

**В. В. Пеленко
А. А. Верхованцев
В. В. Нечитайлов**

**НАДЕЖНОСТЬ СИСТЕМ ПРОИЗВОДСТВА
ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ И ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ**

Учебное пособие

**Санкт-Петербург
2023**

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

**В. В. Пеленко
А. А. Верхоланцев
В. В. Нечитайлов**

НАДЕЖНОСТЬ СИСТЕМ ПРОИЗВОДСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ И ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ

Учебное пособие

Утверждено Редакционно-издательским советом ВШТЭ СПбГУПТД

Санкт-Петербург
2023

УДК 620.19 (075)

ББК 31.38я7

П 246

Рецензенты:

заместитель директора департамента образования СПбГЭТУ «ЛЭТИ»,

кандидат технических наук, доцент

А. Г. Волков;

доцент кафедры автоматизированного электропривода и электротехники

Высшей школы технологии и энергетики Санкт-Петербургского

государственного университета технологий и дизайна, кандидат технических наук, доцент

В. П. Иваненко

Пеленко, В. В.

П 246 Надежность систем производства электрической и тепловой энергии:
учеб. пособие / В. В. Пеленко, А. А. Верхоланцев, В. В. Нечитайлов. —
СПб.: ВШТЭ СПбГУПТД, 2023. — 75 с.

ISBN978-5-91646-247-0

Учебное пособие соответствует программам и учебным планам дисциплины «Надежность систем производства электрической и тепловой энергии» для студентов, обучающихся по направлению подготовки 13.04.01 «Теплоэнергетика и теплотехника», профиль: «Технология производства электрической и тепловой энергии».

В пособии рассматриваются основные понятия и определения теории надежности, физическая сущность и закономерности изменения технического состояния теплоэнергетического оборудования; факторы, определяющие интенсивность накопления повреждений; методы получения и анализа информации об отказах и неисправностях.

Учебное пособие может быть полезно для бакалавров направления 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника», профиль: «Технология производства электрической и тепловой энергии», а также для аспирантов и инженерно-технических работников предприятий теплоэнергетического комплекса.

ISBN 978-5-91646-247-0

УДК 620.19 (075)

ББК 31.38я7

© ВШТЭ СПбГУПТД, 2023

© Пеленко В. В., Верхоланцев А. А.,
Нечитайлов В. В., 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ТЕМА 1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ	6
1.1. Особенности понятия надежности	6
1.2. Этапы становления и направления развития надежности	7
1.3. Экономическая оценка уровня надежности	9
ТЕМА 2. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ, ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ.....	10
ТЕМА 3. ОСНОВНЫЕ ЗАКОНЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОТКАЗОВ КАК СЛУЧАЙНЫХ СОБЫТИЙ	21
3.1. Виды математического описания случайных величин	21
3.2. Основные законы распределения непрерывных случайных величин	21
3.3. Распределение Герца.....	31
3.4. Основные законы распределения дискретных случайных величин	35
ТЕМА 4. ПОКАЗАТЕЛИ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК И ИХ ЭЛЕМЕНТОВ.....	36
4.1. Единичные показатели надежности.....	37
4.2. Интенсивность отказов.....	39
4.3. Средняя наработка до отказа.....	41
4.4. Гамма-процентная наработка до отказа.....	42
4.5. Параметр потока отказов.....	43
4.6. Средняя наработка на отказ.....	45
ТЕМА 5. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОЖИДАНИЕ И ДИСПЕРСИЯ СЛУЧАЙНОЙ ВЕЛИЧИНЫ.....	46
5.1. Математическое ожидание дискретной случайной величины.....	46
5.2. Математическое ожидание непрерывной случайной величины.....	47
5.3. Дисперсия дискретной и непрерывной случайной величины.....	47
ТЕМА 6. ХАРАКТЕРИСТИКИ РЕМОНТОПРИГОДНОСТИ И ДОЛГОВЕЧНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ.....	48
6.1. Показатели ремонтпригодности	48
6.1.1. Закон восстановления объекта.....	48
6.1.2. Интенсивность восстановления.....	50
6.1.3. Среднее время восстановления.....	50
6.2. Показатели долговечности	51
6.2.1. Закон долговечности объекта	51
6.2.2. Средний ресурс и средний срок службы оборудования	52
6.2.3. Гамма-процентные ресурс и срок службы	53
6.2.4. Назначенные ресурс и срок службы оборудования.....	53
6.2.5. Установленные ресурс и срок службы оборудования.....	54
6.3. Комплексные показатели надежности	54
6.3.1. Коэффициент готовности объекта.....	54
6.3.2. Коэффициент оперативной готовности	55
6.3.3. Коэффициент технического использования объекта	56

ТЕМА 7. МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ БЕЗОТКАЗНОСТИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ	57
7.1. Классификация методов расчета надежности.....	58
7.2. Конкретные методы расчета надежности при проектировании.....	61
7.2.1. Последовательное (основное) соединение элементов	61
7.2.2. Параллельное соединение элементов	62
7.2.3. Метод ключевых элементов.....	63
7.3. Метод Марковского моделирования.....	63
ТЕМА 8. РЕЗЕРВИРОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ. ОБЩИЕ МЕТОДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЁЖНОСТИ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ	64
8.1. Основные понятия резервирования.....	64
8.2. Типовые структуры расчета надёжности	68
8.2.1. Расчёт надёжности, основанный на использовании параллельно-последовательных структур	69
8.2.2. Включение резервного оборудования системы замещением.....	70
ТЕМА 9. МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ БЕЗОТКАЗНОСТИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК В ЭКСПЛУАТАЦИИ	71
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	74
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	75

ВВЕДЕНИЕ

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

Дисциплина «Надежность систем производства электрической и тепловой энергии» рассматривает общие вопросы надежности электроэнергетических систем (ЭЭС). Общая проблема надежности ЭЭС и их элементов связана с вопросами определения и оптимизации показателей надежности объектов на стадиях проектирования, изготовления и эксплуатации.

Основная цель дисциплины «Надежность систем производства электрической и тепловой энергии» – изложение основ теории надежности и методов их практического применения для расчета надежности схем соединений комплектующих элементов и энергосистем в целом. Решение основных задач надежности электроэнергетических систем предусматривает достижение оптимального соотношения между затратами на производство, транспортировку и распределение тепловой и электрической энергии и технико-экономическими последствиями от их недоотпуска. Сказанное предполагает, в первую очередь, расчет, анализ и достоверное прогнозирование показателей надежности электроэнергетических систем и узлов энергопотребления.

Основными задачами настоящего курса является освоение основных понятий современной теории надежности, формирование представлений о том, какими должны быть надежные теплоэнергетические объекты и их элементы, а также формирование представлений и знаний о том, как обеспечить надежность функционирования электроэнергетических и теплоэнергетических систем.

ТЕМА 1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Одной из основных проблем общего машиностроения, включая теплоэнергетическое, является проблема надежности, определяющая не только качество технических систем, но и их эффективность.

Надежность является важнейшей технической характеристикой качества объекта. *Надежность* как комплексное свойство изделий оценивается вероятностными характеристиками, основанными на статистической обработке экспериментальных данных по безотказности, долговечности, ремонтпригодности, сохраняемости.

Усложнение машин и повышение требований к их функциональным возможностям приводит к повышению требований и к их надежности (безотказности, долговечности, ремонтпригодности, сохраняемости).

Основное противоречие в развитии современной техники заключается в том, что если не предпринимать необходимые меры по повышению надежности, то чем сложнее, быстрее и точнее обеспечивается требуемая работа техники, тем ниже ее надежность (если не заниматься их сохранением) и выше экономические потери, обусловленные учащающимися отказами в работе, сбоями и неисправностями. Отсюда следует, что решение проблемы надежности является не только важной технической, но и значимой экономической задачей.

В настоящее время во всем мире промышленность несет огромные потери из-за недостаточной надежности и долговечности машин. Это обусловлено тем, что на каждую машину при изготовлении, за весь период ее эксплуатации на проведение ремонтов и технических обслуживаний затрачивается средств в 2–3 раза больше, чем стоимость ее создания. Поэтому проблеме качества и *надежности* придается первостепенное значение, и задача повышения надежности лежит в основе разработок, связанных с созданием новых высококачественных машин, оборудования и приборов теплоэнергетического комплекса.

1.1. Особенности понятия надежности

Особенностью понятия и проблемы надежности является ее связь со всеми этапами проектирования, изготовления и использования изделия. Каждый из этих этапов вносит свою лепту в решение сложной задачи создания изделия требуемого уровня надежности с наименьшими затратами средств и времени.

При проектировании и расчете изделия в его структуру закладываются параметры, обеспечивающие требуемый уровень надежности. При этом надежность определяется структурой и конструктивным устройством машины и ее узлов, зависит от применяемых материалов, методов защиты от различных вредных воздействий, системы смазки, приспособленности к ремонтам и обслуживанию, а также от других характеристик и особенностей.

При изготовлении изделия обеспечивается его надежность. Она зависит от качества изготовленных деталей, методов контроля выпускаемой продукции, возможностей управления ходом технологического процесса, от качества сборки изделия и его узлов, методов испытания готовой продукции и других показателей и характеристик технологического процесса.

При эксплуатации изделия реализуется его надежность. Показатели безотказности и долговечности проявляются в явной форме только в процессе использования машины и зависят от методов и условий эксплуатации изделия, принятой системы его ремонтов и методов технического обслуживания, режимов работы и других эксплуатационных факторов.

1.2. Этапы становления и направления развития надежности

Надежность, как всякая отрасль науки, возникла и развивается непрерывно и последовательно. История ее развития характеризуется четырьмя основными этапами.

Первый этап (1950-е годы) характеризуется становлением направлений и формированием задач исследований. Положено начало систематическому изучению долговечности и безотказности изделий, сформулированы требования к их количественным показателям.

Второй этап (1960-е годы) характеризуется формулированием классической теории надежности. Для этого периода характерно начало изучения долговечности и безотказности механических систем на стадии проектирования; разработка методов расчета элементов изделий с учетом статистических данных о надежности, нормирование показателей безотказности и долговечности.

Третий этап (1970-е годы) характеризуется системным подходом к анализу надежности изделий с учетом технико-экономических показателей, перспектив развития техники. Разрабатываются и находят применение в ряде отраслей машиностроения методы управления долговечностью и безотказностью изделий в эксплуатации, основанные на анализе статистических данных об отказах сборочных единиц с учетом затрат на обеспечение их работоспособного состояния.

Четвертый этап (1980–90 годы) характеризуется разработкой и внедрением комплекса мероприятий по обеспечению долговечности и безотказности основных элементов при конструировании, изготовлении и эксплуатации изделий. Эти мероприятия разработаны на основе результатов анализа физической сущности и закономерностей изменения процессов, происходящих в элементах изделий в период их эксплуатации.

Вопросы надежности разрабатываются и в настоящее время, что позволяет формулировать основные положения науки о надежности машин и определить ее место среди других отраслей знаний. Наука о надежности изучает закономерности изменения показателей качества изделий и систем и на основе этого разрабатывает методы, обеспечивающие с наименьшей затратой

средств и времени необходимую продолжительность и безотказность их работы.

Надежность, как наука, должна *дать исчерпывающие ответы на основные вопросы, поставленные перед ней практикой эксплуатации* изделий:

- сколько времени изделие сможет проработать без отказов?
- сколько отказов может произойти за определенный промежуток времени?
- как нужно спроектировать и изготовить изделие, чтобы оно было оптимально надежным?
- как следует эксплуатировать изделие (периодичность обслуживания, объем ремонтов, количество запасных частей) для того, чтобы оно было надежным?

В начальные периоды развития наука и исследования по надежности развивались по двум направлениям.

Первое направление возникло в радиоэлектронике и связано с развитием математических методов оценки надежности, особенно применительно к сложным системам, со статической обработкой эксплуатационной информации, с разработкой структур сложных систем, обеспечивающих высокий уровень надежности.

Второе направление возникло в машиностроении и связано с изучением физики отказов (износа, усталостной прочности, коррозии), с разработкой методов расчета на прочность, износ, теплостойкость и др., с применением технологических приемов, обеспечивающих необходимую надежность изделия.

В дальнейшем начался и осуществляется процесс взаимного слияния этих двух направлений, перенесение рациональных идей из одной области в другую и формирование на этой основе единой науки о надежности изделий.

Как всякая прикладная отрасль знаний наука о надежности базируется на фундаментальных математических и естественных науках.

Первой теоретической основой науки о надежности являются математические методы теории вероятностей и математической статистики.

Второй теоретической основой науки о надежности являются результаты исследований естественных наук, изучающих физико-химические процессы разрушения, старения и изменения свойств материалов, из которых изготовлены изделия или которые необходимы для их функционирования (топливо, смазочные материалы и т.п.). Сюда же относятся науки, изучающие виды механических разрушений материалов (сопротивление материалов, теория ползучести), изменения, происходящие в материалах и их поверхностных слоях (физико-химическая механика, триботехника), химические процессы разрушения в материалах (коррозия металлов, старение полимеров) и другие.

Теория надежности использует все те достижения в области расчета и проектирования изделий данного типа, а также технологии их изготовления, которые включают зависимости, характеризующие связь показателей качества с факторами, меняющимися в процессе эксплуатации и производства изделий. *Например*, уравнения и зависимости, описывающие рабочий процесс машины, возникающие динамические нагрузки, законы перемещения рабочих органов,

КПД и др., необходимые для математического описания изменения начальных показателей машины и их анализа.

1.3. Экономическая оценка уровня надежности

Оценка достигнутого уровня надежности и необходимость его повышения должна решаться в первую очередь с экономических позиций, поскольку экономика является основным критерием для решения большинства практических вопросов надежности. Современный уровень развития техники позволяет достичь практически любых показателей надежности изделия, но все дело заключается в затратах на достижение поставленной цели. Эти затраты могут быть так высоки, что эффект от повышения надежности машины не возместит их и суммарные затраты от проведенных мероприятий будет отрицательным.

В общем случае изменение во времени суммарного экономического эффекта при эксплуатации изделия складывается под влиянием двух основных факторов (рис.1.1).

Затраты $Q_{и}$ и $Q_{э}(t)$ являются отрицательными в балансе эффективности.

Затраты $Q_{и}$ представляют собой затраты на изготовление нового изделия, включая его проектирование, изготовление, испытание, отладку, транспортирование к месту работы. Затраты $Q_{э}(t)$ представляют затраты на эксплуатацию, включая техническое обслуживание, ремонты, профилактические мероприятия – все то, что связано с поддержанием и восстановлением работоспособности изделия.

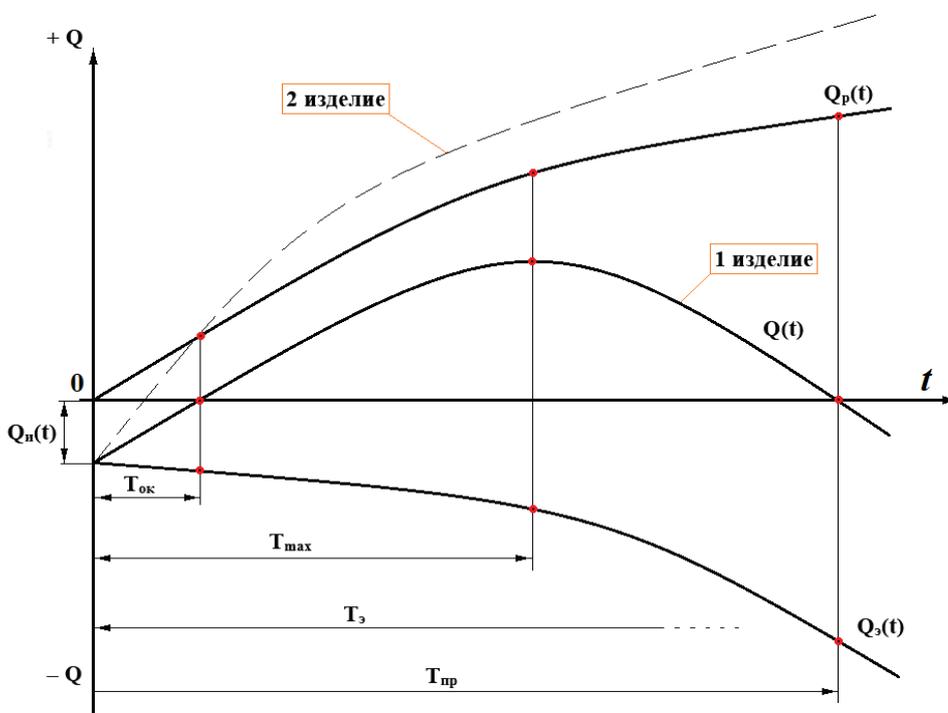


Рисунок 1.1. Изменение во времени суммарного экономического эффекта в жизненном цикле изделия

С другой стороны, работа изделия приносит положительный экономический эффект $Q_p(t)$, зависящий от его целевого назначения. Например, для технологического оборудования как результат выпуска продукции, для транспортных машин – перевозка грузов, для двигателей как следствие преобразования энергии и пр.

Изменение $Q_э(t)$ во времени имеет тенденцию к возрастанию, так как старение отдельных элементов изделия приводит к необходимости вкладывать все большие средства для восстановления утраченных свойств.

Изменение $Q_p(t)$ во времени, наоборот, имеет тенденцию к уменьшению тенденции роста, поскольку более частые простои изделия в ремонтах и техническом обслуживании снижают его производительность.

Поэтому кривая суммарной эффективности

$$Q(t) = Q_и + Q_э(t) + Q_p(t) \quad (1.1)$$

имеет максимум и два раза пересекает ось абсцисс t .

Период времени $t = T_{ок}$, при котором $Q_и + Q_э(t) = Q_p(t)$ является сроком окупаемости, когда изделие при эксплуатации возвратило затраты, вложенные в него при изготовлении и транспортировании и эксплуатации. С этого момента ($T_{ок}$) изделие начинает приносить прибыль. Однако прибыль постепенно снижается из-за возрастания эксплуатационных затрат и становится равной нулю при $t = T_{пр}$, когда $Q_и + Q_э(t) = Q_p(t)$. При $t > T_{пр}$ затраты на эксплуатацию больше того экономического эффекта, который может обеспечить изделие. Следовательно, время $T_{пр}$ будет предельным временем службы изделия.

Длительность экономически целесообразной эксплуатации изделия $T_э$ после достижения максимальной прибыли находится в диапазоне между T_{max} , когда изделие принесло максимальную прибыль, и предельным временем службы изделия $T_{пр}$, т.е. $T_{max} < T_э < T_{пр}$.

Выбор варианта изделия с позиции надежности нужно производить из сравнения затрат на изготовление и эксплуатацию изделия с тем экономическим эффектом, который он сможет обеспечить. Экономический критерий является важнейшим и при оценке разнообразных возможностей по повышению и обеспечению надежности изделия.

ТЕМА 2. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ, ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ

Техническим комитетом по стандартизации ТК 119 «Надежность в технике» с января 2022 года введен в действие Национальный стандарт РФ «Надежность в технике. Надежность объекта. Термины определения». ГОСТ Р 27.102-2021.

В указанном стандарте отмечается, что «Приведенные определения можно, при необходимости, изменять, вводя в них производные признаки, раскрывая значение используемых в них терминов, указывая объекты, входящие в объем определяемого понятия. Изменения не должны нарушать смысл понятий, определенных в настоящем стандарте».

Поэтому все дальнейшее изложение материала учебного пособия осуществляется в авторской редакции.

Надежность – это свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих его способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, хранения и транспортирования.

Надежность является комплексным свойством, которое в зависимости от назначения объекта и условий его применения может включать в частном случае такие единичные показатели, как безотказность, долговечность, ремонтпригодность и сохраняемость или определенное сочетание этих свойств.

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

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

Ремонтпригодность – свойство объекта, заключающееся в приспособленности к поддержанию и восстановлению работоспособного состояния путем технического обслуживания и ремонта.

Сохраняемость – свойство объекта сохранять в заданных пределах значения параметров, характеризующих способности объекта выполнять требуемые функции в течение и после хранения и (или) транспортирования.

Сочетание единичных показателей надежности реализуется в виде одного из трех основных комплексных обобщенных характеристик:

-коэффициент готовности;

-коэффициент оперативной готовности;

-коэффициент технического использования.

В каждом конкретном случае оценки или задания надежности изделия следует пользоваться теми сторонами и видами показателей надежности, которые необходимы для характеристик надежности объекта с учетом его целевого назначения.

Исследование и обеспечение указанных свойств надежности ЭЭС в их единстве является требуемой, но, как правило, сложно реализуемой и до конца не всегда практически осуществимой задачей.

В данном пособии основное внимание уделено расчету показателей надежности систем энергоснабжения, характеризующих свойство безотказности, долговечности и ремонтпригодности.

Надежность является одним из самых важных параметров техники. Ее показатели необходимы для оценки качества техники, ее эффективности.

Надежность зависит от многих внешних и внутренних факторов и оценивается многими критериями и показателями. Это привело к появлению в теории надежности большого числа различных терминов и определений.

Далее приведены некоторые из них, часто применяемые на практике и в теории.

Элемент – объект, обладающий рядом свойств, внутреннее строение которого значения не имеет. В теории надежности под элементом понимают элемент, узел, блок, имеющий показатель надежности, самостоятельно учитываемый при расчете показателя надежности системы. Понятия элемента и системы трансформируются в зависимости от решаемой задачи. Например, полупроводниковое реле при оценке его надежности рассматривается как система, состоящая из элементов – транзисторов, диодов, резисторов и т.п. При оценке надежности системы управления тяговыми двигателями полупроводниковое реле является элементом системы.

Система – совокупность связанных между собой элементов, обладающая свойством, отличным от свойств отдельных ее элементов.

Структура системы – взаимосвязи и взаиморасположение составных частей системы, ее устройство. Обычно понятие структура связывают с ее графическим отображением. В зависимости от связей между элементами различают следующие виды структур: последовательные, параллельные, с обратной связью, сетевые и иерархические.

Процесс – это переход системы из одного состояния в другое, сопровождающийся и соответствующий упорядоченному (непрерывному или дискретному) изменению некоторого параметра, определяющего характеристики (свойства) системы. Процесс изменения системы во времени называется динамикой.

Наработка – продолжительность или объем работы объекта, измеряемые единицами времени, числом циклов, километрами пробега и т.п.

Технический объект в процессе функционирования может находиться в различных состояниях, оцениваемых численными показателями.

Согласно ГОСТ 27.002-89 виды **технического состояния** энергетических объектов с позиций теории надёжности характеризуется следующими основными **состояниями** и **событиями**.

Исправное состояние (Исправность). Состояние объекта, при котором он соответствует всем требованиям нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации.

Неисправное состояние (Неисправность). Состояние объекта, при котором он не соответствует хотя бы одному из требований нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации.

Работоспособное состояние (Работоспособность). Состояние объекта, при котором значения всех параметров, характеризующих способность выполнять заданные функции, соответствуют требованиям нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации.

Неработоспособное состояние (*Неработоспособность*). Состояние объекта, при котором значения хотя бы одного параметра, характеризующего способность выполнять заданные функции, не соответствует требованиям нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации. Понятие *исправности* шире, чем понятие *работоспособности*. *Работоспособный* объект обязан удовлетворять лишь тем требованиям нормативно-технической документации (НТД), выполнение которых обеспечивает нормальное применение объекта по назначению. Таким образом, если объект *неработоспособен*, то это свидетельствует о его *неисправности*. С другой стороны, если объект *неисправен*, то это не означает, что он *неработоспособен*.

Предельное состояние. Состояние объекта, при котором его дальнейшая эксплуатация недопустима или нецелесообразна, либо восстановление его работоспособного состояния невозможно или нецелесообразно.

Здесь уместно привести общие определения понятий *ресурса* и *срока службы* на основе приведенного определения понятия предельного состояния объекта.

Ресурсом называется наработка объекта, то есть чистое время эксплуатации без учета времени простоев и ремонтов до достижения *предельного состояния* объекта.

Сроком службы называется календарная продолжительность эксплуатации оборудования до достижения предельного состояния, включая продолжительность простоев и ремонтов.

Понятие «**ресурс**» характеризует долговечность по наработке изделия (циклы, километры и т.д.), а «**срок службы**» определяется по календарному времени.

Переход объекта (изделия) из одного вышестоящего технического состояния в нижестоящее обычно происходит вследствие **событий: повреждений** или **отказов**.

Отказ – это событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния объекта.

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

В ГОСТ15467-79 введено еще одно понятие, отражающее состояние объекта – **дефект**.

Дефектом называется каждое отдельное несоответствие объекта установленным нормам или требованиям. Дефект отражает состояние отличное от отказа.

В зависимости от **причин** возникновения, **отказы** разделяют на *конструктивные, технологические и эксплуатационные*.

Конструктивные отказы возникают вследствие неудачной конструкции узла, неверно выбранных посадок, недостаточной жесткости, несоответствия расчетных данных на прочность или износостойкость. Наиболее часто наблюдаются отказы из-за потери прочности, устойчивости, возникновения

усталости. В условиях пониженных температур наблюдаются отказы в результате хрупкого разрушения материала.

Технологические отказы возникают вследствие нарушений технологического процесса при изготовлении и сборке изделия или из-за применения некачественных материалов. Поскольку технологические неисправности являются результатом несоблюдения технологических условий изготовления, ремонта и сборки узлов изделия, этап изготовления является весьма важным также и с точки зрения обеспечения надёжности машины. Отказы могут возникать вследствие изменения первоначальных размеров изделия, формы, качества поверхности, структуры материала и его механических свойств. Неисправности элементов в большинстве случаев происходят из-за неправильных посадок, нарушения регулировок и ослабления креплений. Они вызывают увеличение бокового и радиального зазоров в паре зубчатых колес, а также зазоров в шарнирах между втулкой и шейкой вала. Изменение посадок в неподвижных соединениях приводит к уменьшению натягов, а ослабление креплений – к увеличению динамических нагрузок, потере жесткости или нарушению сопряжений. Нарушение центровки и соосности, параллельности и перпендикулярности осей также приводит к нарушению зацепления зубчатых колес, перекоосу опор и т.д.

Конструктивные и технологические отказы обычно проявляются в период приработки, когда изделие вступает в эксплуатацию. Приработочные отказы конструктивного и технологического характера часто вызывают длительные перерывы в работе изделий и требуют трудоемких работ по их устранению; часто это случается с изделиями, вновь вводимыми в эксплуатацию.

Эксплуатационные отказы являются следствием накопления повреждений какого-либо типа, естественного изнашивания сопряженных деталей от трения, изменения свойств и качества смазочных и других эксплуатационных материалов, от нарушения режима работы и правил эксплуатации изделия.

По характеру возникновения во времени различают отказы **внезапные**, **постепенные** и **перемежающиеся**.

Внезапный отказ характеризуется резким изменением одного или нескольких заданных параметров изделия. *Примером* внезапного отказа является нарушение работоспособности щековой дробилки, вызванное срезом болтов распорной плиты в результате попадания металлического предмета между дробящими плитами.

Постепенный отказ характеризуется постепенным изменением одного или нескольких заданных параметров машины. Характерным *примером* постепенного отказа является нарушение работоспособности тормозов в результате износа фрикционных элементов.

Перемежающийся отказ – это такой отказ, который возникает многократно и продолжается короткое время. *Примером* такого отказа может служить ухудшение мощностных и топливо-экономических показателей, например, двигателей внутреннего сгорания из-за появления нагара на стенках

цилиндров в камерах сгорания. Этот отказ часто самоустраняется при длительной работе двигателя в тяжелом нагрузочном режиме.

Отказы, как и **случайные события**, могут быть *зависимыми и независимыми*.

Если отказ какого-либо элемента не приводит к отказу других элементов, то такой отказ называется **независимым**. Независимые отказы обычно первичны.

Отказ, появившийся в результате отказов других элементов, называется **зависимым**. Такие отказы обычно определяются предшествующими им независимыми отказами.

Не всегда отказы элементов в сложных изделиях приводят к потере работоспособности изделия. Отказ таких элементов называют **второстепенной неисправностью** и не учитывают при расчете надежности машины.

Возникновение отказа – это конечный результат ряда последовательных этапов в изменении состояния изделия, которые независимо от вида отказа, имеют общие черты. Представление этих этапов в виде блок-схемы (рис. 2.1) позволяет проанализировать природу формирования отказа.

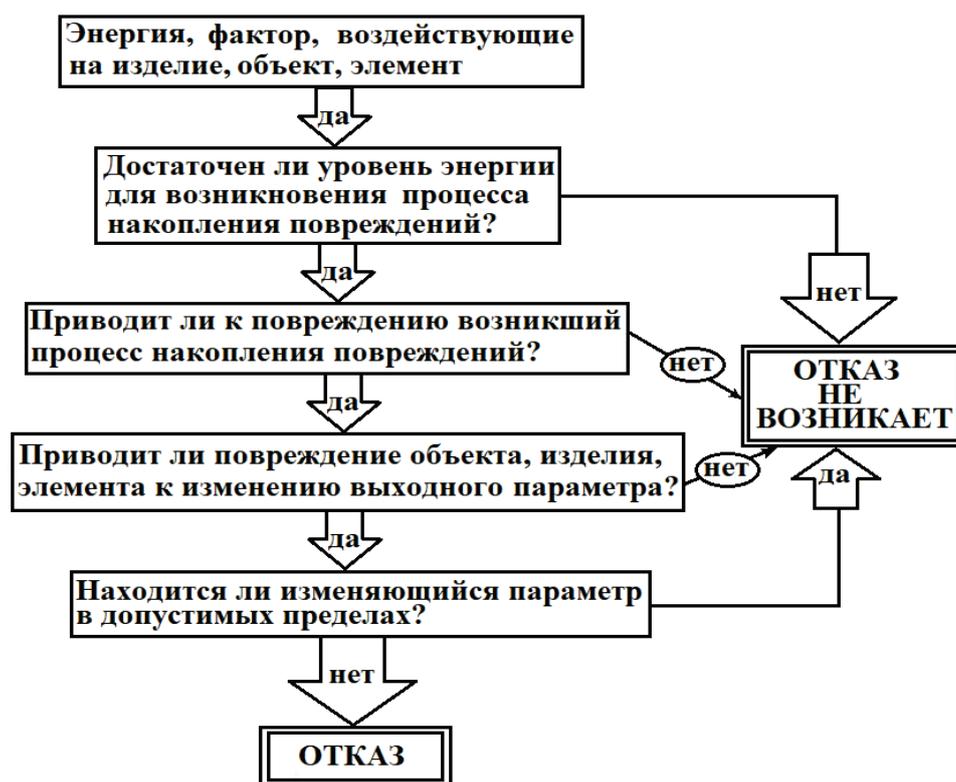


Рисунок 2.1. Схема формирования отказа

При эксплуатации машины на нее действуют все виды энергии различных уровней. Если уровень накапливаемых повреждений от воздействия энергетических полей, не превзойдет величины, вызывающей потерю работоспособности, то предпосылки для возникновения отказа не будет. Если же процесс накопления повреждений возник, то он будет изменять начальные свойства или состояние материалов, из которых выполнено изделие. Под

действием различных уровней энергии могут появляться и развиваться во времени такие процессы, как деформация, изнашивание, трещинообразование, коррозия и др. Эти процессы могут привести к повреждению изделия. Полученное повреждение может влиять или не влиять на выходные параметры изделия. Если данное повреждение не влияет на выходной параметр изделия, то отказ не возникает. Если же повреждение приводит к изменению выходного параметра изделия, то отказ возникнет лишь в том случае, когда этот параметр выйдет за допустимые пределы, установленные техническими условиями на изделие.

В таблице 2.1 приведена одна из распространенных классификационных схем категоризации отказов по основным признакам.

Таблица 2.1 – Основные классификационные признаки отказов

По типу	<i>отказы функционирования</i> , при которых прекращается выполнение объектом основным функций
	<i>отказы параметрические</i> , при которых параметры объекта изменяются в недопустимых пределах
По природе возникновения	<i>случайные отказы</i> – обусловлены непредсказуемыми перегрузками, дефектами материала, ошибками персонала, сбоями системы управления и т.п.
	<i>систематические отказы</i> – обусловлены закономерными явлениями, вызывающими постепенно накопление повреждений: усталость, износ, коррозия материалов и т.п.
Характер возникновения во времени	<i>внезапный отказ</i> – отказ, проявляющийся в резком (мгновенном) изменении характеристик объекта
	<i>постепенный отказ</i> – отказ, происходящий в результате медленного, постепенного ухудшения качества объекта
Внезапные отказы обычно проявляются в виде механических повреждений элементов (трещины – хрупкое разрушение, пробой изоляции, обрывы) и не сопровождаются предварительными видимыми признаками их приближения. Внезапный отказ характеризуется независимостью момента наступления от времени предыдущей работы.	
Постепенные отказы связаны с износом деталей и старением материалов	
Причина возникновения	<i>конструкционный отказ</i> , вызванный недостатками и неудачной конструкцией объекта
	<i>производственный отказ</i> , связанный с ошибками при изготовлении объекта по причине несовершенства или нарушения технологии

	<i>эксплуатационный отказ</i> , вызванный нарушением правил эксплуатации
Характер устранения	<i>устойчивый отказ</i>
	<i>перемежающийся отказ</i> (возникающий/исчезающий). Последствия отказа: легкий отказ (легкоустраняемый)
	<i>средний отказ</i> (не вызывающий отказы смежных узлов – вторичные отказы)
	<i>тяжелый отказ</i> (вызывающий вторичные отказы или приводящий к угрозе жизни и здоровью человека)
Дальнейшее использование объекта	<i>полные отказы</i> , исключающие возможность работы объекта до их устранения
	<i>частичные отказы</i> , при которых объект может частично использоваться
Легкость обнаружения	<i>очевидные (явные) отказы</i>
	<i>скрытые (неявные) отказы</i>
Время (период жизненного цикла) возникновения	<i>прирабочные отказы</i> , возникающие в начальный период эксплуатации
	<i>отказы при нормальной эксплуатации</i>
	<i>износные отказы</i> , вызванные необратимыми процессами износа деталей, старения материалов

С технологических позиций, в зависимости от способа устранения отказа, все изделия разделяются на *ремонтируемые* (восстанавливаемые) и *неремонтируемые* (невосстанавливаемые).

К **ремонтируемым** относятся изделия, которые при возникновении отказа ремонтируют и после восстановления работоспособности снова вводят в эксплуатацию. Широкий спектр теплоэнергетических объектов, дорожные, строительные машины и оборудование, а также многие их элементы являются ремонтируемыми изделиями.

Таким образом, **восстанавливаемые** изделия – это изделия, работоспособность которых может быть восстановлена, в том числе и путем замены.

К **неремонтируемым** изделиям относятся такие, работоспособность которых не может быть восстановлена из-за физико-химических или конструктивных особенностей (свеча зажигания двигателя внутреннего сгорания) или их восстановление нецелесообразно экономически (электронная лампа). К числу неремонтируемых изделий и комплектующих элементов энергетических, дорожных, строительных машин и оборудования относят подшипники качения, тросы, оси, пальцы, крепежные детали и т.п. Восстановление этих элементов экономически нецелесообразно, так как

затраты на ремонт достаточно велики, а обеспечиваемая при этом долговечность значительно ниже, чем у новых деталей.

Таким образом, **невосстанавливаемые** изделия – это такие изделия, для которых работоспособность в случае возникновения отказа не подлежит восстановлению (из-за невозможности или нецелесообразности).

В ряде случаев один и тот же объект, в зависимости от особенностей, этапов эксплуатации или назначения, может считаться восстанавливаемым или невосстанавливаемым.

В связи с этим следует отметить, что для некоторых объектов **предельное состояние** является последним в его функционировании, то есть объект снимается с эксплуатации. Для других объектов предельное состояние является определенной фазой жизненного цикла, требующей проведения ремонтно-восстановительных работ с дальнейшей их эксплуатацией.

Схема постоянных технических состояний и событий для теплоэнергетических объектов приведена на рис. 2.2.

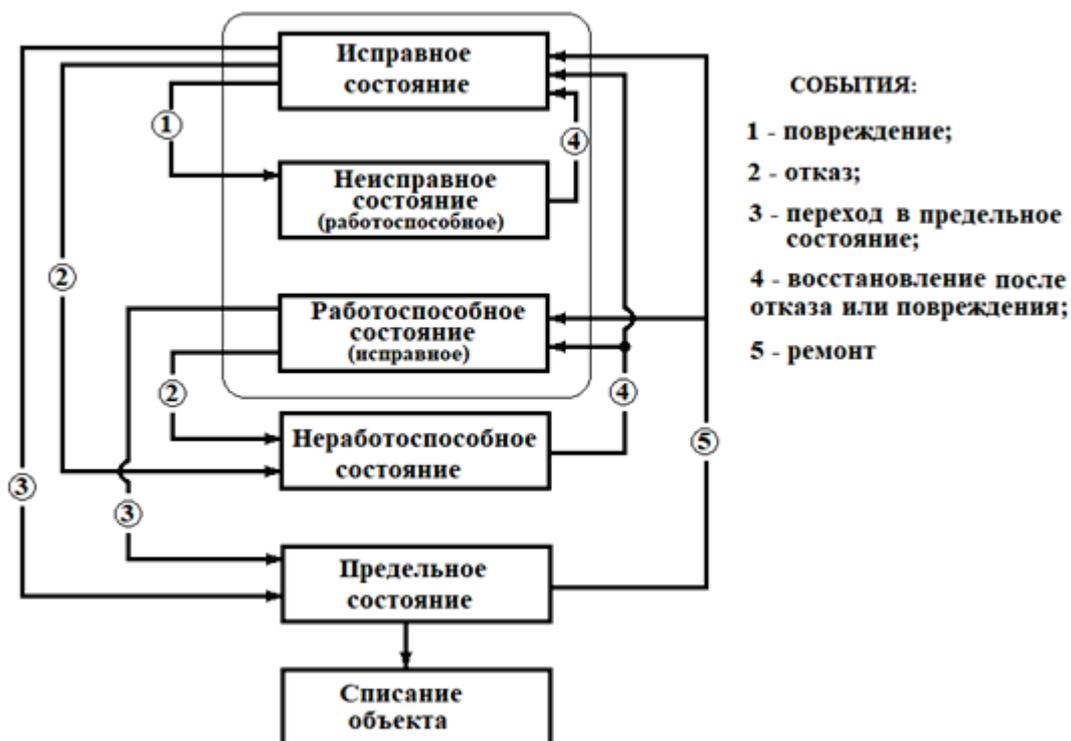


Рисунок 2.2. Схема технических состояний и событий технических объектов

Применение (использование) объекта по назначению прекращается в следующих случаях:

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

Как отмечалось ранее, кроме перечисленных основных частных, наиболее характерных понятий надежности техники (безотказность, долговечность, ремонтпригодность, сохраняемость), для оценки надежности

электроэнергетических систем (ЭЭС) вводятся дополнительные комплексные обобщенные характеристики.

Комплексные показатели надежности

Каждый из рассмотренных выше показателей характеризует только одну, конкретную составляющую надежности: безотказность, долговечность, ремонтпригодность или сохраняемость. Существует несколько показателей, которые отражают суммарные, интегральные характеристики.

К1. Коэффициент готовности объекта

Это комплексный показатель надежности, характеризующий готовность объекта к работе в интервале времени между плановыми остановами объекта, в течение которых применение объекта по назначению не предусматривается, например, остановами объекта на плановый ремонт, модернизацию, вывод в консервацию.

Коэффициент готовности представляет собой вероятность, что объект окажется в работоспособном состоянии в произвольный момент времени, кроме планируемых периодов, в течение которых применение объекта не предусматривается.

К2. Коэффициент оперативной готовности

Это вероятность того, что объект окажется в работоспособном состоянии в произвольный момент времени, кроме планируемых периодов, в течение которых применение объекта по назначению не предусматривается, и, начиная с этого момента, будет работать безотказно в течение заданного интервала времени.

К3. Коэффициент технического использования объекта

Этот коэффициент представляет собой отношение математического ожидания суммарного времени пребывания объекта в работоспособном состоянии за некоторый период эксплуатации к математическому ожиданию суммарного времени пребывания объекта в работоспособном состоянии и простоев, обусловленных техническим обслуживанием и ремонтом за тот же период.

Он характеризует долю времени пребывания объекта в работоспособном состоянии по отношению ко всему рассматриваемому календарному сроку, включающему периоды работоспособности и простоев, связанных как с плановыми ремонтами и техническим обслуживанием, так и неплановыми ремонтами, осуществляемыми для ликвидации отказов объекта.

С учетом рассмотрения четырех основных характеристик надежности и их комбинаций, показатели надежности технических систем могут быть структурированы. Такой сводный структурированный перечень показателей надежности приведен в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Номенклатура показателей надежности

Свойство надежности	Наименование показателя	Обознач.
Единичные показатели		
Безотказность	Вероятность безотказной работы	$P(t)$
	Интенсивность отказов	$\lambda(t)$
	Средняя наработка на отказ	T_o
	Средняя наработка до отказа	T_{cp}
	Средняя наработка между отказами	T
Долговечность	Средний ресурс	T_p
	Гамма-процентный ресурс	$T_{p\gamma}$
	Назначенный ресурс	$T_{p,n}$
	Установленный ресурс	$T_{p,y}$
	Средний срок службы	$T_{сл}$
	Гамма-процентный срок службы	$T_{сл\gamma}$
	Назначенный срок службы	$T_{сл,n}$
	Установленный срок службы	$T_{сл,y}$
Сохраняемость	Средний срок сохраняемости	T_c
	Гамма-процентный срок сохраняемости	$T_{c\gamma}$
	Назначенный срок хранения	$T_{c,n}$
	Установленный срок сохраняемости	$T_{c,y}$
Ремонтопригодность	Среднее время восстановления	T_v
	Вероятность восстановления	$P_v(t)$
	Интенсивность восстановлений	$\mu(t)$
Комплексные показатели		
Комбинация свойств	Коэффициент готовности	K_g
	Коэффициент технического использования	$K_{т.и}$
	Коэффициент оперативной готовности	$K_{о.г}$

В связи с тем, что отказы характеризуются случайностью момента их возникновения, а время восстановления работоспособности случайным характером длительности, отказы можно трактовать как случайные события. Следовательно, основным математическим аппаратом для изучения характера отказов и описания закономерностей их следования, а также параметров восстановления работоспособности является теория вероятностей и ее положения.

Рассмотрим описание единичных показателей надежности с позиций теории вероятностей.

ТЕМА 3. ОСНОВНЫЕ ЗАКОНЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОТКАЗОВ КАК СЛУЧАЙНЫХ СОБЫТИЙ

3.1. Виды математического описания случайных величин

Для любой случайной величины X , непрерывной или дискретной, существует закон ее распределения. Формы записи этого закона могут быть различными. Для дискретных случайных величин это ряд распределения, или интегральный закон, функция распределения $F(x)$. Для непрерывной случайной величины используются интегральный закон, функция распределения $F(x)$ и дифференциальная форма – плотность распределения $f(x)$. На практике эти законы проявляются в виде реализации определенных событий, причем данные о распределении случайной величины существуют только в виде набора пар чисел: значение случайной величины – частота появления этого значения.

Для того, чтобы проводить прогностические расчеты, необходимо иметь аналитическую запись этих законов в виде определенных математических формул. Вид математического описания выбирается исходя из теоретических представлений о распределении случайной величины или на основании экспериментальных данных. Соответствие аналитических зависимостей и экспериментальных данных достигается путем подбора численных значений коэффициентов, входящих в аппроксимирующие формулы. Эти коэффициенты называются параметрами распределения случайной величины.

Для их подбора обычно применяется принцип максимального правдоподобия, частным случаем которого является метод наименьших квадратов.

3.2. Основные законы распределения непрерывных случайных величин

Поскольку существует различие в описании распределения непрерывных и дискретных случайных величин, то в изображении и для их аппроксимации применяются различные формулы.

А. РАВНОМЕРНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ

Для непрерывных случайных величин наиболее простым является **равномерное (прямоугольное)** распределение с двумя параметрами $\{a, b\}$, соответствующее границам интервала, внутри которого может находиться случайная величина. Это распределение встречается в основном в двух типовых ситуациях: во-первых, когда в некотором интервале все значения случайной величины равновозможны и, во-вторых, при аппроксимации других непрерывных распределений в относительно малых интервалах. Равномерное распределение на интервале $[a, b]$ задается плотностью

$$f(x) = \frac{1}{b-a}. \quad (3.1)$$

Функция распределения на этом интервале

$$F(x) = \int_a^x f(x)dx = \frac{1}{b-a} \int_a^x dx = \frac{x-a}{b-a}. \quad (3.2)$$

Условная плотность распределения

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{1-F(t)} = \frac{1}{b-a} \frac{1}{1-\frac{x-a}{b-a}} = \frac{1}{b-x}. \quad (3.3)$$

Математическое ожидание соответствует середине интервала:

$$m_x = \int_a^b xf(x)dx = \frac{b^2-a^2}{2(b-a)} = \frac{a+b}{2}. \quad (3.4)$$

Дисперсия распределения

$$D_x = \int_a^b (x - m_x)^2 f(x)dx = \frac{1}{b-a} \int_a^b (x - m_x)^2 d(x - m_x) = \frac{(b-a)^2}{12}. \quad (3.5)$$

Графики функции и плотности распределения показаны на рисунке 3.1.

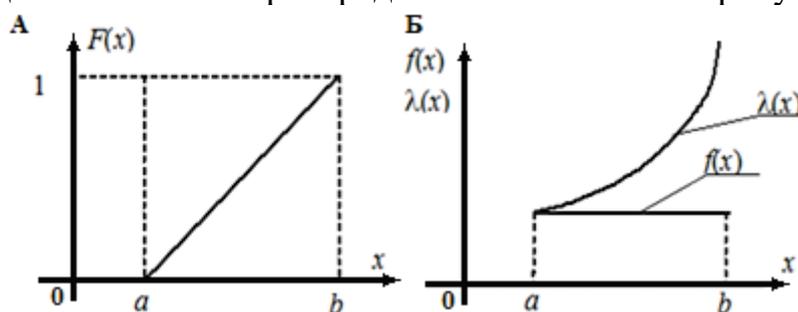


Рисунок 3.1. Графики функции (А) и плотности (Б) распределения случайной величины по прямоугольному (равномерному) закону

Б. ЭКСПОНЕНЦИАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ

Некоторые случайные величины имеют **экспоненциальное** распределение с одним параметром $\lambda_0 > 0$ (однопараметрическое).

Экспоненциальный закон распределения применим к изделиям, прошедшим предварительную приработку. Это распределение используется также при анализе внезапных отказов теплоэнергетического оборудования, буровых насосов, горных машин и другой техники. Все элементы электроники, электротехники подчиняются экспоненциальному закону распределения отказов. По экспоненциальному закону, как правило, распределяется случайная величина, являющая собой продолжительность работы оборудования до отказа,

если его отказы не связаны со старением, т.е. износом оборудования, ухудшением определяющих его работоспособность характеристик. Это распределение наблюдается, когда отказы вызываются случайными внешними факторами, например, колебаниями тепловой, электрической или механической нагрузок, изменением качества топлива, особенностями работы различных операторов или другими случайными воздействиями. Экспоненциальное распределение типично для технических систем, состоящих из большого количества элементов с различными распределениями наработки до отказа. Кроме того, экспоненциальное распределение описывает функционирование объекта под действием пуассоновского потока импульсов нагрузки, обуславливающего отказы сложных систем с восстановлением элементов.

Экспоненциальный закон наиболее прост для описания характеристик надежности технических систем, поэтому при заранее неизвестном законе, зачастую, принимают именно его.

Функция распределения (интегральная)

$$F(x) = 1 - e^{-\lambda_0 x}. \quad (3.6)$$

Плотность распределения (дифференциальная функция распределения)

$$f(x) = \frac{dF(x)}{dx} = \lambda_0 e^{-\lambda_0 x} = \lambda_0 * P(t). \quad (3.7)$$

Условная плотность распределения

$$\lambda(x) = \frac{f(x)}{1-F(x)} = \frac{\lambda_0 e^{-\lambda_0 x}}{1-(1-e^{-\lambda_0 x})} = \lambda_0.$$

Закон определен для случайной величины $x \neq 0$.

Среднее время безотказной работы (математическое ожидание случайной величины «х») составит величину:

$$T_{cp} = m_x = \int_0^{\infty} x \lambda_0 e^{-\lambda_0 x} dx = \frac{1}{\lambda_0}. \quad (3.8)$$

Дисперсия (разброс) времени безотказной работы

$$D_x = \int_0^{\infty} (x - \frac{1}{\lambda_0})^2 \lambda_0 e^{-\lambda_0 x} dx = \frac{1}{\lambda_0^2}. \quad (3.9)$$

Вероятность безотказной работы для времени t может быть вычислена при известном среднем времени безотказной работы объекта, по формуле:

$$P(t) = e^{-\frac{t}{T_{cp}}}. \quad (3.10)$$

Графики функции и плотности экспоненциального распределения показаны на рисунке 3.2.

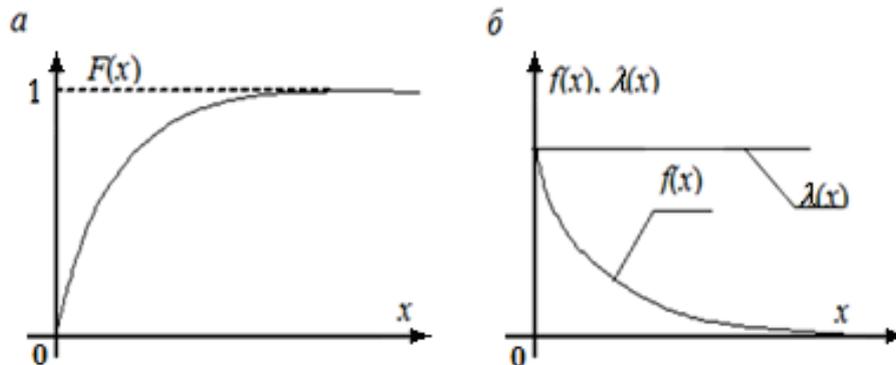


Рисунок 3.2. Графики функции (а) и плотности (б) распределения случайной величины по экспоненциальному закону

Существенным преимуществом экспоненциального закона является также возможность разложения функции в ряд и аппроксимации при $\lambda t = t/T_{cp} \leq 0,1$ линейной зависимостью вида

$$P(t) = 1 - \lambda t + (\lambda t)^2 / 2! - (\lambda t)^3 / 3! + \dots \cong 1 - \lambda t = 1 - t/T_{cp}, \quad (3.11)$$

которая часто используется при приближенных расчетах параметров надежности.

Важным свойством экспоненциальной модели надежности является то, что вероятность безотказной работы и вероятность отказа в интервале времени $(t, t+\Delta t)$ (т.е. $P(t, t+\Delta t)$ и $Q(t, t+\Delta t) = 1 - P(t, t+\Delta t)$) зависят только от длины этого интервала Δt и не зависят от предшествующего времени t . Это свойство в значительной степени ограничивает возможности использования этой модели – она может применяться только в случаях, когда необратимые изменения (старение) объектов несущественны и отказы связаны только со случайными воздействиями.

В. НОРМАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ

Одним из наиболее общих является **распределение ГАУССА, или НОРМАЛЬНОЕ распределение**. Этот закон занимает особое положение. Доказано, что сумма достаточно большого числа независимых или слабо зависимых случайных величин, подчиненных каким угодно законам распределения, приближенно подчиняется нормальному закону распределения. По этой причине нормальный закон распределения наиболее часто встречается в природе. Большинство встречающихся на практике случайных величин, таких как, например, ошибки измерений, могут быть представлены как суммы большого числа малых элементарных ошибок, каждая из которых вызвана

действием отдельной причины, не зависящей от остальных. Каким бы законом распределения ни подчинялись отдельные элементарные ошибки, особенности этих распределений в сумме нивелируются, и сумма оказывается подчиненной закону, близкому к нормальному. Это распределение характерно для отказов, вызванных старением, износом, усталостью.

Нормальный закон распределения характеризуется плотностью вероятности:

$$f(x) = \frac{c}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}\right],$$

при $c = 1$ имеем:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}}. \quad (3.12)$$

Кривая плотности распределения по нормальному закону, приведенная на рисунке 3.3, имеет симметричный холмообразный вид. Максимальная ордината кривой, равная $\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}$, соответствует точке $x=m$. По мере удаления от точки $x=m$ плотность распределения падает, и кривая асимптотически приближается к оси x .

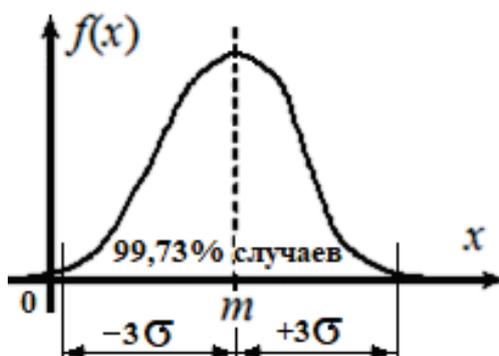


Рисунок 3.3. График плотности распределения случайной величины по нормальному закону (распределение Гаусса)

Параметрами распределения являются коэффициенты m и σ . Величина m здесь соответствует математическому ожиданию случайной величины; σ – среднее квадратичное отклонение величины x . Если изменить величину m , то кривая распределения будет смещаться вдоль оси абсцисс, не меняя своей формы. Центр рассеивания характеризует положение распределения на оси абсцисс. Параметр σ характеризует не положение, а саму форму кривой распределения. Это характеристика рассеяния. Необходимо сразу заметить, что в область $(-3\sigma; +3\sigma)$ попадает 99,73 % значений случайной величины x .

Наибольшая ордината кривой обратно пропорциональна величине σ : чем больше σ , тем ниже максимальное значение $f(x)$. Влияние этих параметров показано на рисунке 3.4

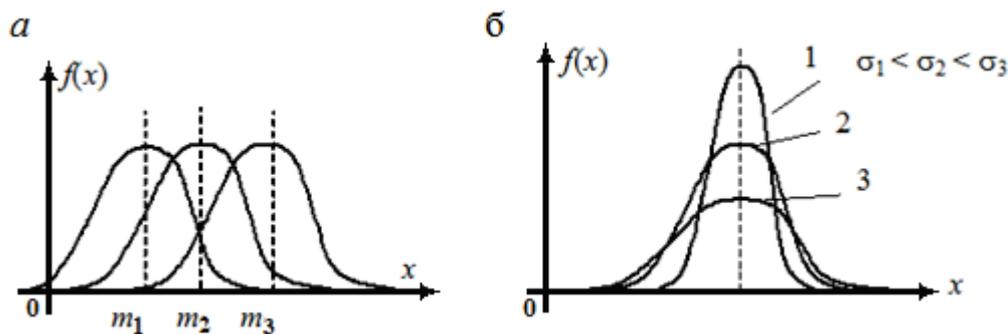


Рисунок 3.4. Влияние параметров распределения на координату и форму плотности распределения Гаусса

Во многих задачах, связанных с нормально распределенными случайными величинами, необходимо определить вероятность попадания случайной величины X в интервал $[\alpha, \beta]$:

$$P(\alpha < X < \beta) = F(\beta) - F(\alpha). \quad (3.13)$$

Здесь $F(x)$ – функция распределения величины X :

+

$$F(x) = \int_{-\infty}^x f(x) dx = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}} dx. \quad (3.14)$$

Вычисление значения функции распределения требует в каждом случае численного интегрирования. Чтобы избежать этого, используется нормированное нормальное распределение с $m = 0$ и $\sigma = 1$. Для этого вводится новая переменная u :

$$u = \frac{x-m}{\sigma}; \quad x = m + \sigma u; \quad dx = \sigma du.$$

Функция распределения принимает вид:

$$F(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\frac{x-m}{\sigma}} e^{-\frac{u^2}{2}} \sigma du = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^u e^{-\frac{u^2}{2}} du. \quad (3.15)$$

Обычно используется обозначение

$$\Phi(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^u e^{-\frac{t^2}{2}} dt. \quad (3.16)$$

Интеграл $\int e^{-\frac{t^2}{2}} dt$ не выражается через элементарные функции. Это так называемый интеграл вероятности. Для него составлены таблицы. Поскольку функция $\Phi(u)$ симметрична, то $\Phi(-u) = 1 - \Phi(u)$. Вероятность нахождения случайной величины X в диапазоне $[\alpha, \beta]$ определится выражением

$$P(\alpha < X < \beta) = \Phi\left(\frac{\beta - m}{\sigma}\right) - \Phi\left(\frac{\alpha - m}{\sigma}\right). \quad (3.17)$$

В ряде таблиц приводится значение интеграла для $\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^u e^{-\frac{t^2}{2}} dt$. При $u=0 \Phi(u) = 0,5$.

В том случае, когда случайная величина представляет произведение большого числа независимых случайных величин, среди которых нет преобладающих, то распределение ее вероятности соответствует **логарифмически нормальному** распределению.

В этом законе распределения логарифм случайной величины распределен по нормальному закону. Распределение несколько точнее, чем нормальное, описывает наработку до отказа и его применяют для описания наработки электронных ламп, подшипников качения и других деталей.

Плотность распределения определяется выражением

$$f(x) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln x - m)^2}{2\sigma^2}}, \quad (3.18)$$

параметр нормированного распределения

$$u = \frac{\ln x - m}{\sigma}.$$

Закон определен для случайной величины $x > 0$.

График плотности распределения показан на рисунке 3.5.

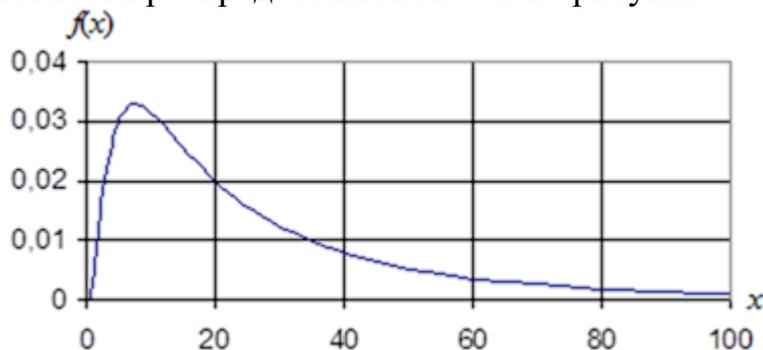


Рисунок 3.5. График плотности логарифмически нормального распределения

Это распределение позволяет описать распределение случайной величины, имеющей положительную асимметрию. Нормальное распределение хорошо согласуется с опытными данными, когда количество измерений достаточно велико. При малом количестве измерений более адекватным является **распределение Стьюдента**. В качестве параметра распределения используется величина

$$t = \frac{x - m_x}{\frac{s}{\sqrt{n}}}. \quad (3.19)$$

Плотность вероятности распределения параметра t зависит от величины t и также от числа степеней свободы n_c , $n_c = n - 1$. Кривые напоминают кривые нормального распределения, но при малых n (или n_c) они значительно медленнее сближаются с осью абсцисс. Общий вид этих кривых показан на рисунке 3.6.

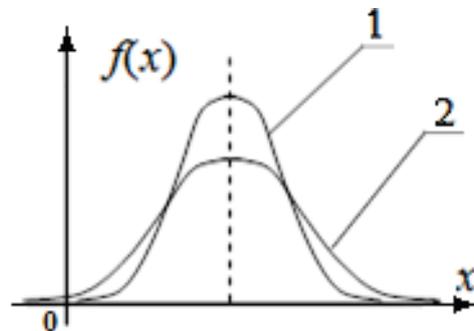


Рисунок 3.6. График плотности распределения случайных величин, имеющих нормальное распределение (1) и распределение Стьюдента (2)

При увеличении количества измерений распределение Стьюдента приближается к нормальному распределению. Значения плотности и функции распределения Стьюдента выражаются через гамма-функции, для вычисления которых необходимо численное интегрирование. Поэтому обычно пользуются статистическими таблицами, в которых в зависимости от числа степеней свободы n для нескольких значений уровня значимости α приводятся значения параметра $t_{кр(1)}$, для которого вероятность появления значений $t < t_{кр(1)}$ равна доверительной вероятности $b = 1 - \alpha$ (односторонний критерий) или $t_{кр(2)}$, для которого вероятность выполнения условия $t_{кр(2)} < t < t_{кр(2)}$ равна b (двухсторонний критерий).

Г. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕЙБУЛЛА

Применительно к описанию усталости металлов Вейбуллом предложено распределение, называемое **распределением Вейбулла**, функция распределения вероятности которого имеет вид:

$$F(x) = 1 - e^{-\left(\frac{x-m}{x_0}\right)^n}. \quad (3.20)$$

Плотность распределения

$$f(x) = \frac{dF(x)}{dx} = \left(\frac{x-m}{x_0}\right)^{n-1} \frac{n}{x_0} e^{-\left(\frac{x-m}{x_0}\right)^n}. \quad (3.21)$$

Закон определен при $x > m$, $x_0 > 0$.

В такой форме записи распределение имеет три параметра m, x_0 и n , поэтому называется **трехпараметрическим**. Параметр m соответствует характеристике положения случайной величины, параметр x_0 нормирует

значение случайной величины и определяет степень рассеяния. Параметр n определяет вид (форму) кривой плотности распределения и также оказывает влияние на рассеяние случайной величины. При $0 < n \leq 1$ график плотности представляет собой L-образную кривую, при $n > 0$ кривая принимает колоколообразный вид. При $m=0$ и $n=1$ распределение Вейбулла переходит в экспоненциальное распределение. Характерный вид кривых показан на рисунке 3.7.

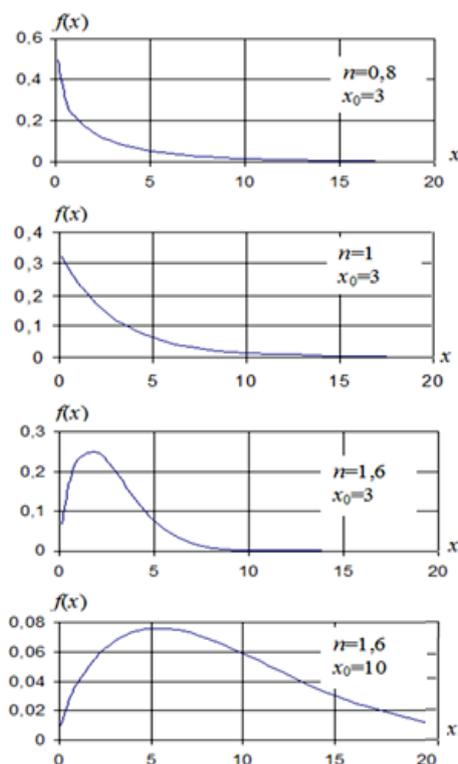


Рисунок 3.7. Графики плотности распределения для закона Вейбулла

В отличие от нормального, распределение Вейбулла не имеет математического обоснования и является только достаточно хорошей аппроксимацией опытных данных. Вейбулл отмечал, что единственным достоинством этого распределения является простота математического выражения при выполнении необходимых общих условий. Опыт показывает, что во многих случаях это распределение лучше описывает некоторые наблюдения, чем другие известные функции.

Это распределение применяется для оценки надежности сложных технических систем, когда имеют место отказы изделий на начальной стадии эксплуатации или в процессе отработки системы. Закон распределения Вейбулла – один из самых распространенных в теории надежности. Распределение Вейбулла удовлетворительно описывает наработку до отказа у многих невосстанавливаемых изделий (деталей по усталостным разрушениям, наработку подшипников). Применяется для оценки надежности по приработочным данным (в первый период эксплуатации).

Модель Вейбулла является универсальной моделью надежности электрооборудования. С помощью распределения Вейбулла (иногда называют Вейбулла-Гнеденко) можно описывать разнообразные причины отказов: усталостные, внезапные, постепенные.

Необходимо отметить, что форма записи интегральной функции распределения вероятности для закона Вейбулла может иметь иной, отличающийся от соотношения (3.20) вид.

Функцию (интегральную) распределения принимают в виде:

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t^m}, \quad (3.22)$$

где m – параметр формы кривой распределения;

λ – параметр масштаба.

Закон Вейбулла имеет два положительных параметра: m и λ , поэтому называется в данном случае двухпараметрическим. (Экспоненциальное распределение является частным случаем распределения Вейбулла при $m = 1$. При $m = 2,5 - 3,5$ распределение Вейбулла близко к нормальному).

Особенно просто по предложенной форме записи закона Вейбулла выражается вероятность безотказной работы:

$$P(t) = 1 - F(t) = e^{-\lambda t^m}. \quad (3.23)$$

Плотность распределения времени безотказной работы:

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = \lambda * m * t^{m-1} * e^{-\lambda t^m}. \quad (3.24)$$

Интенсивность распределения времени безотказной работы:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{P(t)} = \lambda * m * t^{m-1}. \quad (3.25)$$

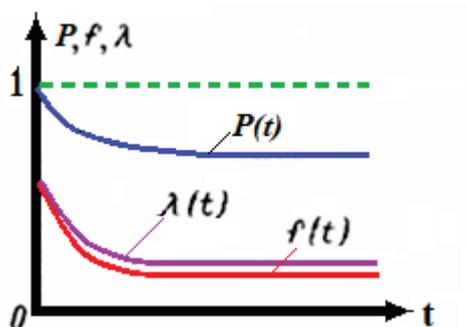


Рисунок 3.8. Характер зависимости параметров распределения Вейбулла $P(t), \lambda(t), f(t)$ от времени

Среднее время безотказной работы равно математическому ожиданию времени безотказной работы t :

$$T_{cp} = Mt = \int_0^{\infty} P(t)dt = \int_0^{\infty} e^{-\lambda t^m} dt = \lambda^{-\left(\frac{1}{m}\right)} * \Gamma\left(1 + \frac{1}{m}\right). \quad (3.26)$$

где:

$\Gamma\left(1 + \frac{1}{m}\right)$ – табулированная гамма-функция.

Для представления непрерывных случайных величин используются также другие виды распределений, в частности, χ^2 – распределение Пирсона, F-распределение Фишера и т.д. Расчетные формулы или значения функций распределения приводятся в табличном виде в справочной литературе.

Нередко при оценке надежности сложных систем требуется использование законов распределения дискретных случайных величин, к рассмотрению которых перейдем в нижеследующем разделе.

3.3. Распределение Герца

Важную отдельную группу объектов теплоэнергетики, требующих математического описания их надежности, составляют тепловые сети, системы водоотведения, трубопроводы и трубопроводные системы различного назначения.

Действительное время жизни трубопровода должно, в данном случае, рассматриваться как непрерывная случайная величина, имеющая математическое ожидание и плотность распределения, удовлетворяющие некоторым физическим особенностям описываемой переменной, то есть происходящих глубинных процессов старения и накопления повреждений.

Поскольку трубы тепловой или иной сети, уцелевшие к моменту рассмотрения события (аварии, отказа), предположительно изначально были более прочны, чем уже ранее вышедшие из строя, есть основания полагать, что распределение должно обладать левосторонней асимметрией. Кроме того, с помощью функции надежности, соответствующей этому распределению, оно должно давать возможность определять условную вероятность того, что элемент будет работоспособен в течение времени τ , если к настоящему моменту времени $t_{он}$ уже достиг определенного возраста. Среднее значение этой условной плотности распределения есть ожидаемое время доживания элемента. При установке нового элемента время доживания должно совпадать со средним временем его жизни и убывать с возрастом.

В принципе, в качестве математических моделей старения могут быть рассмотрены и использованы любые распределения. Однако, например, при **нормальном** распределении невозможно отразить различную скорость старения в зависимости от выработки технического ресурса, поскольку распределение Гаусса симметрично. Кроме того, диапазон изменения

аргумента нормального распределения (от $-\infty$ до $+\infty$) не исключает очень малых, либо вообще отрицательных значений времени жизни, что не согласуется с физическим смыслом переменной. **Логарифмически нормальное** распределение является левосторонне асимметричным, однако анализ этого вида распределения показывает, что время доживания элемента увеличивается с его возрастом, что также не логично по физической сущности процесса старения. При **экспоненциальном** распределении интенсивность отказов и время доживания не зависят от возраста элемента, что также не соответствует физической сущности процесса накопления повреждений.

Одной из моделей, учитывающих отмеченные особенности и специально предложенных, и ориентированных на описание процесса старения трубопроводов, является **трехпараметрическое распределение Герца**. Предложенное распределение Герца, в отличие от **распределения Вейбулла**, базируется на корректном физическом обосновании и строгом математическом описании.

Параметры старения достаточно просты для понимания, определения и ясно интерпретируемы:

α – показатель старения (при $\alpha = 0$ труба не стареет);

b – коэффициент, характеризующий интенсивность отказов (при $t \rightarrow \infty$ показывает максимальную интенсивность отказов);

θ – время, вплоть до которого в отношении трубы не проводилась существенная реабилитационная (восстановительная) работа.

Таким образом, аналитическое выражение распределения Герца и связанных с ним функций можем записать в нижеследующем виде.

Функция плотности распределения времени жизни трубы $f(t)$:

$$f(t) = \begin{cases} 0; & (t \leq \theta) \\ \frac{(\alpha+1)b \cdot \exp [b(t-\theta)]}{\{\alpha + \exp [b(t-\theta)]\}^2}; & (t > \theta). \end{cases} \quad (3.27)$$

Основные свойства функции плотности распределения $f(t)$:

$$f(t = \infty) = 0.$$

Математическое ожидание $E(t)$ времени жизни трубы:

$$E(t) = \theta + \frac{(\alpha+1) \ln(\alpha+1)}{\alpha b}. \quad (3.28)$$

График изменения функции плотности распределения $f(t)$ во времени приведен на рисунке 3.9.

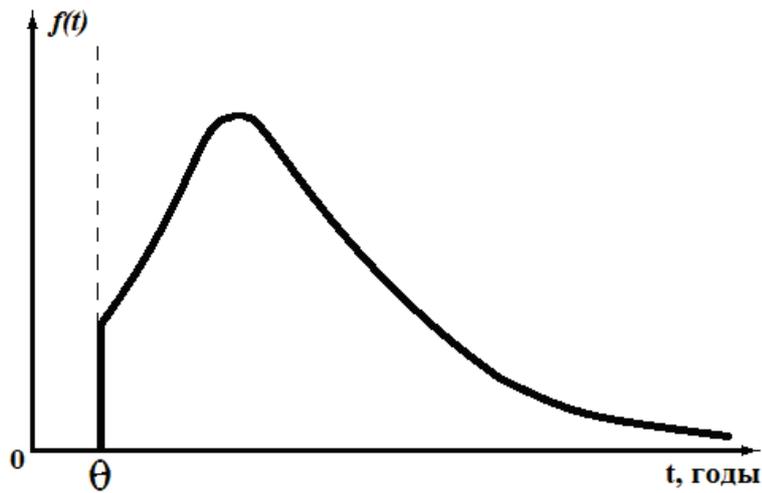


Рисунок 3.9. Характер изменения функции плотности распределения $f(t)$.

Функция надежности (вероятность безотказной работы) $P(t)$:

$$P(t) = \begin{cases} 1; & (nput \leq \theta) \\ \frac{(\alpha+1)}{\{\alpha + \exp [b(t-\theta)]\}}; & (nput > \theta). \end{cases} \quad (3.29)$$

Основные свойства $P(t)$:

$$P(t = \infty) = 0.$$

График изменения функции надежности $P(t)$ во времени приведен на рисунке 3.10.

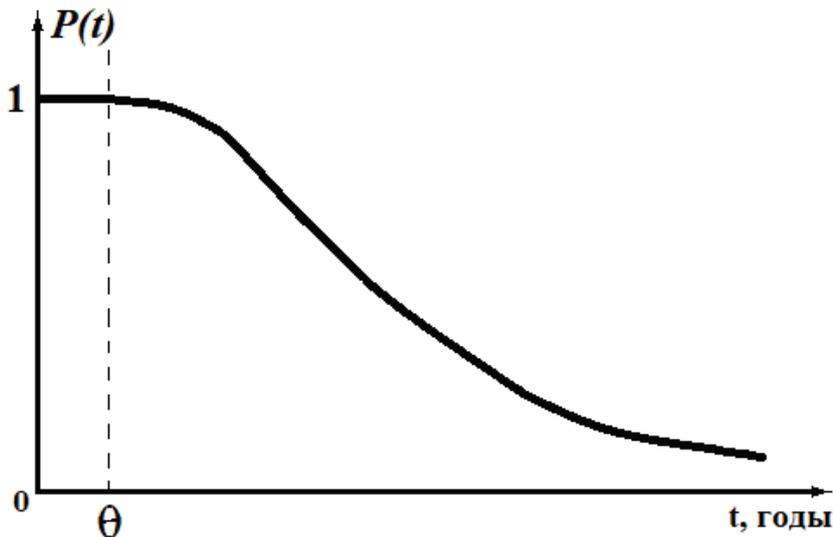


Рисунок 3.10. Изменение функции надежности $P(t)$ во времени

Функция интенсивности отказов $\lambda(t)$:

$$\lambda(t) = \begin{cases} 0; & (nput \leq \theta) \\ \frac{b \cdot \exp [b(t-\theta)]}{\{\alpha + \exp [b(t-\theta)]\}}; & (nput > \theta). \end{cases} \quad (3.30)$$

Основные свойства интенсивности отказов $\lambda(t)$:

$$\lambda(t \rightarrow \infty) = 0.$$

Графическое представление об изменении во времени функции интенсивности отказов $\lambda(t)$ приведено на рисунке 3.11.

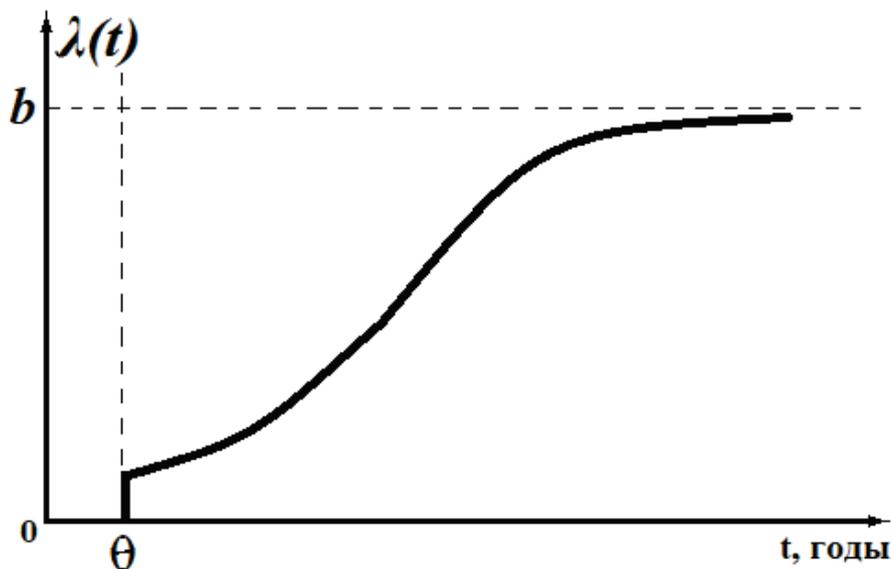


Рисунок 3.11. Характер изменения функции интенсивности отказов $\lambda(t)$ от времени эксплуатации

Среднее время доживания трубы $E(\tau/t)$:

$$E(\tau/t) = \begin{cases} \theta - t + \frac{(\alpha+1)\ln(\alpha+1)}{ab}; & (\tau/t \leq \theta). \\ \frac{\{\alpha + \exp[b(t-\theta)]\} \cdot \ln\{\alpha + \exp[b(t-\theta)]\}}{ab} - \left(\frac{t-\theta}{\alpha}\right); & (\tau/t > \theta). \end{cases} \quad (3.31)$$

Следует внести пояснение к форме записи среднего времени доживания трубы $E(\tau/t)$. Здесь речь идет о времени доживания трубы τ , при условии, что труба проработала без отказа в течение времени t .

Основные свойства времени доживания трубы $E(\tau/t)$:

$$E(\tau/t \rightarrow \infty) = 1/b.$$

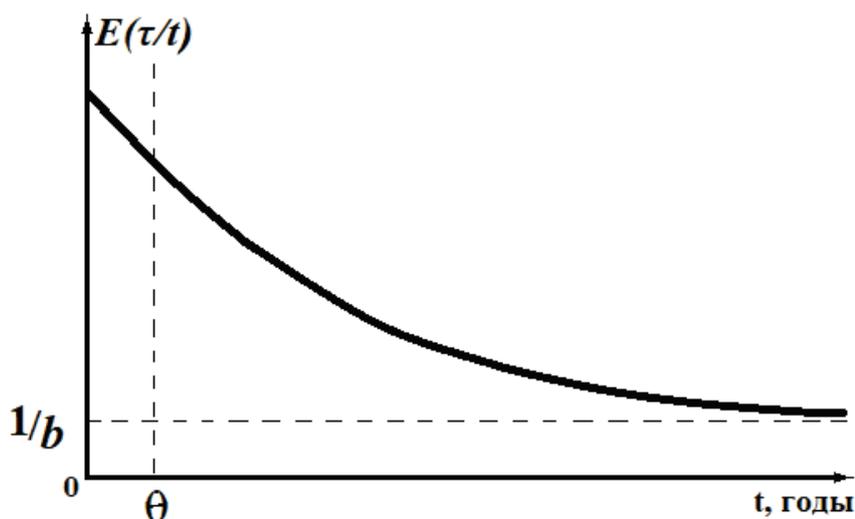


Рисунок 3.12. Характер изменения времени доживания $E(\tau/t)$ трубы на протяжении цикла эксплуатации

Заметим, что при $\alpha = 0$ и $\theta = 0$ распределение Герца трансформируется в экспоненциальный закон распределения с параметром $1/b$ ($\lambda = b = \text{const}$).

3.4. Основные законы распределения дискретных случайных величин

Для дискретных величин существует только функция распределения, так как производная от функции распределения не определена.

Наиболее общим случаем дискретного распределения является **биномиальное распределение**. Пусть производится n независимых опытов, в каждом из которых событие A может появиться либо нет. Вероятность появления события A во всех опытах постоянна и равна p . В качестве дискретной случайной величины X будем рассматривать количество появления события A в этих опытах. Вероятность $p_n(m)$ появления события A именно m раз

$$p_n(m) = C_n^m p^m (1 - p)^{n-m}. \quad (3.32)$$

Здесь C_n^m – число сочетаний m элементов из n ,

$$C_n^m = \frac{n!}{m!(n-m)!}. \quad (3.33)$$

Случайная величина с таким распределением называется биномиальной случайной величиной, а ее распределение – биномиальным. Параметрами распределения являются вероятность появления событий в одном опыте p и количество опытов n .

Математическое ожидание этого распределения

$$M(m) = n \cdot p. \quad (3.34)$$

Дисперсия

$$D(m) = n \cdot p \cdot (1-p). \quad (3.35)$$

Такое распределение имеет, например, число отказавших однотипных невосстанавливаемых изделий в течение фиксированного интервала работы. При $n \rightarrow \infty$ биномиальный закон сходится к нормальному с параметрами

$$m_n = n \cdot p, \quad \sigma = \sqrt{n \cdot p \cdot (1-p)}. \quad (3.36)$$

При малых вероятностях $p < 0,1$ и большом количестве опытов, $n > 10$ биномиальное распределение сводится к **распределению Пуассона**, которое также называется законом редких событий.

Вероятность того, что случайная положительная целая величина X примет значение m , равна:

$$p(m) = \frac{\lambda^m}{m!} \lambda^m e^{-\lambda}. \quad (3.37)$$

Параметром распределения является величина $\lambda > 0$. Математическое ожидание и дисперсия равны:

$$m_x = \lambda, \quad D_x = \lambda. \quad (3.38)$$

При больших значениях $n > 50$ распределение Пуассона приближается к нормальному распределению. Закон Пуассона представляет устойчивое распределение, т. е. сумма случайных величин, каждая из которых имеет распределение Пуассона, также распределена по этому закону.

В статистике используются и другие распределения дискретных случайных величин. При необходимости сведения о них можно найти в справочной литературе.

ТЕМА 4. ПОКАЗАТЕЛИ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК И ИХ ЭЛЕМЕНТОВ

Как известно, **показателем надежности** называется количественная характеристика одного или нескольких свойств, определяющих надежность электроэнергетического объекта или его элемента. Выше отмечалось, что показатели надежности подразделяют на единичные, характеризующие одно свойство, и комплексные, характеризующие несколько свойств. Единичные

показатели надежности применяются в основном для характеристики отдельных конструктивных элементов, комплексные показатели – для узлов, блоков и систем в целом. Рассмотрим некоторые из них.

4.1. Единичные показатели надежности

Первоочередные единичные показатели надежности можно подразделить на показатели безотказности и восстанавливаемости.

Исторически сложилось так, что законом надежности объекта назвали **закон безотказности**. Этот закон $P(t)$ (**функция надежности**) определяет вероятность безотказной работы в течение заданной наработки t . Если известен закон распределения продолжительности работы невосстанавливаемого элемента в виде функции распределения $F(t)$, то вероятность работы без отказа в течение времени t

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

$$P(\infty) = 0; P(0) = 1.$$

Общий вид этого закона показан на рисунке 4.1.

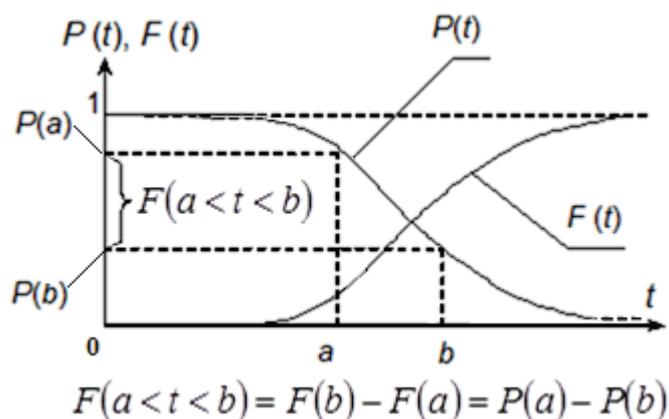


Рисунок 4.1. Общий вид закона надежности

Вероятность того, что отказ наступит на интервале $[a, b]$, равна

$$F(a < t < b) = F(b) - F(a) = P(a) - P(b).$$

Закон надежности можно выразить через безусловную плотность вероятности отказа $f(t)$ в момент времени t в соответствии с соотношением:

$$P(t) = 1 - F(t) = 1 - \int_0^t f(t) dt = \int_0^{\infty} f(t) dt - \int_0^t f(t) dt = \int_t^{\infty} f(t) dt,$$

Вероятность безотказной работы $P(t)$ является основной количественной характеристикой безотказности, то есть вероятностью того, что в заданном интервале времени (или в пределах заданной наработки) при заданных условиях работы не произойдет отказа:

$$P(t) = P(T_0 \geq t).$$

Функцией, характеризующей противоположное событие, является вероятность отказа, или ненадежность:

$$Q(t) = P(T_0 < t).$$

Очевидно, что:

$$P(t) + Q(t) = 1.$$

То есть факт того, что отказ или произойдет, или не произойдет, является событием достоверным.

Как видим, функция $Q(t)$ обладает всеми свойствами интегральной функции $F(t)$ распределения случайной величины – времени безотказной работы $Q(t) = F(t)$, а именно:

$$Q(t) = 0, \text{ при } t = 0; Q(t) = 1, \text{ при } t = \infty; Q(t_i) \geq Q(t_j), \text{ при } t_i \geq t_j.$$

Производная от функции распределения представляет собой плотность распределения $f(t)$ случайной величины t :

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = \frac{dQ(t)}{dt} = Q'(t) = [1 - P(t)]' = -P'(t).$$

Интенсивностью отказов называется отношение плотности распределения безотказной работы элемента к его надежности.

Интенсивность отказов $\lambda(t)$ записывается в виде:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{P(t)} = -\frac{P'(t)}{P(t)} = -\frac{dP(t)}{P(t)dt} = -\frac{d[\ln P(t)]}{dt}.$$

Тогда получаем:

$$d[\ln P(t)] = -\lambda(t)dt.$$

Интегрируя, запишем окончательное выражение для вероятности безотказной работы:

$$P(t) = e^{-\int_0^t \lambda(\tau) d\tau}.$$

Полученное фундаментальное соотношение носит название экспоненциального закона надежности, или уравнение связи показателей надежности.

При этом значение показателя степени экспоненты $r(t) = \int_0^t \lambda(\tau) d\tau$ **Н. М. Седакин** предложил называть **выработанным за время t ресурсом надежности $r(t)$** .

Ресурс надежности представляет собой безразмерную величину, значение которой может изменяться от нуля до бесконечности и равно степени уменьшения вероятности безотказной работы (ВБР) с ростом наработки. Численно $r(t_n)$ равен площади под кривой (рис.3.2) интенсивности отказов (параметра потока отказов для восстанавливаемой системы) в пределах наработки $(0, t_n)$.

При длительной работе технического объекта в одних и тех же условиях в неизменном режиме условная ВБР в будущем зависит от выработанного ресурса за время t :

$$P(t, t+\Delta t_n) = e^{-\int_0^{t+\Delta t_n} \lambda(\tau) d\tau} = e^{-[r(0, t+\Delta t_n) - r(0, t)]}.$$

Если же режим эксплуатации переменный, то с вычислением вероятности возникают трудности, и эта задача решается специальными методами.

4.2. Интенсивность отказов

Такое название в теории надежности получила условная плотность $\lambda(t)$ распределения вероятности наработки невосстанавливаемого объекта до отказа. В соответствии с определением $\lambda(t)$ представляет условную вероятность отказа невосстанавливаемого объекта в момент времени t при условии, что до этого времени отказа не было. Как было отмечено:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{1-F(t)} = \frac{\frac{dF(t)}{dt}}{1-F(t)} = -\frac{\frac{d[1-F(t)]}{dt}}{1-F(t)} = -\frac{d \ln[1-F(t)]}{dt} = -\frac{d \ln P(t)}{dt}.$$

Данная формула соответствует мгновенной интенсивности отказов. Средняя величина на интервале времени $[t_1, t_2]$ рассчитывается по формуле:

$$\bar{\lambda}(t_1, t_2) = \frac{1}{(t_2 - t_1)} \int_{t_1}^{t_2} \lambda(\tau) d\tau.$$

Понятие интенсивности отказов в соответствии с определением вводится только для невосстанавливаемых объектов, таких как электрическая лампочка, подшипник качения и т.д.

Восстанавливаемые элементы, которыми являются многие элементы теплоэнергетического оборудования, могут иметь много отказов, после которых происходит восстановление их работоспособности. В непосредственном виде понятие интенсивности отказов для них неприменимо, так как условие, что до момента t отказов не было, не выполняется. Отказы были, но после восстановления работоспособности оборудование продолжало эксплуатироваться и работать.

Понятие интенсивности отказов для восстанавливаемых объектов имеет смысл в том случае, если объект в перерывах между отказами восстанавливается, а время эксплуатации t каждый раз начинает отсчитываться с момента последнего включения в работу. Характер изменения интенсивности отказов во времени показан на рисунке 4.2.

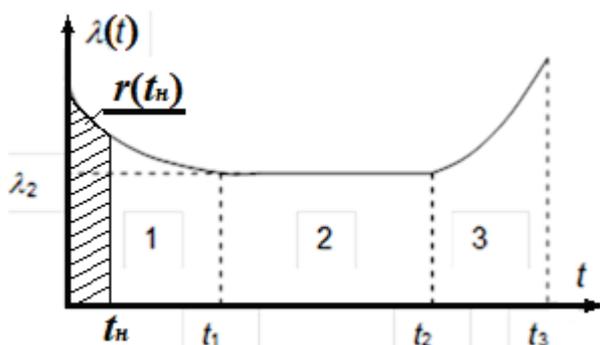


Рисунок 4.2. Зависимость интенсивности отказов от продолжительности работы (в «жизненном» цикле)

В «жизненном» цикле изделия можно выделить три характерных периода:

- 1) приработки;
- 2) нормальной эксплуатации;
- 3) старения изделия.

В первый период отказы связаны с качеством проектирования, изготовления, монтажа, входного и выходного контроля. Приработочные отказы объекта устраняются во время пуско-наладочных испытаний, его опытной эксплуатации и в принципе должны быть выявлены и устранены перед сдачей объекта в эксплуатацию. Обычно начинают рассчитывать надежность объекта, начиная с момента t_1 .

На втором этапе отказы связаны с качеством эксплуатации, при этом процессы старения пока не влияют на поведение объекта. Интенсивность отказов остается приблизительно постоянной, $\lambda(t)=\lambda_2$.

В момент времени t_2 начинают проявляться процессы старения, интенсивность отказов возрастает. В некоторый момент времени t_3 эксплуатация объекта становится экономически неоправданной из-за увеличения затрат на восстановительные ремонты, оборудование достигает предельного состояния и выводится из работы.

Если известен момент времени t_2 и имеется возможность назначить $t_3=t_2$, то для такого объекта можно принять $\lambda(t)=\lambda_2$. Для периода $t > t_2$ такое допущение будет ошибочным. Если расчетчик устраивает результат с запасом, т.е. с заведомо лучшими фактическими показателями надежности, чем дает расчет, то для этого временного интервала можно также принять $\lambda(t)=\text{const}$, но при этом должно быть $\lambda(t) > \lambda_2$.

При $\lambda=\text{const}$ получается наиболее простой, экспоненциальный закон надежности объекта:

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

Здесь λ выступает в виде параметра распределения (плотность распределения отказов).

Для показателей надежности используются две формы представления: вероятностная и статистическая. Вероятностная форма обычно бывает удобнее при априорных аналитических расчетах надежности, статистическая – при экспериментальном исследовании надежности технических систем.

Кроме того, оказывается, что одни показатели лучше интерпретируются в вероятностных терминах, а другие – в статистических.

Статистическая оценка интенсивности отказов находится по формуле:

$$\overline{\lambda(t)} = \frac{N(t) - N(t+\Delta t)}{N(t+\Delta t)\Delta t} = \frac{n}{[(N-n) \cdot \Delta t]}$$

где:

$N(t), N(t + \Delta t)$ – количество работоспособных изделий при наработках « t » и « $t + \Delta t$ »;

N – количество работоспособных изделий на начало испытаний;

$n = [N(t) - N(t + \Delta t)]$ – количество отказавших изделий;

$N(t + \Delta t) = (N - n)$ – количество работоспособных изделий;

Δt – интервал наработки.

Различие между частотой и интенсивностью отказов в том, что первый показатель характеризует вероятность отказа за интервал $(t, t + \Delta t)$ элемента, взятого из группы элементов произвольным образом, причем неизвестно, в каком состоянии (работоспособном или неработоспособном) находится выбранный элемент. Второй показатель характеризует вероятность отказа за тот же интервал времени элемента, взятого из группы оставшихся работоспособными к моменту « t » элементов.

4.3. Средняя наработка до отказа

Средняя наработка до отказа – это математическое ожидание случайной величины t – продолжительности работы до первого отказа. Зная закон надежности, можно найти значение средней наработки:

$$T_1 = T_{cp} = \int_0^{\infty} t f(t) dt = - \int_0^{\infty} t d[1 - F(t)].$$

Интегрируя полученное соотношение по частям, получим окончательно:

$$T_1 = T_{cp} = \int_0^{\infty} P(t) dt.$$

На рисунке 4.3 приведена геометрическая интерпретация средней наработки до отказа.

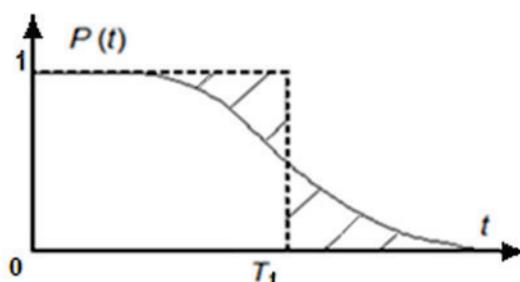


Рисунок 4.3. Схема определения средней наработки до отказа

Величина T_1 есть такое значение t , при котором площадь прямоугольника с высотой 1 и основанием T_1 равна площади под кривой закона надежности. Для этого заштрихованные площади должны совпадать.

В том случае, если используется экспоненциальный закон надежности при $\lambda = \text{const}$, значение T_1 определяется из выражения

$$T_1 = \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda} \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} d(\lambda t) = \frac{1}{\lambda}.$$

Здесь интенсивность отказов λ выступает в качестве параметра закона надежности. Аппроксимация экспоненциальным распределением закона надежности очень удобна. Среднюю наработку до отказа можно оценить эмпирически по формуле:

$$T_1 = \frac{\sum_{i=1}^n T_i}{n},$$

где T_i – продолжительность работы до отказа i -го объекта; n – количество однотипных элементов, за которыми проводится наблюдение.

Величину T_1 можно также определить по экспертным оценкам, ориентируясь на опыт и справочные данные. Если объект является невосстанавливаемым, то средняя наработка до отказа является также характеристикой долговечности. Вопрос об аппроксимации закона экспоненциальным распределением решается с учетом допустимых погрешностей при таком расчете.

4.4. Гамма-процентная наработка до отказа

Гамма-процентная наработка до отказа – это наработка, в течение которой отказ не возникает с вероятностью γ . Эта характеристика поясняется на рисунке 4.4.

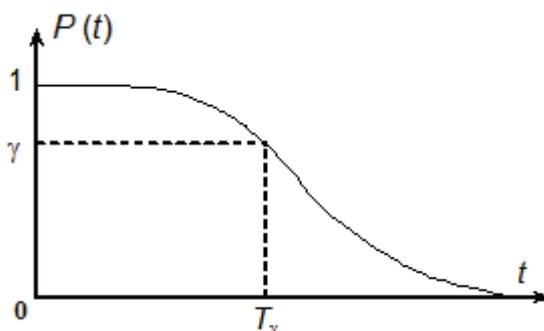


Рисунок 4.4. Схема определения гамма-процентной наработки до отказа

Согласно определению, величина T_γ определяется из условия $P(T_\gamma) = \gamma$. Если известна плотность распределения наработки объекта до отказа $f(t)$, то значения γ и T_γ связаны зависимостью:

$$\int_0^{T_\gamma} f(t) dt = F(T_\gamma) = 1 - P(T_\gamma) = 1 - \gamma,$$

Откуда

$$\gamma = 1 - \int_0^{T_\gamma} f(t) dt = \int_{T_\gamma}^{\infty} f(t) dt.$$

Медианная наработка до отказа $T_{0,5}$ определяется по этой формуле при условии $\gamma = 0,5$.

4.5. Параметр потока отказов

По аналогии с интенсивностью отказов невосстанавливаемых объектов показателем безотказности восстанавливаемых объектов является параметр потока отказов $\omega(t)$. Предполагается, что эксплуатация восстанавливаемого объекта происходит по следующей схеме. В момент времени $t=0$ объект начинает использоваться по назначению и работает до отказа. После отказа происходит восстановление его работоспособности, и он продолжает работать до следующего отказа. При этом время восстановления объекта не учитывается, восстановление считается мгновенным. Моменты отказов восстанавливаемого объекта на оси суммарной наработки образуют поток отказов.

Параметр потока отказов представляет собой отношение математического ожидания числа отказов **восстанавливаемого** объекта за достаточно малую его наработку к значению этой наработки (мгновенный параметр потока отказов).

Мгновенным параметром потока отказов $\omega(t)$ называется предел, если он существует, отношения среднего числа отказов в малом интервале около момента t к величине этого интервала.

$$\omega(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{M[m(t+\Delta t)] - M[m(t)]}{\Delta t},$$

где $M[m(t+\Delta t)]$, $M[m(t)]$ – математические ожидания отказов “ m ” объектов (количества отказов) за время t и $(t+\Delta t)$.

Параметр потока отказов может быть найден по эксплуатационным данным в соответствии с формулой

$$\omega(t + \Delta t, t) = \frac{m(\Delta t)}{\Delta t},$$

где $m(\Delta t)$ – количество отказов за интервал наработки Δt .

Среднее значение параметра потока отказов на интервале $[t_1, t_2]$:

$$\bar{\omega}(t_1, t_2) = \frac{1}{(t_2 - t_1)} \int_{t_1}^{t_2} \omega(\tau) d\tau.$$

Отсюда среднее число отказов на интервале:

$$m_{cp}(t) = \bar{\omega}(t_1, t_2) * (t_2 - t_1) = \int_0^t \omega(\tau) d\tau.$$

Величина $\omega(\tau)d\tau$ есть условная вероятность того, что отказ произойдет в интервале $[t, t+dt]$ при условии, что в момент времени t отказа не было. Последовательные отказы восстанавливаемых объектов, как правило, независимы, и в момент времени t происходит только один отказ, два и более отказов невозможны, т.е. поток ординарный. Чаще всего предполагают, что поток отказов представляет собой пуассоновский поток с постоянным параметром, или **простейший** стационарный поток. Это поток событий должен удовлетворять трем свойствам:

1) стационарность (среднее число отказов, происходящих в единицу времени постоянно, $\omega = \text{const}$);

2) отсутствие последействия (возникновение одного отказа не влияет на появление последующих);

3) ординарность (невозможность возникновения одновременно двух и более отказов).

В общем случае, когда $\omega(t) \neq \text{const}$, поток отказов восстанавливаемого оборудования называется пуассоновским с переменным параметром $\omega(t)$.

Наработка на отказ \bar{t} за любой период работы равна:

$$\bar{t} = \frac{1}{\omega(t)} = \text{const}.$$

Вероятность безотказной работы такого объекта описывается известным фундаментальным соотношением:

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

В интервале времени $0 < t < t_1$ до первого отказа восстанавливаемого объекта параметр потока отказов $\omega(t)$ естественным образом совпадает с интенсивностью отказов $\lambda_1(t)$:

$$\omega(t) = \lambda_1(t).$$

На следующем интервале времени от t_1 до t_2 от первого до второго отказа поведение $\omega(t)$ будет определяться тем, насколько объект в результате ремонта восстановит свою надежность, т.е. приблизится по надежности к своему исходному состоянию $\lambda_1(t)$. Возможные варианты изменения параметра потока отказов показаны на рисунке 4.5.

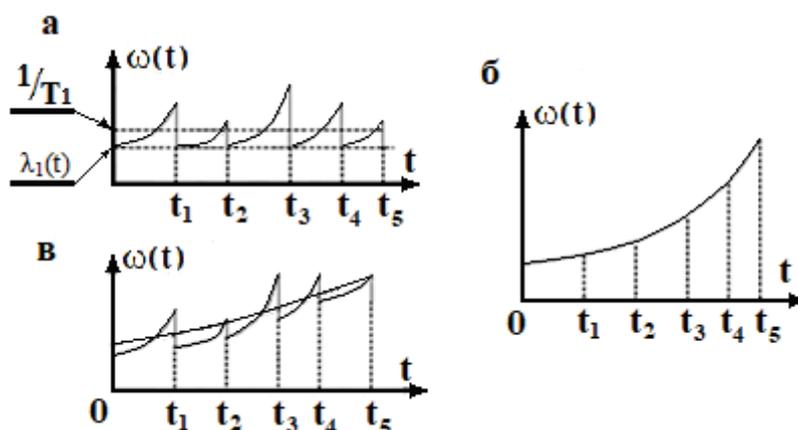


Рисунок 4.5. Зависимость параметра потока отказов $\omega(t)$ от продолжительности эксплуатации и регламента ремонта и восстановления: *а* – полное восстановление надежности при ремонте; *б* – ремонт без восстановления надежности; *в* – частичное восстановление надежности

Одним из предельных случаев является вариант «а», когда объект полностью восстанавливает свою надежность при ремонте после отказа. После восстановления объект на интервале $[t_1, t_2]$ будет вести себя так же, как на предыдущем интервале $[0, t_1]$, т. е. всегда после ремонтов в эксплуатации будет находиться как бы новый по надежности объект. Среднее значение параметра

потока отказов в течение всего периода эксплуатации останется постоянным и составит величину $\omega(t) \approx 1/T_1$.

Вторым предельным случаем является вариант «б», при котором восстановление работоспособности объекта не изменяет его надежности и, следовательно, не снижает значения параметра потока отказов. Интенсивность отказов продолжает возрастать, соответствуя ситуации, когда не было отказов и последующих за ними восстановления работоспособности.

Вариант «в» занимает промежуточное положение, отражая ситуацию, когда при ремонте происходит частичное восстановление надежности оборудования. Интенсивность отказов возрастает по пунктирной кривой несколько медленнее, чем при варианте «б».

Если закон надежности объекта имеет экспоненциальное распределение, т.е. соответствует варианту «а» с постоянным для любого t параметром λ , то для такого объекта и $\omega(t) = \omega = \lambda$. Среднее число отказов за наработку t составит величину:

$$m_{cp}(t) = \omega \cdot t = \lambda \cdot t.$$

Статистическая оценка параметра потока отказов находится по формуле:

$$\overline{\omega(t)} = \frac{n}{N \cdot \Delta t},$$

где N – первоначальное количество изделий, поставленных на начало испытаний;

n – количество отказавших изделий;

Δt – интервал наработки.

Различие между параметром потока отказов ω и интенсивностью λ отказов в том, что первый показатель характеризует вероятность отказа за интервал $(t, t + \Delta t)$ восстанавливаемых элементов, то есть количество отказов в единицу времени относится к количеству N первоначально установленных под наблюдение элементов. Второй показатель характеризует вероятность отказа за тот же интервал времени элемента, взятого из группы оставшихся работоспособными к моменту « t » $(N-n)$ элементов.

$$\lambda = \frac{n}{(N-n) \cdot \Delta t}.$$

4.6. Средняя наработка на отказ

Средняя наработка на отказ – это показатель безотказности восстанавливаемого объекта, численно равный отношению наработки восстанавливаемого объекта к математическому ожиданию числа его отказов в течение этой наработки.

$$T_0 = \frac{t}{m_{cp}(t)} = \frac{t}{\int_0^t \omega(t) dt} = \frac{1}{\omega},$$

где $\bar{\omega}$ – средний на интервале t параметр потока отказов $\omega(t)$.

Если при ремонте объекта его работоспособность восстанавливается полностью, то средняя наработка на отказ будет равна средней наработке до отказа:

$$T_0 = T_1.$$

Для экспоненциального закона надежности средняя наработка на отказ составит величину $T_0 = 1/\lambda$.

ТЕМА 5. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОЖИДАНИЕ И ДИСПЕРСИЯ СЛУЧАЙНОЙ ВЕЛИЧИНЫ

Экспериментальные методы оценки показателей надежности основаны на использовании статистических данных, получаемых при испытаниях изделий на надежность, или данных опытной или подконтрольной эксплуатации. Для получения достоверных результатов анализа требуется корректная обработка экспериментальных данных. Первичный статистический анализ всей совокупности полученных в исследовании данных дает возможность охарактеризовать ее в предельно сжатом виде и ответить на два главных вопроса:

- 1) какое значение наиболее характерно для выборки;
 - 2) велик ли разброс данных относительно этого характерного значения,
- т. е. какова «размытость» данных.

На первый вопрос дает ответ величина математического ожидания случайной величины, а на второй – дисперсия или среднеквадратическое отклонение.

5.1. Математическое ожидание дискретной случайной величины

Как известно, закон распределения полностью характеризует случайную величину. Однако часто закон распределения неизвестен и приходится ограничиваться меньшими сведениями. Иногда даже выгоднее пользоваться числами, которые описывают случайную величину суммарно; такие числа называют *числовыми характеристиками случайной величины*. К числу важных числовых характеристик относится математическое ожидание (первый начальный момент).

Математическое ожидание приблизительно равно среднему значению случайной величины. Для решения многих задач достаточно знать математическое ожидание. Хотя математическое ожидание дает о случайной величине значительно меньше сведений, чем закон ее распределения, но для решения задач, подобных приведенной и многих других, знание математического ожидания оказывается достаточным.

Математическим ожиданием дискретной случайной величины называют сумму произведений всех ее возможных значений на их вероятности. Пусть случайная величина X может принимать только значения x_1, x_2, \dots, x_n , вероятности которых соответственно равны p_1, p_2, \dots, p_n . Тогда математическое ожидание $M(X)$ случайной величины X определяется равенством

$$M(X) = x_1p_1 + x_2p_2 + \dots + x_np_n.$$

Если дискретная случайная величина X принимает счетное множество возможных « n » значений, то

$$M(X) = \sum_1^n x_i p_i.$$

Вероятностный смысл математического ожидания состоит в следующем: *математическое ожидание приближенно равно (тем точнее, чем больше число испытаний) среднему арифметическому наблюдаемых значений случайной величины.*

Математическое ожидание числа появлений события в одном испытании равно вероятности этого события.

Математическое ожидание больше наименьшего и меньше наибольшего возможных значений. Другими словами, на числовой оси возможные значения расположены слева и справа от математического ожидания. В этом смысле математическое ожидание характеризует расположение распределения и поэтому его часто называют *центром распределения*.

5.2. Математическое ожидание непрерывной случайной величины

Математическое ожидание непрерывной случайной величины обладает свойством, схожим с тем, которое мы рассмотрели для дискретной: *математическое ожидание непрерывной случайной величины – это абсцисса центра тяжести плотности распределения.*

Формула для вычисления математического ожидания непрерывной случайной величины по известной плотности распределения $p(x)$ записывается в виде:

$$M(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} xp(x)dx.$$

5.3. Дисперсия дискретной и непрерывной случайной величины

Дисперсия (второй центральный момент) – это мера разброса значений случайной величины X относительно ее математического ожидания $M(X)$.

Дисперсия определяется как математическое ожидание квадрата отклонения случайной величины от своего математического ожидания.

$$D(X) = M[X - M(X)]^2.$$

Это соотношение часто, для удобства вычисления, записывают в виде:

$$D(X) = M(X^2) - M(X)^2.$$

Если мы имеем дело с дискретной случайной величиной (которая задана перечнем значений x_i и соответствующих вероятностей p_i), то формула принимает вид:

$$D(X) = \sum_1^n p_i x_i^2 - (\sum_1^n p_i x_i)^2.$$

Если же речь идет о **непрерывной случайной величине** (заданной плотностью вероятностей $f(x)$ в общем случае), формула дисперсии X выглядит следующим образом:

$$D(X) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) [x - M(X)]^2 dx = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) x^2 dx - (\int_{-\infty}^{+\infty} f(x) x dx)^2, \text{ или}$$

$$D(X) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) x^2 dx - M(X)^2$$

Если случайная величина описывает физические объекты с некоторой размерностью (секунды, часы, годы, метры, килограммы и т.п.), то дисперсия будет выражаться в квадратных единицах (секунды в квадрате, метры в квадрате и т.п.). Ясно, что это не совсем удобно для анализа, поэтому часто вычисляют корень второй степени из дисперсии – среднееквадратическое отклонение $\sigma(X) = \sqrt{D(X)}$, которое имеет ту же размерность, что и исходная величина и также описывает разброс.

ТЕМА 6. ХАРАКТЕРИСТИКИ РЕМОНТОПРИГОДНОСТИ И ДОЛГОВЕЧНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

6.1. Показатели ремонтпригодности

Как следует из номенклатуры показателей надежности, приведенной в таблице 2.2 второго раздела, основными показателями ремонтпригодности являются *вероятность восстановления, интенсивность восстановления и среднее время восстановления* отказа изделия. Названные характеристики восстановления отказов изделия определяются законом восстановления.

6.1.1. Закон восстановления объекта

Этот закон представляет собой вероятность того, что время восстановления работоспособного состояния объекта не превысит величины t . Очевидно, что $P_e(0) = 0$, $P_e(\infty) = 1$. Закон восстановления объекта соответствует функции распределения времени восстановления объекта после отказа:

$$P_{\varepsilon}(t) = F_{\varepsilon}(t). \quad (6.1)$$

Если известна плотность распределения времени восстановления объекта, то можем записать:

$$P_{\varepsilon}(t) = \int_0^t f_{\varepsilon}(t) dt. \quad (6.2)$$

Часто для описания времени восстановления как случайной величины используется экспоненциальное распределение, для которого функция распределения и плотность распределения приведены в разделе 4.2.

Напомним, что это однопараметрический закон, имеющий функцию распределения вероятности восстановления изделия $F_{\varepsilon}(t)$:

$$F_{\varepsilon}(t) = P_{\varepsilon}(t) = 1 - e^{-\mu_0 t}, \quad (6.3)$$

плотность распределения вероятности восстановления $f(t)$:

$$f_{\varepsilon}(t) = \frac{dF(t)}{dt} = \mu_0 e^{-\mu_0 t}, \quad (6.4)$$

условную плотность распределения (интенсивность потока восстановлений изделия) $\mu(t)$:

$$\mu(t) = \frac{f_{\varepsilon}(t)}{1 - F(t)} = \frac{\mu_0 e^{-\mu_0 t}}{1 - (1 - e^{-\mu_0 t})} = \mu_0. \quad (6.5)$$

Закон определен для случайной величины $t > 0$ (время восстановления) с параметром распределения $\mu > 0$. Разумеется, что для экспоненциального распределения $\mu_0 = \text{const} > 0$.

Тогда математическое ожидание m_t случайной величины t – времени восстановления составит значение:

$$m_t = \int_0^{\infty} t \mu_0 e^{-\mu_0 t} dt = \frac{1}{\lambda_0}.$$

Дисперсия D_t :

$$D_t = \int_0^{\infty} \left(t - \frac{1}{\mu_0}\right)^2 \mu_0 e^{-\mu_0 t} dt = \frac{1}{\mu_0^2}.$$

По этому закону, как правило, распределяется также случайная величина – продолжительность работы оборудования до отказа, если его отказы не связаны со старением, т.е. износом оборудования, ухудшением определяющих его работоспособность характеристик. Это распределение наблюдается, когда отказы вызываются случайными внешними факторами, например, колебаниями тепловой, электрической или механической нагрузок, изменением качества топлива, особенностями работы различных операторов или другими случайными воздействиями.

6.1.2. Интенсивность восстановления

Интенсивностью восстановления $\mu(t)$ называется условная плотность распределения времени восстановления при условии, что до момента t восстановление не закончено. Так как продолжительность восстановления t_g обычно много меньше продолжительности работы t , то на практике чаще всего для аппроксимации интенсивности восстановления принимают, как отмечалось выше, экспоненциальный закон распределения с постоянным параметром μ :

$$P_g(t) = F_g(t) = 1 - e^{-\mu t},$$
$$f_g(t) = \frac{dF_g(t)}{dt} = \mu e^{-\mu t}.$$

Однако в общем случае $\mu = \mu(t) \neq \text{const}$, тогда:

$$P_g(t) = F_g(t) = 1 - e^{-\int_0^t \mu(t) dt}, \quad (6.6)$$

$$f_g(t) = \frac{dF_g(t)}{dt} = \mu e^{-\int_0^t \mu(t) dt}. \quad (6.7)$$

Таким образом, для определения вероятности восстановления при экспоненциальном законе распределения времени восстановления, имеем индивидуальные для μ_0 базовые соотношения (6.3) и (6.4). В общем случае, при переменном значении интенсивности восстановления $\mu = \mu(t) \neq \text{const}$, пользуемся общими соотношениями (6.6) и (6.7)

6.1.3. Среднее время восстановления

Это математическое ожидание времени восстановления работоспособного состояния объекта:

$$T_g = \int_0^{\infty} t f_g(t) dt \quad (6.8)$$

или:

$$T_g = \int_0^{\infty} t \frac{dF_g(t)}{dt} dt = \int_0^{\infty} t dF_g(t) = - \int_0^{\infty} t d[1 - F_g(t)].$$

После интегрирования последнего соотношения по частям, получим:

$$T_g = - t [1 - F_g(t)]_0^{\infty} + \int_0^{\infty} [1 - F_g(t)] dt = \int_0^{\infty} [1 - P_g(t)] dt. \quad (6.9)$$

Для экспоненциального закона можем записать:

$$P_g(t) = F_g(t) = 1 - e^{-\mu t}. \quad (6.10)$$

Тогда получим среднее время восстановления в виде соотношения:

$$T_e = \int_0^{\infty} e^{-\mu t} dt = -\frac{1}{\mu} \int_0^{\infty} e^{-\mu t} d(-\mu t) = \frac{1}{\mu}. \quad (6.11)$$

В теплоэнергетике для некоторых элементов оборудования помимо чистого времени восстановительного ремонта необходимо дополнительное время, например, на расхолаживание топочной камеры или охлаждение фланцев корпуса турбины. В ядерной энергетике требуется выдержка времени для снижения ионизирующего излучения до допустимого уровня и проведения дезактивации. Поэтому иногда вместо термина среднее время восстановления используется термин среднее время простоя, вызванного отказом. Эти два термина равноправны и имеют один и тот же смысл.

6.2. Показатели долговечности

Основными единичными показателями долговечности, как следует из номенклатуры показателей надежности, приведенной в таблице 2.2 второго раздела, являются различные виды ресурса и срока службы изделия:

- средний ресурс;
- гамма-процентный ресурс;
- назначенный ресурс;
- установленный ресурс;
- средний срок службы;
- гамма-процентный срок службы;
- назначенный срок службы;
- установленный срок службы.

Напомним здесь общие определения понятий *ресурса* и *срока службы* на основе определения категории предельного состояния объекта, приведенного в разделе 2.

Ресурсом называется наработка объекта, т.е. чистое время эксплуатации без учета времени простоев и ремонтов до достижения предельного состояния объекта.

Сроком службы называется календарная продолжительность эксплуатации оборудования до достижения предельного состояния, включая продолжительность простоев и ремонтов.

6.2.1. Закон долговечности объекта

Закон долговечности представляет собой вероятность того, что предельное состояние объекта наступит не ранее некоторого момента времени t , так как предполагается, что оборудование эксплуатируется до наступления предельного состояния, т.е. до такого состояния, когда использование его по назначению невозможно или экономически невыгодно, или восстановление его

работоспособности технически невозможно или экономически нецелесообразно.

Как было отмечено ранее, закон долговечности определяет вероятность $P_d(t)$ того, что предельное состояние объекта наступит не ранее момента времени t . По определению закон долговечности зависит от функции распределения случайной величины t_d , соответствующей ресурсу или сроку службы объекта. Общий вид закона долговечности приведен на рисунке 6.1.

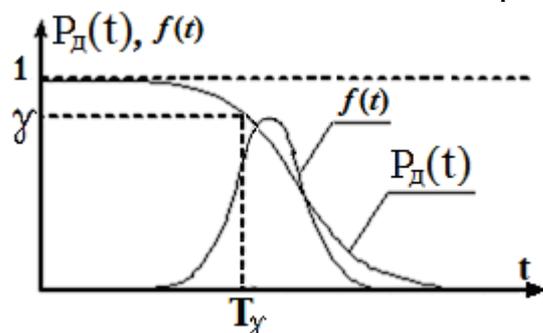


Рисунок 6.1. Общий вид закона долговечности

По оси абсцисс откладывается время достижения предельного состояния (ресурс, или срок службы), по оси ординат – вероятность возможности эксплуатации объекта. Очевидно, что $P_d(0) = 1$, $P_d(\infty) = 0$.

Для невосстанавливаемых объектов, которые после первого отказа переходят в предельное состояние, закон долговечности совпадает с законом надежности, т.е. $P_d(t) = P(t)$.

Многие виды энергетического оборудования рассчитываются на срок службы около 25-30 лет. Так как ресурс оборудования T_p и срок службы T_c зависят от влияния многих факторов, то естественно можно ожидать, что величина $[1 - P_d(t)]$ будет иметь распределение, близкое к распределению нормального закона Гаусса. Плотность распределения должна иметь колоколообразный вид, причем максимум плотности должен соответствовать значению $t = 25 - 30$ лет.

6.2.2. Средний ресурс и средний срок службы оборудования

Это математические ожидания времени достижения объектом своего предельного состояния. При известном законе долговечности эти величины рассчитываются по формулам:

$$T_p = \int_0^{\infty} P_d(t_p) dt_p, \quad (6.12)$$

$$T_c = \int_0^{\infty} P_d(t_c) dt_c. \quad (6.13)$$

Если законы долговечности $P_d(t_p)$ и $P_d(t_c)$ неизвестны, то средние значения T_p и T_c могут быть найдены по экспериментальным данным:

$$T_p = \frac{\sum_{i=1}^n t_{p,i}}{n}, \quad (6.14)$$

$$T_c = \frac{\sum_{i=1}^n t_{c,i}}{n}, \quad (6.15)$$

где $t_{p,i}, t_{c,i}$ – время достижения i -м объектом предельного состояния; n – количество наблюдаемых объектов одинаковой конструкции и работающих приблизительно в одинаковых условиях.

Следует обратить внимание на то, что для анализа характеристик надежности объекты должны наблюдаться в течение всего срока эксплуатации, т.е. как минимум в течение 25–30 лет. Поэтому количество результатов достижения предельного состояния бывает очень ограниченным, а найденные характеристики будут соответствовать только уже физически и морально устаревшим образцам оборудования.

6.2.3. Гамма-процентные ресурс и срок службы

Это значения ресурса $T_{p,\gamma}$ и срока службы $T_{c,\gamma}$, при которых с вероятностью γ объект не достигает предельного значения.

$$P_{\partial}(T_{p,\gamma}) = \gamma, \quad (6.16)$$

$$P_c(T_{c,\gamma}) = \gamma. \quad (6.17)$$

6.2.4. Назначенные ресурс и срок службы оборудования

Для некоторых ответственных типов оборудования, например, главных паропроводов, достижение предельного состояния недопустимо из-за больших потерь, связанных с ликвидацией аварий. В этом случае могут устанавливаться так называемые назначенные показатели долговечности. Это такие значения ресурса $T_{рн}$ и срока службы $T_{сн}$, при достижении которых применение объекта должно быть прекращено независимо от его состояния.

Назначенный ресурс – суммарная наработка, при достижении которой применение изделия по назначению должно быть прекращено независимо от его технического состояния. Кроме того, предприятие-изготовитель, а также ремонтное предприятие могут установить *гарантийный ресурс*, в течение которого гарантируется выполнение установленных требований к объекту (при соблюдении правил его эксплуатации, хранения и транспортировки). Все виды ресурса измеряются в единицах наработки, чаще всего – в единицах времени.

Назначенный срок службы – представляет собой суммарную календарную продолжительность эксплуатации, при достижении которой применение изделия по назначению должно быть прекращено независимо от его технического состояния.

Назначенные величины выбираются по аналогии с определением гамма-процентных значений ресурса и срока службы для очень высокой вероятности $\gamma = 1$. При достижении назначенных показателей долговечности T_{PH} и T_{CH} объект практически со 100 % вероятностью не достигнет предельного состояния.

Все виды ресурса измеряются в единицах наработки, чаще всего – в единицах времени.

6.2.5. Установленные ресурс и срок службы оборудования

Под *установленным ресурсом* понимается технически обоснованная или заданная величина ресурса, обеспечиваемая конструкцией, технологией и условиями эксплуатации, в пределах которой изделие не должно достигать предельного состояния.

Под *установленным сроком службы* следует понимать технико-экономически обоснованный или заданный срок службы, обеспечиваемый конструкцией, технологией и эксплуатацией, в пределах которого объект не должен достигать предельного состояния.

6.3. Комплексные показатели надежности

Каждый из рассмотренных выше показателей характеризует только одну составляющую надежности: безотказность, ремонтпригодность или долговечность. Существует несколько показателей, которые отражают суммарные характеристики.

6.3.1. Коэффициент готовности объекта

Это комплексный показатель надежности, характеризующий готовность объекта к работе в интервале времени между плановыми остановами объекта, в течение которых применение объекта по назначению не предусматривается, например, остановами объекта на плановый ремонт, модернизацию, вывод в консервацию.

Коэффициент готовности представляет собой вероятность, что объект окажется в работоспособном состоянии в произвольный момент времени, кроме планируемых периодов, в течение которых применение объекта не предусматривается. Коэффициент готовности рассчитывается по формуле:

$$K_g = \frac{t_{раб}}{t_{раб} + t_{сост}^{ас}} = 1 - \frac{t_{сост}^{ас}}{t_{раб} + t_{сост}^{ас}}, \quad (6.18)$$

где $t_{раб}$ – период работоспособности; $t_{сост}^{ас}$ – период простоев, связанных с неплановыми ремонтами, осуществляемыми для ликвидации отказов объекта.

Следует отметить, что во время $t_{раб}$ входит также продолжительность нахождения объекта в резерве. Коэффициент готовности является основным

показателем надежности для восстанавливаемых объектов непрерывного действия, выходной эффект от применения которых пропорционален суммарной продолжительности пребывания в работоспособном состоянии.

Коэффициент готовности удобен при проведении расчетов и для сравнения.

Различают стационарный и нестационарный, а также средний коэффициенты готовности и простоя. На практике, как правило, используются стационарные коэффициенты. В стационарном режиме коэффициент готовности имеет двоякую интерпретацию. С одной стороны – вероятность того, что в произвольный момент времени объект окажется в работоспособном состоянии, с другой – математическое ожидание доли времени нахождения объекта в работоспособном состоянии.

Для режима эксплуатации, когда средняя наработка на отказ не меняется в течение эксплуатации ($T_0 = const$), коэффициент готовности равен:

$$K_g = \frac{T_0}{T_0 + t_{ср}^{ас}} \quad (6.19)$$

Для энергетических установок, у которых возможны частичные отказы, приводящие к частичным снижениям располагаемой мощности ниже номинального уровня мощности, иногда рассматривают коэффициент готовности оборудования относительно фиксированного уровня мощности.

Так, коэффициент готовности $K_{гн}$ относительно номинального уровня мощности N_n представляет собой вероятность того, что установка будет работать с располагаемой мощностью не ниже номинальной в произвольный момент времени, кроме планируемых остановов. Аналогично коэффициент готовности установки $K_{гч}$ относительно частичного уровня мощности $N_ч$ есть вероятность того, что располагаемая мощность установки в периоды между плановыми остановами буден не ниже, чем $N_ч$. В этих случаях

$$K_{гн} = \frac{t_{раб}^н}{t_{раб}^н + t_{ср}^{ас}}, K_{гч} = \frac{t_{раб}^ч}{t_{раб}^ч + t_{ср}^{ас}}, K_{гн} \leq K_{гч}. \quad (6.20)$$

6.3.2. Коэффициент оперативной готовности

Это вероятность того, что объект окажется в работоспособном состоянии в произвольный момент времени, кроме планируемых периодов, в течение которых применение объекта по назначению не предусматривается, и, начиная с этого момента, будет работать безотказно в течение заданного интервала времени. Коэффициент оперативной готовности обозначают $K_{ог}(t_{б.р})$, где $t_{б.р}$ – длительность заданного интервала времени, в течение которого требуется безотказная работа. При $t_{б.р} > 0$ $K_{ог}(t_{б.р}) < K_g$.

Из вероятностного определения следует, что

$$K_{ог} = K_g * P(t). \quad (6.21)$$

Только в начальный момент включения после ремонта оборудования из вероятностного определения следует, что $K_{oz} = K_z$.

Коэффициент оперативной готовности реже используется на практике, поскольку его определение требует знания значения $t_{б,р}$, а оно может меняться в зависимости от условий работы или быть неизвестным.

6.3.3. Коэффициент технического использования объекта

Этот коэффициент представляет собой отношение математического ожидания суммарного времени пребывания объекта в работоспособном состоянии $t_{раб}$ за некоторый период эксплуатации к математическому ожиданию суммарного времени пребывания объекта в работоспособном состоянии и простоев, обусловленных техническим обслуживанием и ремонтом за тот же период.

Он характеризует долю времени пребывания объекта в работоспособном состоянии по отношению ко всему рассматриваемому календарному сроку $t_{кал}$, включающему периоды работоспособности $t_{раб}$ и простоев, связанных как с плановыми ремонтами и техническим обслуживанием $t_{восс}^{пл}$, так и неплановыми ремонтами $t_{восс}^{ас}$, осуществляемыми для ликвидации отказов объекта:

$$K_{ти} = \frac{t_{раб}}{t_{кал}} = \frac{t_{раб}}{t_{раб} + t_{восс}^{ас} + t_{восс}^{пл}}. \quad (6.22)$$

Для установки, которая может иметь частичные плановые разгрузки и частичные отказы, величина $t_{раб}$ рассчитывается как сумма интервалов, в течение которых установка работает как с полной, так и частичной нагрузками:

$$t_{раб} = \sum_1^B t_i^{ном} + \sum_1^C t_i^{част}. \quad (6.23)$$

В отдельных литературных источниках коэффициент технического использования определяется соотношением:

$$K_{ти} = t_n / (t_n + t_с + t_p + t_o), \quad (6.24)$$

где t_n – суммарная наработка изделия в рассматриваемый промежуток времени; $t_с$, t_p и t_o – соответственно, суммарное время, затраченное на восстановление, ремонт и техническое обслуживание изделия за тот же период времени.

Одним из важнейших вопросов обеспечения эффективности функционирования технического изделия является повышение характеристик его надежности. Эта задача решается на всех трех стадиях жизненного цикла изделий: на этапе проектирования, производства, эксплуатации.

Рассмотрим далее вопросы оценки надежности на стадии проектирования объектов и элементов технических систем.

ТЕМА 7. МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ БЕЗОТКАЗНОСТИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ

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

Таким образом, еще на стадии проектирования должны быть заложены основы для создания теплоэнергетического оборудования, сохраняющего работоспособность в различных условиях эксплуатации, а предусмотренная при этом надежность должна быть обеспечена в процессах его изготовления и эксплуатации.

Как показывает анализ имеющейся информации, существует большое количество разнообразных принципов классификации методов расчета показателей безотказности энергетических объектов. Одна из возможных схем расчета надежности приведена на рисунке 7.1.

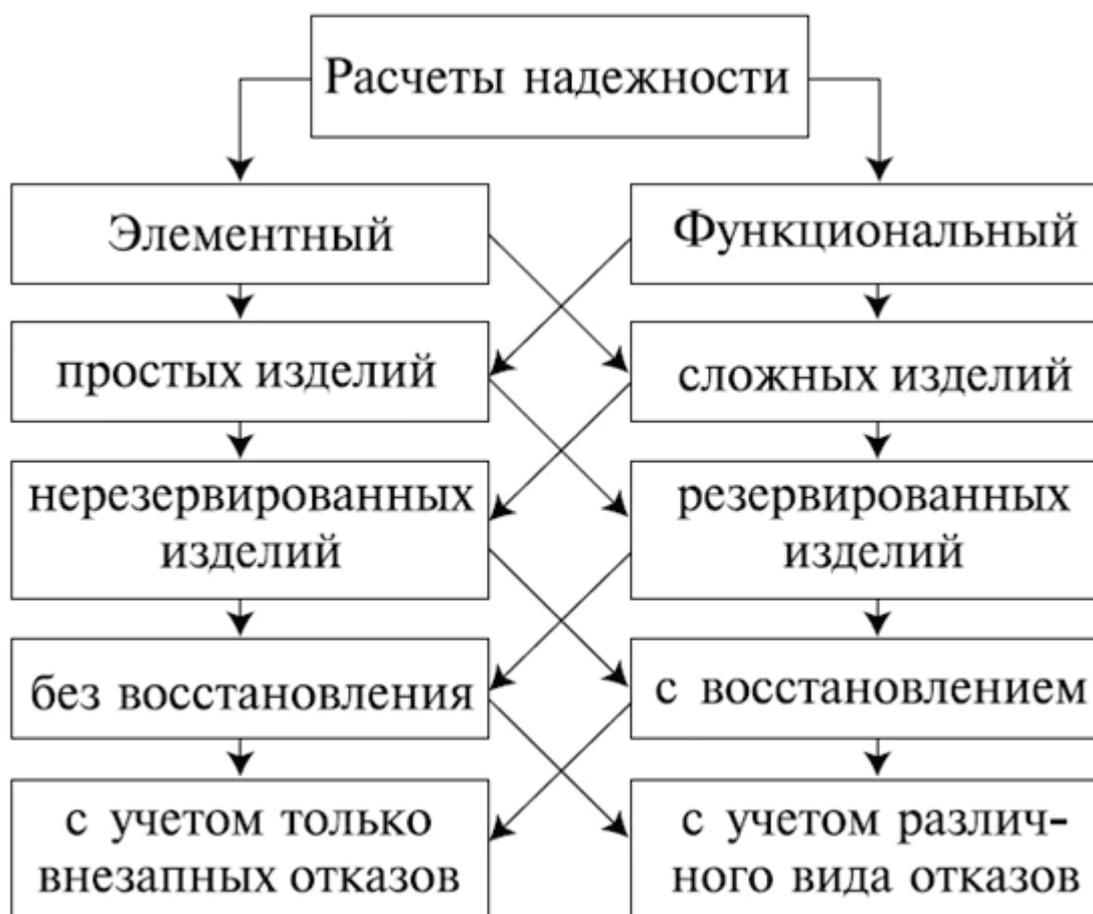


Рисунок 7.1. Схема классификации расчетов надежности

7.1. Классификация методов расчета надежности

Главным назначением расчетов надежности следует считать:

- сравнительный анализ различных конструктивных (схемных) вариантов изделия на стадии его проектирования для обоснованного выбора комплектующих элементов, общей структурной схемы, способов резервирования, методов контроля и обслуживания;

- ориентировочная, прогнозируемая оценка надежности изделия на этапе утверждения технического проекта для обоснования вывода о том, что проектируемое изделие может быть изготовлено удовлетворяющим требованиям по надежности;

- ориентировочная, прогнозируемая оценка надежности сложного изделия на этапе отработки опытного образца для обоснования распределения требований к надежности частей изделия и обоснованного, хотя и ориентировочного, определения состава и количества запасных частей и сроков обслуживания.

Методы расчета надежности подразделяют:

1) по составу рассчитываемых *показателей надежности* (ПН): безотказности, ремонтпригодности; долговечности; сохраняемости; комплексных показателей надежности (методы расчета коэффициентов готовности, технического использования и др.).

2) по основным принципам расчета свойств, составляющих надежность, или комплексных показателей надежности объектов: методы прогнозирования, структурные методы расчета, физические методы расчета.

Применительно к стадиям жизненного цикла систем различают **расчеты на стадии проектирования** (прогнозирующие расчеты) и на стадии эксплуатации и испытаний (главным образом – констатирующие расчеты). К первой относятся расчеты, основанные на анализе структуры системы и заданных условий работы. Их принято называть расчетно-аналитическими или расчетами надежности. Ко второй – расчеты, связанные с обработкой результатов эксперимента или эксплуатации. Они называются – расчетно-экспериментальными или обработкой опытных, статистических данных. По принципиальным основам расчеты делятся на элементные (системные) и функциональные (частным случаем которых являются расчеты параметрические).

По характеру учитываемых отказов различают расчеты с учетом одного вида отказов (внезапных, полных) и с учетом характеристик отказов (внезапные, постепенные, полные, частичные, типа замыкание, обрыв, сбой и т.д.).

По виду систем – расчеты простых систем и сложных систем. Расчеты простых систем в свою очередь делятся на расчеты *резервированных* и *не резервированных* систем, систем *без восстановления* и *с восстановлением*. Расчеты сложных систем делятся на расчеты надежности контуров управления и расчеты состояний систем.

Из приведенных методов расчета надежности наиболее простыми и освоенными являются элементный, системный расчет с учетом одного вида отказов (внезапного, полного). К наиболее трудоемким относятся функциональный расчет с учетом характера отказов (особенно сбоев), а также расчет надежности сложных и больших систем управления.

Для расчета надежности используются следующие основные методы:

- метод структурных схем;
- метод логических схем;
- схемно-функциональный метод;
- матричный метод;
- метод графов.

Метод структурных схем

Структурные методы расчета основаны на представлении объекта в виде логической (структурно-функциональной) схемы, описывающей зависимость состояний и переходов объекта от состояний и переходов его элементов с учетом их взаимодействия и выполняемых ими функций в объекте с последующими описаниями построенной структурной модели адекватной математической моделью и вычислением ПН объекта по известным характеристикам надежности его элементов.

Структурные методы являются основными методами расчета показателей безотказности, ремонтпригодности и комплексных ПН в процессе проектирования объектов, поддающихся разукрупнению на элементы, характеристики надежности, которые в момент проведения расчетов известны или могут быть определены другими методами (прогнозирование, физические по статистическим данным, собранные в процессе их применения в аналогичных условиях). Эти методы применяют также для расчета долговечности и сохраняемости объектов, критерии предельного состояния которых выражаются через параметры долговечности (сохраняемости) их элементов.

Расчет ПН структурными методами в общем случае включает:

- представление объекта в виде структурной схемы, описывающей логические соотношения между состояниями элементов и объекта с учетом структурно-функциональных связей и взаимодействии элементов, принятой стратегии обслуживания, видов и способов резервирования и других факторов;
- описание построенной *структурной схемы надежности* (ССН) объекта адекватной математической моделью, позволяющей в рамках введенных предположений и допущений вычислить ПН объекта по данным о надежности его элементов в рассматриваемых условиях их применения.

В качестве структурных схем надежности могут применяться:

- **структурные блок-схемы** надежности, представляющие объект в виде совокупности определенным образом соединенных (в смысле надежности) элементов;

- **деревья отказов** объекта, представляющие графическое отображение причинно-следственных связей, обуславливающих определенные виды его отказов;

- **графы** (диаграммы) состояний и переходов, описывающих возможные состояния объекта и его переходы из одного состояния в другое в виде совокупности состояний и переходов его элементов.

Метод структурных схем применяется для простых систем при следующих условиях:

- элементы систем рассматриваются как одноотказные;
- система представляется в виде единой структурной схемы, состоящей из суммы последовательных и параллельных соединений элементов, подсистем;
- в структурной схеме одно и то же событие должно представляться в виде одного элемента, подсистемы, то есть должна соблюдаться ординарность.

Методика построения структурной схемы включает следующие основные этапы:

- составление структурной схемы на основе изучения конструкции функциональной системы принципиальной схемы системы;
- составление текстовой формулировки условий безотказности системы;
- составление структурной схемы, на которой прямоугольником обозначается событие безотказной работы элемента, а соединяющая линия обозначает связь – последовательность реализации событий безотказной работы системы в целом (последовательное или параллельное соединение);
- составляется уравнение для оценки вероятности безотказной работы системы.

Метод логических схем

Этот метод применяется:

- для систем, когда трудно обеспечиваются условия независимости событий и ординарности видов отказов, то есть для сложных функциональных систем;
- систем с резервированием с дробной кратностью;
- систем с различными видами отказов для одних и тех же элементов;
- систем, выполняющих несколько функций.

Таким образом, сущность метода заключается в построении уравнения полной группы событий, характеризующих состояние работоспособности системы.

Порядок определения вероятности безотказной работы при методе логических схем следующий:

- формулируются условия безотказной работы системы в целом в зависимости от сочетания возможности появления отказов ее отдельных элементов;
- строится логическая схема условий безотказной работы системы с цепочкой логических связей ее работоспособности и возможных отказов отдельных элементов;

- составляется алгебраическое уравнение событий безотказной работы и расчетное уравнение вероятностей с использованием методов алгебры логики (алгебры Буля);

- производится подбор и подготовка количественных характеристик надежности элементов, входящих в систему;

- определяется вероятность безотказной работы системы в целом и отдельных ее частей.

Одна из возможных схем классификации методов оценки показателей безотказности энергетических объектов при проектировании содержит в качестве признаков *восстанавливаемость* и *невосстанавливаемость* анализируемых объектов.

1. Для невосстанавливаемых объектов могут применяться следующие основные методы.

1.1. Структурные методы.

1.1.1. Последовательное (основное) соединение элементов.

1.1.2. Параллельное соединение элементов.

1.1.3. Метод ключевых элементов.

1.2. Логико-вероятностные методы.

1.2.1. Метод минимальных путей.

1.2.2. Метод минимальных сечений.

1.2.3. Метод деревьев отказов.

1.2.4. Метод деревьев событий.

2. Для восстанавливаемых объектов наиболее распространенными являются динамические (зависящие от времени) модели.

2.1. Метод Марковского моделирования – составления уравнений Колмогорова. (Метод составления дифференциальных уравнений).

2.2. Метод составления интегральных уравнений.

2.3. Метод составления интегро-дифференциальных уравнений.

7.2. Конкретные методы расчета надежности при проектировании

7.2.1. Последовательное (основное) соединение элементов

Пусть система состоит из N отдельных элементов.

Событие A_i – безотказная работа i -го отдельного элемента $i = 1, 2, \dots, N$.

Событие B – безотказная работа системы. Система будет безотказно работать тогда, когда одновременно будут функционировать все отдельные элементы, то есть

$$B = A_1 \cdot A_2 \cdot \dots \cdot A_N = \prod_{i=1}^N A_i$$

для независимых событий

$$P(B) = P(A_1) \cdot P(A_2) \cdot \dots \cdot P(A_N) = \prod_1^N P_i(A_i)$$

Окончательно получаем:

$$P(t) = P_1(t) \cdot P_2(t) \cdot \dots \cdot P_N(t) = \prod_1^N P_i(t),$$

где $P(t)$ – вероятность безотказной работы системы;

$P_1(t), P_2(t), \dots, P_N(t)$ – вероятности работы отдельных элементов (объектов).

В частном случае, при одинаковой надежности всех элементов, то есть $P_1(t) = P_2(t) = \dots = P_N(t)$, вероятность безотказной работы системы определяется выражением

$$P(t) = \{P_i(t)\}^N.$$

7.2.2. Параллельное соединение элементов

Пусть система состоит из N отдельных элементов.

Событие A_i – безотказная работа i -го отдельного элемента $i = 1, 2, \dots, N$.

Событие C_i – отказ в работе i -го отдельного элемента.

Событие B – безотказная работа системы.

Событие C – отказ работы системы.

Система не будет работать тогда, когда одновременно *не будут* функционировать все отдельные элементы, то есть

$$C = C_1 \cdot C_2 \cdot \dots \cdot C_N = \prod_1^N C_i$$

для независимых событий

$$P(C) = P(C_1) \cdot P(C_2) \cdot \dots \cdot P(C_N) = \prod_1^N P_i(C_i)$$

Учитывая, что $P(C) + P(B) = 1, P(C_i) + P(B_i) = 1$, получим:

$$P(C_i) = 1 - P(B_i), \text{ а также } P(B) = 1 - P(C)$$

Тогда окончательно получаем:

$$P(t) = 1 - [1 - P_1(t)] \cdot [1 - P_2(t)] \cdot \dots \cdot [1 - P_N(t)] = 1 - \prod_1^N [1 - P_i(t)],$$

где $P(t)$ – вероятность безотказной работы системы;

$P_1(t), P_2(t), \dots, P_N(t)$ – вероятности работы отдельных элементов (объектов).

В частном случае, при одинаковой надежности всех элементов, то есть $P_1(t) = P_2(t) = \dots = P_N(t)$, вероятность безотказной работы системы определяется выражением

$$P(t) = 1 - \{P_i(t)\}^N.$$

7.2.3. Метод ключевых элементов

Предположим, что система может работать в одном из K режимов R_1, R_2, \dots, R_k с вероятностями $P(R_1), P(R_2), \dots, P(R_k)$. Считаем, что в режиме R_i известны показатели надежности элементов системы, при этом отказы элементов в этом режиме независимы.

Тогда по формуле полной вероятности можно найти полную вероятность безотказной работы системы:

$$P_c = \sum_1^k P(R_i) \cdot P(A/R_i),$$

где $P\left(\frac{A}{R_i}\right)$ – условная вероятность безотказной работы системы, вычисленная при условии ее работы в режиме R_i .

Таким образом, полный показатель безотказной работы системы равен сумме вероятностей каждого из различных режимов работы, умноженные на условные показатели надежности системы, вычисленные для этих режимов.

В частности, для мостиковой схемы, выбрав ключевой элемент (имеет наибольшее количество связей в структурной схеме) и рассматривая два возможных его состояния: R_1 , когда $P(R_1) = 1$, и R_2 , когда $P(R_2) = 0$, и рассчитывая для полученных новых структурных схем условные вероятности $P(A/R_1)$, и $P(A/R_2)$, по приведенной формуле Байеса определим полную вероятность безотказной работы системы P_c .

7.3. Метод Марковского моделирования

Метод Марковского (динамического) моделирования представляет собой метод составления дифференциальных уравнений – уравнений Колмогорова.

Однородные Марковские процессы с дискретным множеством состояний и непрерывным временем являются основным аппаратом исследования надежности сложных систем с восстановлением. Это объясняется тем, что именно они позволяют получать аналитические выражения для расчета различных показателей надежности и вероятности безотказной работы системы, а также вероятности ее восстановления.

Марковский процесс является однородным, если время нахождения в каждом из состояний подчиняется экспоненциальному закону распределения. Построение Марковских моделей надежности осуществляется следующим образом. На основе информации о структуре и принципах функционирования исследуемой системы определяется множество ее возможных состояний. Это множество разделяется на два подмножества – работоспособных состояний и состояний отказа.

Далее строится Марковский граф переходов, вершинами которого являются состояния системы, а ребрами – возможные переходы между состояниями. Интенсивности переходов определяются характеристиками безотказности (λ -интенсивность отказов) и ремонтпригодности (μ -

интенсивность восстановлений) элементов системы. По графу переходов составляется необходимая система уравнений, решение которой позволяет получить требуемые показатели надежности.

Пусть элемент может находиться в двух состояниях: **1**- исправное состояние; **2** – состояние отказа. Марковский граф переходов элемента между исправным состоянием и состоянием отказа показан на рисунке 7.2.

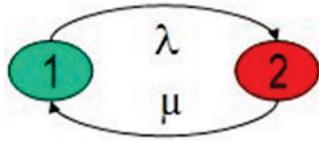


Рисунок 7.2. Марковский граф переходов восстанавливаемого элемента

Обозначим:

$P_1(t)$ – вероятность нахождения элемента в момент времени t в состоянии 1; $P_2(t)$ – вероятность нахождения элемента в момент времени t в состоянии 2.

Дифференциальные уравнения относительно неизвестных вероятностей $P_1(t)$ и $P_2(t)$ записываются в виде:

$$\frac{dP_1(t)}{dt} = -\lambda \cdot P_1(t) + \mu \cdot P_2(t) \quad (7.1)$$

$$\frac{dP_2(t)}{dt} = -\mu \cdot P_2(t) + \lambda \cdot P_1(t) \quad (7.2)$$

При этом очевидно, что:

$$P_1(t) + P_2(t) = 1. \quad (7.3)$$

В стационарных условиях имеем:

$$\frac{dP_1(t)}{dt} = \frac{dP_2(t)}{dt} = 0. \quad (7.4)$$

Совместное решение уравнений (7.1), (7.3) и (7.4) позволяет определить требуемые неизвестные вероятности:

$$P_1(t) = \mu / (\lambda + \mu);$$

$$P_2(t) = \lambda / (\lambda + \mu).$$

Совершенно аналогично решаются задачи с произвольным количеством состояний элемента.

ТЕМА 8. РЕЗЕРВИРОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ. ОБЩИЕ МЕТОДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

8.1. Основные понятия резервирования

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

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

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

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

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

Виды резервирования

Структурное (элементное) резервирование – метод повышения надёжности объекта, предусматривающий использование избыточных элементов, входящих в физическую структуру объекта. Обеспечивается подключением к основной аппаратуре резервной таким образом, чтобы при отказе основной аппаратуры резервная продолжала выполнять ее функции.

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

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

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

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

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

Способы структурного резервирования

По способу подключения резервных элементов и устройств различают следующие способы резервирования (рис. 8.1).

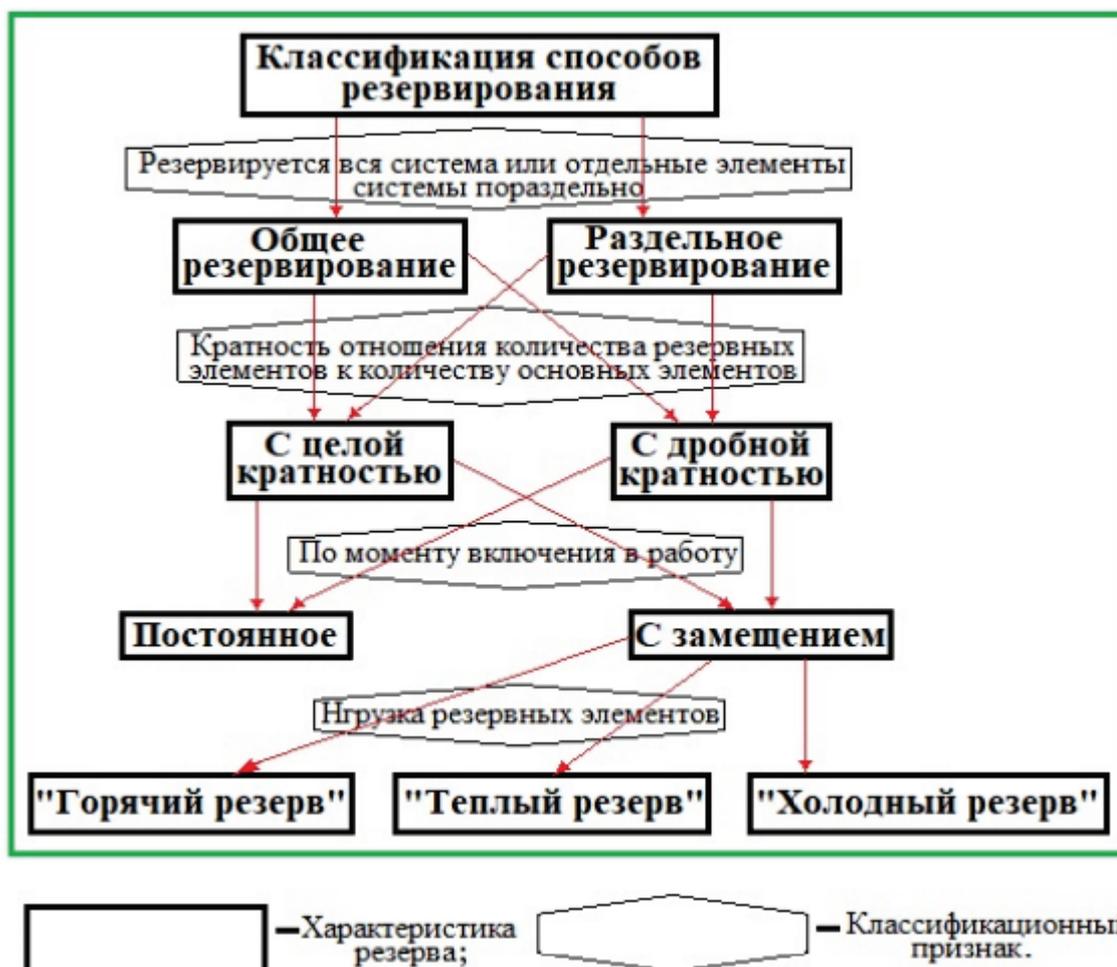


Рисунок 8.1. Классификация способов структурного резервирования

Резервирование раздельное (поэлементное) с постоянным включением резервных элементов показано на рисунок 8.2.

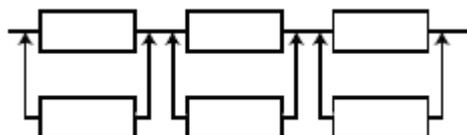


Рисунок 8.2. Резервирование раздельное с постоянным включением резервных элементов

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

Резервирование раздельное с замещением отказавшего элемента одним резервным элементом (рис. 8.3) – это такой способ резервирования, при котором резервируются отдельные элементы объекта или их группы.

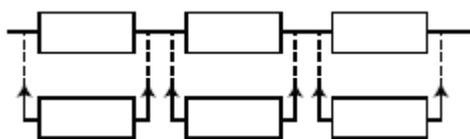


Рисунок 8.3. Резервирование раздельное с замещением отказавшего элемента

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

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

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

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

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

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

Ненагруженный («холодный») резерв – резервный элемент, практически не несущий нагрузку.

Резервирование общее с постоянным подключением (рис. 8.4а) либо с замещением (рис. 8.4б). В этом случае резервируется объект в целом, а в качестве резервного – используется аналогичное сложное устройство. Этот способ менее экономичен, чем раздельное резервирование. При отказе, например, первого основного элемента возникает необходимость подключать всю технологическую резервную цепочку.

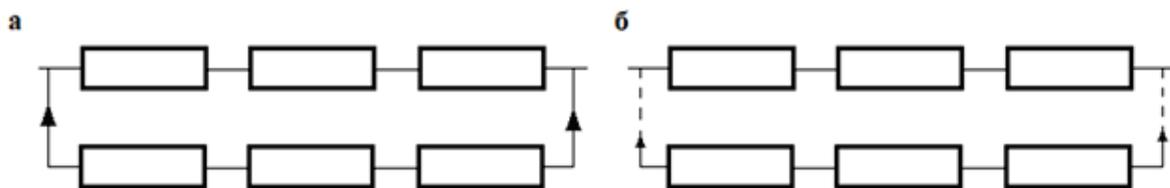


Рисунок 8.4. Резервирование общее

Резервирование мажоритарное («голосование» n из m элементов) (рис. 8.5). Этот способ основан на применении дополнительного элемента – его называют мажоритарный, или логический, или кворум-элемент. Он позволяет вести сравнение сигналов, поступающих от элементов, выполняющих одну и ту же функцию. Если результаты совпадают, тогда они передаются на выход устройства. На рисунке 8.5 изображено резервирование по принципу голосования «два из трёх», т.е. любые два совпадающих результата из трёх считаются истинными и проходят на выход устройства. Можно применять соотношения три из пяти и др. Главное достоинство этого способа – обеспечение повышения надёжности при любых видах отказов работающих элементов. Любой вид одиночного отказа элемента не окажет влияния на выходной результат. Эффективно в системах управления процессами.

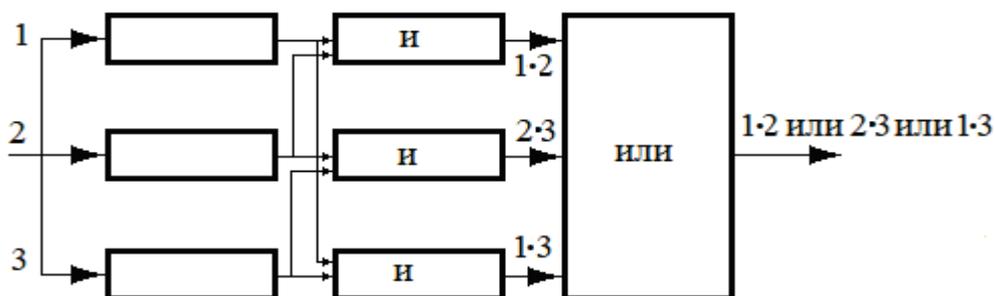


Рисунок 8.5. Резервирование мажоритарное

8.2. Типовые структуры расчета надёжности

Под структурной схемой надёжности понимается наглядное представление (графическое или в виде логических выражений) условий, при которых работает или не работает исследуемый объект (система, устройство, технический комплекс и т.д.). Типовые структурные схемы представлены на рисунке 8.6.

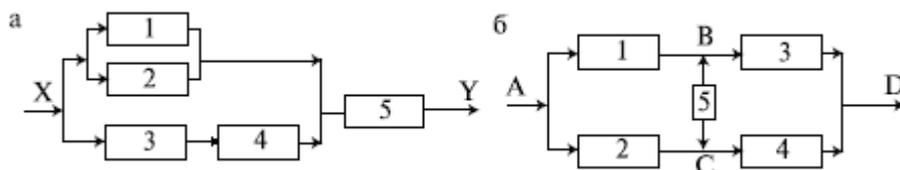


Рисунок 8.6. Типовые структуры расчёта надёжности

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

На рисунке 8.6а представлен вариант параллельно-последовательной структуры. По этой структуре можно сделать следующее заключение. Объект состоит из пяти частей. Отказ объекта наступает тогда, когда откажет или элемент 5, или узел, состоящий из элементов 1–4. Узел может отказать тогда, когда одновременно откажет цепочка, состоящая из элементов 3,4, и узел, состоящий из элементов 1,2. Цепь 3–4 отказывает, если откажет хотя бы один из составляющих ее элементов, а узел 1,2 – если откажут оба элемента, т.е. элементы 1,2. Расчёт надёжности при наличии таких структур отличается наибольшей простотой и наглядностью.

В тех случаях, когда условие работоспособности не удаётся представить в виде простой параллельно-последовательной структуры, используют или логические функции, или графы и ветвящиеся структуры, по которым оставляются системы уравнений работоспособности.

8.2.1. Расчёт надёжности, основанный на использовании параллельно-последовательных структур

На рисунке 8.7 представлено параллельное соединение элементов 1, 2, 3. Это означает, что устройство, состоящее из этих элементов, переходит в состояние отказа после отказа всех элементов при условии, что все элементы системы находятся под нагрузкой, а отказы элементов статистически независимы.

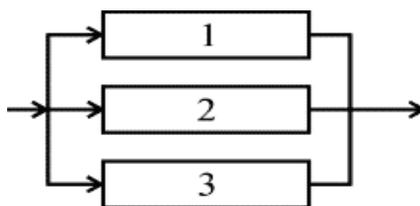


Рисунок 8.7. Блок-схема системы с параллельным соединением элементов

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

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

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

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

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

$$\lambda_c = \frac{dQ(t)dt}{P(t)} = \frac{n \cdot \lambda_i \cdot Q(t)^n}{P(t)^n}.$$

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

$$T_0 = \frac{1}{\lambda} * \sum_{i=1}^n \frac{1}{i}.$$

8.2.2. Включение резервного оборудования системы замещением

В данной схеме включения n одинаковых образцов оборудования только один находится все время в работе (рис. 8.8). Когда работающий образец выходит из строя, его непременно отключают, и в работу вступает один из резервных (запасных) элементов. Этот процесс продолжается до тех пор, пока все резервные образцы не будут исчерпаны.

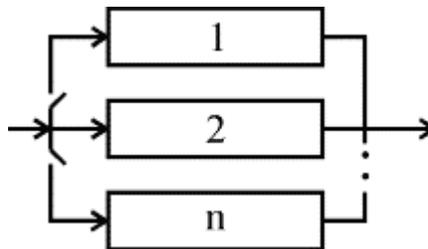


Рисунок 8.8. Блок-схема системы включения резервного оборудования замещением

Примем для этой системы следующие допущения:

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

Система способна выполнять требуемые от нее функции, если исправен по крайней мере один из n образцов оборудования. В этом случае при экспоненциальном законе и «холодном» резерве надёжность равна просто сумме вероятностей состояний системы, исключая состояние отказа, т.е.

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

где m – кратность резервирования.

$$T_c = T_0(m + 1),$$

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

При «горячем» резерве

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

ТЕМА 9. МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ БЕЗОТКАЗНОСТИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК В ЭКСПЛУАТАЦИИ

При эксплуатации энергетических объектов существует необходимость периодического контроля их показателей безотказности. Контроль в данном случае следует понимать как проверку соответствия показателей безотказности объектов существующим нормам, которые заданы в виде точечных значений вероятности безотказной работы и нижней доверительной границы (НДГ) этих значений при соответствующей доверительной вероятности. Эти нормативные показатели безотказности объектов относятся к группе позитивных показателей, то есть таких, которые увеличиваются при росте надежности объекта.

Существует определенная процедура оценки показателей надежности сложных технических объектов и систем в эксплуатации. Она содержит следующие основные этапы:

- 1) выбор плана наблюдения за объектом эксплуатации;
- 2) активное или пассивное планирование наблюдений;
- 3) сбор необходимой информации;
- 4) статистическая обработка информации.

План наблюдения предусматривает формирование определенной структурированной информации, позволяющей в конечном итоге получить достоверные показатели надежности. Наблюдения рекомендуется выполнять по одному из семи планов, рекомендованных ГОСТ 27.502-83. В литературе встречается до четырнадцати различных планов наблюдений. Смысл введения планов наблюдений заключается в том, что для каждого из них разработана, апробирована и введена соответствующим стандартом методика вычисления показателей надёжности, которая позволяет получить достоверные результаты. Опыт применения различных методик показывает, что если не соблюдать соответствия планов наблюдения и рекомендованных методик расчёта, то можно получить значительное искажение оценок надёжности.

Планы наблюдения имеют условное обозначение, как правило, из трёх букв, заключённых в квадратные скобки, например: [N,U,N]. Этот план, в частности, соответствует ситуации, когда контролируется N объектов, и каждый из них работает до отказа. Символ U означает, что объекты после отказа снимаются с контроля. Этот план трудно реализуем в эксплуатации сложных объектов теплоэнергетического оборудования, так как требует много времени для наблюдения, и поэтому представляет чисто теоретический интерес.

План $[N,U,T]$ соответствует ситуации, когда на подконтрольную эксплуатацию взято N объектов. Наблюдения ведутся до наперёд заданного времени T . При этом из N объектов отказывает случайное число r . Остальные $N-r$ объектов безотказно отрабатывают время T . При таком плане определённую проблему представляет использование при расчёте показателей надёжности информации о $N-r$ не отказавших объектов.

План $[N,U,r]$ соответствует ситуации, когда под наблюдение взято N объектов, которые работают до появления заранее принятого числа отказов $r \leq N$. При этом остальные $N-r$ объектов отрабатывают время $t(r)$ безотказно.

План $[N,R,T]$ соответствует ситуации, когда число объектов, взятых под наблюдение, равно N . Символ R обозначает, что после отказов наблюдаемые образцы ремонтируют или заменяют новыми, за которыми опять ведут наблюдение. Подконтрольную эксплуатацию прекращают в заранее установленный момент времени T . За это время будет наблюдаться случайное число отказов r . План $[N,R,r]$ соответствует ситуации, когда под наблюдение взято N объектов. После отказов наблюдаемые объекты ремонтируют или заменяют новыми, за которыми опять ведут наблюдение. Подконтрольную эксплуатацию прекращают при достижении заранее установленного числа отказов r . Наблюдение по планам $[N,R,T]$, $[N,R,r]$ характеризуют последовательные процессы отказов и восстановлений объектов. Длительность восстановлений обычно не учитывается.

Выбор планов наблюдений зависит от типа объекта, целей наблюдения, оцениваемых показателей надёжности и условий эксплуатации. Рекомендации по применению планов наблюдений приведены в табл. 9.1.

Далее осуществляется обработка результатов испытаний:

- построение вариационного ряда наблюдаемых значений;
- построение гистограммы распределения;
- выдвижение гипотезы о виде закона распределения;
- оценка точечных значений параметров функции распределения;
- проверка непротиворечивости результатов наблюдений принятой гипотезе;
- принятие решения о непротиворечивости выдвинутой гипотезы статистическим данным;
- оценка интервальных значений параметров функций распределения и ПН (показатели надёжности) при положительных результатах предыдущего этапа.

В случае отрицательного результата процедуры проверки гипотезы процесс статистической обработки повторяется, начиная с этапа выдвижения гипотезы, о другом виде функции распределения.

Ещё раз следует подчеркнуть, что только с использованием рекомендованных стандартом планов наблюдений можно получить качественную в статистическом смысле информацию и тем самым заложить основу для получения достоверных оценок показателей надёжности.

Таблица 9.1 – Рекомендации по применению планов наблюдений

План наблюдения	Показатель надёжности	Распределение случайной величины
[N,U,N]	Средняя наработка до отказа, средний ресурс, средний срок службы, гамма-процентный ресурс, гамма-процентный срок службы, вероятность безотказной работы	Вейбулла, экспоненциальное, нормальное, логарифмически нормальное
[N,U,r]	Гамма-процентный ресурс, гамма-процентный срок службы, вероятность безотказной работы	Неизвестное
[N,U,T]	Средняя наработка до отказа, средний ресурс, средний срок службы	Вейбулла, экспоненциальное, нормальное
[N,R,r], [N,R,T]	Средняя наработка до отказа	Экспоненциальное
[N,M,r]	Средняя наработка на отказ	Экспоненциальное
	Коэффициент готовности	Неизвестное
[N,M,T]	Средняя наработка на отказ	Экспоненциальное

Условные обозначения: N – объём выборки; U – планы испытаний, в которых отказавшие объекты не заменяются и не восстанавливаются; R – отказавшие объекты заменяются новыми; M – работоспособность объектов восстанавливается после каждого отказа. Третья буква указывает на признак окончания наблюдения: N – отказ всех N объектов; r – отказ r объектов; T – по истечении времени (наработки) T.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из практики эксплуатации известно, что даже у одинаковых изделий, работающих в аналогичных условиях, отказы происходят в случайные моменты времени. Количественная оценка надежности связана с природой возникновения отказа, которая является результатом случайного совпадения ряда неблагоприятных факторов. Это свидетельствует о том, что накопление повреждений в изделиях происходит непрогнозируемым образом и отказ является случайным событием. Надежность является одной из основных характеристик качества, поэтому проблемы качества и эффективности техники невозможно решить без повышения ее надежности. В инженерной практике при проектировании и планировании производства расчеты на надежность весьма востребованы, но осуществляются не всегда. Этот факт объясняется сложностью математического аппарата теории надежности, отсутствием достаточно простых и удобных схем, моделей и методик расчета, сложностью и большим объемом вычислений, ограниченностью статистических и экспериментальных данных. Существующие методики оценки риска в промышленности в большинстве случаев недостаточно теоретически обоснованы и, как правило, носят эмпирический или полуэмпирический характер.

Таким образом, в настоящее время очевиден разрыв между теорией надежности и практикой решения инженерных задач. Значительная часть литературы по надежности либо носит узкоспециальный отраслевой характер и содержит сведения или результаты исследований по надежности отдельных видов техники, либо посвящена разработке сложного математического аппарата, ограниченного в практическом использовании.

В связи с этим основная цель настоящего учебного пособия – адаптированный обзор основных положений и методов прикладной теории надежности, которыми могли бы пользоваться специалисты-практики разного профиля. Указанная цель достигается, в том числе, изложением основ теории надежности в максимально обобщенном виде.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сугак, Е. В. Основы теории надежности [Текст] / Е. В. Сугак, Г. Г. Назаров, В. Л. Королев, С. А. Мангараков. – Красноярск: Сиб. аэрокосмич. акад., 1998. – 380 с.
2. Невзоров, В. Н. Надежность машин и оборудования. Основы теории [Текст] / В. Н. Невзоров, Е. В. Сугак. – Красноярск: Сиб. гос. технологич. ун-т, 1998. – 240 с.
3. Невзоров, В. Н. Надежность машин и оборудования. Проектирование, эксплуатация, экспериментальные исследования [Текст] / В. Н. Невзоров, Е. В. Сугак. – Красноярск: Сиб. гос. технологич. ун-т, 1998. – 264 с.
4. Сотсков, Б. С. Основы теории и расчета надежности элементов и устройств автоматики и вычислительной техники [Текст] / Б. С. Сотсков. – М.: Высш. школа, 1970. – 272 с.
5. Наумов, В. А. Основы надежности и долговечности в машиностроении [Текст] / В. А. Наумов. – Омск: Омский политехнический институт, 1972. – 332 с.
6. Болотин, В. В. Прогнозирование ресурса машин и конструкций [Текст] / В. В. Болотин. – М.: Машиностроение, 1984. – 312 с.
7. Проников, А. С. Надежность машин [Текст] / А. С. Проников. – М.: Машиностроение, 1978. – 592 с.
8. Шульц, В. В. Теория надежности машин [Текст] / В. В. Шульц. – Л.: Ленинградский инж.-строит. ин-т, 1983. – 75 с.
9. Хенли, Э. Надежность технических систем и оценка риска [Текст] / Э. Хенли, Х. Кумамото. – М.: Машиностроение, 1984. – 528 с.
10. Кубарев, А. И. Надежность в машиностроении [Текст] / А. И. Кубарев. – М.: Изд-во стандартов, 1989. – 224 с.
11. Буравлев, А. И. Управление техническим состоянием динамических систем [Текст] / А. И. Буравлев, Б. И. Доценко, И. Е. Казаков. – М.: Машиностроение, 1995. – 240 с.
12. ГОСТ 15467-79. Управление качеством продукции. Основные понятия. Термины и определения [Текст]. – Введ. 1979–07–01.
13. ГОСТ Р 27.013-2019 (МЭК 62308:2006). Национальный стандарт российской федерации. Надежность в технике. Методы оценки показателей безотказности [Текст]. – Введ. 2020–07–01.
14. Дорохов, А. Н. Обеспечение надежности сложных технических систем [Текст] : учебник / А. Н. Дорохов, В. А. Керножицкий, А. Н. Миронов и др. – СПб.: Изд-во «Лань», 2017. – 352 с.
15. Кравченко, Е. Г. Надежность технических систем в машиностроении [Текст] : учеб. пособие / Е. Г. Кравченко. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВПО «КНАГТУ», 2014. – 126 с.

Учебное издание

Пеленко Валерий Викторович

Верхоланцев Александр Александрович

Нечитайлов Василий Васильевич

Надежность систем производства электрической и тепловой энергии

Учебное пособие

Редактор и корректор М. Д. Баранова
Техн. редактор Д. А. Романова

Учебное электронное издание сетевого распространения

Системные требования:
электронное устройство с программным обеспечением
для воспроизведения файлов формата PDF

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

Дата подписания к использованию 13.01.2023 г. Рег. № 47/21

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