

Н. П. ЯМПУРИН, А. В. БАРАНОВА

ОСНОВЫ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

Под редакцией д-ра техн. наук,
проф. Н. П. Ямпурин

Рекомендовано

*Учебно-методическим объединением по образованию
в области радиотехники, электроники, биомедицинской техники
и автоматизации в качестве учебного пособия
для студентов высших учебных заведений, обучающихся
по специальности «Проектирование и технология
радиоэлектронных средств»*



Москва
Издательский центр «Академия»
2010

УДК 621.38(075.8)
ББК 32.85я73
Я574

Рецензент —

зам. зав. кафедрой 404 МАИ (ГТУ), профессор, канд. техн. наук *В. Ф. Борисов*;
начальник отдела САПР ОАО АНПП «ТЕМП-АВИА», канд. техн. наук
М. М. Егоров

Ямпурин Н. П.

Я574 Основы надежности электронных средств : учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений / Н. П. Ямпурин, А. В. Баранова ; под ред. Н. П. Ямпурина. — М. : Издательский центр «Академия», 2010. — 240 с.

ISBN 978-5-7695-5908-2

Представлены основные положения и определения в области надежности электронных средств, приведены теоретические сведения по показателям надежности и методам ее расчета для восстанавливаемых и невосстанавливаемых систем. Изложены основы оценки надежности сложных систем, в том числе с учетом надежности программных средств. Особое внимание уделено автоматизированному расчету показателей надежности электронных средств с применением САПР.

Для студентов высших учебных заведений.

УДК 621.38(075.8)
ББК 32.85я73

*Оригинал-макет данного издания является собственностью
Издательского центра «Академия», и его воспроизведение любым способом
без согласия правообладателя запрещается*

© Ямпурин Н. П., Баранова А. В., 2010

© Образовательно-издательский центр «Академия», 2010

ISBN 978-5-7695-5908-2

© Оформление. Издательский центр «Академия», 2010

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|--|-----------|
| Предисловие | 3 |
| Глава 1. Основные термины и определения теории надежности | 5 |
| 1.1. Понятия надежности | 5 |
| 1.2. Отказы и неисправности | 6 |
| 1.3. Системы и элементы | 7 |
| Глава 2. Характеристики надежности радиоэлектронных средств при внезапных отказах | 9 |
| 2.1. Единичные показатели безотказности | 9 |
| 2.2. Зависимости между отдельными показателями надежности | 15 |
| 2.3. Единичные показатели восстанавливаемости | 17 |
| 2.4. Комплексные показатели надежности РЭС | 19 |
| 2.5. Рекомендации по выбору показателей надежности для различных электронных средств | 21 |
| 2.6. Задачи для самостоятельного решения с примерами решения типовых вариантов | 22 |
| Глава 3. Законы распределения случайных величин при анализе надежности РЭС | 30 |
| 3.1. Биномиальный закон распределения | 30 |
| 3.2. Распределение Пуассона | 31 |
| 3.3. Экспоненциальное распределение | 32 |
| 3.4. Нормальное распределение | 34 |
| 3.5. Распределение Вейбулла | 36 |
| 3.6. Гамма-распределение | 37 |
| 3.7. Распределение Рэля | 38 |
| 3.8. Задачи для самостоятельного решения с примерами решения типовых вариантов | 39 |
| Глава 4. Анализ структурных схем надежности РЭС | 44 |
| 4.1. Основные сведения | 44 |
| 4.2. Метод преобразования сложной логической структуры по базовому элементу | 47 |
| 4.3. Задачи для самостоятельного решения с примерами решения типовых вариантов | 49 |
| Глава 5. Резервирование радиоэлектронных средств | 59 |
| 5.1. Методы резервирования | 59 |

| | |
|---|------------|
| 5.2. Общее резервирование | 62 |
| 5.3. Поэлементное резервирование | 63 |
| 5.4. Смешанное резервирование | 65 |
| 5.5. Мажоритарное резервирование | 66 |
| 5.6. Задачи для самостоятельного решения | 67 |
| Глава 6. Методы расчета надежности электронных средств | 71 |
| 6.1. Основные положения | 71 |
| 6.2. Классификация методов расчета | 73 |
| 6.3. Методы расчета надежности по внезапным отказам при последовательном соединении элементов | 74 |
| 6.4. Прикидочный расчет надежности | 75 |
| 6.5. Ориентировочный расчет надежности | 78 |
| 6.6. Окончательный расчет надежности | 81 |
| 6.7. Задачи для самостоятельного решения с примерами решения типовых вариантов | 83 |
| Глава 7. Надежность восстанавливаемых радиоэлектронных средств | 88 |
| 7.1. Восстанавливаемость как свойство надежности | 88 |
| 7.2. Особенности расчета показателей надежности восстанавливаемых систем | 89 |
| 7.3. Оценка надежности восстанавливаемых РЭС | 90 |
| 7.3.1. Оценка надежности нерезервируемой восстанавливаемой системы | 90 |
| 7.3.2. Оценка надежности нерезервируемой системы, восстанавливаемой двумя способами | 92 |
| 7.3.3. Оценка надежности системы из двух блоков при ремонте двумя бригадами | 94 |
| 7.3.4. Оценка надежности системы с ненагруженным резервом | 96 |
| 7.3.5. Оценка надежности системы с нагруженным резервом | 98 |
| 7.4. Задачи для самостоятельного решения | 99 |
| Глава 8. Оценка надежности аппаратной части типовой телекоммуникационной вычислительной сети | 103 |
| 8.1. Общие сведения | 103 |
| 8.2. Определение надежности ТВС со структурой «звезда» | 104 |
| 8.3. Определение надежности ТВС со структурой «кольцо» | 106 |
| 8.4. Определение надежности системы с профилактическим обслуживанием | 108 |
| 8.5. Задачи для самостоятельного решения | 109 |
| Глава 9. Обеспечение надежности программных средств | 111 |
| 9.1. Общие сведения | 111 |
| 9.2. Особенности проектирования и эксплуатации программных средств | 112 |
| 9.3. Классификация методов обеспечения надежности программных средств | 114 |

| | |
|--|------------|
| 9.4. Инженерные методы проектирования надежных программных средств | 116 |
| 9.4.1. Характеристики программных ошибок и априорное определение надежности ПС | 116 |
| 9.4.2. Тестирование как основной метод проектирования надежных ПС | 120 |
| Глава 10. Автоматизированный расчет надежности электронных средств | 125 |
| 10.1. Общие сведения о современных средствах автоматизированного расчета надежности и тенденциях их развития | 125 |
| 10.2. Подсистема анализа показателей безотказности радиоэлектронных средств АСОНИКА-Б | 127 |
| 10.3. Проектирование электронных средств с применением системы АСОНИКА | 128 |
| 10.3.1. Основные положения виртуального проектирования с применением системы АСОНИКА | 128 |
| 10.3.2. Структура автоматизированной системы АСОНИКА | 132 |
| 10.3.3. Пример расчета надежности с применением САПР АСОНИКА-Б | 134 |
| Ответы к задачам | 140 |
| Приложения | 142 |
| Приложение 1. Справочные данные по надежности современной элементной базы | 142 |
| Приложение 2. Рекомендации по работе с подсистемой АСОНИКА-Б | 226 |
| Список литературы | 234 |

ПРЕДИСЛОВИЕ

Среди множества существующих в настоящее время книг по надежности одни дают общее представление о надежности технических средств, в том числе электронных, а другие — содержат энциклопедическое изложение предмета, но ни одна из них не подходит для изучения начального курса. Кроме того, необходимость написания данного учебного пособия обусловили следующие причины:

- введение в 1990-е гг. ряда новых стандартов, уточняющих и развивающих основные положения теории и расчета надежности, в том числе электронных средств (ЭС);
- широкое распространение устройств цифровой обработки сигналов, особенно сигнальных процессоров, подтвердившее тот факт, что надежность современных систем определяется надежностью не только их аппаратной части, но и программной. Это устанавливается и соответствующими стандартами, например введением термина «информационная надежность»;
- развитие CALS-технологий (в отечественной терминологии — ИПИ-технологий), определившее широкое использование информационных технологий, в частности автоматизированного расчета надежности.

Основное внимание в данном учебном пособии уделяется показателям надежности неремонтируемой и ремонтируемой аппаратуры, анализу структурных схем надежности и теории надежности восстанавливаемых изделий.

Для оказания максимальной помощи студентам в овладении методами определения надежности ЭС приводятся необходимый комплект примеров и задачи для самостоятельного решения, а также примеры решения типовых вариантов.

Учебное пособие включает в себя десять глав:

- первая глава содержит основные термины и определения;
- вторая — характеристики надежности радиоэлектронных средств (РЭС) при внезапных отказах;
- третья — законы распределения случайных величин, используемых при анализе надежности РЭС;

- четвертая — описание структурных схем надежности РЭС;
- пятая — вопросы резервирования РЭС;
- шестая и седьмая — методики расчета характеристик надежности восстанавливаемых и невосстанавливаемых изделий;
- восьмая — оценку надежности аппаратной части типовых информационных систем;
- девятая — оценку надежности программных средств (ПС);
- десятая — обзор современных САПР по расчету показателей надежности ЭС.

Два имеющихся в учебном пособии приложения содержат справочную информацию по надежности современной элементной базы и рекомендации по работе с подсистемой АСОНИКА-Б.

Авторы считают данное пособие существенным дополнением к имеющимся учебникам по теории надежности: оно будет полезно студентам при выполнении курсовых и дипломных работ, а также преподавателям вузов как для аудиторных занятий, так и при организации самостоятельной работы студентов.

Пособие написано на основе многолетнего опыта преподавания авторами спецкурса «Основы надежности электронных средств» в Арзамасском политехническом институте, являющемся филиалом Нижегородского государственного технического университета им. Р. Е. Алексеева. Также авторы использовали опыт преподавания курса «Теоретические основы конструирования и надежности ЭС» в Московском авиационном институте (техническом университете) проф. А. В. Фоминым и доц. О. Н. Умрихиным.

В учебном пособии не рассматривается расчет показателей надежности интегральных микросхем, что связано не только с ограниченным объемом издания, но и со спецификой данного вопроса.

В учебном пособии упор сделан на универсальные программные средства, а не на уникальные — являющиеся инструментом исследователей.

Авторы выражают благодарность Е. В. Второвой за работу по техническому оформлению материалов учебного пособия.

ОСНОВНЫЕ ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ

1.1. Понятия надежности

Рост сложности радиоэлектронной аппаратуры после второй мировой войны привел к снижению ее надежности, что стимулировало, в свою очередь, развитие соответствующего научного направления — теории надежности.

Терминология в теории надежности сложилась не сразу, ее формирование определялось развитием представлений о надежности.

Первым нормативным документом, заложившим основы терминологии и установившим важнейшие характеристики надежности изделий, стал ГОСТ 13377—67. Вторую редакцию этого документа (ГОСТ 13377—75) сменил новый ГОСТ 27.002—83, в последней редакции которого (ГОСТ 27.002—89) закреплены и уточнены все важнейшие термины и определения.

Термины и характеристики, используемые в области надежности, являются общими для различных отраслей промышленности, что говорит о фундаментальности этой науки.

Все изделия радиоэлектронной промышленности характеризуются качеством, т. е. определенной совокупностью свойств, которые существенно отличают данное изделие от других и определяют степень его пригодности для использования по своему назначению. В процессе эксплуатации вследствие износа и происходящих необратимых процессов старения характеристики РЭС (а следовательно, и их качество) изменяются. Изменение качества изделия во времени характеризует один из главных его показателей — надежность.

Под **надежностью** понимают свойство изделия выполнять заданные функции, сохраняя свои эксплуатационные показатели в определенных пределах в течение требуемого промежутка времени или требуемой наработки при соблюдении режимов эксплуатации, правил технического обслуживания, хранения и транспортировки. Надежность оценивается по следующим характеристикам изделия: работоспособность, долговечность, безотказность, ремонтпригодность, сохраняемость (ГОСТ 27.002—89).

Работоспособность — состояние изделия, при котором оно способно выполнять заданные функции с параметрами, установленными требованиями технической документации.

Долговечность — свойство изделия длительно сохранять работоспособность до предельного состояния с необходимыми перерывами для профилактического обслуживания. Предельное состояние определяется невозможностью дальнейшей эксплуатации изделия, обусловленной либо снижением его эффективности, либо требованиями безопасности, оговоренными в технической документации.

Безотказность — свойство изделия сохранять работоспособность в течение некоторой наработки без вынужденных перерывов.

Ремонтопригодность — приспособленность изделия к предупреждению, обнаружению и устранению отказов и неисправностей посредством проведения профилактического обслуживания и ремонтов.

Сохраняемость — свойство изделия поддерживать свои эксплуатационные показатели в течение и после срока хранения и транспортировки, установленного технической документацией.

1.2. Отказы и неисправности

Отказ — случайное событие, заключающееся в нарушении работоспособности изделия.

Отказы классифицируются по различным признакам.

1. По характеру возникновения различают *внезапные* отказы, происходящие в результате изменения одного или нескольких параметров изделия, и *постепенные* отказы, при которых наблюдается постепенное изменение главных параметров изделия в результате либо его износа, либо старения.

2. По взаимосвязи отказы подразделяются на *зависимые* — появляющиеся вследствие предшествующих случаев, и *независимые* — возникновение которых не связано с предшествующими отказами.

3. По характеру проявления различают отказы *явные* — которые обнаруживаются визуально, и *неявные* — для обнаружения которых требуется специальная измерительная аппаратура.

4. По характеру устранения отказы подразделяются на *устойчивые* — сравнительно просто обнаруживаемые и обычно легко устраняемые, и *самоустраняющиеся* — которые исчезают сами, а обнаружить и устранить их бывает очень сложно.

Самоустраняющиеся отказы проявляются в виде сбоя или в форме перемежающегося отказа. *Сбоем* называется однократно

возникающий и самоустраниющийся отказ. *Отказ* представляет собой один из видов неисправности изделия. *Неисправность* — это несоответствие изделия одному или нескольким требованиям, предъявляемым к нему техническими условиями. Причем не все неисправности являются отказами. Неисправности, которые не приводят к отказу в процессе эксплуатации, называются *дефектами*.

1.3. Системы и элементы

В теории надежности различают надежность системы в целом и надежность элементов, входящих в эту систему.

Системой называется совокупность совместно действующих объектов, полностью обеспечивающая выполнение определенных практических задач, при этом под *объектом* понимают различные взаимодействующие технические устройства.

Одновременно с термином «система» употребляют аналогичные по смыслу термины «аппаратура» и «устройство», однако обобщающим в электронике является термин «электронное средство».

Различают системы восстанавливаемые и невосстанавливаемые. *Восстанавливаемая* система после отказа подвергается ремонту и продолжает выполнять свои функции. Большинство используемых на практике систем относятся к восстанавливаемым. *Невосстанавливаемая* система в случае возникновения отказа не подлежит или не поддается восстановлению либо по экономическим соображениям, либо по техническим причинам.

Системы различают также по характеру обслуживания. Системы, выполняющие свои задачи с помощью обслуживающего персонала и обычно приспособленные к устранению отказов во время эксплуатации, относятся к *обслуживаемым*. Системы, выполняющие возложенные на них функции без участия обслуживающего персонала, называются *необслуживаемыми*. Такие системы могут быть самовосстанавливаемыми, т.е. приспособленными к самостоятельному устранению отказов без участия обслуживающего персонала, например за счет автоматического резервирования.

По характеру влияния отказов элементов на выходной параметр системы подразделяются на простые и сложные. *Простые* системы при отказе элементов либо полностью теряют работоспособность, либо продолжают выполнять свои функции в полном объеме, если отказавший элемент зарезервирован. Такие системы могут находиться только в двух состояниях: рабочем и нерабочем. *Сложные* системы обладают способностью при отказе

элементов выполнять свои функции, но с меньшей эффективностью, т. е. они могут находиться в нескольких рабочих состояниях. К сложным системам обычно относятся многоканальные комплексы с разветвленной структурой, состоящие из нескольких самостоятельных, но взаимосвязанных устройств, например компьютерные сети.

Также системы могут быть с *резервированием* и *без резервирования*.

Элементом называется часть системы, не имеющая самостоятельного эксплуатационного назначения и выполняющая в ней некоторые функции. Для практического использования любого элемента необходимо соединение его с другими элементами в определенную систему. Элементами в ЭС являются различные электрорадиоизделия (ЭРИ), например резисторы, конденсаторы, интегральные схемы, кабели, реле, а также более сложные конструкции, входящие в состав устройств. При анализе надежности блочных и функциональных систем в качестве элементов могут рассматриваться отдельные каскады, узлы, блоки. Элементами сложных систем являются отдельные устройства и агрегаты.

Одно и то же устройство в зависимости от решаемой задачи может рассматриваться либо как система, либо как элемент.

Контрольные вопросы

1. Какие нормативные документы устанавливают терминологию в теории надежности?
2. Дайте определение понятия надежности РЭС.
3. Что такое работоспособность, долговечность, безотказность, ремонтпригодность и сохраняемость РЭС?
4. Что называется отказом РЭС?
5. Какие виды отказов РЭС вы знаете?
6. Что представляет собой сбой в РЭС?
7. Что называется системой в РЭС?
8. Какие виды систем используются в РЭС?
9. Какие системы являются простыми и какие сложными?
10. Что называется элементом в РЭС?
11. Определите, какому виду относятся следующие неисправности телевизора:
 - а) при включении перегорел предохранитель;
 - б) четкость изображения ухудшилась;
 - в) иногда изображение распадается на отдельные крупноразмерные фрагменты.

ХАРАКТЕРИСТИКИ НАДЕЖНОСТИ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ ПРИ ВНЕЗАПНЫХ ОТКАЗАХ

2.1. Единичные показатели безотказности

Количественно надежность характеризуется **показателями надежности**, отражающими те или иные ее свойства. В зависимости от того, какие свойства надежности РЭС показатели отражают, их подразделяют на *единичные* и *комплексные*.

ГОСТ 27.002—89 определяет следующие шесть основных показателей надежности: вероятность безотказной работы $P(t)$, гамма-процентная наработка до первого отказа T_γ , интенсивность отказов $\lambda(t)$, средняя наработка до первого отказа $T_{ср}$, средняя наработка на отказ T_0 , параметр потока отказов $V(t)$.

Четыре первых показателя используются для оценки надежности невосстанавливаемых (неремонтируемых) РЭС, а два последних — восстанавливаемых (ремонтируемых). В частном случае (например, если оценивается надежность ремонтируемого радиоизделия до первого отказа) они совпадают, но в общем случае показатели надежности ремонтируемых и неремонтируемых РЭС имеют разное математическое описание.

Дадим вероятностное и статистическое определения основных показателей надежности, а также проанализируем их основные свойства.

Вероятность безотказной работы — это вероятность того, что в заданном интервале времени $(0, t)$ или просто в течение времени t изделие не откажет, т. е.

$$P(t) = p\{\theta \geq t\}, \quad (2.1)$$

где θ — случайная величина, характеризующая время работы изделия до отказа.

Функция $P(t)$ обладает следующими основными свойствами:
 $0 \leq P(t) \leq 1$, $P(0) = 1$, $\lim_{t \rightarrow \infty} P(t) = 0$.

Типичный график функции $P(t)$, называемый в литературе кривой убыли изделий, приведен на рис. 2.1.

Значение $P(t_i)$ определяет долю работоспособных изделий в момент времени t_i , в чем и состоит физический смысл функции $P(t)$.

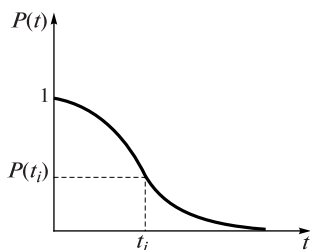


Рис. 2.1. Изменение вероятности безотказной работы изделия во времени

Наряду с вероятностным определением функции $P(t)$ используется и статистическое определение вероятности безотказной работы:

$$\bar{P}(t) = \frac{N(t)}{N_0} = 1 - \frac{n(t)}{N_0}, \quad (2.2)$$

где $N(t)$ — число изделий, исправных на момент времени t ; N_0 — общее число изделий, поставленных на испытания; $n(t)$ — число изделий, отказавших в интервале времени $(0, t)$.

При $N_0 \rightarrow \infty$ функции (2.1) и (2.2) будут равны.

Вероятность безотказной работы можно определить и для произвольного интервала времени (t_0, t) , что на практике соответствует работе изделия еще до момента времени t_0 . В этом случае говорят об условной вероятности безотказной работы $P(t_0, t)$, считая, что в момент времени t_0 (в момент начала наработки) изделие было работоспособно.

Условная вероятность определяется по следующей формуле:

$$P(t_0, t) = p\{\theta \geq t_0, \theta \geq t\} = P(t)/P(t_0), \quad (2.3)$$

где $P(t_0)$ и $P(t)$ — вероятности безотказной работы в интервалах времени $(0, t_0)$ и $(0, t)$ соответственно.

Статистически условная вероятность безотказной работы определяется выражением

$$\bar{P}(t_0, t) = N(t)/N(t_0), \quad (2.4)$$

откуда очевидно, что при $t_0 = 0$ она преобразуется к виду (2.2).

Помимо основного показателя $P(t)$ в теории надежности используются и следующие вспомогательные показатели: вероятность отказа $Q(t)$ и ее производная по времени $\varphi(t)$ — плотность распределения наработки до отказа (в ГОСТ 13377—67 эти показатели были отнесены к основным, но время расставило все по своим местам: сейчас они вспомогательные) [13].

Вероятность отказа — это вероятность того, что в заданном интервале времени $(0, t)$ радиоизделие откажет, т. е.

$$Q(t) = p\{\theta < t\}. \quad (2.5)$$

Поскольку функции $P(t)$ и $Q(t)$ образуют полную группу несовместных событий, то

$$P(t) + Q(t) = 1. \quad (2.6)$$

Статистически вероятность отказа определяется отношением

$$\bar{Q}(t) = n(t)/N_0. \quad (2.7)$$

Плотность распределения наработки до отказа (иногда называемая *частотой отказов*)

$$\varphi(t) = dQ(t)/dt, \quad (2.8)$$

или с учетом (2.6)

$$\varphi(t) = -dP(t)/dt,$$

т. е. $\varphi(t)$ представляет собой «скорость» снижения надежности изделия во времени.

Произведение $\varphi(t) dt$ характеризует безусловную вероятность того, что изделие откажет в интервале времени $(t, t + dt)$ при условии, что до момента времени t оно находилось в работоспособном состоянии. Статистически плотность распределения наработки до отказа определяется следующим отношением:

$$\bar{\varphi}(t) = \frac{\Delta n(t)}{N_0 \Delta t}, [1/\text{ч}],$$

где $\Delta n(t)$ — число отказов в интервале времени Δt .

Особенностью данного показателя является наличие размерности [1/ч].

Гамма-процентная наработка до первого отказа — это наработка, в течение которой отказ изделия не возникнет с вероятностью γ , выраженной в процентах ($P_\gamma = \gamma/100$):

$$P_\gamma = 1 - \int_0^{T_\gamma} \varphi(t) dt. \quad (2.9)$$

Статистическое определение гамма-процентной наработки следующее:

$$\bar{P}(T_\gamma) = \bar{P}_\gamma = N(T_\gamma)/N_0, \quad (2.10)$$

где $N(T_\gamma)$ — число изделий, исправных в момент времени T_γ .

Интенсивность отказов — это условная плотность вероятности отказа изделия в некоторый момент времени наработки при условии, что до этого момента отказов не было:

$$\lambda(t) = \frac{dQ(t)}{dt} \frac{1}{(1-Q(t))} = \frac{\varphi(t)}{P(t)}, [1/\text{ч}]. \quad (2.11)$$

В зарубежной литературе в качестве единицы измерения интенсивности отказов используют 1 fit (фит) = 10^{-6} [1/ч].

Величина $\lambda(t)dt$ характеризует условную вероятность того, что изделие откажет в интервале времени $(t, t + dt)$ при условии, что в момент времени t оно находилось в работоспособном состоянии. Статистически интенсивность отказов определяется как доля изделий, которые отказывают в единицу времени после момента времени t :

$$\bar{\lambda}(t) = \frac{n(t + \Delta t) - n(t)}{N(t)\Delta t} = \frac{\Delta n}{N(t)\Delta t}, [1/\text{ч}], \quad (2.12)$$

где $n(t)$ и $n(t + \Delta t)$ — число изделий, отказавших соответственно к моментам времени t и $t + \Delta t$.

Интенсивность отказов часто называют λ -характеристикой, или кривой жизни изделия.

Опыт эксплуатации РЭС показывает, что изменение интенсивности отказов системы длительного действия происходит следующим образом (рис. 2.2):

I — период начальной приработки аппаратуры. В этот период наблюдается повышенное число отказов системы вследствие различных производственных недостатков и выхода из строя наиболее ненадежных ее элементов со скрытыми дефектами. По мере выхода из строя дефектных элементов и замены их более качественными интенсивность отказов системы понижается. Продолжительность периода приработки зависит от типа системы и вида характеристик элементов, входящих в нее. Обычно период приработки составляет от десятков до сотен часов. Чем более однородны характеристики элементов, тем короче период приработки. Малая продолжительность периода приработки

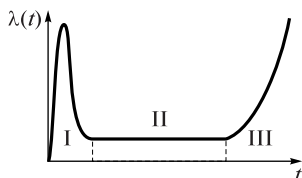


Рис. 2.2. Кривая жизни системы:
I — период приработки; II — период нормальной эксплуатации; III — период массового износа и старения

является достоинством системы, так как его можно исключить из времени эксплуатации в результате предварительной тренировки на заводе-изготовителе;

II — период нормальной эксплуатации системы, характеризуемый пониженным уровнем и постоянством интенсивности отказов во времени. Продолжительность этого периода зависит от среднего срока службы элементов системы и условий ее эксплуатации. Обычно она составляет несколько тысяч часов и характеризует долговечность аппаратуры. Интенсивность отказов системы в период нормальной эксплуатации можно снизить за счет проведения профилактических ремонтных мероприятий. Период нормальной эксплуатации системы определяется экспоненциальным законом распределения вероятности безотказной работы;

III — период массового износа и старения элементов системы, характеризуемый значительным ростом числа отказов. С наступлением этого периода дальнейшая эксплуатация системы нецелесообразна.

Средняя наработка до первого отказа — это математическое ожидание времени t исправной работы изделия до первого отказа:

$$T_{\text{cp}} = \int_0^{\infty} t \varphi(t) dt. \quad (2.13)$$

Вид функции $\varphi(t)$ определяется конкретным законом распределения случайной величины t .

Статистически средняя наработка до первого отказа находится как среднее арифметическое значение реализаций случайного интервала времени θ работы изделия до первого отказа:

$$\bar{T}_{\text{cp}} = \sum_{i=1}^{N_0} \theta_i / N_0, \quad (2.14)$$

где θ_i — время наработки i -го изделия до первого отказа; N_0 — число исправных изделий, поставленных на испытания.

Средняя наработка на отказ — это математическое ожидание интервала времени между соседними восстанавливаемыми отказами:

$$T_0 = \int_0^{\infty} dF_k(t), \quad (2.15)$$

где $F_k(t)$ — функция распределения случайного времени θ_k исправной работы изделия между $(k - 1)$ -м и k -м отказами.

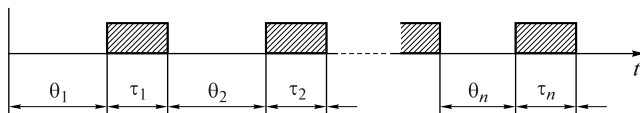


Рис. 2.3. Распределение отказов во времени

Статистически наработка на отказ определяется как среднее арифметическое значение реализаций случайного времени $\theta_{k,i}$ исправной работы изделия между $(k - 1)$ -м и k -м отказами без учета времени ремонта (рис. 2.3):

$$\bar{T}_0 = \sum_{i=1}^m \theta_{k,i} / m, \quad (2.16)$$

где m — число отказов испытываемых изделий.

При этом предполагается, что все вышедшие из строя радиоизделия заменяются новыми или восстанавливаются, т.е. число испытываемых изделий сохраняется одинаковым на протяжении всего испытания.

Параметр потока отказов — это предел отношения вероятности появления хотя бы одного отказа восстанавливаемого изделия за промежуток времени Δt к значению этого промежутка времени $\Delta t \rightarrow 0$, т.е.

$$V(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} (p\{t, t + \Delta t\} / \Delta t). \quad (2.17)$$

Статистически параметр потока отказов (средняя частота отказов) определяется как отношение числа отказов $\Delta n'$ в единицу времени к общему числу N_0 испытываемых изделий, включая отказы, возникшие после замены отказавших элементов:

$$\bar{V}(t) = \Delta n' / (N_0 \Delta t). \quad (2.18)$$

При сравнении формул (2.18) и (2.12) видно, что $\Delta n' \geq \Delta n$, поскольку в случае ремонтируемой РЭС число отказов может возрасти.

Наибольшее значение в теории надежности имеет так называемый *простейший поток отказов*, т.е. поток отказов, удовлетворяющий условиям стационарности, отсутствия последствия и ординарности.

Ординарный поток событий имеет место, когда вероятность появления двух и более отказов в единичном интервале времени

пренебрежимо мала по сравнению с вероятностью появления одного отказа.

Стационарный поток событий характеризуется постоянным относительным числом отказов в единичном интервале времени.

Понятие *отсутствие последействия* означает, что вероятность появления отказов в единичном интервале времени не зависит от возникновения отказов во всех других непересекающихся интервалах времени, т. е. отказы возникают независимо друг от друга. Для стационарных потоков отказов $\lambda(t) = \text{const}$, а так как значения $V(t)$ и $\lambda(t)$ совпадают, то $V(t) = \lambda(t) = \text{const}$.

2.2. Зависимости между отдельными показателями надежности

1. Определим связь между частотой отказов $\varphi(t)$ и вероятностью безотказной работы $P(t)$.

Проинтегрировав правую и левую части соотношения (2.8) для $Q(t)$ в пределах от 0 до t , получим выражение $Q(t) = \int_0^t \varphi(t) dt$, подставив которое в формулу (2.6), запишем:

$$P(t) = 1 - \int_0^t \varphi(t) dt = \int_t^{\infty} \varphi(t) dt. \quad (2.19)$$

2. Определим связь между частотой отказов $\varphi(t)$, интенсивностью отказов $\lambda(t)$ и вероятностью безотказной работы $P(t)$.

Воспользуемся статистическим определением интенсивности отказов $\bar{\lambda}(t)$. Разделив числитель и знаменатель выражения (2.12) на $N_0 \Delta t$, запишем:

$$\bar{\lambda}(t) = \frac{\Delta n / (N_0 \Delta t)}{(N(t) \Delta t) / (N_0 \Delta t)} = \frac{\Delta n / (N_0 \Delta t)}{N(t) / N_0}.$$

Здесь выражение, стоящее в числителе, представляет собой функцию $\bar{\varphi}(t)$, а выражение, стоящее в знаменателе, согласно формуле (2.2) определяет функцию $\bar{P}(t)$, т. е. получаем

$$\bar{\lambda}(t) = \bar{\varphi}(t) / \bar{P}(t), \quad (2.20)$$

что полностью соответствует формуле (2.11).

3. Определим аналитическую связь между вероятностью безотказной работы $P(t)$ и интенсивностью отказов $\lambda(t)$.

Воспользуемся равенством (2.6) и запишем формулу (2.11) в следующем виде:

$$\lambda(t) = -\frac{dP(t)}{dt} \frac{1}{P(t)} = -\frac{d}{dt} \ln P(t). \quad (2.21)$$

Проинтегрировав (2.21) от 0 до t , запишем:

$$\ln P(t) = -\int_0^t \lambda(t) dt,$$

или, потенцируя окончательно, получим:

$$P(t) = \exp\left(-\int_0^t \lambda(t) dt\right). \quad (2.22)$$

Формула (2.22) является одной из важнейших в теории надежности невосстанавливаемых изделий.

Для практически важного случая $\lambda(t) = \lambda = \text{const}$ из (2.22) можно записать

$$P(t) = \exp(-\lambda t), \quad (2.23)$$

т.е. в период нормальной эксплуатации радиоизделия вероятность его безотказной работы снижается по экспоненциальному закону.

4. Определим связь между средней наработкой до первого отказа T_{cp} и вероятностью безотказной работы $P(t)$.

Для определения величины T_{cp} подставим выражение (2.8) в формулу (2.13):

$$T_{\text{cp}} = \int_0^{\infty} t \left(-\frac{dP(t)}{dt}\right) dt = -\int_0^{\infty} t dP(t).$$

Проинтегрировав полученное выражение по частям, получим

$$T_{\text{cp}} = -tP(t)\Big|_0^{\infty} + \int_0^{\infty} P(t) dt,$$

где первый интеграл равен нулю, следовательно,

$$T_{\text{cp}} = \int_0^{\infty} P(t) dt. \quad (2.24)$$

Выражение (2.24) показывает, что кривая убыли радиоизделий (см. рис. 2.1) обладает следующими свойствами: площадь, ограниченная ею и осями координат, численно равна среднему времени безотказной работы T_{cp} . В случае когда $\lambda = \text{const}$, из формулы (2.24) имеем

$$T_{cp} = 1/\lambda. \quad (2.25)$$

Подставив выражение (2.25) в формулу (2.22), получим

$$P(t) = \exp(-t/T_{cp}). \quad (2.26)$$

5. Определим связь между гамма-процентной наработкой до отказа T_γ и средней наработкой до отказа T_{cp} .

Подставим выражение (2.26) в формулу (2.8), а полученное в результате выражение для $\varphi(t)$ — в формулу (2.9).

Выполнив необходимые преобразования, запишем выражение $P_\gamma = \exp(-T_\gamma/T_{cp})$, прологарифмировав которое, получим

$$T_\gamma = -T_{cp} \ln(P_\gamma) = -T_{cp} \ln(\gamma/100). \quad (2.27)$$

Из формулы (2.27) следует: $P_\gamma < e^{-1}$ при $T_{cp} < T_\gamma$ и $P_\gamma > e^{-1}$ при $T_{cp} > T_\gamma$.

Таким образом, одного известного показателя надежности изделия ($P(t)$, $\lambda(t)$ или T_{cp}) вполне достаточно для нахождения других ее показателей надежности.

2.3. Единичные показатели восстанавливаемости

Большинство РЭС является системами длительного использования, которые после отказов восстанавливаются и продолжают функционировать. Процесс восстановления, заключающийся в обнаружении и устранении отказа, так же как и процесс возникновения отказов, является вероятностным. В качестве случайной величины здесь выступает время восстановления, зависящее от многих факторов (характера возникшего отказа, приспособленности аппаратуры к быстрому обнаружению отказа, степени подготовки обслуживающего персонала, быстроты замены отказавшего элемента и др.). Опыт эксплуатации показывает, что основную долю времени восстановления (80...90 %) составляет процесс обнаружения отказавшего элемента.

Под **восстанавливаемостью** принято понимать свойство системы восстанавливать свою работоспособность после возникновения отказа с учетом качества обслуживания.

Количественно восстанавливаемость системы оценивается следующими показателями: вероятностью восстановления $P_B(\tau)$, средним временем восстановления T_B и интенсивностью восста-