точность расчетов индивидуального риска, даже в случае наличия всей необходимой информации, не лучше одного порядка. При этом проведение полной количественной оценки риска более полезно для сравнения различных вариантов (например, размещения оборудования), чем для заключения о степени безопасности объекта. Зарубежный опыт показывает, что наибольший объем рекомендаций по обеспечению безопасности вырабатывается с применением качественных (инженерных) методов анализа риска, позволяющих достигать основных целей анализа при использовании меньшего объема информации и затрат труда. Однако количественные методы оценки риска всегда очень полезны, а в некоторых ситуациях – и единственно допустимы, в частности, для сравнения опасностей различной природы или при экспертизе особо опасных сложных технических систем.

Наконец, последний этап анализа риска технологической системы – разработка рекомендаций по уменьшению уровня риска (управлению риском) в случае, если степень риска выше приемлемой.

Оценка допустимого риска

Оценка величины любого риска производится сравнением его фактической величины, изменяющейся от 0 до 1, с его приемлемой величиной. Приемлемый риск является некоторым компромиссом между негативными последствиями риска (вред, ущерб, потери) и затратами на их предупреждение или сокращение. Приемлемым можно считать такой уровень риска, с которым общество, бизнес соглашаются на данном этапе своего развития. Опираясь на величину приемлемого риска, можно весь диапазон рисков дифференцировать на пять уровней, закрепив за ними следующие названия: малый, приемлемый, повышенный, высокий и чрезвычайный риски.

Приемлемую величину каждого вида риска можно научно обосновать. Так приемлемую величину валеологического риска смерти людей можно установить равной $5 \cdot 10^{-4}$. Это соответствует данным ВОЗ, согласно которым в современном мире практически невозможно предотвратить 5 смертей от общих заболеваний на каждые 10000 человек в возрасте до 30 лет. С таким риском общество вынуждено соглашаться, поскольку затраты на его снижение будут бесполезными вследствие названных причин.

Аналогичным образом можно обосновать приемлемость экологического риска. Так, экологическая наука утверждает, что если ущерб окружающей природной среде не превышает 5% ее общей ресурсной базы для конкретной местности, то природа сохраняет способность к полной самостоятельной реабилитации. Указанную величину экологического риска можно считать приемлемой. На ее основе предлагается установить пять классов экологической безопасно-

сти производства: безопасное, приемлемой опасности, повышенной опасности, опасное и чрезвычайно опасное.

Концепция приемлемого технического риска стала реальной альтернативой не оправдавшему себя на практике категорическому императиву абсолютной безопасности. Приемлемый технический риск необходимо устанавливать для каждого вида технических систем. Его целесообразно определять на стадии проектирования и указывать в технической документации. Результаты анализа аварийности объектов техносферы позволяют установить обобщенный уровень приемлемого технологического риска в пределах 0,05...0,1.

Приемлемую величину экономического риска лучше соотносить с реально достижимой рентабельностью производства, допуская при этом, что обе эти величины являются обратными по отношению друг к другу. Исходя из этого, можно считать, что экономический риск, равный 0,25...0,30, в большинстве случаев будет приемлемым, так как он соответствует достаточно высокому уровню рентабельности, равному 70...75%.

В таблице представлена примерная дифференциация названных видов рисков, которая может служить ориентиром при установлении приемлемости рисков для конкретных условий жизнедеятельности.

Таблица 3 Уровни риска

Вид риска	Примерные уровни риска за год, в процентах				
	малый	приемлемый	повышенный	высокий	чрезвычайный
Валеологический: гибель чел./год	<0.01	0,01...0,05	0,05...0,5	0,5...2,0	>2,0
Экологический	<1.0	1...5	5...25	25...50	>50
Технический	<5	5...10	10...25	25...50	>50
Экономический	<15	25...30	30...50	50...75	>75

13 ЛОГИКО-ГРАФИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ АНАЛИЗА НАДЁЖНОСТИ И РИСКА

Анализ причин промышленных аварий показывает, что возникновение и развитие крупных аварий, как правило, характеризуется комбинацией случайных локальных событий, возникающих с различной частотой на разных стадиях аварии (отказы оборудования, человеческие ошибки при эксплуатации проектировании, внешние воздействия, разрушение, разгерметизация, выброс, утечка, пролив вещества, испарение, рассеяние веществ, воспламенение, взрыв, интоксикация и т.д.). Для выявления причинно-следственных связей между этими событиями используют логико-графические методы деревьев отказов и событий.

Модели процессов в человеко-машинных системах должны отражать процесс появления отдельных предпосылок и развития их в причинную цепь происшествия в виде соответствующих диаграмм причинно-следственных связей – диаграмм влияния. Такие диаграммы являются формализованными представлениями моделируемых объектов, процессов, целей, свойств в виде множества графических символов (узлов, вершин) и отношений – предполагаемых или реальных связей между ними. Широкое распространение получили диаграммы в форме потоковых графов (графов состояний и переходов), деревьев событий (целей, свойств) и функциональных сетей различного предназначения и структуры.

В последние десятилетия интенсивно разрабатываются диаграммы влияния из класса семантических или функциональных сетей, которые являются графами, но с дополнительной информацией, содержащейся в их узлах и дугах (рёбрах). Достоинства таких сетей: возможность объединения логических и графических способов представления исследуемых процессов, учёт стохастичности информации, выраженной узлами и дугами, доступность для моделирования циклических и многократно наблюдаемых событий, наибольшие (по сравнению с другими типами диаграмм) логические возможности.

Другим (после графов) и наиболее широко используемым типом диаграмм влияния являются «деревья». В безопасности диаграммы данного класса часто называют «деревом происшествий» и «деревом их исходов». Они являются в сущности графами с ветвящейся структурой и с дополнительными (логическими) условиями.

Основные достоинства этих моделей: сравнительная простота построения; дедуктивный характер выявления причинно-следственных связей исследуемых явлений; направленность на их существенные факторы; лёгкость преобразования таких моделей; наглядность реакции изучаемой системы на изменение структуры; декомпозируемость «дерева» и процесса его изучения; возможность качественного анализа исследуемых процессов; лёгкость дальнейшей формализации и алгоритмизации; приспособленность к

обработке на средствах ВТ; доступность для статистического моделирования и количественной оценки изучаемых явлений, процессов и их свойств.

Создание дерева заключается в определении его структуры:

- элементов – головного события (происшествия) и ему предшествующих предпосылок;

- связей между ними – логических условий, соблюдение которых необходимо и достаточно для его возникновения.

На практике обычно используют обратную или прямую последовательность выявления условий возникновения конкретных происшествий или аварийности и травматизма в целом:

- от головного события дедуктивно к отдельным предпосылкам;

- от отдельных предпосылок индуктивно к головному событию.

Из анализа структуры диаграммы влияния следует, что основными её компонентами служат узлы (вершины) и связи (отношения) между ними. В качестве узлов обычно подразумеваются простейшие элементы моделируемых категорий (переменные или константы) – события, состояния, свойства, а в качестве связей – активности, работы, ресурсы и другие взаимодействия. Отношения или связи между переменными или константами в узлах диаграммы графически представляются в виде линий, называемых дугами или рёбрами.

Каждые два соединённых между собой узла образуют ветвь диаграммы. В тех случаях, когда узлы связаны направленными дугами таким образом, что каждый из них является общим ровно для двух ветвей, возникают циклы или петли.

Переменные в узлах характеризуются фреймами данных – множеством выходов (значений, принимаемых переменными, неизменных во времени и между собой не пересекающихся) и условными распределениями вероятностей появления каждого из них.

Идея прогнозирования размеров ущерба от происшествий в человеко-машинных системах основана на использовании деревьев специального типа (деревьев исходов) – вероятностных графов. Их построение позволяет учитывать различные варианты разрушительного воздействия потоков энергии или вредного вещества, высвободившихся в результате происшествия.

С помощью предварительно построенных диаграмм – графов, сетей и деревьев могут быть получены математические модели аварийности и травматизма.

В исследовании безопасности широкое распространение получили диаграммы влияния ветвящейся структуры, называемые «деревом» событий (отказов, происшествий). Деревом событий называют не ориентированный граф, не имеющий циклов, являющийся конечным и связным. В нём каждая пара вершин должна быть связанной (соединённой цепью), однако все соединения не должны образовывать петлю (циклов), т.е. содержать такие маршруты, вершины которых одновременно являются началом одних и концом других цепей.

Структура дерева происшествий обычно включает одно размещаемое сверху нежелательное событие – происшествие (авария, несчастный случай,

катастрофа), которое соединяется с набором соответствующих событий – предпосылок (ошибок, отказов, неблагоприятных внешних воздействий), образующих определённые их цепи или «ветви». «Листьями» на ветвях дерева происшествий служат предпосылки – инициаторы причинных цепей, рассматриваемые как постулируемые исходные события, дальнейшая детализация которых нецелесообразна. В качестве узлов дерева происшествий могут использоваться как отдельные события или состояния, так и логические условия их объединения (сложения или перемножения).

Процедура анализа «дерева отказов»

Опасности носят потенциальный, т.е. скрытый характер. Условия реализации потенциальной опасности называются причинами.

Опасность – следствие некоторой причины или группы причин, которая, в свою очередь, является следствием другой причины, т.е. причины и следствия образуют иерархические структуры или системы, так называемые: «дерево событий», «дерево причин», «дерево отказа» или «дерево опасности», «дерево неисправностей».

Процедура построения дерева неисправностей (отказов) включает, как правило, следующие этапы:

- Определение нежелательного (завершающего) события в рассматриваемой системе.

- Тщательное изучение возможного поведения и предполагаемого режима использования системы.

- Определение функциональных свойств событий более высокого уровня для выявления причин тех или иных неисправностей системы и проведение более глубокого анализа поведения системы с целью выявления логической взаимосвязи событий более низкого уровня, способных привести к отказу системы.

Построение дерева неисправностей (отказов) для логически связанных событий на входе. Эти события должны определяться в терминах идентифицируемых независимых первичных отказов. Чтобы получить количественные результаты для завершающего нежелательного события дерева, необходимо задать вероятность отказа, коэффициент неготовности, интенсивность отказов, интенсивность восстановлений и другие показатели, характеризующие первичные события, при условии, что события дерева неисправностей не являются избыточными. Более строгий и систематический анализ предусматривает выполнение таких процедур, как (1) определение границ системы, (2) построение дерева неисправностей, (3) качественная оценка, (4) количественная оценка. Обычно система изображается в виде блок-схемы, показывающей все функциональные взаимосвязи и элементы. При построении дерева неисправностей исключительно важную роль приобретает правильное задание граничных условий, которые не следует путать с физическими границами системы.

Одним из основных требований, предъявляемых к граничным условиям, является задание завершающего нежелательного события, установление

которого требует особой тщательности, поскольку именно для него как для основного отказа системы строится дерево неисправностей. Кроме того, чтобы проводимый анализ был понятен всем заинтересованным лицам, исследователь обязан составить перечень всех допущений, принимаемых при определении системы и построении дерева неисправностей.

Анализ дерева происшествий связан с определением возможности появления или не появления головного события – происшествия конкретного типа. Данные условия устанавливаются путём выделения из всего массива исходных предпосылок двух подмножеств, реализация которых либо приводит, либо не приводит к возникновению головного события. Такие подмножества делятся на аварийные сочетания предпосылок, образующие в совокупности с условиями их появления каналы прохождения сигнала до этого события, и отсечные сочетания, исключающие условия формирования таких путей к головному событию. Самым удобным способом выявления условий возникновения и предупреждения происшествий является выделение из таких подмножеств так называемых «минимальных сочетаний событий», т.е. тех из них, появление которых минимально необходимо и достаточно для достижения желаемого результата.

Построение «дерева отказов»

Дерево отказов – это топологическая модель надёжности и безопасности, которая отражает логико-вероятностные взаимосвязи между отдельными случайными исходными событиями в виде первичных отказов или результирующих отказов, совокупность которых приводит к главному анализируемому событию. Таким образом, «дерево отказов» – это ориентировочный граф в виде дерева.

Основной целью построения дерева неисправностей является символическое представление существующих в системе условий, способных вызвать её отказ. Кроме того, построенное дерево позволяет показать в явном виде слабые места системы и является наглядным средством представления и обоснования принимаемых решений, а также средством исследования компромиссных соотношений или установления степени соответствия конструкции системы заданным требованиям.

Выделяют пять типов вершин «дерева отказов» (ДО):

- вершины, отображающие первичные отказы;
- вершины, отображающие результирующие или вторичные отказы;
- вершины, отображающие локальные отказы, которые не влияют на возникновение других отказов;
- вершины, соответствующие операции логического объединения случайных событий (типа «ИЛИ»);
- вершины, соответствующие операции логического произведения случайных событий (типа «И»).

Каждой вершине ДО, отображающей первичный или результирующий отказ, соответствует определенная вероятность возникновения отказа. Одним из основных преимуществ ДО является то, что анализ ограничивается выявлением только тех элементов систем и событий, которые приводят к постулируемому отказу или аварии. Чтобы определить вероятность отказа, необходимо найти аварийные сочетания, для чего необходимо произвести качественный и количественный анализ «дерева отказов».

Структура «дерева отказа» включает одно головное событие (аварию, инцидент), которое соединяется с набором соответствующих ниже-стоящих событий (ошибок, отказов, неблагоприятных внешних воздействий), образующих причинные цепи (сценарии аварий). Для связи между событиями в узлах «деревьев» используются знаки «И» и «ИЛИ». Логический знак «И» означает, что вышестоящее событие возникает при одновременном наступлении нижестоящих событий (соответствует перемножению их вероятностей для оценки вероятности вышестоящего события). Знак «ИЛИ» означает, что вышестоящее событие может произойти вследствие возникновения одного из нижестоящих событий.

Обычно предполагается, что исследователь, прежде чем приступить к построению дерева неисправностей, тщательно изучает систему. Поэтому описание системы должно быть частью документации, составленной в ходе такого изучения.

В зависимости от конкретных целей анализа дерева неисправностей для построения последнего специалисты по надёжности обычно используют либо метод первичных отказов, либо метод вторичных отказов, либо метод инициированных отказов.

Метод первичных отказов. Отказ элемента называется первичным, если он происходит в расчётных условиях функционирования системы. Построение дерева неисправностей на основе учёта лишь первичных отказов не представляет большой сложности, так как дерево строится только до той точки, где идентифицируемые первичные отказы элементов вызывают отказ системы. Для иллюстрации этого метода рассмотрим следующий пример

Метод инициированных отказов. Подобные отказы возникают при правильном использовании элемента, но в неустановленное время или в неполюженном месте. Другими словами, инициированные отказы – это сбои операций координации событий на различных уровнях дерева неисправностей: от первичных отказов до завершающего события (нежелательного либо конечного).

Качественная и количественная оценка «дерева отказов»

Излагаемый ниже подход основан на использовании так называемых минимальных сечений дерева неисправностей.

Сечение определяется как множество элементарных событий, приводящих к нежелательному исходу. Если из множества событий, принадлежащих некоторому сечению, нельзя исключить ни одного и в то же время это множество событий приводит к нежелательному исходу, то в этом случае говорят о наличии минимального сечения. Выявление минимальных сечений требует больших затрат времени, и для их нахождения требуется машинный алгоритм. Пример качественной оценки «дерева отказов» представлен на рис. 18

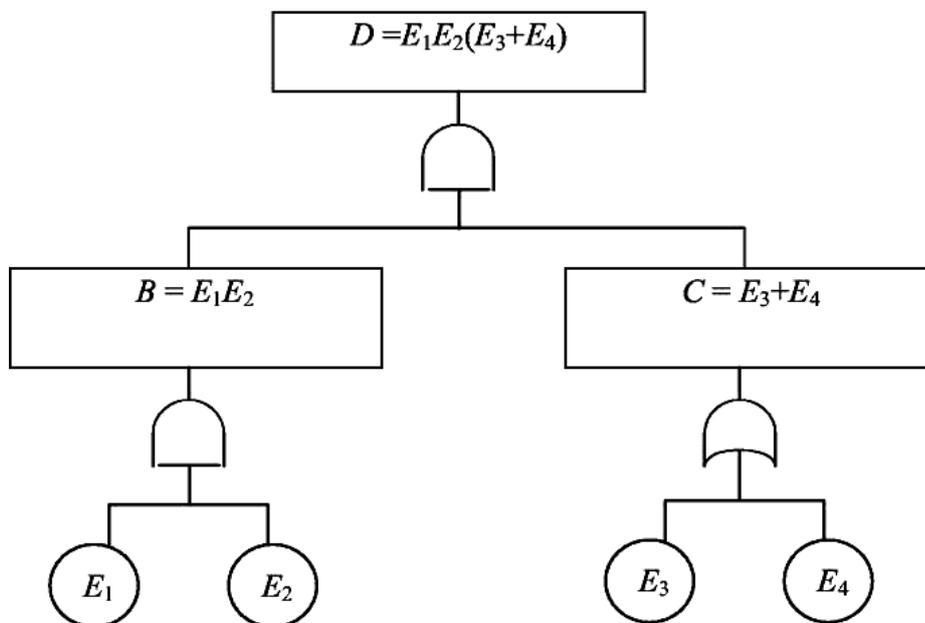


Рисунок 18 – Дерево отказов

Количественная оценка производится на основании информации о таких количественных показателях надёжности для завершающего события, как вероятность отказа, интенсивность отказов или интенсивность восстановлений. Вначале вычисляют показатели надёжности элемента, затем находят критический путь и, наконец, оценивают завершающее событие.

Количественная оценка дерева осуществляется либо методом статического моделирования, либо аналитическим методом.

В первом случае дерево неисправностей моделируется на ЭВМ обычно для нескольких тысяч или даже миллионов циклов функционирования системы. При этом основными этапами моделирования являются:

- задание показателей надёжности для элементарных событий;
- представление всего дерева неисправностей на цифровой ЭВМ;
- составление перечня отказов, приводящих к завершающему событию, и перечня соответствующих минимальных сечений;
- вычисление требуемых конечных результатов.

Во втором случае используют существующие аналитические методы.

Аналитический вывод для простых схем «дерева отказов»

Для того чтобы дерево неисправностей отвечало своему назначению, в нём используются схемы, показывающие логические связи между отказами основных элементов системы и завершающим событием. Для представления этих логических схем в математической форме применяются основные законы булевой алгебры.

Схема «ИЛИ». Любой из этих символов показывает объединение событий, связанных со схемой «ИЛИ». Математическое описание схем «ИЛИ» с двумя событиями на входе дано на рис. 19.

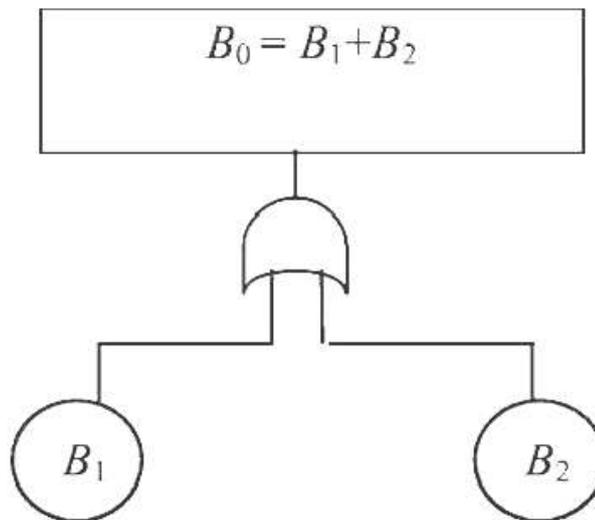


Рисунок 19 – Схема «ИЛИ» с двумя выходами

Событие B_0 на выходе схемы «ИЛИ» записывается в булевой алгебре

$$B_0 = B_1 + B_2$$

где B_1 и B_2 – события на входе.

Схема «И» изображается символом $*$ или \cap . Этот символ обозначает пересечение событий. Схема «И» с двумя входами показана на рис. 19. Событие B_0 на выходе схемы «И» записывается в булевой алгебре как

$$B_0 = B_1 B_2$$

Схема «И» с приоритетом логически эквивалентна схеме «И», но отличается от неё тем, что события на её входе должны происходить в определённом порядке. Схема «И» с приоритетом, имеющая два входа, показана на рис. 20. В данном случае предполагается, что событие A_1 должно наступить раньше события A_2 .

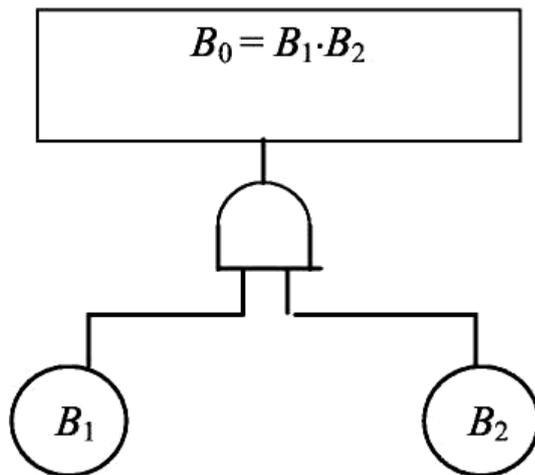


Рисунок 20 – Схема «И» с двумя входами

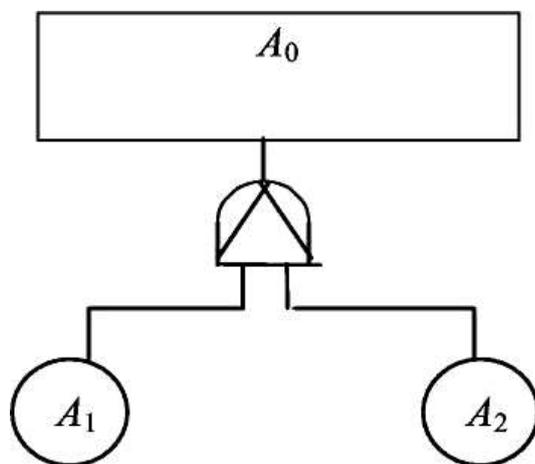


Рисунок 21 – Приоритетная схема «И» с двумя входами

«Дерево отказов» с повторяющимися событиями

Характерная конфигурация такого дерева неисправностей показана на рис. 22.

В этом случае «дерево неисправностей» можно представить с помощью следующих булевых выражений:

$$T = C \cdot B_0, \quad B_1 = A_1 + A_2$$

$$B_0 = B_1 \cdot B_2, \quad B_2 = A_1 + A_3$$

где A_1, A_2, A_3 и C – элементарные события; B_1, B_2, B_0 – промежуточные события; T – завершающее событие.

Подставляя в первое выражение соотношения для B_0, B_1 и B_2 , получаем

$$T = C(A_1 + A_2)(A_1 + A_3)$$

Согласно рис. 22, отказ A_1 является повторяющимся элементарным событием, поэтому полученное выражение необходимо упростить, используя распределительный закон булевой алгебры.

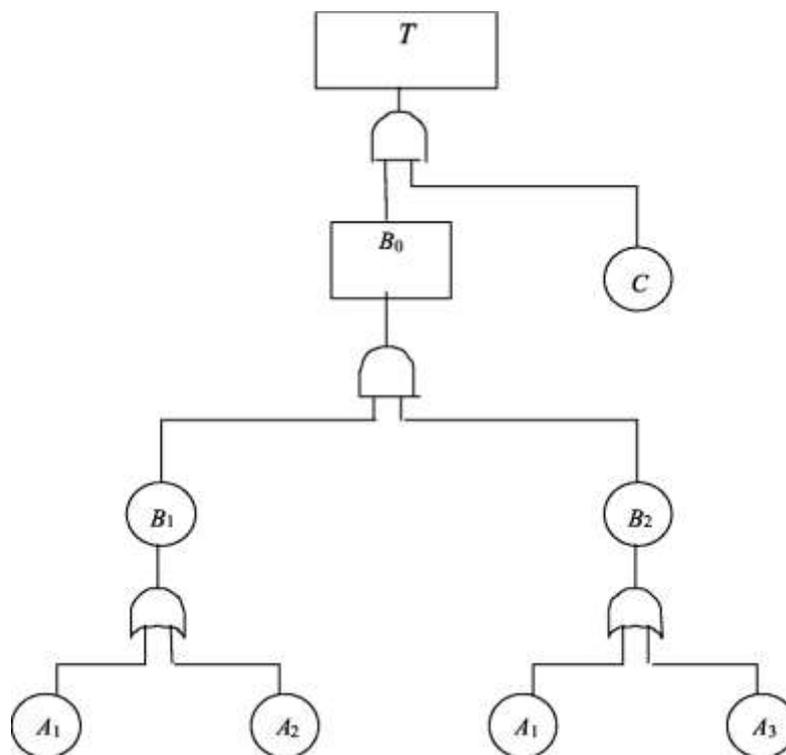


Рисунок 22 – «Дерево отказов» в случае повторяющихся событий

В результате получаем

$$T = C[A_1 + A_2 A_3]$$

и первоначальное «дерево неисправностей» принимает вид, показанный на рис. 23.

Таким образом, прежде чем находить количественные показатели надёжности и риска, следует упростить выражения с повторяющимися событиями, используя свойства булевой алгебры, в противном случае будут получены ошибочные количественные оценки.

Преимущества и недостатки метода «дерева отказов»

Данный метод, как и любой другой, обладает определёнными достоинствами и недостатками. Так, например, метод даёт представление о поведении системы, но требует от специалистов по надёжности глубокого понимания системы и конкретного рассмотрения каждый раз только одного определённого отказа; помогает дедуктивно выявлять отказы; даёт конструкторам, пользователям и руководителям возможность наглядного обоснования конструктивных изменений и анализа компромиссных решений; позволяет выполнять количественный и качественный анализ надёжности; облегчает анализ надёжности

сложных систем. Вместе с тем реализация метода требует значительных затрат средств и времени.

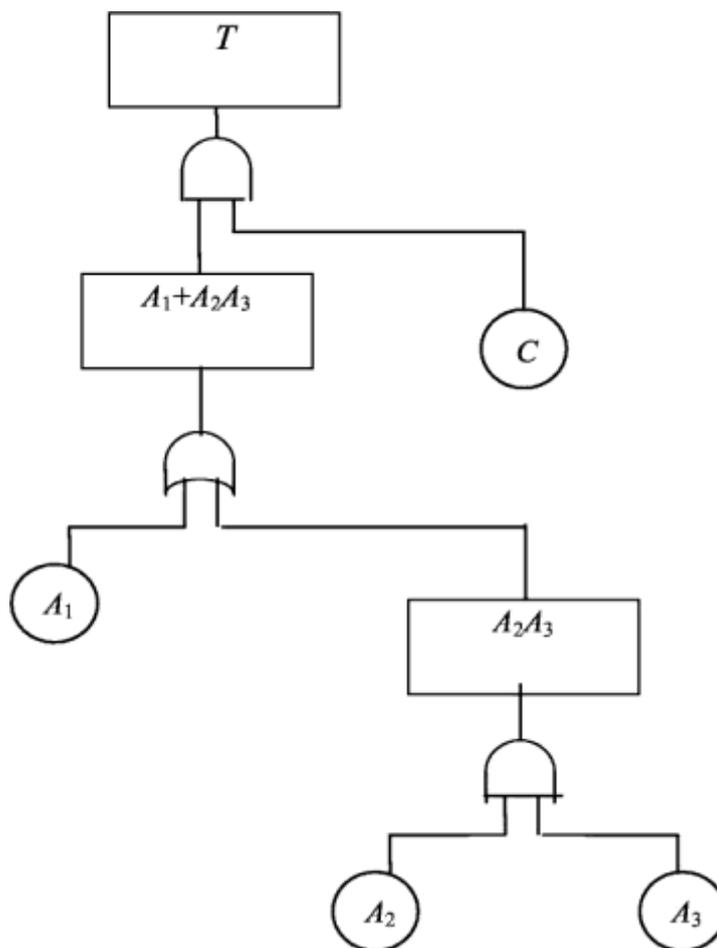


Рисунок 23 – Упрощённое «дерево неисправностей»

Кроме того, полученные результаты трудно проверить и трудно учесть состояния частичного отказа элементов, поскольку при использовании метода, как правило, считают, что система находится либо в исправном состоянии, либо в состоянии отказа. Существенные трудности возникают и при получении в общем случае аналитического решения для деревьев, содержащих резервные узлы и восстанавливаемые узлы с приоритетами, не говоря уже о тех значительных усилиях, которые требуются для охвата всех видов множественных отказов.

14 ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

Пример 1

Допустим, что на испытание поставлено 1000 однотипных электронных ламп. За 3000 ч отказало 80 ламп, требуется определить вероятность безотказной работы $P(t)$ и вероятность отказа $Q(t)$ в течение 3000 ч

Дано:	Решение:
$N = 1000$ шт.	$P(t) = \frac{N - n(t)}{N}$;
$\Delta t = 3000$ ч	$P(t) = \frac{1000 - 80}{1000} = 0,92$
$n = 80$ шт.	$Q(3000) = 1 - P(3000) = 0,08$
Найти:	или
$P(t)$	$Q(3000) = \frac{n(t)}{N} = \frac{80}{1000} = 0,08$.
$Q(t)$	

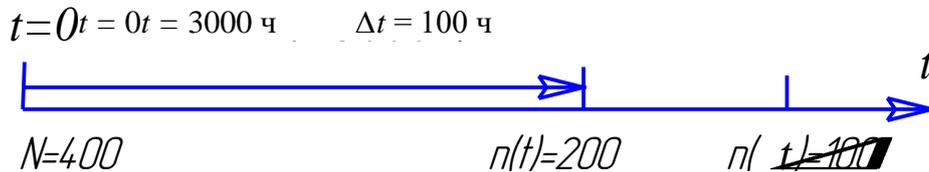
Пример 2

Допустим, что на испытание поставлено 1000 однотипных электронных ламп. За первые 3000 ч отказало 80 ламп, а за интервал времени 3000–4000 ч отказало еще 50 ламп. Требуется определить частоту $f(\Delta t)$ и интенсивность $\lambda(\Delta t)$ отказов электронных ламп в промежутке времени $\Delta t = 3000$ –4000 ч.

Дано:	Решение:
$N = 1000$ шт.	$f(\Delta t_2) = \frac{n(\Delta t_2)}{N \cdot \Delta t_2}$;
$\Delta t_1 = 3000$ ч	$f(\Delta t_2) = \frac{50}{1000 \cdot 1000} = 5 \cdot 10^{-5}$
$n_1 = 80$ шт.	$\lambda(\Delta t_2) = \frac{n(\Delta t_2)}{N_{CP} \cdot \Delta t_2}$,
$\Delta t_2 = [3000, 4000]$	где $N_{CP} = \frac{N_{РАБ\ 1} + N_{РАБ\ 2}}{2}$;
$n_2 = 50$ шт.	$N_{РАБ\ 1} = 1000 - 80 = 920$ шт.;
Найти:	$N_{РАБ\ 2} = 1000 - 130 = 870$ шт.;
$a(\Delta t_2)$	$N_{CP} = \frac{(1000 - 80) + (920 - 50)}{2} = 895$ шт.;
$\lambda(\Delta t_2), \text{ч}^{-1}$.	$\lambda(\Delta t_2) = \frac{50}{895 \cdot 1000} = 5,58 \cdot 10^{-5}$

Пример 3

На испытание поставлено $N_0 = 400$ изделий. За время $t = 3000$ ч отказало $n(t) = 200$ изделий, за интервал $\Delta t = 100$ ч отказало $n(\Delta t) = 100$ изделий. Требуется определить вероятность безотказной работы за 3000 ч, вероятность безотказной работы за 3100 ч, вероятность безотказной работы за 3050 ч, частоту отказов $f(3050)$, интенсивность отказов $\lambda(3050)$.



Дано:

$$N = 400 \text{ шт.}$$

$$t = 3000 \text{ ч}$$

$$n = 200 \text{ шт.}$$

$$\Delta t = 100 \text{ ч}$$

$$n(\Delta t) = 100 \text{ шт.}$$

Найти:

$$P(3000)$$

$$P(3100)$$

$$P(3050)$$

$$f(3050)$$

$$f(3000)$$

$$f(3100)$$

$$\lambda(3000)$$

$$\lambda(3050)$$

$$\lambda(3100)$$

Решение:

Вероятность безотказной работы определяется по формуле

$$P(t) = \frac{N - n(\Delta t)}{N}$$

Для $t = 3000$ ч (начало интервала)

$$P(3000) = \frac{N_0 - n(3000)}{N_0} = \frac{400 - 200}{400} = 0,5$$

Для $t = 3100$ ч (конец интервала)

$$P(3100) = \frac{N_0 - n(3100)}{N_0} = \frac{400 - 300}{400} = 0,25$$

Среднее время исправно работающих изделий в интервале

Δt :

$$N_{cp} = \frac{N_t + N_{t+1}}{2} = \frac{200 + 100}{2} = 150$$

Число изделий, отказавших за время $t = 3050$ ч:

$$n(3050) = N_0 - N_{cp} = 400 - 150 = 250$$

$$P(3050) = \frac{400 - 250}{400} = 0,375$$

Определяется частота отказа:

$$f(3050) = \frac{n(\Delta t)}{N \cdot \Delta t}; \quad f(3050) = \frac{100}{400 \cdot 100} = 0,0025 = 2,5 \cdot 10^{-4} \text{ ч}^{-1}$$

Так же определяется частота отказов за интервалы 3000 и 3100 ч, причем началом интервалов является $t = 0$.

$$f(3000) = \frac{200}{400 \cdot 3000} = 0,000167 = 1,67 \cdot 10^{-4}$$

Единица измерения - ч^{-1} ;

$$f(3100) = \frac{300}{400 \cdot 3100} = 0,00024 = 2,4 \cdot 10^{-4}$$

Определяется интенсивность отказов:

а) в интервале $\Delta t = 3050$ ч,

$$\lambda(3050) = \frac{n(\Delta t)}{N_{cp} \cdot \Delta t}$$

$$\lambda(3050) = \frac{100}{150 \cdot 100} = 0,0067 = 6,7 \cdot 10^{-3}$$

Единица измерения - ч⁻¹;

б) в интервале $\Delta t = 3000$ ч, $N_{cp}(3000) = 400 - 100 = 300$ шт

$$\lambda(3000) = \frac{100}{300 \cdot 3000} = 0,000222 = 2,22 \cdot 10^{-4} \text{ ч}^{-1};$$

в) в интервале $\Delta t = 3100$ ч, $N_{cp}(3100) = 400 - 150 = 250$ шт

$$\lambda(3100) = \frac{100}{250 \cdot 3000} = 0,00039 = 3,9 \cdot 10^{-4}$$

Пример 4.

В течение некоторого периода времени производилось наблюдение за работой одного объекта. За весь период зарегистрировано $n = 15$ отказов. До начала наблюдений объект проработал 258 ч, к концу наблюдения наработка составила 1233 ч. Определить среднюю наработку на отказ t_{cp} .

Дано:

$$n = 15$$

$$t_1 = 258 \text{ ч}$$

$$t_2 = 1233 \text{ ч}$$

Найти:

$$t_{cp}$$

Решение:

Нарботка за указанный период составила

$$\Delta t = t_2 - t_1 = 1233 - 258 = 975 \text{ ч.}$$

Нарботка на отказ по статистическим данным определяется по формуле

$$t_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{n},$$

где t_i – время исправной работы между $(i - 1)$ и i отказами; n – число отказов за некоторое время t .

Приняв $\sum_{i=1}^n t_i = 975$ ч, можно определить среднюю наработку на отказ

$$t_{cp} = \frac{975}{15} = 65 \text{ ч.}$$

Пример 5

Производилось наблюдение за работой трех однотипных объектов. За период наблюдения было зафиксировано по первому объекту 6 отказов, по второму – 11 отказов, третьему – 8 отказов. Нарботка первого объекта $t_1 = 6181$ ч, второго $t_2 = 329$ ч, третьего $t_3 = 245$ ч. Определить наработку объектов на отказ.

Дано:

$N = 3$ шт.

$n_1 = 6$ шт.

$n_2 = 11$ шт.

$n_3 = 8$ шт.

$t_1 = 181$ ч

$t_2 = 329$ ч

$t_3 = 245$ ч

Найти:

t_{cp}

Решение:

1-й вариант решения:

$$t_{cp} = \sum_{i=1}^n t_i / n_i;$$

$$t_{cp} = \frac{T_1 + T_2 + T_3}{n_1 + n_2 + n_3};$$

$$t_{cp} = \frac{181 + 329 + 245}{6 + 11 + 8} = 30,2 \text{ ч};$$

2-й вариант решения:

$$t_{cp1} = \frac{t_1}{n_1}, \quad t_{cp2} = \frac{t_2}{n_2}, \quad t_{cp3} = \frac{t_3}{n_3};$$

$$t_{cp1} = \frac{181}{6} = 30,2 \quad t_{cp2} = \frac{329}{11} = 29,9 \quad t_{cp3} = \frac{245}{8} = 30,6 \text{ ч};$$

$$t_{cp} = (30,2 + 29,9 + 30,6) / 3 = 30,2 \text{ ч}.$$

Как видно, у задачи есть два варианта решения. Первый основан на использовании общей формулы вычисления средней наработки; второй – более детальный: сначала находится средняя наработка для каждого элемента, а среднее значение этих чисел и есть то, что определяется.

Пример 6

За наблюдаемый период эксплуатации в аппаратуре было зафиксировано 8 отказов. Время восстановления составило: $t_1 = 12$ мин, $t_2 = 23$ мин, $t_3 = 15$ мин, $t_4 = 9$ мин, $t_5 = 17$ мин, $t_6 = 28$ мин, $t_7 = 25$ мин, $t_8 = 31$ мин.

Требуется определить среднее время восстановления аппаратуры.

Дано:

$n = 8$ отказов

$t_1 = 12$ мин

$t_2 = 23$ мин

$t_3 = 15$ мин

$t_4 = 9$ мин

$t_5 = 17$ мин

$t_6 = 28$ мин

$t_7 = 25$ мин

$t_8 = 31$ мин

Решение:

$$t_{cp.в} = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{n};$$

$$t_{cp.в} = \frac{12 + 23 + 15 + 9 + 17 + 28 + 25 + 31}{8} = 20 \text{ мин}.$$

Найти:

$t_{cp.в}$

Пример 7

Аппаратура имела среднюю наработку на отказ $t_{cp} = 65$ ч и среднее время восстановления $t_в = 1,25$ ч. Требуется определить коэффициент готовности $K_г$.

Дано:

$t_{cp} = 65$ ч

$t_в = 1,25$ ч

Решение:

$$K_г = \frac{t_{cp}}{t_{cp} + t_в};$$

$$K_г = \frac{65}{65 + 1,25} = 0,98.$$

Найти:

$K_г$

Пример 8

Пусть время работы элемента до отказа подчинено экспоненциальному закону $\lambda = 2,5 \cdot 10^{-5} \text{ ч}^{-1}$. Требуется определить вероятность безотказной работы $P(t)$, частоту отказов $f(t)$ и среднюю наработку на отказ t_{cp} , если $t = 500, 1000, 2000$ ч.

Дано:

$\lambda = 2,5 \cdot 10^{-5} \text{ ч}^{-1}$

$t_1 = 500$ ч

$t_2 = 1000$ ч

$t_3 = 2000$ ч

Решение:

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

$$P(t_1) = e^{-2,5 \cdot 0,00001 \cdot 500} = 0,98;$$

$$P(t_2) = e^{-2,5 \cdot 0,00001 \cdot 1000} = 0,97;$$

$$P(t_3) = e^{-2,5 \cdot 0,00001 \cdot 2000} = 0,95;$$

Найти:

$P(t)$

$f(t)$

$t_{cp}, \text{ ч}$

$$f(t) = \lambda \cdot P(t);$$

$$f(t_1) = 2,5 \cdot 10^{-5} \cdot 0,98 = 2,45 \cdot 10^{-5} \text{ ч}^{-1};$$

$$f(t_2) = 2,5 \cdot 10^{-5} \cdot 0,97 = 2,425 \cdot 10^{-5} \text{ ч}^{-1};$$

$$f(t_3) = 2,5 \cdot 10^{-5} \cdot 0,95 = 2,375 \cdot 10^{-5} \text{ ч}^{-1};$$

$$t_{cp} = \frac{1}{\lambda};$$

$$t_{cp} = \frac{1}{2,5 \cdot 10^{-5}} = 4 \cdot 10^4$$

Пример 9

Известно, что интенсивность отказов $\lambda = 0,02 \text{ ч}^{-1}$, а среднее время восстановления $t_B = 10 \text{ ч}$. Требуется вычислить коэффициент готовности и функцию готовности изделия.

Дано:

$$t_B = 10 \text{ ч}$$

$$\lambda = 0,02 \text{ ч}^{-1}$$

Найти:

$$K_G$$

$$P_G$$

Решение:

Коэффициент готовности изделия определяется по формуле

$$K_G = \frac{T_{cp}}{T_{cp} + t_B}.$$

Средняя наработка до первого отказа равна $t_{cp} = 1/\lambda$.

Тогда

$$K_G = \frac{1/\lambda}{1/\lambda + t_B}, K_G = \frac{1/0,02}{1/0,02 + 10} = 0,83.$$

Функция готовности изделия определяется по формуле

$$P_G(t) = K_G + (1 - K_G)e^{-t/K_G t_B},$$

где t – любой момент времени, при $t = 0$ система находится в исправном состоянии.

$$P_G(t) = 0,83 + (1 - 0,83)e^{-t/0,83 \cdot 10} = 0,83 + 0,17e^{-0,12t}.$$

Пример 10

Система состоит из 12 600 элементов, средняя интенсивность отказов которых $\lambda_{cp} = 0,32 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$.

Необходимо определить вероятность безотказной работы в течение $t = 50 \text{ ч}$.

Дано:

$$N = 12\,600$$

$$\lambda_{cp} = 0,32 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$$

$$t = 50 \text{ ч}$$

Найти:

$$P(t)$$

Решение:

Интенсивность отказов системы определяется по формуле

$$\lambda_c = \lambda_{cp} N = 0,32 \cdot 10^{-6} \cdot 12\,600 = 4,032 \cdot 10^{-3} \text{ ч}^{-1}.$$

Вероятность безотказной работы по экспоненциальному закону равна:

$$P(50) = e^{-\lambda_c t} = e^{-4,032 \cdot 10^{-3} \cdot 50} \approx 0,82.$$

Пример 11

Система состоит из $N = 5$ блоков. Надежность блоков характеризуется вероятностью безотказной работы в течение времени t , которая равна: $p_1(t) = 0,98$; $p_2(t) = 0,99$; $p_3(t) = 0,97$; $p_4(t) = 0,985$; $p_5(t) = 0,975$.

Требуется определить вероятность безотказной работы системы.

<p>Дано:</p> <p>$N = 5$</p> <p>$p_1(t) = 0,98$</p> <p>$p_2(t) = 0,99$</p> <p>$p_3(t) = 0,97$</p> <p>$p_4(t) = 0,985$</p> <p>$p_5(t) = 0,975$</p>	<p>Решение:</p> <p>Необходимо воспользоваться формулой для определения безотказной работы системы:</p> $P_c(t) = \prod_{i=1}^N p_i(t) = 0,98 \cdot 0,99 \cdot 0,97 \cdot 0,985 \cdot 0,975 = 0,904.$ <p>Вероятности $p_1(t), p_2(t), p_3(t), p_4(t), p_5(t)$ близки к единице, поэтому вычислить $P_c(t)$ удобно, пользуясь приближенной формулой.</p> <p>В данном случае $q_1 = 0,02; q_2 = 0,01; q_3 = 0,03; q_4 = 0,015; q_5 = 0,025$. Тогда</p> $P_c(t) = \prod_{i=1}^5 p_i(t) \approx 1 - \sum_{i=1}^5 q_i(t) = 1 - (0,02 + 0,01 + 0,03 + 0,015 + 0,025) = 0,9.$
<p>Найти:</p> <p>$P_c(t)$</p>	

Пример 12

Система состоит из трех устройств. Интенсивность отказов электронного устройства равна $\lambda_1 = 0,16 \cdot 10^{-3} \text{ ч}^{-1} = \text{const}$. Интенсивности отказов двух электро-механических устройств линейно зависят от времени и определяются следующими формулами: $\lambda_2 = 0,23 \cdot 10^{-4} t \text{ ч}^{-1}$, $\lambda_3 = 0,06 \cdot 10^{-6} t^{2,6} \text{ ч}^{-1}$.

Нужно рассчитать вероятность безотказной работы изделия в течение 100 ч.

<p>Дано:</p> <p>$N = 3$</p> <p>$\lambda_1 = 0,16 \cdot 10^{-3} \text{ ч}^{-1}$</p> <p>$\lambda_2 = 0,23 \cdot 10^{-4} t \text{ ч}^{-1}$</p> <p>$\lambda_3 = 0,06 \cdot 10^{-6} t^{2,6} \text{ ч}^{-1}$</p> <p>$t = 100 \text{ ч}$</p>	<p>Решение:</p> <p>Так как $\lambda \neq \text{const}$, то на основании формулы</p> $P_c(t) = \exp\left(-\sum_{i=1}^N \int_0^t \lambda_i(t) dt\right)$ <p>можно написать</p> $P_c(t) = \exp\left\{-\left[\int_0^t \lambda_1(t) dt + \int_0^t \lambda_2(t) dt + \int_0^t \lambda_3(t) dt\right]\right\} =$ $= \exp\left[-\left(\lambda_1 t + 0,23 \cdot 10^{-4} \frac{t^2}{2} + 0,06 \cdot 10^{-6} \frac{t^{3,6}}{3,6}\right)\right],$
<p>Найти:</p> <p>$P(t)$</p>	

при $t = 100 \text{ ч}$

$$P_c(100) = \exp\left[-\left(0,16 \cdot 10^{-3} \cdot 100 + 0,23 \cdot 10^{-4} \frac{100^2}{2} + 0,06 \cdot 10^{-6} \frac{100^{3,6}}{3,6}\right)\right] \approx 0,33.$$

Пример 13

Система состоит из трех блоков, средняя наработка до первого отказа которых равна $T_1=160$ ч, $T_2= 320$ ч, $T_3= 600$ ч. Для блоков справедлив экспоненциальный закон надежности.

Требуется определить среднюю наработку до первого отказа системы.

Дано:

$$N = 3$$

$$T_1 = 160 \text{ ч}$$

$$T_2 = 320 \text{ ч}$$

$$T_3 = 600 \text{ ч}$$

Найти:

$$t_{cp.c}$$

Решение:

Согласно экспоненциальному закону $P(t) = \exp(-\lambda t)$.

Интенсивность отказов системы:

$$\lambda_c = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 = \frac{1}{T_1} + \frac{1}{T_2} + \frac{1}{T_3}.$$

Средняя наработка до первого отказа системы:

$$t_{cp.c} = \frac{1}{\lambda_c},$$

следовательно,

$$t_{cp.c} = \frac{1}{\frac{1}{T_1} + \frac{1}{T_2} + \frac{1}{T_3}} = \frac{1}{\frac{1}{160} + \frac{1}{320} + \frac{1}{600}} \approx 91 \text{ ч.}$$

Пример 14

Система состоит из двух устройств. Вероятности безотказной работы каждого из них в течение времени $t= 100$ ч равны: $p_1(100) = 0,95$; $p_2(100) = 0,97$. Справедлив экспоненциальный закон надежности. Необходимо найти среднюю наработку до первого отказа системы $t_{cp.c}$.

Дано:

$$N = 2$$

$$t = 100 \text{ ч}$$

$$p_1(100) = 0,95$$

$$p_2(100) = 0,97$$

Найти:

$$t_{cp.c}$$

Решение:

Определяется вероятность безотказной работы изделия:

$$P_c(100) = p_1(100) \cdot p_2(100) = 0,95 \cdot 0,97 = 0,92.$$

Определяется интенсивность отказов изделия по формуле

$$P_c(100) = e^{-\lambda_c t} = e^{-\lambda_c 100};$$

$$\lambda_c = -\frac{\ln 0,92}{100} = 8,3 \cdot 10^{-4}$$

$$t_{cp.c} = \frac{1}{\lambda_c} = \frac{1}{8,3 \cdot 10^{-4}} \approx 1205$$

Пример 15

Вероятность безотказной работы одного элемента в течение времени t равна $p(t) = 0,9997$. Требуется определить вероятность безотказной работы системы, состоящей из $N = 100$ таких же элементов.

Дано:
 $p(t) = 0,9997$
 $N = 100$

Решение:

1-й вариант решения:

Если у всех элементов системы одинаковая надежность,

то

$$P_c(t) = p^N(t) = (0,9997)^{100} = 0,9704.$$

2-й вариант решения:

Так как вероятность $P_c(t)$ близка к единице, то можно воспользоваться следующей формулой:

$$P_c(t) = 1 - Q_c(t).$$

Для одного элемента системы:

$$q(t) = 1 - p(t) = 1 - 0,9997 = 0,0003; \text{т.е.}$$

$$Q_c(t) = N \cdot q(t) = 100 \cdot 0,0003 = 0,03.$$

Из $P_c(t) + Q_c(t) = 1$ следует $P_c(t) = 1 - 0,03 = 0,97$.

Получается, что первый вариант решения более точен.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время трудно представить себе высококвалифицированного специалиста в области техносферной безопасности, не обладающего навыками в оценке надёжности технологического оборудования и техногенного риска.

В учебном пособии рассмотрены основные положения теории надёжности технических систем и техногенного риска, элементы физики отказов, структурные схемы надёжности технических систем и их расчёт. Приведены методологии анализа и оценки техногенного риска. Курс направлен на формирование ключевых компетенций, необходимых для эффективного решения профессиональных задач и организации профессиональной деятельности, а так же при выполнении курсового проектирования и выпускной квалификационной работы

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Абиев, Р. Ш.** Надежность механического оборудования и комплексов : учебник для студентов ВПО по направлению "Строительство" / Р. Ш. Абиев, В. Г. Струков . - СПб. : Проспект Науки, 2012. - 224 с. - ISBN 978-5-903090-78-5
2. **Корчагин, А. Б.** Надежность технических систем и техногенный риск : учеб. пособие : в 2 ч. / А. Б. Корчагин, В. С. Сердюк, А. И. Бокарев. – Омск : Изд-во ОмГТУ, 2011. ISBN 978-5-8149-1066-0 Ч. 1 : Основы теории. – 228 с. : ил.
3. **Малафеев, С. И.** Надежность технических средств : учеб. пособие для студ. вузов по напр. подготовки 200100 "Приборостроение" спец. 200103 "Авиационные приборы и измерительно-вычислительные комплексы"; рек. УМО / С. И. Малафеев, А. И. Копейкин. - СПб. : Лань, 2012. - 313 с. : ил. - (Учебники для вузов. Специальная литература). - ISBN 978-5-8114-1268-6.
4. **Питухин, А.В.** Надежность лесозаготовительных машин и оборудования [Комплект] : учебное пособие / А. В. Питухин, В. Н. Шиловский, В. М. Костюкевич. - СПб. : Лань, 2010. - 288 с., 1 эл. опт. диск (CD-ROM). - (Учебники для вузов. Специальная литература.). - ISBN 978-5-8114-0990-7.
5. **Шлапак, В. П.** Управление надежностью машин : учебное пособие ФГБОУ ВПО (МАДИ) к использованию в образовательных учреждениях, по направлению подготовки магистров 110800.68 - Агроинженерия / ФГБОУ ВПО СГАУ им. Н.И. Вавилова ; сост.: В. П. Шлапак, В. В. Сафонов, В. В. Венскаяйтис. - Саратов : ФГБОУ ВПО "Саратовский ГАУ", 2014. - 468 с. - ISBN 978-5-7011-0780-7
6. **Шишмарев, В. Ю.** Диагностика и надежность автоматизированных систем : учебник для студентов учреждений высш. проф. образования / В. Ю. Шишмарев. - М. : Издательский центр " Академия ", 2013. - 352 с. - (Бакалавриат). - ISBN 978-5-7695-6919-7
7. **Шубин, Р.А.** Надёжность технических систем и техногенный риск : учебное пособие / Р.А. Шубин. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2012 – 80 с. – 50 экз. – ISBN 978-5-8265-1086-5.
8. **Юркевич, В.В.** Надежность и диагностика технологических систем [Текст]: учебник для студ. вузов (доп. МОН РФ) / В. В. Юркевич, А. Г. Схиртладзе. - М.: Академия, 2011. - 304 с. : ил. - ISBN 978-5-7695-5990-7.