Под редакцией профессора И. А. УШАКОВА

МОСКВА «РАДИО И СВЯЗЬ» 1985

Рецензенты: докт. техн. наук проф. А. И. Перроте, докт. техн. наук проф. Ф. И. Кузьмин, канд. техн. наук А. Н. Явриян, канд. техн. наук Э. Т. Давыдов, канд. техн. наук И. В. Наливкин, канд. техн. наук А. И. Андреев

Рассматриваются вопросы расчета надежности на различных этапах разработки и эксплуатации технических систем, решения задач оптимального проектирования структур и моделирования процессов функционирования систем с учетом ресурсных и экономических ограничений.

В написании книги принимали участие также специалисты по надежности из ГДР, Республики Куба и США.

Для инженерно-технических работников.

Редакция литературы по кибернетике и вычислительной технике

Надежность технических систем: Справочник. Ю. К. Беляев, В. А. Богатырев, В. В. Болотин и др.; Под ред. И. А. Ушакова. — М.: Радио и связь, 1985.— 608 с, ил.

Оглавление справочника Надежность технических систем

Предисловие редактора
РАЗДЕЛ I. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Глава 1. Термины и понятия надежности
1.1. Предварительные замечания
1.2. Общие понятия
1.3. Характеристики отказов
1.4. Резервирование
1.5. Показатели безотказности и ремонтопригодности
1.6. Показатели долговечности и сохраняемости
1.7. Терминология по надежности в области систем энергетики

Глава 2. Показатели надежности
2.1. Предварительные замечания
2.2. Невосстанавливаемые объек
2.3. Восстанавливаемые объекты
2.4. Специальные показатели
2.5. Выбор показателей надежности системы
2.6. Задание требований по надежности

РАЗДЕЛ II. МЕТОДЫ РАСЧЕТА

Глава 3. Надежность элемента

3.1. Невосстанавливаемый элемент
3.2. Восстанавливаемый элемент

Глава 4. Системы без восстановления
4.1. Последовательное соединение элементов
4.2. Нагруженный резерв
4.3. Ненагруженный резерв
4.4. «Схема гибели» (экспоненциальное распределение наработки до отказа)

Глава 5. Системы с восстановлением
5.1. Общая схема марковского процесса
5.2. «Схема гибели и размножения»
5.3. Восстанавливаемые резервированные системы различной кратности с неидеальными параметрами контроля и переключения
5.4. Приближенный метод расчета надежности систем с восстановлением

Глава 6. Дублирование с восстановлением
6.1. Предварительные замечания
6.2. Идентичные элементы
6.3. Зависимые элементы
6.4. Учет контроля и переключения
6.5. Ненагруженный резерв с профилактикой

Глава 7. Системы с монотонной структурой
7.1. Предварительные замечания
7.2. Определение монотонной структуры
7.3. Метод прямого перебора
7.4. Метод разложения относительно особого элемента
7.5. Аналитико-статистический метод
7.6. Метод минимальных путей и разрезов

Глава 8. Расчет эффективности функционирования систем
8.1. Предварительные замечания
8.2. Системы кратковременного действия
8.3. Системы длительного действия
8.4. Некоторые частные случаи
8.5. Вопросы декомпозиции сложных систем
8.6. Методические указания по оценке эффективности
8.7. Живучесть сложных систем

Глава 9. Системы с резервом времени
9.1. Терминология и классификация
9.2. Одноканальные системы с необесценивающими отказами
9.3. Одноканальные системы с обесценивающими отказами
9.4. Одноканальные системы со случайной загрузкой
9.5. Многоканальные системы

Глава 10. Системы массового обслуживания с ненадежным прибором

10.1. Предварительные замечания
10.2. Стандартная однолинейная система с ожиданием
10.3. Система с поступлением требований группами
10.4. Система с обратной связью
10.5. Система с «разогревом»
10.6. Система с поступлением требований группами, с «разогревом» и с обратной связью

РАЗДЕЛ III. СТАТИСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НА ЭВМ

Глава 11. Методология моделирования
11.1. Предварительные замечания
11.2. Описание модели и процедуры имитации
11.3. Программное обеспечение
11.4. Организация имитационного эксперимента
11.5. Моделирование редких событий
11.6. Некоторые методологические
вопросы

Глава 12. Моделирование высоконадежных систем
12.1. Предварительные замечания
12.2. Сущность метода ускоренного моделирования
12.3. Метод «взвешенного» моделирования
12.4. Алгоритм моделирования непосредственно на модели системы
12.5. Метод «искусственных» моментов регенерации
12.6. Численный метод нахождения вероятности безотказной работы высоконадежных систем

РАЗДЕЛ IV. ОПТИМИЗАЦИОННЫЕ ЗАДАЧИ НАДЕЖНОСТИ

Глава 13. Оптимальное резервирование
13.1. Предварительные замечания
13.2. Формулировка задач оптимального резервирования
13.3. Решение для показателя надежности типа R при одном ограничении
13.4. Приближенный метод решения для показателя надежности типа T при одном ограничении
13.5. Решение для показателя надежности типа R при нескольких ограничениях
13.6. Многофункциональная система при одном ограничении
13.7. Получение оценок сверху в задачах большой размерности
13.8. Приближенный алгоритм оптимального введения избыточности в системы с произвольной структурой

Глава 14. Обеспечение технических объектов запасными элементами
14.1. Предварительные замечания
14.2. Задачи оптимального проектирования системы ЗИП
14.3. Стратегии пополнения запасов элементов
14.4. Расчет показателей достаточности системы ЗИП сложной структуры
14.5. Расчет показателей достаточности одиночного комплекта ЗИП
14.6. Расчет показателя достаточности ремонтного комплекта ЗИП

14.7. Расчет показателя достаточности группового комплекта ЗИП
14.8. Оптимальное проектирование комплектов ЗИП
14.9. Оптимальное проектирование систем ЗИП сложной структуры

Глава 15. Оптимальное управление запасами
15.1. Управление запасом резервных изделий
15.2. Приближенное решение для иерархической системы многономенклатурного запаса элементов

Глава 16. Оптимальное обнаружение и поиск отказов
16.1. Предварительные замечания
16.2. Контроль работоспособности и диагностирование систем с одиночным отказом
16.3. Последовательный поиск отказов с восстановлением объекта контроля
16.4. Обнаружение отказавшего элемента

Глава 17. Модели технического обслуживания
17.1. Построение математической модели
17.2. Стратегии технического обслуживания при полной информации
17.3. Учет структуры системы
17.4. Профилактика при известной средней наработке

РАЗДЕЛ V. МЕТОДЫ ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИСПЫТАНИЙ

Глава 18. Общие вопросы экспериментальной оценки надежности. Первичный анализ статистических данных
18.1. Основные определения
18.2. Организация испытаний и сбор информации
18.3. Качественный анализ отказов и предварительная обработка результатов испытаний

Глава 19. Оценка показателей надежности по экспериментальным данным
19.1. Предварительные замечания
19.2. Типы оцениваемых показателей надежности
19.3. Характер априорных сведений при определении показателей надежности по экспериментальным данным
19.4. Характер статистической информации при различных стратегиях испытаний
19.5. Методы определения точечных оценок
19.6. Процедура проверки согласия опытного распределения с теоретическим
19.7. Интервальная оценка показателей надежности
19.8. Способ обработки неполных экспериментальных данных

Глава 20. Контроль показателей надежности
20.1. Предварительные замечания
20.2. Одноступенчатый контроль
20.3. Последовательный контроль

Глава 21. Вычисление доверительных границ для показателей надежности систем по результатам испытаний элементов
21.1. Предварительные замечания

21.2. Показатели надежности систем
21.3. Общие методы построения доверительных оценок
21.4. Нижняя доверительная оценка надежности системы в случае безотказных испытаний компонент
21.5. Биномиальные испытания элементов системы
21.6. Испытания системы со «стареющими» элементами
21.7. Интервальное оценивание показателя надежности системы из элементов с нормальным распределением наработки

Глава 22. Вычисление доверительных границ для показателей надежности сложных систем, состоящих из элементов с экспоненциальным распределением наработки
22.1. Доверительные границы для показателей надежности последовательной системы без восстановления (метод плоскости)
22.2. Доверительные границы для коэффициента готовности восстанавливаемого устройства
22.3. Метод Линдстрема — Маддена для последовательных систем
22.4. Метод подстановки
22.5. Метод фидуциальных вероятностей
22.6. Вычисление нижней доверительной границы для вероятности безотказной работы системы без восстановления методом фидуциальнЫх вероятностей
22.7. Вычисление доверительных границ для показателей надежности систем с восстанавливаемыми элементами методом фидуциальных вероятностей

Глава 23. Статистический контроль показателей надежности сложных систем по двум уровням
23.1. Предварительные замечания
23.2. Система с резервированием без восстановления
23.3. Выигрыш от учета информации по элементам системы
23.4. Последовательно-параллельная система без восстановления
23.5. Контроль коэффициента готовности системы с резервными восстанавливаемыми элементами
23.6. Выигрыш от учета информации по элементам системы
23.7. Контроль коэффициента готовности системы при экспоненциальных распределениях наработки и времени восстановления элементов
23.8. Контроль коэффициента готовности при экспоненциальных распределениях наработки и времени восстановления на основе F-распределения
23.9. Ориентировочный расчет плана контроля
23.10. Контроль показателя надежности по доверительным границам

Глава 24. Форсированные испытания
24.1. Основные понятия
24.2. Форсированные испытания, проводимые на одной выборке
24.3. Методы «доламывания» и ступенчатых нагружений

РАЗДЕЛ VI. СПЕЦИАЛЬНЫЕ МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТА

Глава 25. Распределения с монотонной функцией интенсивности
25.1. Предварительные замечания

25.2. Определения различных классов «стареющих» и «молодеющих» распределений
25.3. Сохранение монотонности функции интенсивности при различных преобразованиях
25.4. Граничные оценки для показателей надежности

Глава 26. Надежность механических систем
26.1. Основные понятия
26.2. Модели отказов механических систем
26.3. Применение теории выбросов случайных процессов

Глава 27. Методы расчета надежности систем с восстановлением
27.1. Общая постановка задачи
27.2. Марковские модели восстанавливаемых систем
27.3. Предельные теоремы и неравенства для регенерирующих процессов
27.4. Общая модель резервирования с восстановлением
27.5. Общая модель сложной восстанавливаемой системы

Глава 28. Специальные системы исследования систем с восстановлением
28.1. Стационарные характеристики для полумарковского процесса
28.2. Способ введения фиктивных состояний
28.3. Процессы марковского восстановления и алгоритмы фазового укрупнения
28.4. Использование точечных процессов для расчета стационарных характеристик
28.5. Топологический метод расчета надежности сложных систем

Глава 29. Надежность структурно-сложных ретрансляционных сетей
29.1. Предварительные замечания
29.2. Надежность сетей с рекуррентной структурой
29.3. Оценка показателей надежности сетей с произвольной структурой

Глава 30. Системы из элементов с многими состояниями
30.1. Предварительные замечания
30.2. Построение математической модели
30.3. Виды представления монотонных систем
30.4. Представление функции S(x) на основе минимальных реализаций вектора состояний
30.5. Представление функции S(x) на основе максимальных реализаций вектора состояния

Глава 31. Использование диффузионных процессов
31.1. Предварительные замечания
31.2. «Схема гибели и размножения». Коэффициент готовности
31.3. Моменты распределений
31.4. Вероятность безотказной работы
31.5. Немарковские модели надежности

РАЗДЕЛ VII. ПРИМЕРЫ ПРИКЛАДНЫХ ЗАДАЧ НАДЕЖНОСТИ

Глава 32. Надежность электроэнергетических систем
32.1. Особенности электроэнергетических систем
32.2. Определение показателей надежности электроснабжения потребителей
32.3. Использование резервов мощности в ЭЭС

Глава 33. Надежность магистральных газо- и нефтепроводов
33.1. Задачи расчета надежности
33.2. Модели надежности звеньев трубопровода
33.3. Расчет показателей надежности трубопровода
33.4. Временное резервирование в системах газо- и нефтеснабжения

Глава 34. Надежность информационных систем
34.1. Предварительные замечания
34.2. Основные показатели эффективности интегральных микросхем
34.3. Основные характеристики тракта передачи данных

Глава 35. Надежность гидромеханических сооружений
35.1. Постановка задачи
35.2. Нормирование надежности
35.3. Расчеты надежности

Глава 36. Вибрационные нагрузки иа радиоэлектронную аппаратуру
36.1. Предварительные замечания
36.2. Линейный осциллятор
36.3. Механические модели на основе линейных уравнений теории упругости
36.4. Нелинейные колебательные модели электрорадиоэлементов
36.5. Методы расчета надежности радиоэлектронной аппаратуры, подверженной вибрациям

ПРЕДИСЛОВИЕ РЕДАКТОРА

Обилие различных книг по проблеме надежности привело к необходимости написания справочника, в котором бы были сведены воедино практические рекомендации по априорным расчетам и экспериментальным оценкам надежности, моделированию и оптимизационным задачам.

Создание справочника, содержащего все современные результаты теории надежности, потребовало привлечения к его написанию многих специалистов, активно работающих в различных областях теории и практики надёжности. Авторы справочника имеют огромный практический опыт работы в промышленности и исследовательских институтах, а также богатый опыт преподавания в учебных заведениях. Все они известны многочисленными публикациями в области надежности, большинство являются авторами монографий. Привлечение для написания одной работы такого большого числа крупных специалистов по надежности, безусловно, существенно облегчило подготовку материала на высоком профессиональном уровне. Каждый из них написал именно те разделы, в которых максимально представлен его личный вклад в теорию и практику надежности. Это позволило существенным образом расширить спектр затрагиваемых вопросов, включить многие новые результаты.

Размещение материала в справочнике подчинено логике и последовательности создания и использования технических систем: сначала приводятся методы априорных вероятностных расчетов и статистического моделирования, т. е. методы, используемые на этапе проектирования, затем рассматриваются оптимизационные задачи надежности,

возникающие на последних этапах проектирования и в процессе эксплуатации, и, наконец, приводятся методы статистической обработки информации о надежности изделий, полученной в результате эксплуатации и специальных испытаний. Книгу завершают главы, содержащие более тонкие специальные математические методы, а также примеры нестандартных задач надежности, возникающие в различных технических областях.

Остановимся на содержании разделов справочника.

Раздел I. Общие сведения. В нем содержатся основные термины и понятия надежности технических систем, а также показатели надежности функционирования. В основном термины и показатели соответствуют тем, которые приняты в стандартах, однако введены и некоторые новые.

Раздел II. Методы расчета. Расчёты надежности в настоящее время стали обязательным элементом инженерного проектирования любой технической системы, любого технического изделия — от микросхемы до Единой системы связи страны, от отдельного силового агрегата до Единой энергосистемы страны. Широкое внедрение расчетов надежности в практику проектирования предполагает наличие достаточно общих и в определенном смысле унифицированных расчетных методов, которые являются общими для разработчиков и заказчиков. Действительно, без проведения количественного анализа принимаемых технических решений (в том числе и по вопросам надежности) проектирование, производство и эксплуатация современных сложных систем становятся практически невозможными. Это связано с огромными затратами материальных и людских ресурсов, а также с огромными затратами времени на реализацию разрабатываемых проектов.

Раздел III. Статистическое моделирование на ЭВМ. Статистическое (в более общем случае — имитационное) моделирование является мощным инструментом анализа сложных систем, описание которых удается провести лишь в терминах алгоритмов функционирования и взаимодействий элементов. Однако большая размерность задач и малая вероятность возникновения интересующих нас событий (в частности, при анализе высоконадежных систем) обусловливают то, что стандартные методы моделирования могут и не привести к получению сколько-нибудь достоверных характеристик надежности за обозримое время. Приходится прибегать к различным специальным методам ускорения процесса моделирования. В справочнике изложены лишь общие методологические вопросы моделирования процессов функционирования систем (в том числе и высоконадежных).

Раздел IV. Оптимизационные задачи надежности. В задачах надежности чаще всего приходится говорить не о «лучшем» решении, а об условно оптимальном, имея в виду, что обеспечение любых требуемых технических характеристик всегда связано с определенными затратами ресурсов.

В данном разделе приведены методы решения основных оптимизационных задач проектирования и эксплуатации технических систем. Наиболее разработанными в методологическом плане и наиболее широко внедренными в практику можно считать методы оптимального резервирования, в частности методы обеспечения технических систем запасными элементами. Методы технической диагностики в настоящее время также представляют собой мощное самостоятельное направление, причем имеется много

инженерных методов, использующих конкретную специфику различных технических объектов. (Здесь приводятся лишь математические модели процессов обнаружения и поиска отказов.) Методы оптимизации профилактических (регламентных) работ к настоящему времени находятся в стадии интересных математических изысканий, серьезное их внедрение затрудняется из-за отсутствия необходимых исходных данных. Приводимый в данном справочнике материал является в большей степени методологическим, а не справочным в прямом смысле этого слова.

Раздел V. Методы оценки надежности по результатам испытаний. Даже имея адекватную реальному объекту математическую модель и владея самым современным математическим аппаратом, нельзя проводить расчетные работы, если при этом отсутствуют достоверные статистические данные о надежности. Как часто расчеты надежности, проведенные с большой точностью на основании строгих математических моделей с использованием самой современной вычислительной техники, могут проводить к неверным решениям только из-за того, что исходная информация для этих расчетов не отличалась достоверностью.

При этом важно иметь не только достоверный источник первичной статистической информации по надежности и обоснованный метод классификации, но и корректные методы математической обработки. В данном разделе приводятся методы обработки определительных и контрольных испытаний, а также методы доверительной оценки показателей надежности систем по результатам испытаний отдельных ее элементов. (Последняя ситуация типична при оценке надежности таких сложных развивающихся систем, как сети ЭВМ, транспортные коммуникации, системы энергетики и связи, которые фактически никогда не находятся сколько-нибудь длительное время в неизменном составе и с неизменной структурой.)

Раздел VI. Специальные математические методы расчета. В данном разделе содержатся некоторые (в основном новые) специальные математические методы анализа надежности технических систем. Этот материал носит методологический характер, предполагаемые методы не всегда доведены до уровня инженерных методик, однако все они, как показывает практика общения редактора и многих из авторов книги с инженерами-практиками на различных лекциях, семинарах и консультациях, весьма полезны в тех случаях, когда применение общепринятых методов анализа надежности уже является недостаточным. Кроме того, рассмотренные методы хорошо иллюстрируют возможности и тенденции развития математического аппарата современной теории надежности.

Раздел VII. Примеры прикладных задач надежности. Для анализа надежности конкретного технического объекта нужно достаточно хорошо знать сам объект. Материалы данного раздела служат иллюстрацией того, что построение математических моделей требует глубокого понимания исследуемого технического объекта, знания его особенностей и наличия вполне определенных исходных данных. В противном случае расчеты надежности могут привести лишь к дезориентации. Качество анализа надежности конкретного объекта зависит не только и не столько от умения применять богатый арсенал математических средств, сколько от искусства строить математические модели, с максимальной степенью адекватности (в соответствующем разрезе) отражающие физическую сущность реального исследуемого объекта. В разделе содержится несколько примеров приложения математических методов исследования к анализу надежности технических объектов различной физической природы и различного целевого назначения.

Основная цель данного раздела справочника — показать, как общие методы теории надежности, разрабатываемые в последние годы в основном применительно к радиоэлектронным системам, могут быть с успехом использованы и в других отраслях техники и народного хозяйства. Материал этого раздела является иллюстрацией того, что теория надежности, ее методы расчетов и экспериментальных оценок междисциплинарны по своей сути. В то же время отдельные отрасли — радиоэлектроника, информатика, машиностроение, строительство, энергетика — порождают интересные конкретные ответвления теории надежности со своими специфическими особенностями, иногда со своими специальными математическими методами исследования. Именно такое взаимное обогащение и является основой успешного развития любого прикладного научного направления.

Приложения. Для расчетов и экспериментальной оценки надежности нужен определенный минимум стандартных таблиц и общематематических формул, которые приведены в приложении (часть необходимых специальных таблиц и номограмм приведена непосредственно по тесту).

И. Ушаков

Скачать книгу Ю. К. Беляев, В. А. Богатырев, В. В. Болотин и др.; Под ред. И. А. Ушакова. Надежность технических систем: Справочник. Москва, Издательство Радио и связь, 1985