

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
«Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники»

Кафедра теоретических основ электротехники

А. П. Курулёв

***НАДЕЖНОСТЬ ИЗДЕЛИЙ
ПРОМЫШЛЕННОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ***

*Рекомендовано УМО
по образованию в области информатики и радиоэлектроники
для специальности 1-36 04 02 «Промышленная электроника»
в качестве учебно-методического пособия*

Минск БГУИР 2014

УДК 621.38-027.45(076)
ББК 32.859я7
К93

Р е ц е н з е н т ы:

кафедра электротехники и систем электропитания учреждения образования
«Военная академия Республики Беларусь»
(протокол №5 от 21.01.2013 г.);

заведующий кафедрой информационных технологий в управлении
Международного института дистанционного обучения Белорусского
национального технического университета,
доктор технических наук, профессор В. Ф. Голиков

Курулёв, А. П.

К93 Надежность изделий промышленной электроники : учеб.-метод.
пособие / А. П. Курулёв. – Минск : БГУИР, 2014. – 104 с. : ил.
ISBN 978-985-488-978-8.

Содержится лекционный материал по теории и практике обеспечения
надежности изделий промышленной электроники, типовые задачи, примерная
тематика контрольных работ и рефератов, перечень вопросов для самоконтроля,
учебная программа (в сокращении).

**УДК 621.38-027.45(076)
ББК 32.859я7**

ISBN 978-985-488-978-8

© Курулёв А. П., 2014
© УО «Белорусский государственный
университет информатики
и радиоэлектроники», 2014

*Светлой памяти
Александра Михайловича Широкова –
основателя школы надежности
посвящается*

Предисловие

Введение на факультете информационных технологий и управления учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» новой специальности 1-36 04 02 «Промышленная электроника» привело к необходимости написания учебно-методического пособия для курса по теории и обеспечению надежности изделий и систем на этапах проектирования, производства и эксплуатации.

Основным требованием к изделиям и системам электроники является их пригодность к использованию по назначению в заданных условиях эксплуатации. Пригодность изделий характеризуется их качеством, составной частью которого является надежность, поэтому большое внимание в пособии уделено анализу причин отказов и методам расчета показателей надежности изделий.

В пособие включены используемые в теории надежности основные понятия теории вероятностей – законы и плотность распределения случайных величин, математическое ожидание, дисперсия, доверительный интервал и доверительная вероятность.

Пособие содержит типовые задачи по расчету основных показателей надежности изделий, примерную тематику контрольной работы, вопросы для самоконтроля и рабочую программу (в сокращении).

Автор благодарен заведующему кафедрой электротехники и систем электропитания Военной академии Республики Беларусь, кандидату технических наук, доценту А. Н. Малашину, заведующему кафедрой информационных технологий в управлении Международного института дистанционного обучения Белорусского национального технического университета, доктору технических наук, профессору В. Ф. Голикову, а также заведующему кафедрой теоретических основ электротехники Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, кандидату технических наук, доценту И. Л. Свито за ряд замечаний по содержанию пособия, что позволило улучшить его качество.

Пожелания и замечания просьба направлять по адресу: 220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 6, БГУИР.

Список сокращений и условных обозначений

- Вер – вероятность
МОЖ – математическое ожидание
НТД – нормативно-техническая документация
ПН – показатели надежности
СКО – среднее квадратическое отклонение
ССН – структурная схема надежности
ТО – техническое обслуживание
ТТЗ – тактико-техническое задание
ТУ – технические условия
 $\Gamma(k)$ – табулированная гамма-функция
Фит – единица измерения количества отказов
 $D[x]$ – дисперсия случайной величины
 $F(x)$ – функция распределения случайной величины
 $F(t)$ – время безотказной работы изделия (или наработка до отказа) – интегральная функция распределения наработки до отказа
 $F(t)$ – плотность распределения наработки до отказа
 $f(x)$ – плотность распределения случайной величины x
 $f_{\text{Теор}}(t_j)$ – теоретическая плотность распределения случайной величины на интервале Δt_j
 $\hat{f}(t)$ – статистическая плотность распределения наработки до отказа
 $f_{\text{В}}(t)$ – плотность распределения времени восстановления изделия
 $f_{\text{Тр.стат}}(t_j)$ – среднее на интервале Δt_j значение статистической плотности распределения случайной величины
 $K_{\text{В}}$ – норма восстановления и $t_{\text{пр}\Sigma}$ – суммарное время простоя изделия
 $K_{\text{Г}}$ – коэффициент готовности изделия
 $\widehat{K}_{\text{Г}}$ – статистический коэффициент готовности изделия
 $K_{\text{ОГ}}$ – коэффициент оперативной готовности изделия
 $K_{\text{П}}$ – коэффициент простоя изделия
 $K_{\text{СЭ}}$ – коэффициент сохранения эффективности изделия
 $K_{\text{ТИ}}$ – коэффициент технического использования изделия
 k – параметр формы в гамма-распределении Эрланга
 $M[x]$ – математическое ожидание дискретной случайной величины
 $N(t)$ – число изделий, безотказно проработавших до текущего времени t
 $N(0)$ – число изделий, исправных на момент начала испытаний $t = 0$
 $N(t + t_0)$ – число изделий, безотказно проработавших в интервале времени $t + t_0$
 $\Delta n(t, \Delta t)$ – число отказов в интервале времени от t до $t + \Delta t$
 Δn_j – число реализаций T_i , попавших в j -й интервал группирования
 $P(t)$ – вероятность безотказной работы изделия
 P_i – вероятности возможных значений случайной величины
 $P(t_\gamma)$ – вероятность гамма-процентной наработки до отказа
 $\hat{P}(t_0)$ – статистическая вероятность безотказной работы от 0 до t_0

$\hat{P}(t, t + t_0)$ – статистическая вероятность безотказной работы от t до $t + t_0$
 $P_B(t)$ – вероятность восстановления изделия
 $P_0(t)$ – вероятность работоспособного состояния изделия в произвольный момент времени; a и b – параметры масштаба и формы по Вейбуллу
 $Q(t)$ – вероятность отказа изделия
 Δq_j теор – теоретическая и Δq_j стат – выборочная $[t_{j-1}, t_j]$ (статистическая) вероятность попадания случайной величины T в интервал
 r – число степеней свободы критерия согласия χ^2 Пирсона
 s – число связей, наложенных на теоретическую функцию распределения
 T – средняя наработка до отказа
 T_0 – средняя наработка на отказ (для восстанавливаемых изделий)
 \hat{T}_0 – статистическая оценка наработки на отказ (для восстанавливаемых изделий)
 T_B – среднее время восстановления изделия
 \hat{T}_B – статистическая оценка среднего восстановления изделия
 T_{PC} – время работоспособного состояния изделия
 T_{TO} – время технического обслуживания изделия
 T_i – статистические данные по реализации отказов ($i = 1 \dots n$)
 T_{XP} – средний и $t_{XP\gamma}$ – гамма-процентный срок сохраняемости изделия
 T_{CP} – средний ресурс
 Δt – длительность интервала
 $t_{\text{прим}}$ – время применения изделия по назначению
 t_{B_i} – время восстановления изделия после i -го отказа
 Δt_j – длина интервалов группирования; $t_{\text{сл}}$ – средний срок службы
 t_γ – гамма-процентная наработка до отказа
 t_i – наработка до отказа i -го изделия
 Δ – критерий согласия двух функций; χ^2 -критерий согласия Пирсона
 x_i – возможные значения случайной величины
 $\lambda(t)$ – интенсивность отказов изделия
 μ – интенсивность восстановления изделия
 μ_0 – параметр масштаба в гамма-распределении Эрланга
 $\varphi_{\text{стат}}$ – точечная оценка случайной величины
 $\sigma[x]$ – среднее квадратическое отклонение случайной величины
 $\omega(t)$ – параметр потока отказов (для восстанавливаемых изделий)
 $\hat{\omega}(t)$ – статистическая оценка параметра потока отказов (для восстанавливаемых изделий)

Часть первая. Лекционный материал

1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ НАДЕЖНОСТИ

1.1. Основные понятия, термины и определения теории надежности

Пригодность любого изделия к использованию по назначению определяется качеством изделия, которое оценивается совокупностью свойств, одним из которых является надежность.

Надежность – свойство изделия выполнять заданные функции, сохраняя свои эксплуатационные показатели в заданных пределах в течение требуемого промежутка времени или требуемой наработки.

Надежность изделия обуславливается его:

- безотказностью;
- ремонтпригодностью;
- сохраняемостью;
- долговечностью его частей.

Безотказность – свойство изделия сохранять работоспособность в течение некоторой наработки без вынужденных простоев.

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

Наработка – продолжительность или объем работы изделия, измеряемые в часах, циклах и других единицах.

Ремонтпригодность – свойство изделия приспосабливаться к поддержанию и восстановлению работоспособного состояния путем технического обслуживания и ремонта. Понятие «ремонтпригодность» эквивалентно международному термину «поддерживаемость» или «приспособленность к поддержанию работоспособного состояния».

К термину «ремонтпригодность» относятся:

- обслуживаемость;
- контролепригодность;
- технологичность;
- приспособленность к диагностированию.

Сочетание свойств безотказности и ремонтпригодности изделия с учетом технического обслуживания и ремонта называют «готовностью объекта».

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

Сохраняемость зависит от:

- колебаний температуры;
- влажности воздуха;
- вибраций при транспортировании и т. п.

Различают сохраняемость изделия: до ввода в эксплуатацию и в период эксплуатации (при перерывах в работе).

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

Долговечность характеризуется:

- сроком службы;
- ресурсом.

Срок службы определяется календарной продолжительностью эксплуатации изделия до момента возникновения предельного состояния или до списания.

Ресурс – наработка изделия до предельного состояния.

Различают:

- ресурс до первого ремонта;
- межремонтный ресурс;
- средний ресурс;
- назначенный ресурс (при достижении которого эксплуатация должна быть прекращена из соображений безопасности или экономичности);
- остаточный ресурс – суммарная наработка изделия от момента контроля его технического состояния до перехода в предельное состояние.

Свойства надежности изделия связаны с понятиями: состояние, восстановление, ремонт, техническое обслуживание.

Состояние изделия:

- исправное или рабочее;
- неисправное или неработоспособное;
- предельное.

Переход из одного состояния в другое происходит вследствие:

- повреждения (нарушения исправного состояния при сохранении работоспособности);
- отказа (нарушения работоспособности изделия).

Отказы:

- внезапные;
- постепенные (которым предшествует непрерывное и монотонное изменение одного или несколько параметров изделия).

Критерий отказа – признак (и) нарушения работоспособности.

Причина отказа – явление, вызвавшее его возникновение.

Последствия отказа – явления, обусловленные возникновением отказа.

Отказы:

- независимые (не связаны с предшествующими);
- зависимые (от предыдущего состояния);
- явные (при внешнем осмотре);
- неявные (при специальных измерениях);
- устойчивые;
- самоустраняющиеся;
- сбой (однократный, перемежающийся (несколько сбоев, следующих друг за другом)).

Предельное состояние изделия (при котором дальнейшая эксплуатация изделия недопустима или нецелесообразна).

Критерий – признак(и) состояния изделия, не соответствующий(е) установленным нормативно-технической и конструкторской (проектной) документацией требованиям.

Восстановление – процесс перевода изделия из неработоспособного состояния в работоспособное.

Восстановление включает:

- идентификацию отказа (место и характер);
- наладку (замену) отказавшего элемента;
- регулирование;
- контроль состояния элемента и изделия в целом.

Ремонт – комплекс по восстановлению работоспособности изделия и ресурсов.

Техническое обслуживание – комплекс операций по поддержанию работоспособности изделия и его ресурсов.

Изделие может быть:

- обслуживаемое (предусмотренное НТД или проектной документацией);
- необслуживаемое (не предусмотренное НТД).

Временные понятия надежности

Наработка – это продолжительность или объем работы изделия.

Наработка – это:

- непрерывная величина (продолжительность работы в часах, километраж пробега и т. п.);
- целочисленная величина (число рабочих циклов, запусков и т. п.).

Наработка до отказа – наработка изделия от начала эксплуатации до возникновения первого отказа:

- как для неремонтируемых (невосстанавливаемых);
- так и для ремонтируемых (восстанавливаемых).

Наработка между отказами – наработка изделия от окончания восстановления его работоспособности после отказа до возникновения следующего отказа.

Наработка между отказами определяется продолжительностью (или объемом) работы изделия от k -го до $(k + 1)$ -го отказа (эта наработка относится только к восстанавливаемым изделиям).

Показатели надежности

Показатель надежности – количественная характеристика одного или нескольких свойств, составляющих надежность изделия.

Классификация показателей надежности:

- единичный показатель характеризует одно из свойств изделия;
- комплексный показатель характеризует несколько свойств, составляющих надежность изделия;
- расчетный показатель определяется расчетным методом;
- экспериментальный показатель – точечная или интервальная оценка надежности, которая определяется по данным испытаний;

- эксплуатационный показатель – точечная или интервальная оценка, которая определяется по статистическим данным эксплуатации;
- экстраполированный показатель – точечная или интервальная оценка надежности определяется на основании результатов расчетов, испытаний или эксплуатационных данных путем экстраполяции (продолжения среднего значения на будущее время).

1.2. Некоторые понятия теории вероятности, используемые в теории надежности

Некоторые понятия теории вероятности:

- закон распределения случайной величины;
- функция распределения;
- плотность распределения;
- математическое ожидание;
- дисперсия;
- квантили;
- обработка опытов по статическим данным;
- доверительный интервал;
- доверительная вероятность.

Закон распределения случайной величины – соотношение, устанавливающее связь между возможными значениями случайной величины и их вероятностями.

Например, закон распределения дискретной случайной величины X отображен в табл. 1.1.

Таблица 1.1

X_i	X_1	X_2	X_3	...	X_n
P_i	P_1	P_2	P_3	...	P_n

Примечание. Рассмотрение некоторых законов распределения случайных величин (например показателей безотказной работы изделий) вынесено в отдельные подразделы.

Функция распределения $F(x)$, или интегральная функция распределения, или интегральный закон распределения (как прерывных, так и непрерывных) случайных величин:

$$F(x) = P(X < x),$$

где количественная оценка распределения вероятностей является не вероятностью события $X = x$, а вероятностью события $X < x$, здесь x – текущая переменная (рис. 1.1).

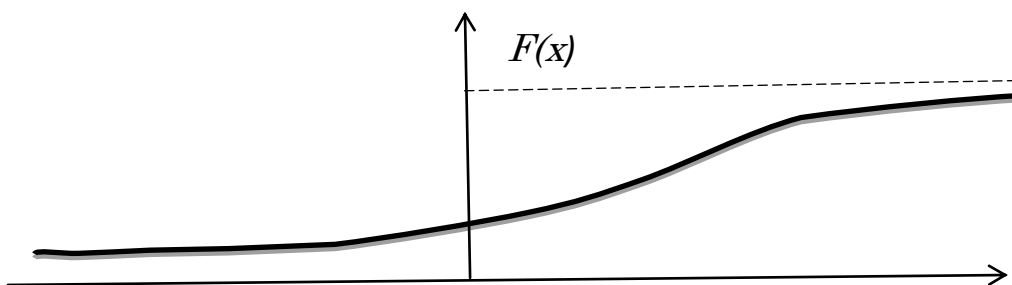


Рис. 1.1

Свойства функции распределения:

$F(x)$ – неубывающая функция, т. е. при $x_2 > x_1$ $F(x_2) \geq F(x_1)$;

$F(-\infty) = 0$; $F(+\infty) = 1$.

Плотность распределения (или плотность вероятности, или дифференциальная функция распределения, или дифференциальный закон распределения) случайной величины X с функцией распределения $F(x)$:

$$f(x) = F'(x) = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{F(x + \Delta x) - F(x)}{\Delta x} = \frac{dF(x)}{dx}$$

характеризует плотность распределения случайной величины (или вероятность попадания) на участке от x до $x + \Delta x$, или среднюю вероятность, приходящуюся на единицу длины на этом участке.

Кривая распределения (рис. 1.2) изображает плотность распределения случайной величины.

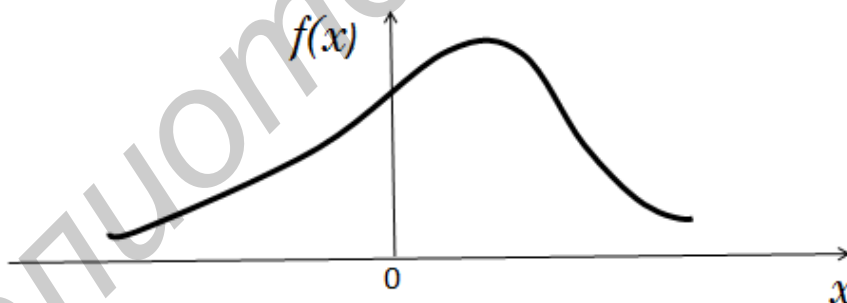


Рис. 1.2

Математическое ожидание (МОЖ) – среднее (или средневзвешенное) значение случайной величины.

Для дискретной случайной величины МОЖ есть сумма средних значений.

Для непрерывной случайной величины МОЖ есть интеграл

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

где $f(x)$ – плотность распределения случайной величины x .

Для дискретной случайной величины X , имеющей значения x_1, x_2, \dots, x_n с соответствующими вероятностями p_1, p_2, \dots, p_n , среднее значение (или математическое ожидание):

$$M(X) = \frac{x_1 p_1 + x_2 p_2 + \dots + x_n p_n}{p_1 + p_2 + \dots + p_n} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i p_i}{\sum_{i=0}^n p_i},$$

т. к. $\sum_{i=1}^n p_i = 1$, то $M[X] = \sum_{i=1}^n x_i p_i$.

Дисперсия случайной величины X есть МОЖ квадрата отклонения случайной величины X от ее математического ожидания:

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

т. е. $D(X) = \int_{-\infty}^{+\infty} (x - m_x)^2 f(x) dx,$

$$D[X] = \sum_{i=1}^n (x_i - m_x)^2 \cdot p_i,$$

где $m_x = M[X]$.

Дисперсия случайной величины имеет размерность квадрата случайной величины. Для наглядности характеристики рассеивания (отклонения от случайной величины в обе стороны) используют величину, размерность которой совпадает с размерностью случайной величины. Для этого из дисперсии извлекают квадратный корень и полученную величину называют СКО (средним квадратическим отклонением) случайной величины X :

$$\sigma[X] = \sqrt{D[X]}.$$

Квантили – интервалы одномерного распределения, попадания в которые имеют равные вероятности.

Квантили $(x_{1/4}; x_{1/2}; x_{3/4})$, децили $(x_{0,1}; x_{0,2} \dots; x_{0,9})$ и процентили $(x_{0,01}; x_{0,02} \dots; x_{0,99})$ на 4, 10, 100 интервалов.

Обработка опытов

Значение искомого параметра, вычисленное на основе ограниченного числа опытов, всегда содержит элемент случайности.

Случайное значение параметра называют оценкой параметра:

– оценкой для МОЖ может служить среднее арифметическое опытных значений случайной величины в n независимых опытах;

– при очень большом числе опытов среднее арифметическое близко к МОЖ.

Доверительный интервал – интервал значений параметра, совместимых с опытными данными и не противоречащих им.

Причем величина параметра не случайна. Случаен интервал, его положение на оси абсцисс, его длина (т. е. доверительную вероятность в связи с этим трактуют не как вероятность «попадания» параметра в доверительный интервал, а как вероятность того, что доверительный интервал накроет параметр).

1.3. Некоторые законы распределения случайных величин, используемые в теории надежности

Для описания дискретных случайных величин используются:

- распределение по биномиальному закону;
- распределение по закону Пуассона.

Для описания непрерывных случайных величин используются:

- распределение Вейбулла – Гнеденко;
- экспоненциальное распределение;
- распределение Рэлея;
- нормальный закон распределения (закон Гаусса).

1.3.1. Законы распределения для описания дискретных случайных величин

Биномиальный закон распределения дискретных случайных величин

Биномиальный закон распределения применяется при статистическом контроле, когда ограничена информация о свойствах изделия, которые необходимо классифицировать на годные и дефектные.

Биномиальный закон распределения: если вероятность появления события A в одном опыте равна p , то вероятность его не появления равна $1 - p = q$, а вероятность появления события A n раз в серии m независимых испытаний равна

$$P_m^n = C_m^n p^n (1 - p)^{m-n} = C_m^n p^n q^{m-n},$$

где C_m^n – число сочетаний m из n :

$$C_m^n = \frac{m!}{n!(m-n)!}.$$

Основные характеристики биномиального закона распределения:

$$\text{МОЖ} \rightarrow M[n] = pm,$$

$$\text{Дисперсия} \rightarrow \sigma^2[n] = M[n]q = pmq,$$

$$\text{СКО} \rightarrow \sigma[n] = \sqrt{M[n]q}.$$

Распределение дискретных случайных величин по закону Пуассона

Применяется для определения вероятности появления заданного числа независимых и несовместимых событий на заданном интервале времени.

Закон Пуассона: вероятность появления события A не менее чем n раз в интервале времени τ равна

$$P_n(\tau) = \frac{(\lambda\tau)^n}{n!} e^{-\lambda\tau},$$

где n – только целочисленные значения;

$\lambda\tau$ – параметр закона Пуассона (МОЖ случайной величины t).

Основные характеристики распределения по закону Пуассона:

$$\begin{aligned}\text{МОЖ} &\rightarrow M[n] = \lambda\tau, \\ \text{Дисперсия} &\rightarrow \sigma^2[n] = \lambda\tau, \\ \text{СКО} &\rightarrow \sigma[n] = \sqrt{\lambda\tau}.\end{aligned}$$

Характерные признаки распределения по закону Пуассона:

- равенство МОЖ и дисперсии;
- распределение Пуассона является предельным случаем биномиального распределения при неограниченном возрастании числа испытаний m , когда вероятность $q \rightarrow 0$, а МОЖ – остается постоянным;
- применение распределения Пуассона справедливо, начиная с $q = 0,1$ и менее.

1.3.2. Законы распределения для описания непрерывных случайных величин

Распределение непрерывных случайных величин Вейбулла – Гнеденко

Применяется для невозстанавливаемых изделий на начальном этапе эксплуатации в интервале $[0, t]$. Вероятность безотказной работы приведена на рис. 1.3:

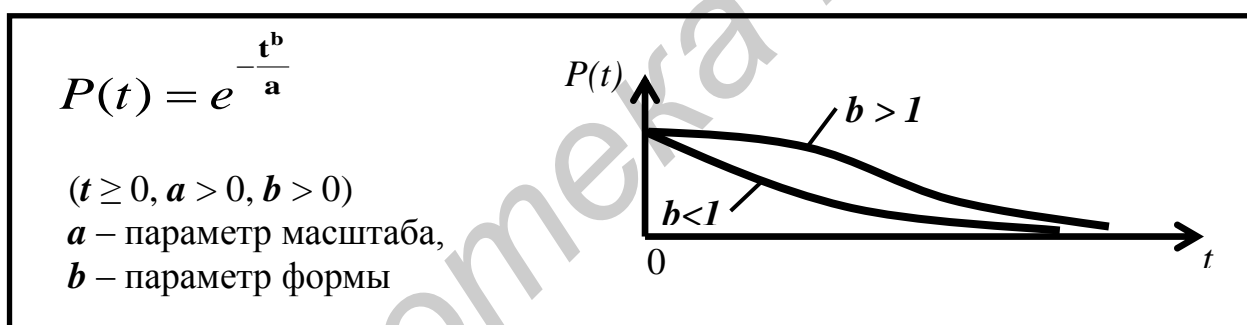


Рис. 1.3

Распределение Вейбулла отражено в табл. 1.2.

Таблица 1.2

<p>Плотность распределения наработки до отказа</p> $f(t) = -\frac{d}{dt} P(t) = \frac{b}{a} t^{b-1} e^{-\frac{t^b}{a}}$	
<p>Интенсивность отказов</p> $\lambda(t) = -\frac{1}{P(t)} \frac{dP(t)}{dt} = \frac{b}{a} t^{b-1}$	
<p>Вероятность отказа</p> $Q(t) = 1 - P(t) = 1 - e^{-\frac{t^b}{a}}$	

Экспоненциальное распределение

Особенности:

- это частный случай распределения Вейбулла и реализуется при $b = 1$;
- показатели безотказности на данный момент времени не зависят от предыстории эксплуатации изделия (если до этого момента времени отказов не происходило);

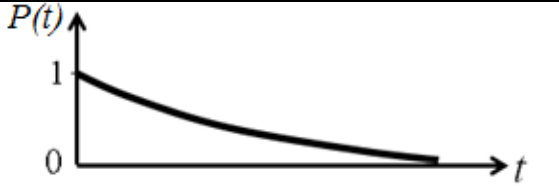
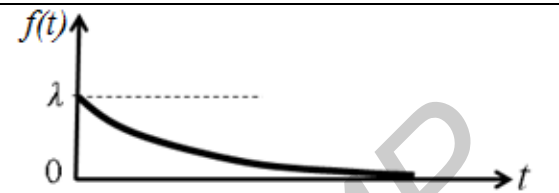

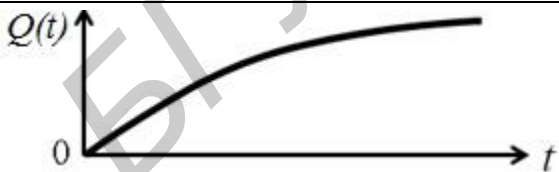
- постоянство интенсивности отказов ($\lambda = \text{const}$);
- так как средняя наработка до отказа

$$T_0 = 1/\lambda, \quad \text{то } P(t) = e^{-t/T_0} = e^{-1} = 0,368;$$

- характерно для большинства сложных изделий, содержащих большое количество невосстанавливаемых элементов, имеющих преимущественно внезапные отказы (вследствие наличия скрытых дефектов);
- применяется для восстанавливаемых изделий с простейшим потоком отказов.

Экспоненциальное распределение отражено в табл. 1.3.

Таблица 1.3

<p>Вероятность безотказной работы</p> $P(t) = e^{-\lambda t}$	
<p>Плотность распределения наработки до отказа</p> $f(t) = \lambda e^{-\lambda t}$	
<p>Интенсивность отказов</p> $\lambda(t) = \frac{f(t)}{P(t)} = \lambda = \text{const}$	
<p>Вероятность отказов</p> $Q(t) = 1 - e^{-\lambda t}$	

Распределение Рэлея

Распределение Рэлея описывает поведение изделий с явно выраженным эффектом старения и износа (табл. 1.4).

Нормальный закон распределения (закон Гаусса)

Особенности:

- закон Гаусса называют предельным, т. к. к нему приближаются другие законы распределения непрерывных случайных величин. Например, биномиальное распределение при достаточно больших значениях МОЖ исследуемой случайной величины очень близко к нормальному;

- случайная величина может принимать любые значения от $-\infty$ до $+\infty$, но возможные значения случайной наработки до отказа могут быть только положительными. Поэтому наработку рассматривают в усеченном интервале времени $(0, +\infty)$, т. е. используется усеченное нормальное распределение.

Таблица 1.4

Вероятность безотказной работы $P(t) = \exp\left(-\frac{t^2}{2c^2}\right)$	
Плотность распределения наработки до отказа $f(t) = \frac{t}{c^2} \exp\left(-\frac{t^2}{2c^2}\right)$	
Интенсивность отказов $\lambda(t) = \frac{t}{c^2}$	
Вероятность отказов $Q(t) = 1 - \exp\left(-\frac{t^2}{2c^2}\right)$	

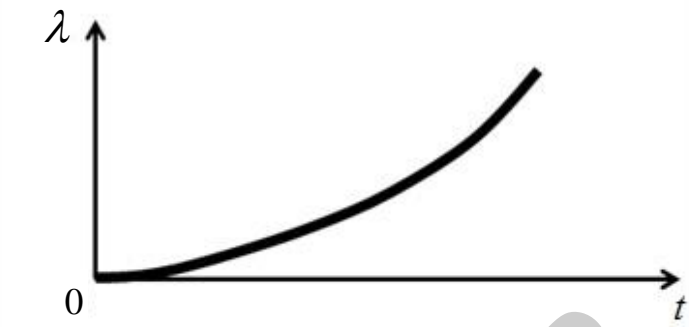
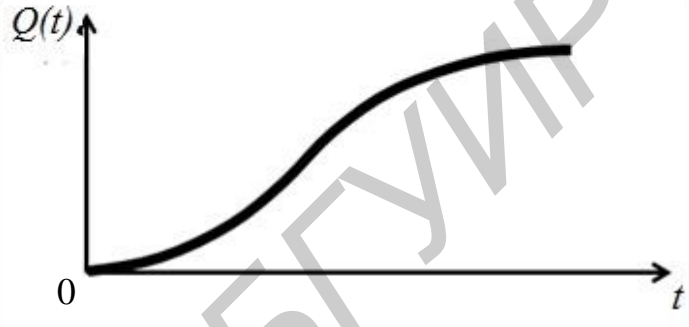
Нормальный закон распределения (закон Гаусса) представлен в табл. 1.5 и 1.6.

Таблица 1.5

Вероятность безотказной $P(t) = -\frac{1}{\sigma(t)\sqrt{2\pi}} \int_t^{\infty} e^{-\frac{(t-M[t])^2}{2\sigma^2(t)}} dt$	
Плотность распределения наработки до отказа $f(t) = -\frac{1}{\sigma(t)\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-M[t])^2}{2\sigma^2(t)}}$	

Примечания:

1. $M(t)$ – МОЖ наработки до отказа (средняя наработка до отказа);
2. $\sigma(t)$ – СКО наработки до отказа (характеризует форму кривой).

<p>Интенсивность отказов</p> $\lambda(t) = -\frac{1}{P(t)} \frac{dP(t)}{dt}$	
<p>Вероятность отказа</p> $Q(t) = 1 - P(t)$	

Сравнение вероятности безотказной работы $P(t)$ для нормального и экспоненциального законов распределения (при одном и том же значении средней наработки до отказа) показано на рис. 1.4.

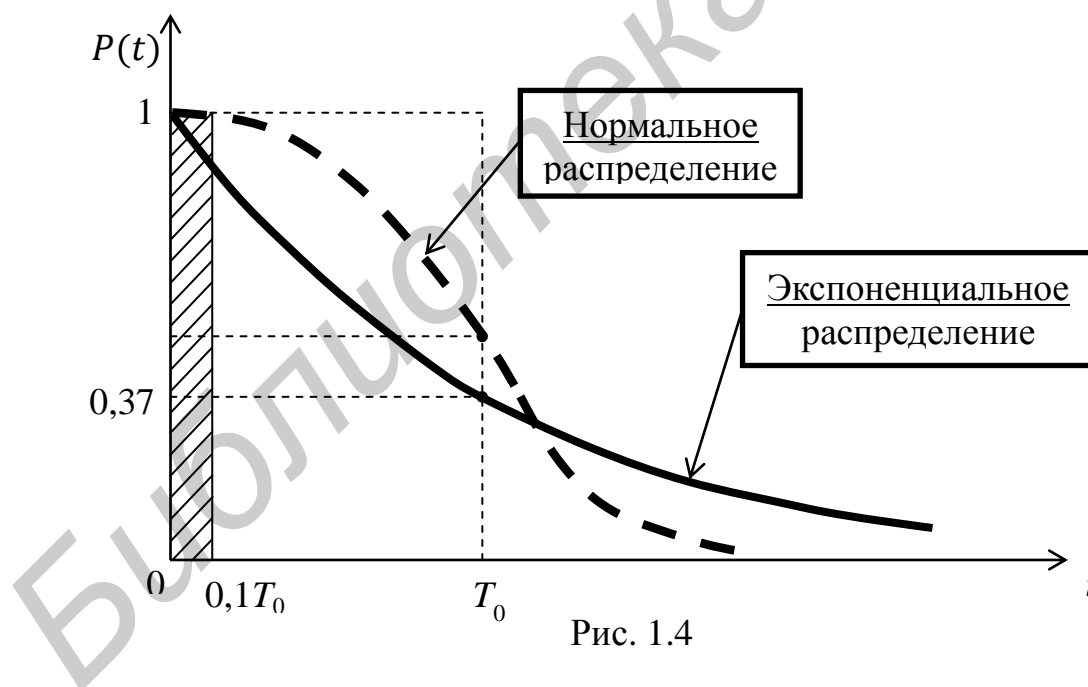


Рис. 1.4

Выводы из сравнения $P(t)$ для нормального и экспоненциального законов распределения случайной величины:

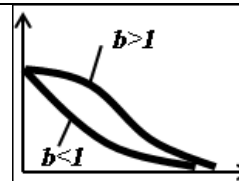
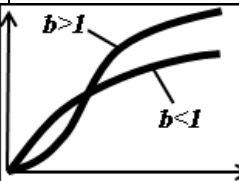
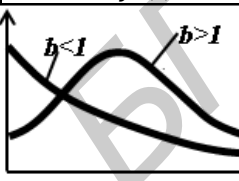
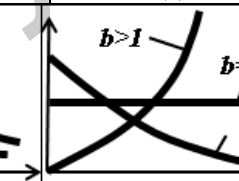
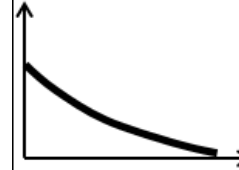

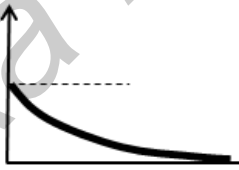
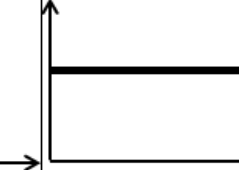
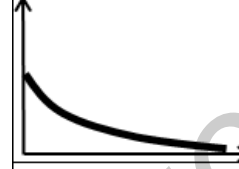

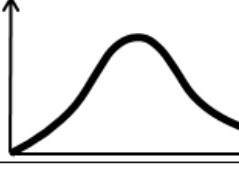
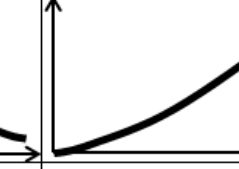
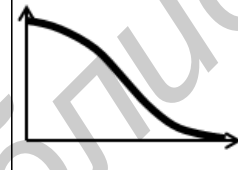


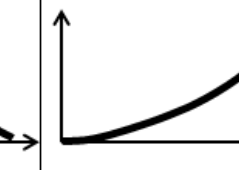
- изделия, время безотказной работы которых подчинены нормальному закону распределения в интервале $(0, T_0)$, имеют более высокие показатели надежности, чем изделия с экспоненциальным законом распределения;
- заштрихованный участок от 0 до $0,1 T_0$ – промежуток времени, охватыва-

ющий 90 %-ный гамма-ресурс (при 99,9 % этот участок сокращается до $0,001 T_0$). При этом различие между нормальным и экспоненциальным законами незначительно, поэтому при $P(t) = 0,95$ и выше используется экспоненциальный закон (как наиболее простой).

На этой основе разработаны действующие госстандарты, регламентирующие требования к надежности изделий. В них, в частности, принята постоянной интенсивность отказов ($\lambda(t) = \lambda = \text{const}$) в течение наработки, что соответствует экспоненциальному закону распределения.

Сравнительная таблица зависимости показателей безотказной работы от времени для различных законов распределения непрерывной случайной величины (табл. 1.7).

Таблица 1.7

Вид распределения	Показатели безотказной работы			
	$P(t)$	$Q(t)$	$f(t)$	$\lambda(t)$
Вейбулла				
Экспоненциальный				
Рэля				
Нормальный				

Выводы по законам распределения для непрерывных случайных величин:

- поведение изделия на 1-м участке (участок приработки) эксплуатации с достаточно высокой точностью описывается законом распределения Вейбулла (при $b < 1$);
- поведение изделия на 2-м участке (участок нормальной эксплуатации) описывается экспоненциальным законом;
- поведение изделия на 3-м участке (участок явно выраженного старения и износа) описывается распределением Рэля или Вейбулла (при $b > 1$).

1.4. Показатели безотказности работы изделий

Показатели надежности (единичные и комплексные):

- показатели безотказности;
- показатели ремонтпригодности;
- показатели долговечности;
- показатели сохраняемости;
- показатели надежности комплексные.

Показатели надежности комплексные – показатели готовности, которые характеризуют одновременно несколько свойств надежности, как правило, безотказность и ремонтпригодность.

Существуют два вида показателей надежности:

- для невозстанавливаемых изделий;
- для восстанавливаемых изделий.

1.4.1. Показатели безотказности для восстанавливаемых изделий (отражены в табл. 1.8)

Таблица 1.8

$P(t)$	Вероятность безотказной работы
$Q(t)$	Вероятность отказа
$f(t)$	Плотность распределения наработки до отказа
$\lambda(t)$	Интенсивность отказов
T	Средняя наработка до отказа
t_γ	Гамма-процентная наработка до отказа

Вероятность безотказной работы изделия

Время безотказной работы изделия (или наработка до отказа) – непрерывная случайная величина, описываемая интегральной функцией распределения $F(t)$.

Вероятность безотказной работы $P(t)$ есть вероятность того, что в пределах заданной наработки отказ изделия не возникает:

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

Вероятность отказа $Q(t)$ есть вероятность того, что изделие откажет в течение заданного времени работы (будучи работоспособным в начальный момент времени):

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

В данном случае вероятность отказа $Q(t)$ совпадает с интегральной функцией распределения наработки до отказа $F(t)$.

Плотность распределения наработки до отказа

Для мгновенных значений показателей надежности, кроме $F(t)$, применяется дифференциальная функция – плотность распределения наработки до отказа $f(t)$:

$$f(t) = \frac{d}{dt} F(t) = \frac{d}{dt} Q(t) = -\frac{d}{dt} P(t).$$

Интенсивность отказов $\lambda(t)$ (как и $f(t)$), являясь дифференциальной характеристикой безотказности, есть условная плотность вероятности возникновения отказа изделия, определяемая для рассматриваемого момента времени при условии, что до этого момента отказ не возникал.

Таким образом,

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{P(t)} \quad (1.1)$$

при $f(t) = -\frac{d}{dt}P(t)$.

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

График интенсивности отказов представлен на рис. 1.5.

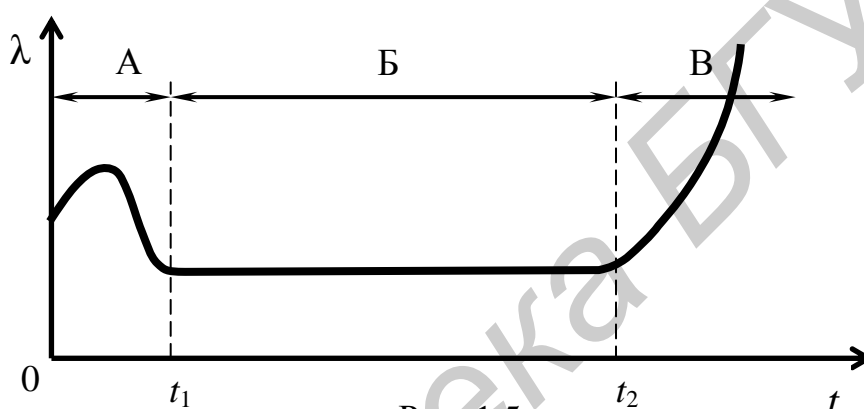


Рис. 1.5

На рис. 1.5:

- А – период приработки;
- Б – период нормальной эксплуатации;
- В – период износа (старения).

Плотность вероятности $f(t)$ и интенсивность отказов $\lambda(t)$ имеют размерность ч^{-1} (т. е. количество отказов за час работы).

Значения $f(t)[\lambda(t)]$ находятся в пределах $10^{-7} \dots 10^{-8} \text{ч}^{-1}$.

Для упрощения используют

$$1 \text{ фит} = 10^{-9} \text{ч}^{-1},$$

т. е. $\lambda(t) = 10^{-8} \text{ч}^{-1} = 10 \text{ фит}$.

Средняя наработка до отказа T есть математическое ожидание наработки изделия до первого отказа:

$$T = \int_0^{\infty} t \cdot f(t) dt = \int_0^{\infty} t \cdot dF(t) = \int_0^{\infty} [1 - F(t)] dt = \int_0^{\infty} P(t) dt. \quad (1.2)$$

Гамма-процентная наработка до отказа t_γ – наработка, в течение которой отказ изделия не возникает с вероятностью γ , выраженной в процентах (рис. 1.6):

$$P(t_\gamma) = 1 - F(t_\gamma) = 1 - \int_0^{t_\gamma} f(t)dt = \frac{\gamma}{100}.$$

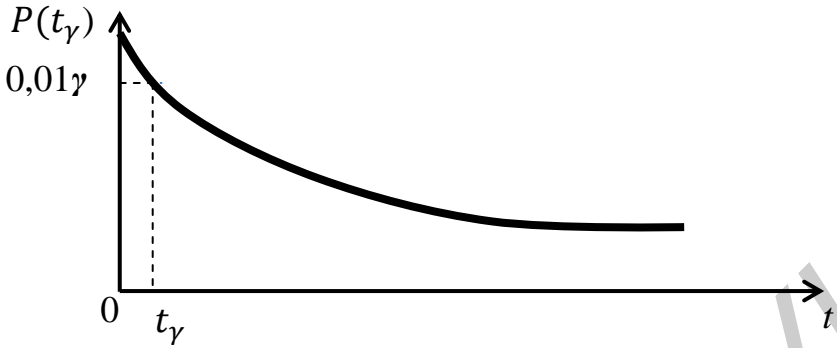


Рис. 1.6

Физический смысл средней наработки до отказа T

Пусть вероятность безотказной работы $P(t) = 0,37$.

Это означает, что при средней наработке изделия до отказа, например при $T = 1000$ ч, вероятность достижения наработки $T = 1500$ ч будет меньше 0,37 (т. е. $P(t) < 0,37$).

Физический смысл гамма-процентной наработки до отказа t_γ

Например при вероятности безотказной работы $P(t_\gamma) = 0,9$ гамма-процентная наработка до отказа t_γ в 10 раз меньше средней наработки до отказа T (при $P(t_\gamma) = 0,99$ – в 100 раз).

Это означает, что при $T = 1000$ ч вероятность $P(t_\gamma) = 0,99$ обеспечивается только на первых 10 ч работы изделия (т. е. из 100 изделий через 10 ч работы останутся работоспособными 99, через 100 ч – 90 и т. д.).

Взаимозависимость показателей безотказности:

1. $P(t) = f(\lambda),$

т. к. $\lambda(t) = \frac{f(t)}{P(t)},$ а $f(t) = -\frac{d}{dt}P(t),$ то $\lambda(t) = -\frac{dP(t)}{P(t)dt}.$

Интегрируя $\lambda(t)$ методом разделения переменных, получим $P(t)$:

$$\frac{dP(t)}{P(t)} = -\lambda(t)dt; \quad \ln[P(t)] = -\lambda(t)dt;$$

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

Таким образом, вероятность безотказной работы $P(t)$ есть экспоненциальная функция, которая в интервале времени $(0 \dots \infty)$ изменяется от 1 до 0.

Зависимость $P(t)$ и $Q(t)$ от плотности распределения наработки до отказа $f(t)$:

$$2. \quad P(t) = f[f(t)],$$

т. к. $f(t) = -\frac{d}{dt}P(t),$

то $P(t) = \int_t^{\infty} f(t)dt.$

3. $Q(t) = f[f(t)]$ – вероятность отказа $Q(t)$, отражающая событие, противоположное вероятности безотказной работы $P(t)$ в том же интервале времени, изменяется от 0 до 1:

$$Q(t) = \int_0^t f(t)dt. \quad \text{При } t \rightarrow \infty$$

$$Q(t) = \int_0^{\infty} f(t)dt = 1.$$

Графики зависимостей $P(t)$ и $Q(t)$ от времени отражены на рис. 1.7 и 1.8.

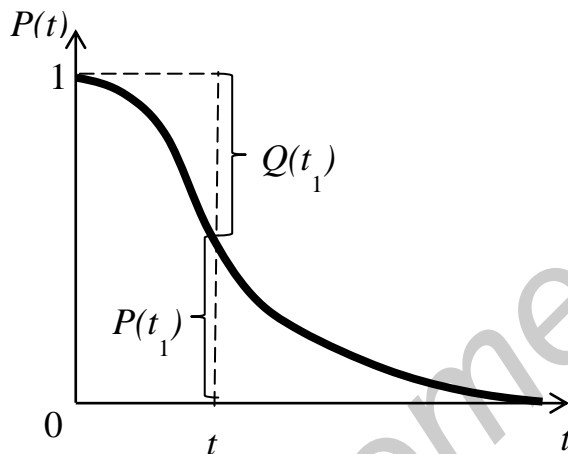


Рис. 1.7

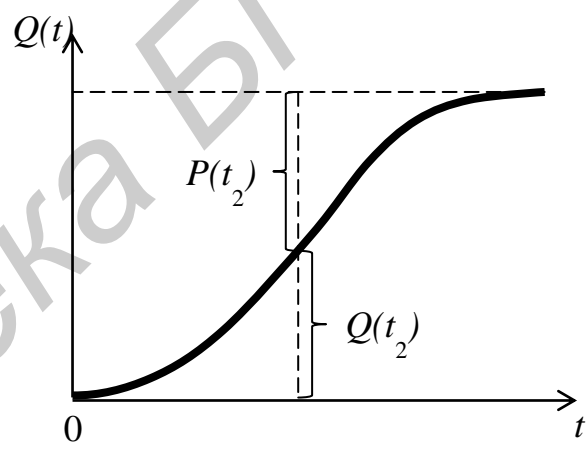


Рис. 1.8

Расчет показателей безотказности (при отсутствии значений исходных данных, например, интегральной функции распределения наработки изделий до отказа $[F(t)]$) производится с использованием *статистических вероятностных характеристик*, определяемых опытным путем.

По результатам испытаний статистическая вероятность безотказной работы $P(t_0)$ в интервале времени от 0 до t_0 есть отношение числа изделий, безотказно проработавших до момента времени $t_0[N(t_0)]$, к числу изделий, исправных на момент начала испытаний $[N(0)]$:

$$\hat{P}(t_0) = \frac{N(t_0)}{N(0)}.$$

Функциональные связи между показателями безотказности отражены в табл. 1.9

Таблица 1.9

Известная функция	Определяемая функция			
	$P(t)$	$Q(t)$	$f(t)$	$\lambda(t)$
$P(t)$	—	$1 - P(t)$	$-\frac{dP(t)}{dt}$	$\frac{1}{P(t)} \cdot \frac{dP(t)}{dt}$
$Q(t)$	$1 - Q(t)$	—	$\frac{dQ(t)}{dt}$	$\frac{1}{1 - dQ(t)} \cdot \frac{dQ(t)}{dt}$
$f(t)$	$\int_0^{\infty} f(t)dt$	$\int_0^t f(t)dt$	—	$\frac{f(t)}{\int_t^{\infty} f(t)dt}$
$\lambda(t)$	$\exp[-\int_0^t \lambda(t)dt]$	$1 - \exp[-\int_0^t \lambda(t)dt]$	$\lambda(t) \times \exp[-\int_0^t \lambda(t)dt]$	—

По результатам испытаний статистическая вероятность безотказной работы в интервале времени от t до t_0 есть отношение числа изделий, безотказно проработавших в интервале времени $t + t_0$ [$N(t + t_0)$], к числу изделий, безотказно проработавших до момента времени t [$N(t)$]:

$$\hat{P}(t, t + t_0) = \frac{N(t + t_0)}{N(t)}$$

По результатам испытаний статистическая плотность распределения наработки до отказа $f(t)$ есть отношение числа отказов [$\Delta n(t, \Delta t)$] в интервале времени $(t, t + \Delta t)$ к произведению числа исправных изделий при $t = 0$ [$N(0)$] на длительность интервала Δt (при $\Delta t \rightarrow 0$):

$$\hat{f}(t) = \frac{\Delta n(t, \Delta t)}{N(0) \cdot \Delta t}$$

По результатам испытаний статистическая интенсивность отказов $\lambda(t)$ есть отношение числа отказов [$\Delta n(t, \Delta t)$] в интервале $(t, t + \Delta t)$ к произведению числа исправных изделий в момент времени t [$N(t)$] на длительность интервала Δt (при $\Delta t \rightarrow 0$):

$$\hat{\lambda}(t) = \frac{\Delta n(t, \Delta t)}{N(t) \cdot \Delta t}$$

По результатам испытаний статистическая средняя наработка до отказа T – среднее арифметическое значений наработки всех изделий, участвующих в испытании:

$$T = \frac{\sum_{i=1}^{N(0)} t_i}{N(0)},$$

где t_i – наработка до отказа i -го изделия.

1.4.2. Показатели безотказности для восстанавливаемых изделий (отражены в табл. 1.10.)

Таблица 1.10

$P(t)$	Вероятность безотказной работы
$\omega(t)$	Параметр потока отказов
T_0	Средняя наработка на отказ

Вероятность безотказной работы $P(t)$ определяется и рассчитывается так же, как и для невосстанавливаемых изделий.

Поток отказов – последовательность случайных моментов времени (или наработки) перехода изделия в неработоспособное состояние.

В сложном изделии поток отказов равен сумме потоков отказов отдельных устройств.

Если каждый поток оказывает (согласно теореме А. Я. Хинчина) на суммарный поток равномерное и небольшое влияние, то суммарный поток будет простейшим и должен удовлетворять трем условиям: ординарности, стационарности, отсутствию последействия.

1-е условие. Ординарность потока означает, что появление двух и более отказов одновременно невозможно.

2-е условие. Стационарность потока означает, что вероятность возникновения некоторого числа отказов на промежутке наработки $(t, t + \Delta t)$ не зависит от положения этого участка на оси наработки, а зависит лишь от длины этого промежутка Δt .

3-е условие. Отсутствие последействия означает, что вероятность возникновения некоторого числа отказов на промежутке наработки (t_1, t_2) не зависит от того, сколько отказов возникло до момента t_1 на промежутке (t_0, t_1) .

Параметр потока отказов $\omega(t)$ есть отношение МОЖ числа отказов восстанавливаемого изделия за достаточно малую ее наработку к значению этой наработки:

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

где Δt – малый отрезок времени наработки;

$n(t)$ – число отказов, наступивших от начального момента времени до достижения наработки;

$[n(t + \Delta t) - n(t)]$ – число отказов на отрезке времени Δt .

Осредненный параметр потока отказов (используемый в расчетах и обработках экспериментальных данных) – отношение МОЖ числа отказов восстанавливаемого изделия за конечную наработку к значению этой наработки:

$$\omega(t) = \frac{M[n(t_2) - n(t_1)]}{t_2 - t_1}.$$

Статистическая оценка параметра потока отказов

$$\hat{\omega}(t) = \frac{n(t_2) - n(t_1)}{t_2 - t_1}.$$

Средняя наработка на отказ T_0 – отношение суммарной наработки восстанавливаемого изделия к МОЖ числа ее отказов в течение этой наработки:

$$T_0 = \frac{t_H}{M[n(t)]},$$

где t_H – суммарная наработка;

$n(t)$ – число отказов в течение наработки t_H .

Статистическая оценка наработки на отказ

$$\hat{T}_0 = \frac{1}{n(t)}.$$

Для простейшего потока отказов

$$\hat{\omega} = \frac{1}{\hat{T}_0}.$$

Для этапа нормальной эксплуатации

$$\lambda(t) = \omega(t) = \text{const}; \quad T_0 = T; \quad P(t) = e^{-\lambda t},$$

т. е. $\lambda(t)$ и $\omega(t)$ изменяются по одному и тому же закону.

1.5. Показатели ремонтпригодности, долговечности и сохраняемости изделий

1.5.1. Показатели ремонтпригодности

Время восстановления работоспособности включает в себя:

- время на обнаружение неисправности – $t_{\text{обн}}$;
- время обнаружения отказавшего элемента – $t_{\text{поиск}}$;
- время на доставку комплектующих – $t_{\text{дост}}$;

- время на ремонт – $t_{\text{рем}}$;
- время на настройку – $t_{\text{наст}}$,

т. е. время восстановления

$$t = t_{\text{обн}} + t_{\text{поиск}} + t_{\text{дост}} + t_{\text{рем}} + t_{\text{наст}}$$

является случайной величиной.

Поэтому в качестве показателей ремонтпригодности (табл. 1.11) используют такие же вероятностные характеристики, как и у показателей безотказности.

Таблица 1.11

$P_B(t)$	Вероятность восстановления
$f_B(t)$	Плотность распределения времени восстановления
$\mu(t)$	Интенсивность восстановления
T_B	Среднее время восстановления

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

$$P_B(t) = 1 - e^{-\mu t},$$

где μ – интенсивность восстановлений.

Плотность распределения времени восстановления изделия:

$$f_B(t) = -\frac{dP_B(t)}{dt} = \mu \cdot e^{-\mu t}.$$

Интенсивность восстановления (по аналогии с $\lambda(t)$) – условная плотность вероятности восстановления работоспособного состояния изделия, определенная для рассматриваемого момента времени при условии, что до этого момента восстановление не было завершено:

$$\mu(t) = \frac{f_B(t)}{1 - P_B(t)},$$

где $\mu(t)$ характеризует количество ремонтов в единицу времени.

Среднее время восстановления – МОЖ времени восстановления работоспособного состояния изделия после отказа:

$$T_B = \int_0^{\infty} t \cdot f_B(t) dt = \int_0^{\infty} [1 - P(t)] dt.$$

Для экспоненциального распределения

$$\mu(t) = \mu = \text{const}, \quad T_B = \frac{1}{\mu}.$$

Статистическая оценка T_B находится по формуле

$$T_B = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_{Bi} \quad \text{или} \quad \hat{T}_B = \frac{1}{\hat{\mu}},$$

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

$\hat{\mu}$ – статистическая интенсивность восстановления.

Показатели ремонтпригодности можно определить через выражения для показателей безотказности, заменив в них обозначения:

$$P(t) \Rightarrow 1 - P_B(t);$$

$$Q(t) \Rightarrow P_B(t);$$

$$f(t) \Rightarrow f_B(t);$$

$$\lambda(t) \Rightarrow \mu(t).$$

Основные математические модели ремонтпригодности:

1) экспоненциальное распределение;

2) гамма-распределение (и его частный случай – распределение Эрланга).

При экспоненциальном распределении показатели ремонтпригодности имеют следующий вид:

$$P_B = 1 - e^{-\mu t};$$

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

$$\mu(t) = \frac{f_B(t)}{1 - P_B(t)} = \mu = \text{const};$$

$$T_B = \frac{1}{\mu}.$$

При гамма-распределении и его частном случае – распределении Эрланга, например, плотность вероятности гамма-распределения имеет следующий вид:

$$f_B(t) = \frac{\mu_0^k}{\Gamma(k)} \cdot t^{k-1} \cdot e^{-\mu_0 t},$$

где μ_0 – параметр масштаба;

k – параметр формы;

$\Gamma(k)$ – табулированная гамма-функция.

При $k = 1$ гамма-распределение превращается в экспоненциальное распределение

$$f_B = \mu_0 e^{-\mu_0 t}.$$

С увеличением k функция плотности гамма-распределения приближается к функции плотности нормального распределения (рис. 1.9):

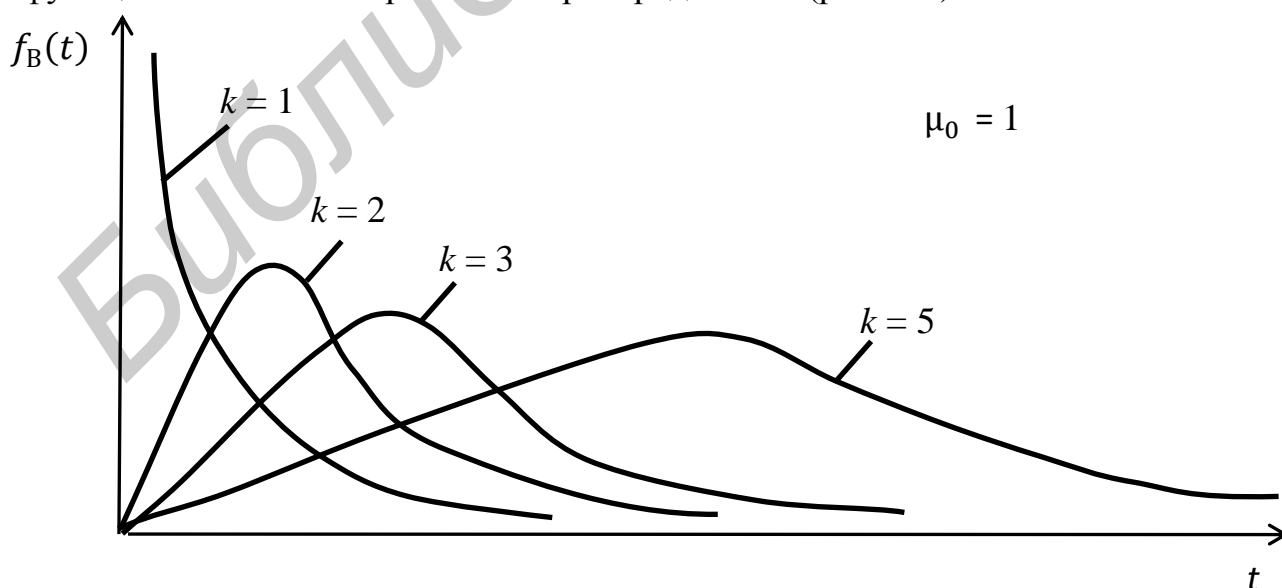


Рис. 1.9

При гамма-распределении:

– среднее время восстановления

$$T_B = \frac{k}{\mu_0};$$

– вероятность восстановления

$$P_B = \frac{\mu_0^k}{\Gamma(k)} \cdot \int_0^t \tau^{k-1} \cdot e^{-\mu_0 \tau} d\tau = e^{-\mu_0 t} \sum_{i=0}^{k-1} \frac{(\mu_0 t)^i}{i!}.$$

При целом k гамма-распределение называется распределением Эрланга k -го порядка.

По закону Эрланга второго порядка ($k = 2$) показатели ремонтпригодности имеют следующие выражения (графики приведены на рис. 1.10):

$$P_B = 1 - (1 + \mu_0^2 t) e^{-\mu_0 t} = 1 - \left(1 - \frac{2t}{T_B}\right) e^{-\frac{2t}{T_B}};$$

$$T_B = \frac{2}{\mu_0};$$

$$f_B(t) = \mu_0^2 \cdot t \cdot e^{-\mu_0 t} = \frac{4}{T_B^2} \cdot t \cdot e^{-\frac{2t}{T_B}};$$

$$\mu(t) = \frac{f_B(t)}{1 - P_B(t)} = \frac{\mu_0^2 \cdot t \cdot e^{-\mu_0 t}}{(1 + \mu_0) \cdot e^{-\mu_0 t}} = \frac{\mu_0^2 \cdot t}{1 + \mu_0 \cdot t}.$$

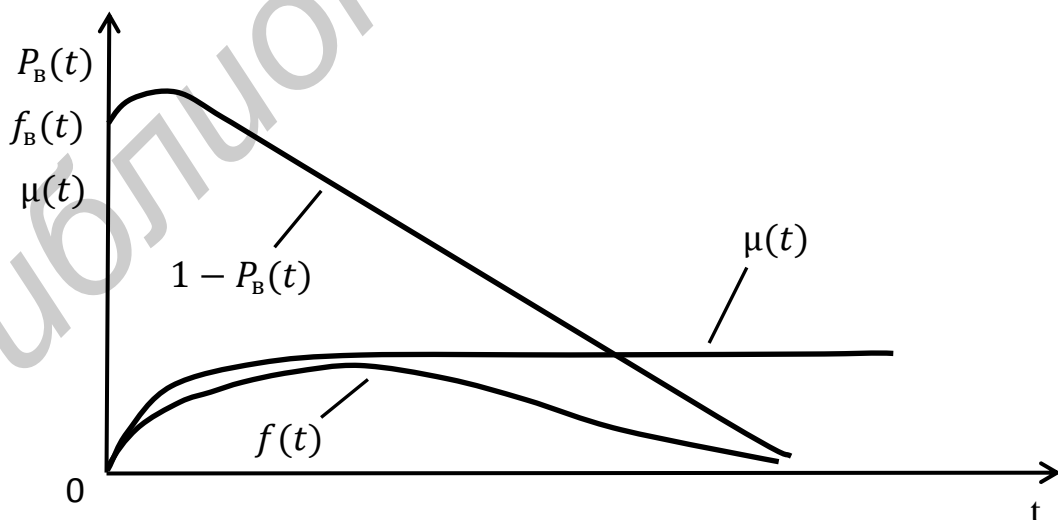


Рис. 1.10

Примечание. На рис. 1.10 $\mu_0 = 0,4 \frac{1}{ч}$, $k = 2$.

1.5.2. Показатели долговечности
(отражены в табл. 1.12)

Таблица 1.12

R	Средний ресурс
R_γ	Гамма-процентный ресурс
$T_{сл}$	Средний срок службы
$T_{сл\gamma}$	Гамма-процентный срок службы

Средний ресурс – математическое ожидание ресурса (R).

Гамма-процентный ресурс – наработка, в течение которой изделие не достигает предельного состояния с заданной вероятностью γ , выраженной в процентах (R_γ).

Средний срок службы – математическое ожидание срока службы ($T_{сл}$).

Гамма-процентный срок службы – календарная продолжительность эксплуатации изделия, в течение которой изделие достигает предельного состояния с заданной вероятностью γ , выраженной в процентах ($T_{сл\gamma}$).

Соотношения между ресурсом и сроком службы могут меняться в зависимости от интенсивности эксплуатации.

Например, ресурс изделия, равный 1000 часов, может быть использован в течение одного года при эксплуатации в непрерывном режиме, и в течение нескольких лет в системе периодического действия (при среднем расходе ресурса 200...300 ч/год).

Средний ресурс $R = M[r] = \int_0^\infty r \cdot f_r(r) dr$,

где $f_r(r)$ – плотность распределения величины ресурса.

Величину гамма-процентного ресурса R_γ можно найти из условия

$$P_{\text{РЕС}}(R_\gamma) = \frac{\gamma}{100},$$

где $P_{\text{РЕС}}(R_\gamma) = \int_r^\infty f_r(r) dr$ – вероятность того, что предельное состояние изделия не наступит в пределах заданного ресурса R_γ .

Средний срок службы

$$T_{сл} = M[t_{сл}] = \int_0^\infty t \cdot f_{t_{сл}}(t) dt.$$

Величину гамма-процентного срока службы $T_{сл\gamma}$ можно найти из условия

$$P_{сл} = (T_{сл\gamma}) = \frac{\gamma}{100},$$

где $f_{t_{сл}}(t)$ – плотность распределения срока службы;

$P_{сл}(T_{сл\gamma}) = \int_{t_{сл\gamma}}^\infty f_{t_{сл}}(t) dt$ – вероятность того, что предельное состояние изделия наступит не ранее календарного времени $t_{сл\gamma}$.

1.5.3. Показатели сохраняемости
(отражены в табл. 1.13)

Таблица 1.13

T_{xp}	Средний срок сохраняемости (МОЖ срока сохраняемости)
t_{xpy}	Гамма-процентный срок сохраняемости

Гамма-процентный срок сохраняемости t_{xpy} – срок сохраняемости, достигаемый изделием с заданной вероятностью γ , выраженной в процентах.

Средний срок сохраняемости:

$$T_{xp} = M[t_{xp}] = \int_0^{\infty} t \cdot f_{t_{xp}} dt,$$

где $f_{t_{xp}}(t)$ – плотность распределения величины t_{xp} .

Величину гамма-процентного срока сохраняемости определяют из условия

$$P_{xp}(t_{xpy}) = \frac{\gamma}{100},$$

где $P_{xp}(t_{xpy}) = \int_{t_{xpy}}^{\infty} f_{t_{xpy}}(t) dt$ – вероятность того, что предельное состояние изделия наступит не ранее календарного времени t_{xpy} .

Комплексные показатели надежности:

- коэффициент готовности – K_r ;
- коэффициент оперативной готовности – $K_{ог}$;
- коэффициент технического использования – $K_{ти}$;
- коэффициент сохранения эффективности – $K_{сэ}$.

Коэффициент готовности K_r – вероятность того, что изделие окажется в работоспособном состоянии в произвольный момент времени (кроме планируемых периодов, в течение которых применение изделия по назначению не предусматривается (плановое ТО, плановый ремонт)):

$$P_0(t) = \left[\frac{\mu}{\lambda + \mu} e^{-(\lambda + \mu)t} + \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \right] \cdot e^{-(\lambda + \mu)t},$$

где $P_0(t)$ – вероятность работоспособного состояния изделия в произвольный момент времени t ;

λ – интенсивность отказов;

μ – интенсивность восстановления.

Представим λ через наработку на отказ: $\lambda = \frac{1}{T_0}$,

μ – через среднее время восстановления: $\mu = \frac{1}{T_B}$,

тогда

$$P_0(t) = \frac{1}{1 + K_B} \left[1 + K_B e^{-\lambda \left(\frac{1 + K_B}{K_B} \right) t} \right],$$

где $K_B = \frac{T_B}{T_0}$ – норма восстановления.

Зависимость вероятности $P_0(t)$ от времени t при различных значениях K_B приведена на рис. 1.11.

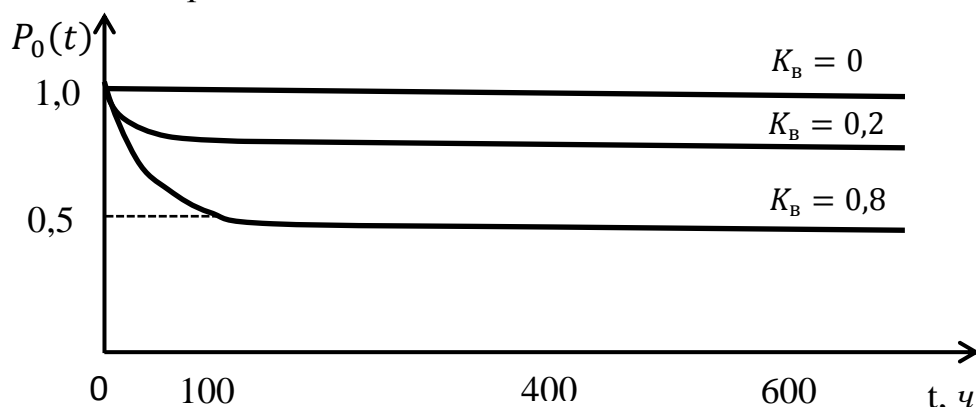


Рис. 1.11

Из рисунка видно, что существует установившееся значение вероятности $P_0(t)$, которое не зависит от времени.

Это значение и есть величина коэффициента готовности (K_r) изделия непрерывного действия:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} P_0(t) = \frac{1}{1 + K_B} = \frac{T_0}{T_0 + T_B} = K_r.$$

Физически K_r представляет собой отношение суммарного времени исправной работы изделия к общему времени исправной работы и ремонта изделия, взятых за определенный период эксплуатации.

Коэффициент готовности для дежурного изделия (с учетом всех его состояний)

$$K_r = 1 - K_{\Pi},$$

где K_{Π} – коэффициент простоя, характеризующийся вероятностью пребывания изделия в произвольный момент времени в нерабочем состоянии:

$$K_{\Pi} = \frac{t_{\text{пр}\Sigma}}{t_{\text{к}}},$$

$t_{\text{пр}\Sigma}$ – суммарный простой изделия за календарное время $t_{\text{к}}$.

Статистическая оценка \widehat{K}_r изделия, используемого по назначению с перерывами, обусловленными появлением отказов и восстановлением после них:

$$\widehat{K}_r = \frac{1}{t_{\text{прим}}} (t_{\text{прим}} - \sum_{i=1}^n t_{\text{в}i}),$$

где $t_{\text{прим}}$ – время применения изделия по назначению (с учетом времени восстановления при отказах);

$t_{\text{в}i}$ – время восстановления изделия после i -го отказа;

n – количество отказов за время применения изделия.

K_r будет стационарным при $t_{\text{прим}} \rightarrow \infty$.

Коэффициент оперативной готовности $K_{\text{ог}}$ – вероятность того, что изделие окажется в работоспособном состоянии в произвольный момент времени (кроме планируемых периодов, в течение которых применение изделия по

назначению не предусматривается (плановое ТО, плановый ремонт)) и, начиная с этого момента, будет работать безотказно в течение заданного интервала времени.

То есть $K_{ог}$ – вероятность совместного осуществления двух событий:

1) застать изделие работоспособным в произвольный момент времени t .

Вероятность этого события (при нормальной эксплуатации)

$$P_0(t) = K_{г};$$

2) изделие проработает безотказно в течение промежутка времени $(t, t + \Delta t)$.

Вероятность этого события (при нормальной эксплуатации) для экспоненциального распределения наработки между отказами

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

тогда

$$K_{ог}(t, t + \Delta t) = P_0(t) \cdot P(\Delta t) = K_{г} \cdot e^{-\lambda t},$$

т. е.

$$K_{ог}(t) = K_{г} \cdot e^{-\lambda t}.$$

Коэффициент технического использования $K_{ти}$ – отношение МОЖ суммарного времени пребывания изделия в работоспособном состоянии ($T_{рс}$) за некоторый период эксплуатации к МОЖ суммарного времени пребывания изделия в работоспособном состоянии ($T_{рс}$) плюс простои, обусловленные техническим обслуживанием ($T_{то}$), плюс ремонт (восстановление $T_{в}$) за этот же период:

$$K_{ти} = \frac{M[T_{рс}]}{M[T_{рс} + T_{то} + T_{в}]}$$

Статистическое значение $\hat{K}_{ти}$ примет вид

$$\hat{K}_{ти} = \frac{[\sum_{i=1}^I T_{рс_i}]}{[\sum_{i=1}^I T_{рс_i} + \sum_{j=1}^J T_{то_j} + \sum_{q=1}^Q T_{в_q}]},$$

где $T_{рс_i}$ – время работы изделия на i -м интервале;

$T_{то_j}$ – время, затраченное на j -е ТО;

$T_{в_q}$ – продолжительность q -го ремонта (восстановления).

Коэффициент сохранения эффективности $K_{сэ}$ – отношение значения показателя эффективности использования изделия по назначению за определенную продолжительность эксплуатации к номинальному значению этого показателя, вычисленному при условии, что отказы изделия в течение того же периода не возникают.

$K_{сэ}$ вводится для сложных изделий (многоканальных), в которых отказы отдельных каналов не приводят к отказу всего изделия, а лишь частично снижают его эффективность.

Для каждого конкретного типа изделия $K_{сэ}$ задается техническим заданием и вводится в НТД и (или) конструкторскую (проектную) документацию.

1.6. Методика расчета эксплуатационной надежности изделий

Цель расчета: определить значения показателей надежности (ПН) изделия по известным значениям показателей надежности его элементов при заданных условиях эксплуатации.

ПН: безотказность, ремонтпригодность, сохраняемость, долговечность.

Значения ПН устанавливаются в тактико-техническом задании (ТТЗ), технических условиях (ТУ) с учетом:

- назначения изделия;
- достигнутого уровня и выявленных тенденций повышения его надежности;
- технико-экономического обоснования;
- возможностей изготовителей;
- требований и возможностей потребителей.

При обосновании требований к ПН важное значение имеет экономическая оценка эксплуатационных свойств изделия, так как:

- создание более надежного изделия требует дополнительного увеличения затрат на его разработку и производство;
- низкая надежность приводит к высокой стоимости его эксплуатации.

Поэтому оценка исходит из оптимальных значений ПН, обеспечивающих минимальные затраты на разработку, производство и эксплуатацию изделия.

Методы расчета ПН:

- 1) аналитические методы расчета (при проектировании изделий);
- 2) расчет ПН по статистическим данным, полученным в процессе испытаний или эксплуатации.

1.6.1. Аналитический метод расчета показателей надежности

В основе расчета лежит модель изделия, представляющая в формализованном виде все состояния работоспособности и (или) исправности изделия (рис.1.12).

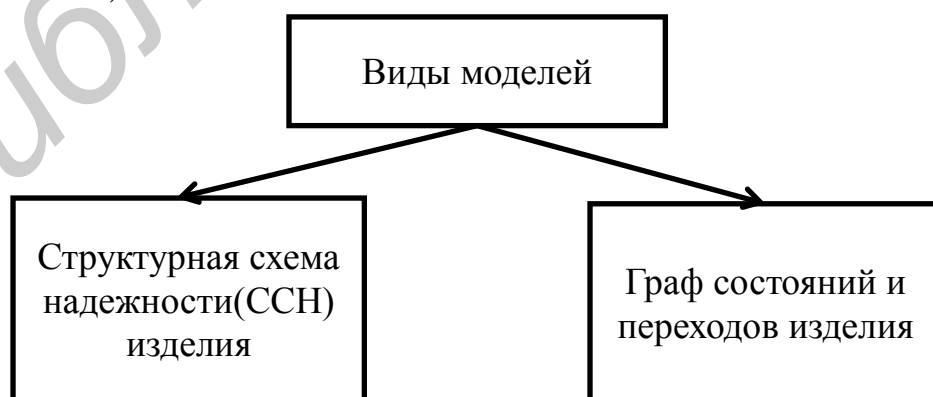


Рис. 1.12

Граф состояний и переходов используется (для узкого класса изделий) в качестве модели сложных изделий с восстанавливаемым резервом.

На практике (для широкого класса изделий) большое распространение получила модель ССН.

Структурная схема надежности (ССН) представляет собой графическое изображение изделия по его составным элементам, соединенным с учетом влияния их отказов на работоспособность изделия в целом.

Основные виды ССН:

- последовательная схема соединения составных элементов изделия;
- параллельная схема;
- последовательно-параллельная схема;
- параллельно-последовательная схема.

Последовательная схема соединений приведена на рис. 1.13:

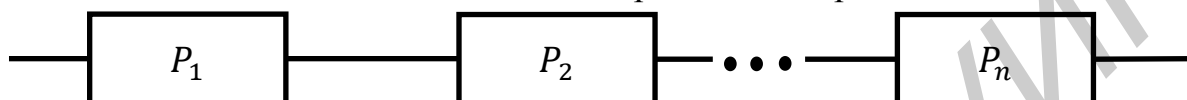


Рис. 1.13

В схеме P_1, P_2, \dots, P_n – вероятности безотказной работы элементов изделия.

При последовательной схеме соединения отказ любого элемента изделия приводит к отказу некоторой части системы или отказу всего изделия.

Параллельная схема соединения приведена на рис. 1.14.

При параллельной схеме соединения отказ любого элемента изделия не приводит к отказу некоторой части изделия или к отказу всего изделия.

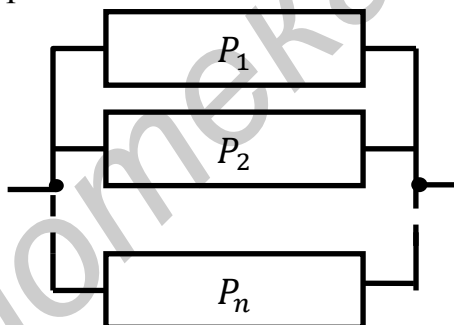


Рис. 1.14

Последовательно-параллельная схема соединения элементов изделия приведена на рис. 1.15.

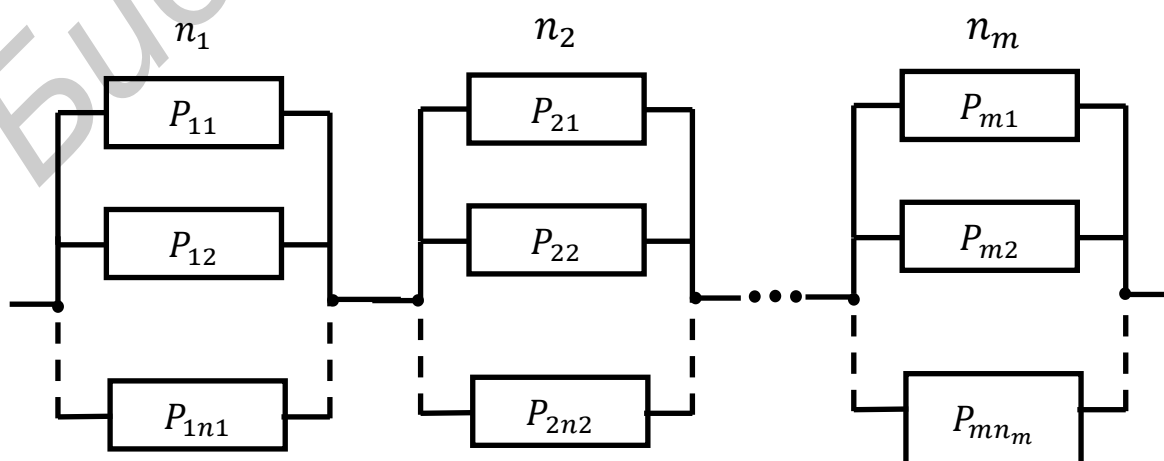


Рис. 1.15

В схеме n_1, n_2, \dots, n_m – число элементов в параллельной части изделия; $P_{11} \dots P_{mn_m}$ – вероятности безотказной работы элементов изделия.

Параллельно-последовательная схема соединения элементов изделия представлена на рис. 1.16.

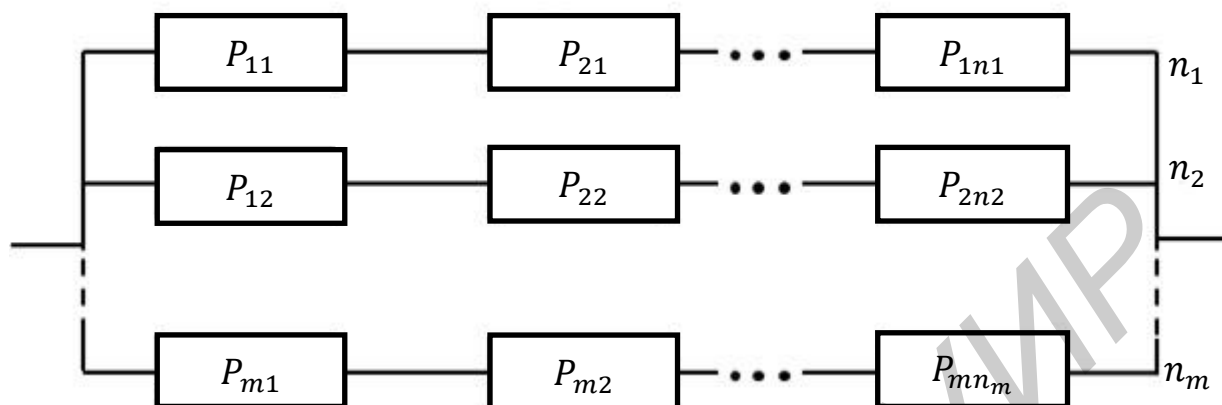


Рис. 1.16

В схеме n_1, n_2, \dots, n_m – число элементов в последовательной части схемы.

Суть расчета состоит в определении числовых значений ПН (показатели безотказности, ремонтпригодности, готовности) по известным значениям интенсивности отказов элементов (или блоков, устройств), входящих в состав изделия.

Расчет производится при условии, что:

- отказы элементов независимы;
- наработка до отказа подчинена экспоненциальному закону распределения;
- известны коэффициенты, учитывающие при расчетах эксплуатационных интенсивностей отказов элементов внешние факторы: электрическую нагрузку, температуру, влажность, давление, вибрации и др.

Данные об интенсивностях отказов элементов приведены в справочниках по надежности министерств соответствующих отраслей, например, справочниках Министерства радиоэлектронной промышленности «Надежность изделий электронной техники, электротехники и квантовой электроники».

Эти данные в справочниках приведены для нормальных условий работы:

- температура $+25\text{ }^\circ\text{C} \pm 10\text{ }^\circ\text{C}$;
- атмосферное давление 750 мм рт. ст.;
- относительная влажность $(60 \pm 20)\%$;
- отсутствие механических воздействий;
- нормальный энергетический режим и т. д.

Основные расчетные соотношения для показателей безотказности изделия при последовательном соединении элементов в ССН.

Если работоспособны все элементы, а также события, заключающиеся в безотказной работе элементов, независимы, то, исходя из теоремы умножения вероятностей, вероятность безотказной работы изделия равна

$$P(t) = \prod_{i=1}^m P_i(t).$$

Но так как вероятность безотказной работы элемента равна

$$P_i(t) = \exp \left[- \int_0^t \lambda_i(\tau) d\tau \right],$$

то

$$\begin{aligned} P(t) &= \prod_{i=1}^m P_i(t) = \prod_{i=1}^m \exp \left[- \int_0^t \lambda_i(\tau) d\tau \right] = \exp \left[- \sum_{i=1}^m \int_0^t \lambda_i(\tau) d\tau \right] = \\ &= \exp \left[- \int_0^t \sum_{i=1}^m \lambda_i(\tau) d\tau \right], \end{aligned}$$

а средняя наработка до отказа

$$T = \int_0^{\infty} P(t) dt = \int_0^{\infty} \exp \left[- \int_0^t \sum_{i=1}^m \lambda_i(\tau) d\tau \right] dt,$$

плотность распределения наработки до отказа (см. табл. 1.9)

$$\begin{aligned} f(t) &= - \frac{dP(t)}{dt} = \sum_{i=1}^m f_i(t) \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^m \left(1 - \int_0^t f_j(\tau) d\tau \right) = \\ &= \sum_{i=1}^m \lambda_i(t) \cdot \exp \left(- \int_0^t \sum_{j=1}^m \lambda_j(\tau) d\tau \right), \end{aligned}$$

интенсивность отказов

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{P(t)} = \sum_{i=1}^m \lambda_i(t),$$

т. е. при последовательном соединении элементов в ССН интенсивность отказов изделия равна сумме интенсивностей отказов его элементов.

При экспоненциальном распределении наработки до отказа формулы показателей безотказности принимают следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} \lambda(t) &= \sum_{i=1}^m \lambda_i = \lambda = \text{const}, \\ P(t) &= \exp(-t \sum_{i=1}^m \lambda_i) = e^{-\lambda t}, \\ T &= T_0 = \frac{1}{\lambda}. \end{aligned} \right\} \quad (1.3)$$

Ниже приведены основные расчетные соотношения для показателей безотказности при параллельном соединении элементов на ССН и допущениях, что:

– работоспособным изделие останется при условии, если работоспособен хотя бы один из элементов, т. е. отказ изделия возникает только после того, как откажут все элементы;

– события, заключающиеся в отказе элементов, – независимы.

Исходя из теоремы умножения вероятностей, вероятность отказа $Q(t)$ изделия (см. табл.1.9)

$$Q(t) = \prod_{i=1}^m Q_i(t),$$

а вероятность безотказной работы изделия

$$P(t) = 1 - Q(t) = 1 - \prod_{i=1}^m Q_i(t) = 1 - \prod_{i=1}^m \int_0^t f_i(\tau) d\tau.$$

Плотность распределения наработки до отказа

$$\begin{aligned} f(t) &= \frac{dQ(t)}{dt} = \sum_{i=1}^m f_i(t) \prod_{i=1, i \neq j}^m \int_0^t f_j(\tau) d\tau = \\ &= \sum_{i=1}^m \lambda_i(t) \cdot \exp\left[-\int_0^t \lambda_i(\tau) d\tau\right] \cdot \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^m Q_j(t) = \\ &= \sum_{i=1}^m \lambda_i(t) \cdot P_i(t) \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^m Q_j(t). \end{aligned}$$

$$\text{Интенсивность отказов } \lambda(t) = \frac{f(t)}{P(t)} = \frac{\sum_{i=1}^m \lambda_i(t) \cdot P_i(t) \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^m Q_j(t)}{1 - \prod_{i=1}^m Q_i(t)}.$$

Из последнего выражения следует, что при параллельном соединении элементов в ССН интенсивность отказов изделия не равна сумме интенсивностей отказов его элементов (как при последовательном соединении), т. е.

$$\lambda(t) \neq \sum_{i=1}^m \lambda_i(t).$$

Это приводит к значительным трудностям при расчете изделий с параллельным соединением элементов в ССН.

Выводы: для аналитического метода расчета показателей надежности необходимо:

- 1) распределить требования по надежности отдельных элементов (узлов, блоков) исходя из общих требований к надежности изделия в целом;
- 2) составить ССН изделия;

3) иметь данные об интенсивности отказов элементов (приведены в справочниках);

4) при расчете ПН предположить, что:

- отказы элементов изделия независимы;
- наработка до отказа элементов изделия подчинена экспоненциальному закону распределения.

1.6.2. Расчет показателей надежности по статистическим данным

Расчет производится исходя из результатов испытаний на надежность, а также сбора и обработки информации о надежности изделий при эксплуатации.

Испытания на надежность включают в себя:

- стендовые (заводские) испытания;
- полигонные испытания;
- эксплуатационные испытания.

Цели испытаний:

- определение значений ПН;
- определение соответствия ПН требованиям, установленным в НТД;
- выявление слабых элементов конструкции;
- выбор мероприятий для повышения надежности.

Виды испытаний:

- определительные;
- контрольные;
- специальные.

В результате определительных испытаний получают значения ПН. Это основной вид испытаний. Могут проводиться в нормальном и ускоренном режимах. Факторы, ускоряющие процесс возникновения отказов: температура, нагрузка, вибрация и т. д.

В результате контрольных испытаний устанавливается, что величина ПН не ниже (или ниже) некоторого значения с заданной вероятностью.

В результате специальных испытаний определяется влияние отдельных (специальных) факторов на надежность изделия (механические, тепловые, радиационные, климатические и др.).

При испытании на надежность заполняются отчетные документы в соответствии с регламентированной НТД «Система сбора и обработки информации о надежности (ССОИН)».

По изделиям, не находящимся на испытаниях, также предоставляются отчеты о надежности с использованием данных из журнала ТО, которые ведет обслуживающий персонал.

При определительных испытаниях на надежность результаты представляются в виде последовательности некоторых величин T_1, T_2, \dots, T_n , которые являются реализациями некоторой случайной величины T (например, наработки на отказ, времени восстановления и др.).

Совокупность этих значений называется выборкой (где n – объем выборки, значения T_i – выборочные значения случайной величины T).

Выборка называется однородной, если все значения T_i являются реализацией одной и той же случайной величины T .

Характеристики случайной величины, найденные по выборке, называются выборочными.

Чем больше объем выборки, тем более точными являются выборочные оценки. Поэтому необходимо оценивать их точность и достоверность.

Эта задача решается методами математической статистики.

Таким образом, расчет ПН по статистическим данным включает в себя решение двух задач:

- первая: по полученным статистическим данным решается задача определения неизвестного закона распределения случайной величины;
- вторая: решается задача проверки на точность полученного закона распределения с помощью точечных и интервальных оценок.

1.7. Методика решения задачи определения неизвестного закона распределения случайной величины

Так как не существует способов непосредственно по имеющимся статистическим данным получить математическую модель (формальное выражение) закона распределения случайной величины, то задача решается следующим образом:

- 1) выдвигается гипотеза о математическом выражении закона распределения;
- 2) проверяется соответствие выдвинутой гипотезы имеющимся статистическим данным.

При решении задачи выдвижения гипотезы о математическом выражении закона распределения рекомендуется за основу брать плотность распределения вероятности, так как представленная в виде графика она наиболее наглядно отображает специфические черты закона распределения:

- расположение области наиболее вероятных значений случайной величины;
- степень рассеивания;
- симметричность и др.

График статистической плотности распределения случайной величины называют гистограммой.

Решение задачи определения неизвестного закона распределения осуществляется в следующей последовательности:

- 1-й этап. Построение гистограммы (по исходным статистическим данным);
- 2-й этап. Выбор теоретической функции плотности распределения (выдвигается гипотеза о виде теоретической функции плотности распределения, которая наиболее близко соответствовала бы статистической функции);
- 3-й этап. Проверка согласия теоретической и статистической функции (по количественному критерию).

1.7.1. Первый этап: построение гистограммы

Полученные статистические данные (T_1, T_2, \dots, T_n) сводятся в таблицу (в табл. 1.14 $n = 100$).

Примечание. В таблице – случайный набор чисел (в часах), в том числе и повторяющихся. Вместо таблицы можно записать непрерывный ряд чисел в одну строку или в один столбец, но таблица компактнее.

Из таблицы выбирают максимальное и минимальное выборочные значения:

$$t_{\max} = 200 \text{ ч и } t_{\min} = 1 \text{ ч.}$$

Эти значения случайной величины T_i принимаются в качестве границ области определения выборочной плотности.

Из выборки определяют число интервалов группирования k по формуле

$$k \approx 1 + 3,3 \lg n = 1 + 3,3 \lg 100 = 7,6.$$

Таблица 1.14

75	10	80	94	2	72	7	28	25	8
13	1	81	33	141	25	68	29	108	13
60	20	65	39	46	84	25	88	10	27
8	89	12	66	31	85	63	11	65	9
44	12	8	15	42	43	4	35	59	46
22	19	45	16	18	200	14	44	11	48
69	173	13	4	17	34	21	29	147	74
14	28	7	160	41	128	24	3	161	42
181	37	109	5	31	129	40	30	103	6
7	67	39	84	3	124	11	37	5	102

Рекомендуется число интервалов k принимать в пределах 10... 30.

Полученное число $k \approx 7,6$ близко $k = 10$, поэтому принимается $k = 10$.

Кроме числа интервалов группирования k , определяют длину интервалов группирования Δt по формуле

$$\Delta t = \frac{t_{\max} - t_{\min}}{k} = \frac{200-1}{10} \approx 20 \text{ ч.}$$

Все значения случайной величины от $t_{\max} = 200$ часов до $t_{\min} = 1$ ч разбиваются на k интервалов группирования с длиной $\Delta t = 20$ ч и подсчитываются значения Δn_j (т. е. число реализаций T_i , попавших в j -й интервал группирования).

Значения Δn_j заносятся в табл. 1.15 в виде значка (или крестика).

Колонки таблицы соответствуют $k = 10$, т. е. десяти интервалам группирования: $[0; 20)$, $[20; 40)$, $[40; 60)$, $[60; 80)$, $[80; 100)$, $[100; 120)$, $[120; 140)$, $[140; 160)$, $[160; 180)$, $[180; 200)$.

Сортировка статистических данных по колонкам табл. 1.15 производится следующим образом:

– если, например, $T_i = 75$ ч, то крестик заносится в колонку [60; 80), после чего число $T_i = 75$ ч из исходных данных вычеркивается, чтобы исключить ошибочный повторный его подсчет;

– если T_i попадает на границу интервала (например $T_i = 80$ ч), то крестик заносится в правую колонку, соответствующую интервалу [80;100);

– если имеются интервалы, в которых оказалось мало реализаций (например $\Delta n_j < 4$), то такие интервалы объединяются с соседними, в которых также мало реализаций. В табл. 1.15 последние четыре интервала объединены в один $\Delta t_7 = [120; 200)$, длина которого 80 ч и для которого $\Delta n_j = 10$. Естественно, что

$$\sum_{j=1}^k \Delta n_j = n = 100, \quad \text{а } k = 7.$$

По полученным данным Δt_j и Δn_j рассчитываются средние на интервалах значения статистической плотности по формуле

$$f_{\text{Тср.стат}}(t_j) = \frac{\Delta n_j}{n \cdot \Delta t_j}$$

и строится гистограмма (рис. 1.17).

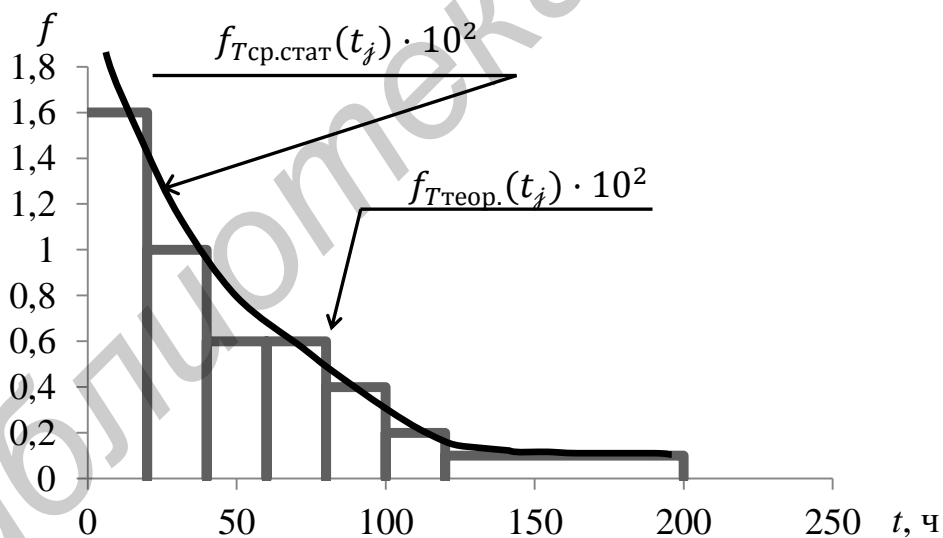


Рис. 1.17

Примечание. Рассчитанные значения $f_{\text{Тср.стат}}(t_j)$ и $f_{\text{Ттеор.}}(t_j)$ внесены в табл. 1.15.

1.7.2. Второй этап: выбор теоретической функции плотности распределения

1. Выдвигается гипотеза о виде теоретических функций распределения $f_{\text{Ттеор.}}(t)$, которая наиболее близко соответствовала бы статистической функции $f_{\text{Тстат.}}(t)$.

По внешнему виду построенной гистограммы $f_{T_{\text{ср.стат}}}(t_j)$ делается предположение, что в качестве теоретической плотности распределения $f_{T_{\text{теор}}}(t_j)$ можно использовать экспоненциальную функцию

$$f_{T_{\text{теор}}}(t) = \frac{1}{T_0} \cdot e^{-\frac{t}{T_0}},$$

где T_0 – наработка на отказ (единственный параметр этой функции).

2. Поскольку истинное значение T_0 неизвестно, вместо нее подставляется ее статистическая оценка $T_{0 \text{ стат}}$, которая рассчитывается по формуле

$$T_{0 \text{ стат}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_i. \quad (1.4)$$

Для рассматриваемого примера $T_{0 \text{ стат}} \approx 50$ ч, тогда

$$f_{T_{\text{теор}}}(t) = \frac{1}{T_{0 \text{ стат}}} \cdot e^{-\frac{t}{T_{0 \text{ стат}}}} = 0,02 \cdot e^{-0,02t}.$$

График этой выбранной теоретической функции построен на рис. 1.17 и совмещен со статистической гистограммой.

Процедуру совмещения статистической гистограммы и теоретической кривой называют сглаживанием гистограммы.

3. Визуально оценивается (по графику и гистограмме) степень соответствия выбранной теоретической функции $f_{T_{\text{теор}}}(t)$ гистограмме $f_{T_{\text{ср.стат}}}(t_j)$.

При существенном несовпадении ищется новая, более подходящая теоретическая функция.

Визуальная (качественная) оценка совпадения выбранной функции и гистограммы позволяет сделать предположение о том, что гипотеза об экспоненциальном распределении наработки между отказами достаточно близко согласуется с имеющимися статистическими данными. Но качественной оценки недостаточно.

1.7.3. Третий этап: проверка согласия статистических данных и выбранной теоретической функции с помощью количественного критерия

Процедура количественной оценки справедливости принятой гипотезы относительно вида теоретической функции выполняется в следующей последовательности.

1. По имеющимся статистическим данным и принятому теоретическому распределению вычисляются:

- теоретическая вероятность попадания случайной величины T в интервал $[t_{j-1}; t_j]$;
- выборочная оценка этой же вероятности по статистическим данным.

Формулы расчета

Теоретическая вероятность попадания случайной величины T в интервал $[t_{j-1}; t_j]$:

$$\Delta q_{j \text{ теор}} = \int_{t_{j-1}}^{t_j} f_{T \text{ теор}}(t) dt = \int_{t_{j-1}}^{t_j} \frac{1}{T_{0 \text{ стат}}} \cdot e^{-\frac{t}{T_{0 \text{ стат}}}} dt.$$

Выборочная оценка этой же вероятности по статистическим данным:

$$\Delta q_{j \text{ стат}} = \frac{\Delta n_j}{n}.$$

Примечание. Рассчитанные значения Δq_j и $\Delta q_{j \text{ стат}}$ приведены в табл. 1.15.

2. Количественная оценка соответствия выбранной теоретической функции $f_{T \text{ теор}}(t)$ гистограмме $f_{T \text{ ср.стат}}(t_j)$ производится с помощью критерия согласия Δ (Колмогорова) или критерия χ^2 (Пирсона).

При применении критерия согласия Колмогорова в качестве меры расхождения между теоретическим и статистическим распределениями рассматривается максимальное значение модуля разности между этими распределениями с условием, что

$$\Delta = \Delta f \sqrt{n} \leq 1,$$

где $\Delta f = \max |f_{T \text{ ср.стат}}(t_j) - f_{T \text{ теор}}(t)|$, n – объем выборки.

Недостаток: критерий Колмогорова требует предварительного знания вида теоретической функции распределения $f_{T \text{ теор}}(t)$ и ее параметров.

Критерий согласия χ^2 Пирсона не требует построения теоретического закона распределения. Достаточно задаться только общим видом функции $f_{T \text{ теор}}(t)$, а входящие в нее числовые параметры определяются по экспериментальным данным.

Формула расчета критерия χ^2 Пирсона:

$$\Delta = \chi_0^2 = \sum_{j=1}^k \frac{n(\Delta q_{j \text{ теор}} - \Delta q_{j \text{ стат}})^2}{\Delta q_{j \text{ теор}}}, \quad (1.5)$$

где $\Delta q_{j \text{ теор}}$ и $\Delta q_{j \text{ стат}}$ определены выше.

При $n \rightarrow \infty$ распределение величины χ_0^2 стремится к χ^2 -распределению с r степенями свободы (если верна гипотеза о теоретической плотности $f_{T \text{ теор}}(t)$).

Число степеней свободы χ^2 – распределения:

$$r = k - s, \quad (1.6)$$

где k – число интервалов группирования гистограмм;

s – число связей, наложенных на теоретическую функцию $f_{T \text{ теор}}(t)$.

Величина s равна числу параметров функций $f_{T \text{ теор}}(t)$ плюс единица.

Если число интервалов $k = 7$, а число параметров равно единице, т. е. T (наработка на отказ), то $s = 1 + 1 = 2$, и число степеней свободы χ^2 – распределения: $r = 7 - 2 = 5$.

По критерию χ^2 Пирсона проверка гипотезы о том, что случайная величина T (наработка на отказ), для которой имеется статистическая выборка

$(T_i, i = 1, \dots, n)$ с плотностью распределения $f_T(t)$, близка к выбранной теоретической (экспоненциальной), и осуществляется по величине вероятности

$$P_{\chi_0^2} = \int_{\chi_0^2}^{\infty} \psi_{\chi^2}(y) dy,$$

где χ_0^2 – рассчитанное значение реализации случайной величины χ^2 ;

$\psi_{\chi^2}(y, r)$ – плотность χ^2 –распределения с r степенями свободы.

Расчеты для построения гистограммы приведены в табл. 1.15.

Таблица 1.15

$[t_{j-1}, t_j]$	[0, 20)	[20, 40)	[40, 60)	[60, 80)	[80, 100)	[100, 120)	[120, 140)	[140, 160)	[160, 180)	[180, 200)
Подсчет числа реализаций, попавших в интервалы $[t_{j-1}, t_j]$	xxxx xxxx xxxx xxxx xxxx xxxx xxxx	xxxx xxxx xxxx xxxx xxxx xxx	xxxx xxxx xxx	xxxx xxxx xxx	xxxx xxxx	xxxx x	xxx	xx	xxx	xx
							$\Sigma = 10$			
Δn_j	32	23	11	11	8	5	3	2	3	2
Δt_j	20	20	20	20	20	20	80			
f_T ср. стат (t_j)	0,016	0,012	0,006	0,006	0,004	0,003	0,00125			
f_T теор (t_j)	0,013	0,009	0,006	0,004	0,003	0,002	0,00036			
Δq_j теор	0,33	0,22	0,15	0,1	0,07	0,05	0,07			
Δq_j стат	0,32	0,23	0,11	0,11	0,08	0,05	0,1			
χ_j^2	0,03	0,4	0,98	0,12	0,27	0,07	1,05			

Значения χ_0^2 и $P_{\chi_0^2}$ для $r = 5$ приведены в табл. 1.16.

Таблица 1.16

$P_{\chi_0^2}$	0,99	0,95	0,9	0,8	0,7	0,5	0,3	0,2	0,1	0,05
r	χ_0^2									
1	0	0,004	0,016	0,064	0,148	0,455	1,074	1,642	2,71	3,84
2	0,02	0,1	0,2	0,45	0,71	1,39	2,4	3,2	4,6	6,0
3	0,1	0,35	0,59	1,0	1,4	2,37	3,7	4,64	6,3	7,8
4	0,3	0,7	1,06	1,65	2,2	3,36	4,9	6,0	7,8	9,5
5	0,56	1,15	1,6	2,34	3,0	4,35	6,1	7,3	9,2	11,1

Результаты решения задачи определения закона распределения случайной величины T оцениваются следующим образом.

Если рассчитанная вероятность $P_{\chi_0^2}$ мала (менее 0,1), то гипотеза об экспоненциальной плотности распределения $f_{T_{\text{ср.стат}}}(t_j)$ отбрасывается как неправдоподобная.

Если эта вероятность относительно велика (больше 0,3... 0,4), то гипотезу можно признать не противоречащей исходным статистическим данным.

Для рассматриваемого случая рассчитанное значение $\chi_0^2 = 2,87$. Так как число степеней свободы $r = 5$, то в табл. 1.16 в последней строке (при $r = 5$) значение χ_0^2 , близкое к $\chi_0^2 = 2,87$, равно $\chi_0^2 = 3,0$. Это значение $\chi_0^2 = 3,0$ находится в столбце с $P_{\chi_0^2} = 0,7$.

Следовательно, $P_{\chi_0^2} = 0,7 > 0,3... 0,4$, а значит, исходные статистические данные не противоречат гипотезе об экспоненциальном законе распределения наработки между отказами.

Точечные и интервальные оценки показателей надежности изделий

Статистическую (выборочную) оценку некоторого показателя надежности, рассчитанную для конкретных выборочных значений случайной величины, называют точечной оценкой этого показателя.

Пусть $\varphi_{\text{стат}}$ – точечная оценка случайной величины T (наработки на отказ), тогда точечная оценка $\varphi_{\text{стат}}$ есть функция выборочных значений T_1, T_2, \dots, T_n , т. е. $\varphi_{\text{стат}} = \Theta(T_1, T_2, \dots, T_n)$.

Оценка $\varphi_{\text{стат}}$ – величина случайная, так как выборочные значения T_1, T_2, \dots, T_n случайны и число их конечно. Поэтому необходимо решать задачу выбора наилучшей функции Θ , при которой точечная оценка $\varphi_{\text{стат}}$ удовлетворяет критериям состоятельности, несмещенности и эффективности.

Критерии точечной оценки

Точечную оценку $\varphi_{\text{стат}}$ называют состоятельной, если с увеличением объема выборки n значение $\varphi_{\text{стат}}$ сходится по вероятности к истинному значению показателя φ :

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \text{Вер} \{ |\varphi_{\text{стат}} - \varphi| > \varepsilon \} = 0,$$

где ε – наперед заданная малая величина.

Точечную оценку $\varphi_{\text{стат}}$ называют несмещенной, если ее математическое ожидание равно истинному значению показателя φ : $M[\varphi_{\text{стат}}] = \varphi$.

Точечную оценку $\varphi_{\text{стат}}$ называют эффективной, если в фиксированном объеме выборки она имеет минимальную дисперсию: $D[\varphi_{\text{стат}}] \rightarrow \min$.

Наилучшей точечной оценкой МОЖ (что доказывается в математической статистике), удовлетворяющей критериям состоятельности, несмещения и эффективности, является среднее арифметическое наблюдаемых значений случайной величины.

Для определения возможного разброса точечной оценки показателя относительно его истинного значения используют доверительный интервал, внутри которого находится истинное значение показателя с заданной для него доверительной вероятностью.

Доверительный интервал совместно с заданной для него доверительной вероятностью называют интервальной оценкой показателя надежности.

Величины доверительного интервала и доверительной вероятности определяют точность и достоверность интервальной оценки.

Рассмотрим формулы для расчета точечной и интервальной оценок показателя надежности φ .

Пусть для показателя φ доверительный интервал $[\varphi_1, \varphi_2]$ с доверительной вероятностью ν покрывает неизвестное истинное значение этого показателя:

$$\text{Вер}\{\varphi_1 \leq \varphi \leq \varphi_2\} = \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} w(y) dy = \nu, \quad (1.7)$$

откуда

$$\nu_1 = \text{Вер}\{\varphi \geq \varphi_2\} = \int_{\varphi_2}^{\infty} w(y) dy, \quad (1.8)$$

$$\nu_2 = \text{Вер}\{\varphi \leq \varphi_1\} = \int_{-\infty}^{\varphi_1} w(y) dy, \quad (1.9)$$

где $w(y)$ – плотность распределения случайной величины $\varphi_{\text{стат}}$.

Геометрический смысл вероятностей ν_1 и ν_2 наглядно виден из рис. 1.18.

Очевидно, что

$$\nu_1 + \nu_2 = \nu. \quad (1.10)$$

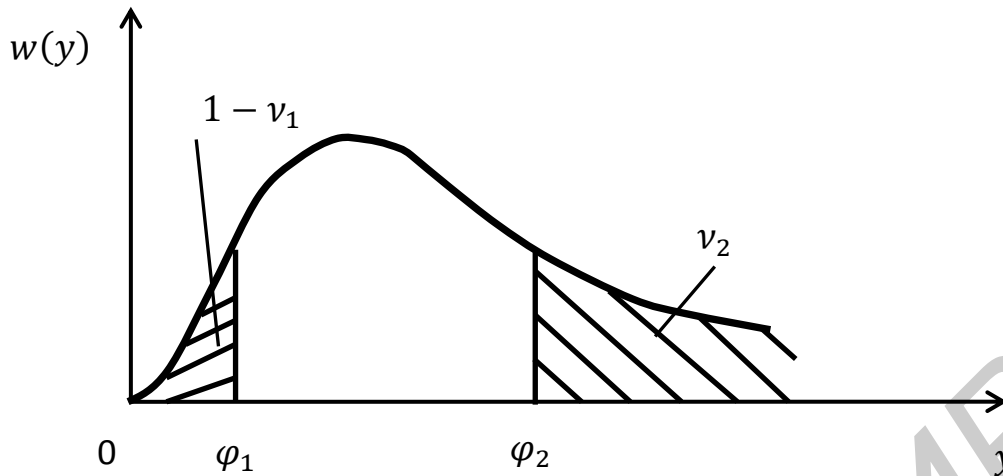


Рис. 1.18

Для того чтобы доверительный интервал $[\varphi_1, \varphi_2]$ покрывал наиболее вероятные значения неизвестного параметра φ , необходимо, чтобы выполнялось равенство

$$\nu_2 = 1 - \nu_1, \quad (1.11)$$

т. е. чтобы вероятности $\text{Вер}\{\varphi > \varphi_2\}$ и $\text{Вер}\{\varphi < \varphi_1\}$ были одинаковыми. С учетом этого по формулам (1.10) и (1.11) рассчитывают

$$\nu_2 = \frac{1-\nu}{2} \quad \text{и} \quad \nu_1 = 1 - \frac{1-\nu}{2}. \quad (1.12)$$

Примечание 1. По этим известным значениям ν_1 и ν_2 можно определить границы доверительного интервала φ_1 и φ_2 .

Примечание 2. Так как параметры плотности $w(y)$ в формулах (1.8) и (1.9) неизвестны, то в $w(y)$ подставляют их выборочные значения, которые случайны, а значит, вид кривой $w(y)$ и ее положение на оси y будут меняться от выборки к выборке.

Следовательно, от выборки к выборке для одной и той же случайной величины будут изменяться положение и размеры доверительного интервала (рис. 1.19).

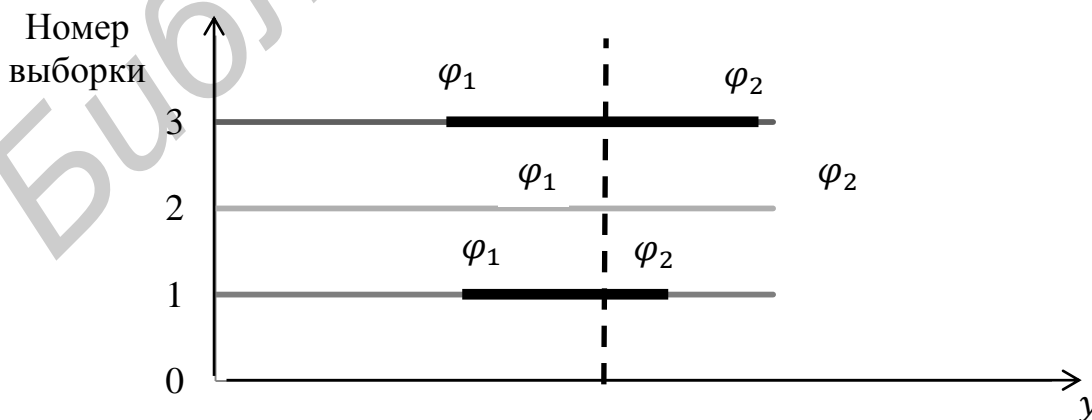


Рис. 1.19

Примечание 3. Из рис. 1.19 следует важная особенность выражения (1.7): так как положение и размеры доверительного интервала $[\varphi_1, \varphi_2]$ – случайны, то доверительную вероятность ν нельзя рассматривать как вероятность попадания случайной величины в некоторой фиксированной интервал, а следует иметь в виду, что доверительный интервал покрывает неизвестное значение оцениваемого показателя.

Из примечаний 1–3 следует, что требуется проверка на точность расчетов доверительной вероятности и доверительного интервала.

Эта проверка осуществляется с помощью определения коэффициентов точности.

Для этого в выражениях (1.8) и (1.9) вместо y вводят переменную δ :

$$\delta = \frac{y}{\varphi_{\text{стат}}}, \quad (1.13)$$

тогда $\nu_1 = \int_{\delta_1}^{\infty} w(\delta) d\delta$ и $\nu_2 = \int_{\delta_2}^{\infty} w(\delta) d\delta,$ (1.14)

где

$$\delta_1 = \frac{\varphi_1}{\varphi_{\text{стат}}} \text{ и } \delta_2 = \frac{\varphi_2}{\varphi_{\text{стат}}} - \text{коэффициенты точности.} \quad (1.15)$$

Коэффициенты точности δ_1 и δ_2 (формулы (1.15)) зависят от величин вероятностей ν_1 и ν_2 (см. формулы (1.12)) и от вида функции плотности $w(\delta)$, которая, в свою очередь, зависит от закона распределения исследуемой случайной величины (экспоненциальное распределение, распределение Эрланга 2-го порядка (см. рис. 1.5) или другие) и от объема выборки n , по которой находится оценка $\varphi_{\text{стат}}$.

Например, для экспоненциального закона распределения случайной величины с увеличением объема выборки n дисперсия функции плотности вероятности $w(\delta)$ уменьшается, и, как следствие, уменьшается величина доверительного интервала.

Таким образом, коэффициенты точности δ_1 и δ_2 являются функциями вероятностей ν_1 и ν_2 и объема выборки n и обозначаются следующим образом: $\delta_1(\nu_1, n)$ и $\delta_2(\nu_2, n)$. Коэффициенты точности $\delta_1(\nu_1, n)$ и $\delta_2(\nu_2, n)$ табулируются для интервальной оценки МОЖ случайных величин с различными законами распределения (табл. 1.17).

По известным коэффициентам точности $\delta_1(\nu_1, n)$ и $\delta_2(\nu_2, n)$ определяются границы доверительного интервала φ_1 и φ_2 :

$$\varphi_1 = \varphi_{\text{стат}} \cdot \delta_1(\nu_1, n); \quad \varphi_2 = \varphi_{\text{стат}} \cdot \delta_2(\nu_2, n). \quad (1.16)$$

Результат нахождения точечной и интервальной оценок показателя надежности φ записывается в виде соотношения (1.7) и читается так: с вероятностью ν неизвестное значение показателя φ покрывается интервалом (или заключено в интервале) $[\varphi_1, \varphi_2]$.

Коэффициенты точности (для случая экспоненциального распределения) приведены в табл. 1.17.

На основании вышеизложенного методика нахождения точечной и интервальной оценок показателя надежности φ следующая.

1. По исходным статистическим данным определяют точечную оценку $\varphi_{\text{стат}}$ (как среднее арифметическое по формуле (1.4)).

2. По заданному значению доверительной вероятности ν рассчитывают значения вероятностей ν_1 и ν_2 (по формулам (1.8) и (1.9)).

3. По таблицам или графикам (зависящим от закона распределения случайной величины T) определяют значения коэффициентов точности $\delta_1(\nu_1, n)$ и $\delta_2(\nu_2, n)$ (табл.1.17).

4. Границы доверительного интервала φ_1 и φ_2 рассчитывают по формулам (1.16).

Результат записывают в виде соотношения (1.7): $\text{Вер}\{\varphi_1 \leq \varphi < \varphi_2\} = \nu$.

Таблица 1.17

n	$\delta_1(\nu_1, n);$				$\delta_2(\nu_2, n)$			
	$\nu_1 = 0,99$	$\nu_1 = 0,95$	$\nu_1 = 0,9$	$\nu_1 = 0,8$	$\nu_2 = 0,01$	$\nu_2 = 0,05$	$\nu_2 = 0,1$	$\nu_2 = 0,2$
1	0,01	0,05	0,1	0,2	4,6	3,0	2,3	1,6
2	0,08	0,18	0,27	0,4	3,3	2,4	1,95	1,5
3	0,15	0,27	0,36	0,5	2,8	2,07	1,8	1,43
4	0,21	0,34	0,44	0,57	2,5	1,94	1,68	1,38
5	0,26	0,39	0,49	0,62	2,3	1,8	1,6	1,34
6	0,3	0,43	0,53	0,65	2,2	1,75	1,54	1,32
7	0,34	0,47	0,56	0,68	2,08	1,7	1,51	1,3
8	0,36	0,5	0,58	0,7	2,0	1,84	1,47	1,28
9	0,39	0,52	0,61	0,72	1,9	1,6	1,44	1,27
10	0,42	0,55	0,62	0,73	1,88	1,57	1,42	1,25
11	0,43	0,56	0,64	0,74	1,83	1,54	1,4	1,24
12	0,45	0,58	0,65	0,76	1,79	1,52	1,38	1,23
13	0,47	0,59	0,67	0,77	1,75	1,49	1,37	1,22
14	0,49	0,6	0,68	0,775	1,6	1,47	1,35	1,21
15	0,5	0,62	0,69	0,78	1,59	1,46	1,34	1,2
20	0,52	0,65	0,72	0,81	1,53	1,35	1,29	1,19
30	0,57	0,7	0,77	0,85	1,43	1,3	1,23	1,15
40	0,63	0,74	0,8	0,87	1,37	1,26	1,2	1,13
50	0,66	0,77	0,82	0,885	1,33	1,23	1,18	1,12
60	0,69	0,79	0,83	0,889	1,3	1,22	1,17	1,11
70	0,72	0,8	0,84	0,9	1,28	1,2	1,15	1,1
80	0,74	0,81	0,86	0,91	1,26	1,19	1,14	1,09
90	0,75	0,82	0,867	0,915	1,25	1,18	1,13	1,085
100	0,77	0,83	0,87	0,916	1,24	1,17	1,12	1,084

2. ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ НА ЭТАПАХ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ

2.1. Обеспечение надежности изделий на этапе проектирования

Рассмотрим причины необходимости анализа ошибок на всех этапах «жизненного цикла» изделий и разработки мер по повышению надежности.

1. В процессе проектирования и разработки тщательно подбираются исходные материалы, при лабораторных испытаниях малых партий процедуры выполняются с точным соблюдением всех предписаний, измерения параметров производятся с использованием приборов высокой точности, все операции обслуживаются высококвалифицированными специалистами, при проектировании достигаются наилучшие параметры и характеристики устройств, заданные техническим заданием на разработку.

2. С переходом на этап производства наблюдаются существенные изменения:

- исходные материалы и комплектующие элементы применяются в больших количествах и при производстве имеют, как правило, значительный разброс параметров;
- точность соблюдения всех предписаний и тщательность контроля вступают в противоречие с требованиями по производительности и экономике (изменяются требованиями к изготовлению и технологическому процессу);
- измерения выполняются не всегда на предписанном оборудовании и по принципу «годен – не годен»;
- производственный персонал зачастую недостаточно глубоко понимает физические процессы технологического цикла;
- усилия персонала всех уровней направлены в первую очередь на выполнение плановых заданий.

В результате значения характеристик надежности изделий оказываются ниже значений, заложенных при разработке.

3. При эксплуатации изделий (устройств) к снижению их характеристик надежности ведут:

- не соответствующая требованиям организация хранения, транспортировки и использования по назначению;
- влияние внешней среды;
- квалификация обслуживающего персонала.

2.1.1. Система сбора данных по надежности

Очевидно, что информация по надежности на всех этапах «жизненного цикла» изделий (проектирование – производство – эксплуатация) является обязательной.

Требования к системе сбора информации по надежности:

- достоверность;
- необходимая полнота;
- своевременность;

- регулярность (непрерывность);
- пригодность для автоматизированного поиска, обработки и передачи данных с использованием ЭВМ.

Основные цели системы сбора информации по надежности:

- выявление ненадежных элементов на всех этапах «жизненного цикла» изделий;
- определение факторов, вызывающих или ускоряющих отказы в процессе производства и эксплуатации;
- выработка корректирующих воздействий на всех этапах «жизненного цикла» изделий;
- разработка рекомендаций по оптимальным режимам применения;
- обоснование перспективных требований по надежности;
- определение количественных показателей надежности (главным образом по данным эксплуатации).

2.1.2. Анализ ошибок проектирования изделий

Ошибки при проектировании изделий приводят:

- 1) к недостаткам проектирования электрических схем;
- 2) к недостаткам проектирования механических конструкций;
- 3) к неполному учету возможностей обслуживающего персонала.

Недостатки проектирования электрических схем:

а) неправильный выбор элементов и материалов (обусловлен тем, что данные о надежности новых элементов, как правило, либо отсутствуют, либо явились результатом только лабораторных испытаний);

б) неправильный выбор режима работы элементов (обусловлен тем, что пиковые нагрузки не всегда можно учесть при проектировании, так же как и переходные процессы);

в) неправильный выбор схем отдельных устройств (обусловлен выбором неоптимальных вариантов функциональных и принципиальных схем).

Недостатки проектирования механических конструкций:

а) не обеспечивается оговоренный в задании на разработку микроклимат для некоторых устройств;

б) не обеспечивается требуемая безотказность работы устройств в условиях повышенных ударных и вибрационных воздействий;

в) не обеспечивается технологичность конструкции (такое свойство конструкции, которое позволяет применять высокопроизводительные методы изготовления при высокой точности и стабильности выполнения производственных операций, от которых зависит надежность изделий);

г) не обеспечивается унификация применяемых в изделии устройств.

Неполный учет возможностей обслуживающего персонала:

а) примерно 30 % отказов устройств связано с неудачной разработкой их конструкций, т. е. при проектировании недостаточно учитывается инженерная психология (например, последовательность операций или действий, количество информации для обслуживающего персонала и т. д.);

б) не в полной мере учитываются требования эргономики (например, конструкция рабочего места персонала, схема движения рук и ног, условия работы и т. д.).

2.1.3. Обеспечение надежности при проектировании изделий

Факторы, влияющие на надежность:

- конструктивно-производственные;
- эксплуатационные.

При этом:

- ошибки проектирования и разработки составляют 40 %;
- ошибки производства – 30 %;
- ошибки эксплуатации – 30 %.

Конструктивно-производственные факторы связаны с проектированием и изготовлением изделий.

Эксплуатационные факторы:

- объективные (влияние внешней среды: климатические, механические, биологические и другие воздействия);
- субъективные (связанные с организацией технической эксплуатации: ТО, ремонт, хранение, обеспечение ЗИП, квалификация обслуживающего персонала и др.).

Методы обеспечения надежности изделий на этапе проектирования:

1. Правильный выбор схемных и конструктивных решений:

- минимальное число элементов и регулировок;
- меры по повышению надежности межблочных соединений (например, на самолете около 2000 разъемов, интенсивность отказов каждого в среднем 10^{-7} 1/ч, а в общем наработка на отказ всего изделия снижается до 5000 ч);
- устойчивость проектируемого изделия к дестабилизирующим факторам: тепловые режимы, повышенная влажность, ударные и вибрационные нагрузки;
- резервирование элементов и устройств.

2. Внедрение нано- и микроэлементов при проектировании, замена аналоговой обработки информации цифровой.

3. Выбор комплектующих элементов и материалов с высокой надежностью и длительным сроком старения (на базе учета статистических и прогнозных данных об интенсивности их отказов).

4. Замена механических устройств электронными (где это возможно).

5. Создание схем автоматической подстройки параметров.

6. Выбор режима работы элементов и устройств (нагрузки не должны превышать 40–60 % от номинальных).

Анализ показывает, что большое количество комплектующих элементов в устройствах промышленной электроники работает в режимах, превышающих допустимые или предельные. Для повышения надежности необходимо, чтобы большинство элементов работало в облегченном режиме и в первую очередь самые ответственные и трудно заменяемые элементы и устройства.

7. Проектирование самонастраивающихся и самообучающихся изделий, основанных на развитии кибернетики, робототехники, физики и биологии.

8. Учет научных разработок по предсказанию надежности элементов и материалов при составлении технического задания на вновь проектируемые устройства (изделия). Например, исследования и синтез нейронных сетей (быстро реагирующих на изменения окружающей среды), по образу и подобию нейронов головного мозга живых организмов (с помощью диаграмм Венна).

9. Разработка мер по удобству технической эксплуатации и учет требований эргономики (удобство работы и контроля, доступ ко всем элементам для их замены или ремонта, безопасность обслуживания).

10. Повышение надежности работы персонала введением при проектировании в схемные решения изделий блокировки, разрешающих выполнение очередной операции (действия) лишь после правильного выполнения предыдущей.

11. Исходным при проектировании необходимо считать не полностью автоматическое, а эргатическое изделие (т. е. изделие, требующее участия человека) на основе симбиоза человека и машины.

2.1.4. Повышение надежности изделий на этапе проектирования путем резервирования

Применение резервирования в любых изделиях и устройствах является основным путем решения проблемы надежности.

В основе резервирования лежит аппаратная избыточность, состоящая в дублировании элементов и устройств за счет резервных элементов или введении дополнительных устройств для диагностических функций.

Резервирование связано:

- с усложнением изделия;
- с увеличением массы, габаритных размеров, потребляемой мощности и стоимости.

Но резервирование позволяет создавать изделия, надежность которых может быть выше надежности входящих в него элементов.

Методы резервирования

1. Общее, предусматривающее резервирование изделия в целом (рис. 2.1).

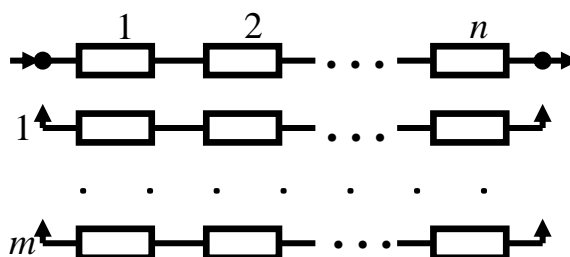


Рис. 2.1

На рис. 2.1:

n – количество элементов в основном изделии и в схемах резервирования;
 m – количество схем резервирования (кратность резервирования).

Отношение числа резервных элементов к числу резервируемых называется кратностью резервирования.

2. Раздельное резервирование предусматривает резервирование отдельных элементов, их групп или отдельных узлов (рис. 2.2).

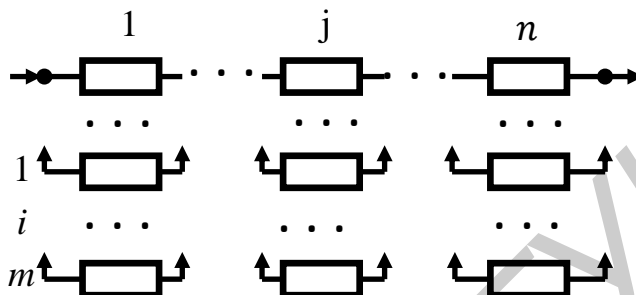


Рис. 2.2

На рис. 2.2:

n – количество элементов в основном изделии;
 m – кратность резервирования.

3. Смешанное резервирование предусматривает совмещение в изделии общего и раздельного резервирования (рис. 2.3).

На рис. 2.3:

$1, \dots, n$ – элементы изделия;

m – кратность резервирования;

а – узел с общим резервированием;

б – узел с раздельным резервированием.

Резервирование может быть:

а) однократное (дублирование) и многократное;

б) с ремонтом любого основного и резервного элемента (резервирование с восстановлением);

в) без ремонта (резервирование без восстановления).

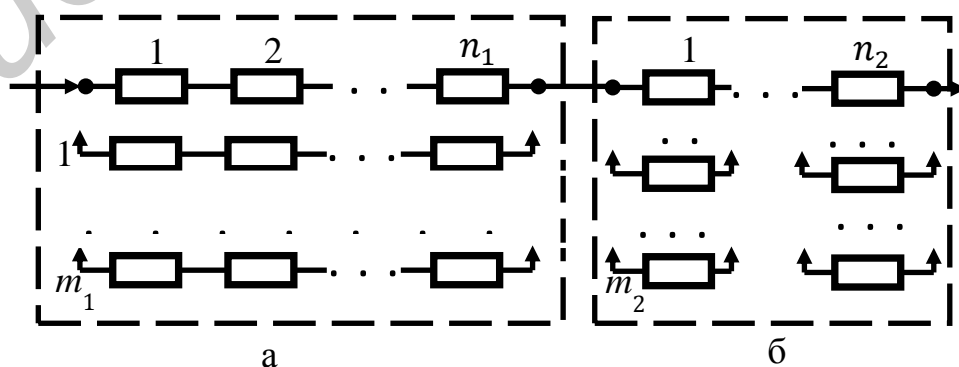


Рис. 2.3

Способы подключения резервных элементов:

- 1) постоянное подключение;
- 2) подключение замещением;
- 3) скользящее подключение.

При постоянном подключении резервные элементы функционируют наравне с основными.

Недостатки:

- значительное увеличение объема аппаратуры;
- с появлением отказов в резерве изменяются параметры изделия, что может привести к изменению режимов работы.

При резервировании замещением:

- функции основного элемента передаются резервному только после отказа основного;
- обязательно наличие коммутирующих устройств для подключения (ручного или автоматического) резервных элементов взамен отказавшим;
- резервные элементы могут находиться в нагруженном, облегченном и ненагруженном режиме;
- если изделие содержит несколько групп однотипных элементов, то для резервирования замещением нет необходимости иметь такое же число резервных элементов, их может быть меньше.

Скользящее резервирование применяется при наличии в изделии одинаковых элементов (узлов, блоков).

При этом группа основных элементов резервируется одним или несколькими резервными элементами, каждый из которых может заменить любой основной отказавший элемент в данной группе (рис. 2.4).

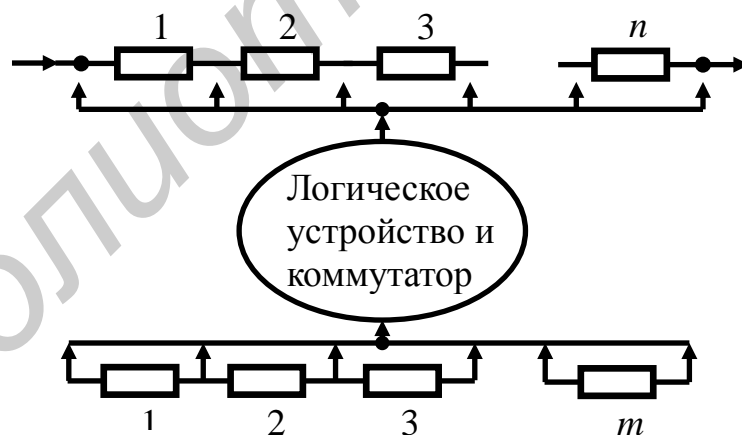


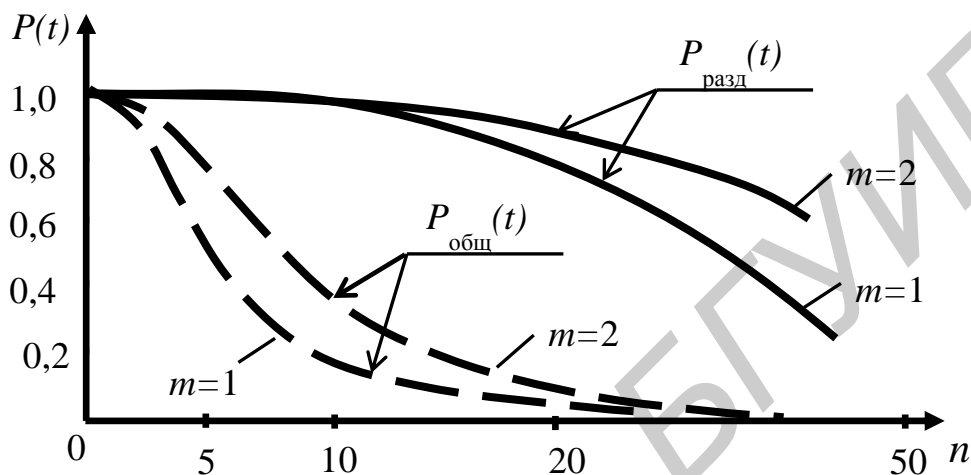
Рис. 2.4

Сравнительный анализ методов резервирования

При одинаковых кратностях и методе резервирования показатели надежности тем выше, чем легче режимы резервных элементов. Наиболее эффективным с этой точки зрения является ненагруженный режим, при котором средняя наработка до отказа пропорциональна числу элементов резервированного изделия.

Самые низкие показатели надежности имеет нагруженный режим, у которого добавочная наработка до отказа с увеличением числа резервных элементов растет.

Наибольший выигрыш на единицу резерва обеспечивает первый резервный элемент. Роль последующих уменьшается, поэтому на практике число резервных элементов не более двух. При раздельном резервировании вероятность безотказной работы проектируемого изделия выше, чем при общем резервировании (рис. 2.5).



На рис. 2.5:

n – число элементов;

m – кратность резервирования;

$P_{\text{общ}}(t)$ – вероятность безотказной работы при общем резервировании;

$P_{\text{разд}}(t)$ – вероятность безотказной работы при раздельной резервации.

Учет прогнозирования надежности при проектировании изделий

Под прогнозированием понимают специальный круг задач по предсказанию или косвенной оценке надежности изделий с определенной степенью достоверности, обоснованной теоретически и подтвержденной на практике.

Основные методы прогнозирования:

- метод распознавания образов;
- прогнозирование надежности по виду ВАХ (вольт-амперной характеристики) проектируемых элементов.

Понятие о методе распознавания образов

Распознавание образов – научное направление, связанное с разработкой принципов построения алгоритмов для определения принадлежности данного объекта (например параметра надежности) к одному из заранее выделенных классов объектов (например доверительному интервалу).

Под образом понимают область в пространстве, в которой отображается заранее известное множество объектов.

Геометрическая интерпретация образа: область в n -мерном пространстве, вдоль координатных осей которого отложены значения параметров.

Под объектом в общем случае понимают различные сигналы, процессы, ситуации, явления, предметы и др.

Каждый объект описывается совокупностью основных характеристик (свойств, признаков).

Одна из основных задач метода – выбор правила (или решающей функции), в соответствии с которым по значениям контрольной реализации устанавливается ее принадлежность к одному из образов, т. е. указываются наиболее правдоподобные значения характеристики объекта.

Характеристики объектов для реализации образов представляют собой случайные выборки, как правило, с нормальным распределением.

Таким образом, алгоритм прогнозирования по методу распознавания образов сводится к тому, что на основе определенной обработки заранее известной информации на момент времени t_i (например известна средняя интенсивность отказов элементов предыдущих выпусков или результаты лабораторных испытаний данного изделия на момент производства) дается прогноз уровня надежности на время t_n (рис. 2.6).

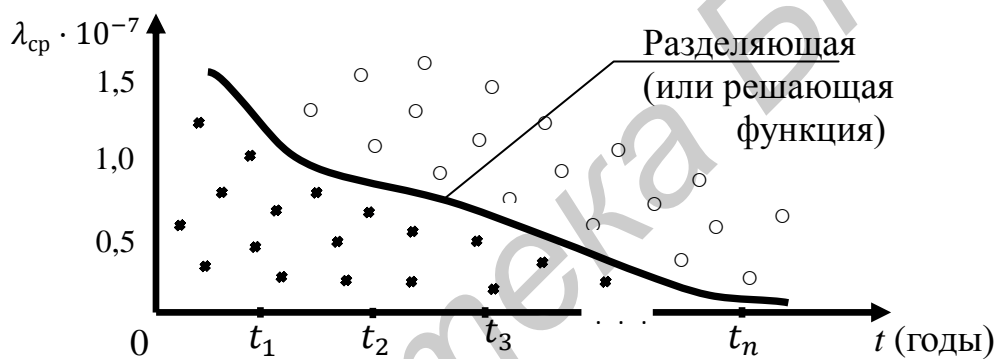


Рис. 2.6

Метод распознавания образов математически достаточно глубоко разработан, но не нашел широкого применения на практике, так как:

- во-первых, он основан на прогнозируемых показателях, не связанных непосредственно с физическими характеристиками изделий;
- во-вторых, постоянное совершенствование технологий непрерывно меняет базу, на которой основывается данный прогноз, делая ее непригодной для распространения на изделия последующих за прогнозом выпусков.

Понятие о прогнозировании и надежности по виду ВАХ проектируемых элементов

Прогнозирование основано на сравнении идеальных ВАХ проектируемых элементов с ВАХ, полученных на этапе разработки в результате опытных испытаний (рис. 2.7).

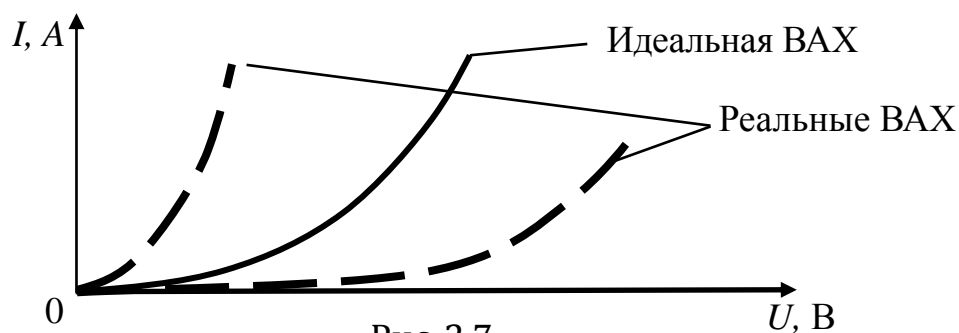


Рис. 2.7

Метод позволяет отбраковывать элементы с ВАХ, имеющие значительные отклонения от идеальной ВАХ, что ведет к повышению надежности изделий в целом.

2.2. Обеспечение надежности изделий на этапе производства

2.2.1. Анализ ошибок производства

К ошибкам производства относят:

- дефекты механической сборки;
- ошибки электрического монтажа;
- ошибки настройки изделий;
- низкое качество применяемых деталей и материалов.

Дефекты механической сборки

Некачественная механическая сборка, низкое качество технологической документации и погрешности опытного производства в совокупности дают около 5 % отказов от общего числа отказов.

Доля отказов по причине некачественной механической сборки из этих 5 % составляет около 1–2 %.

Недостатки механической сборки

Первая группа недостатков: дефекты пайки, сварки, склеивания, плохое закрепление болтов, гаек, шпилек и т. д., что сказывается на надежности изделий, подверженных вибрациям, толчкам, ударам.

Вторая группа: невыполнение требований по герметизации элементов и узлов, что приводит к снижению надежности в условиях повышенной влажности.

Другие причины негерметичности: проницаемость швов и спаек, микротрещины в элементах сборки и проводах.

Третья группа: дефекты упаковки для транспортировки и для длительного хранения (что приводит к попаданию влаги, пыли, грязи).

Герметизация проводится, как правило, с помощью металлоглазанных, металлокерамических, стеклянных и пластмассовых корпусов. Но эпоксидная, фенольная и силиконовая пластмассы сами по себе полной изоляции от влаги не дают. Например при толщине пластмассовой оболочки в 1 мм относительная влажность на защищенной такой оболочкой поверхности достигнет 70 % через 100 ч работы (в среде с относительной влажностью 95 %).

Дефекты электрического монтажа

От 14 до 24 % отказов изделий происходит из-за ошибок электрического монтажа.

Недостатки электрического монтажа

Первая группа: некачественная заготовка соединительных монтажных проводов различных сечений (что может привести к локальному перегреву выводов в местах с меньшей площадью сечения); повреждения центральных жил и экранов проводов.

Процесс заготовки монтажных проводов разной длины и сечения трудно автоматизировать.

Вторая группа: нерациональное размещение отдельных элементов и проводов приводит к взаимным электромагнитным наводкам, а значит, и к неустойчивой работе всего изделия; неправильный выбор натяжения проводов (при чрезмерном натяжении возможен обрыв провода при изменении, например, температуры; провисание приводит к кратковременным замыканиям при воздействии вибрации и ударных нагрузках).

Третья группа: ошибки соединения проводов друг с другом и с деталями конструкции (некоторые материалы плохо спаиваются; в процессе пайки нагреваются детали, расположенные близко от места пайки, что приводит к отказам элементов и нарушению изоляции).

Ошибки настройки изделий

Количество отказов, возникающих при настройке, не превышает 1 % от общего числа возможных отказов.

Ошибки настройки:

- ошибки метода измерений: не учитывается влияние измерительного прибора на схему или неправильно выбирается класс точности прибора;
- ошибки считывания результатов: при недостаточном освещении помещения и аппаратуры; неудачном расположении измерительного прибора; при отклонениях от нормы питающих напряжений; при отсутствии предварительного прогрева аппаратуры.

Замечание: чем больше процент используемых в настройке регулировочных элементов, тем больше погрешностей производства.

Низкое качество применяемых деталей и материалов

Надежность устройств зависит от надежности комплектующих элементов и деталей (более 75 % отказов аппаратуры происходит из-за неисправностей отдельных элементов).

Выбор деталей и элементов осуществляется в основном разработчиками. Но их рекомендации зачастую не выполняются из-за отсутствия на данный момент этих деталей и материалов на предприятии – изготовителе или их высокой стоимости.

2.2.2. Методы обеспечения надежности изделий на этапе производства

1. Выбор соответствующей технологии и внедрение автоматизации (строгое соблюдение технологии с одновременной автоматизацией производства позволяет свести к минимуму влияние субъективных факторов на качество и надежность устройств).

2. Входной контроль элементов и материалов не допускает в производство недоброкачественных комплектующих, имеющих отклонения от заданных требований. Взаимодействие между изготовителем комплектующих и потребителем в процессе входного контроля регламентируется и регулируется предъявлением рекламаций и возвращением изготовителю комплектующих элементов, материалов или устройств, не соответствующих техническим устройствам.

3. Предварительная тренировка элементов и устройств в более тяжелых условиях, чем предусмотрены разработчиками, сокращает этап приработки, позволяет оценить правильность выбранных схемных решений.

4. Правильная настройка и регулировка элементов и изделия в целом (она не должна приводить к таким изменениям параметров, которые могут привести к нарушению работоспособности или выходу из строя; характер регулировок в процессе настройки должен учитывать схемные решения и предшествующий опыт).

5. Текущий и выходной контроль. Текущий контроль позволяет выявить некондиционные элементы и узлы и не допустить их к сборке. Выходной контроль является окончательной проверкой изделия после сборки и настройки.

6. Испытания на надежность проводятся с целью проверки надежности изделий на этапе проектирования и производства.

Основные задачи испытаний:

- определение количественных показателей надежности разрабатываемых изделий с целью проверки их соответствия требованиям технического задания;
- оценка схемных и конструктивных решений при проектировании;
- выявление недостатков производства, снижающих надежность изделий.

Испытания по их последствиям делятся на разрушающие и неразрушающие.

При разрушающих испытаниях не сохраняются неизменными качественные характеристики изделий (либо полная потеря свойств, либо физическое разрушение, либо частичное израсходование ресурса).

При неразрушающих испытаниях не происходит изменения характеристик изделий.

Полученные при испытаниях данные позволяют по косвенным (вторичным) признакам обнаружить скрытые дефекты, влекущие за собой потенциальную ненадежность изделий.

Методы неразрушающих испытаний:

- оптический;
- радиационный;
- тепловой;
- растровой электронной микроскопии;
- электрофизический.

Оптический метод неразрушающих испытаний основан на эффектах взаимодействия исследуемого изделия с различными спектрами светового излучения (инфракрасного, ультрафиолетового, видимого). Здесь используются эффекты поляризации, поглощения, интерференции и рассеяния света на неоднородностях испытываемого элемента.

Радиационный метод основан на взаимодействии ионизирующих излучений и частиц высоких энергий с испытываемым изделием. Метод базируется на «просвечивании» исследуемого изделия с регистрацией теневого изображения на фотопленке, флуоресцирующем или телевизионном экране.

Тепловой метод неразрушающих испытаний основан на регистрации тепловых полей или температуры контролируемого изделия. Разновидность этого метода – тепловой контактный метод, при котором используются термочувствительные краски, термобумага, жидкие кристаллы, термопары, специальные термометры.

Метод растровой электронной микроскопии основан на регистрации в амплитудном, яркостном или цветовом виде на экране ЭЛТ результатов взаимодействия электронного луча с веществом исследуемого изделия. Регистрация результатов взаимодействия основана на вторичной электронной эмиссии и электронной спектроскопии, эффектах поглощения и отражения электронов.

Электрофизический метод неразрушающих испытаний основан на исследовании закономерностей изменений электрофизических характеристик (например на характерных участках ВАХ) и параметров изделий, определяющих характеристики надежности изделия в целом.

2.2.3. Испытания изделий на надежность

Различают испытания:

- определительные;
- контрольные.

Определительные испытания проводятся для вновь разрабатываемых и модернизируемых изделий (на опытных образцах). Цель: сравнение фактических показателей надежности проектируемых изделий с требованиями ТЗ.

Контрольные испытания на надежность проводятся периодически на серийно выпускаемых изделиях. Цель: выявление соответствия показателей надежности требованиям ТУ.

Контрольные испытания могут быть:

- выборочные;
- сплошные.

Сплошной контроль применяется при проверке и испытании всей продукции. Такому виду контроля подвергаются изделия, выпускаемые малыми партиями.

Выборочный контроль применяется только тогда, когда решение о качестве изделий принимается по результатам проверки одной или нескольких выборок из партии или потока изделий.

Выборочный контроль применяется в следующих случаях:

- большой объем выпускаемой продукции;
- непрерывное производство;
- высокая стоимость и сложность испытаний;
- большая продолжительность проводимых испытаний;
- метод контроля – разрушающий;
- при испытаниях происходит значительное расходование ресурса изделия.

Выборочный контроль применяется и в определительных испытаниях, но при этом объем выборки значительно меньше, чем при контрольных испытаниях.

Дополнительная классификация контрольных испытаний на надежность

По условиям проведения контрольные испытания разделяются на лабораторные и эксплуатационные (т. е. испытания на изделия).

При лабораторных испытаниях искусственно моделируются реальные условия эксплуатации. Здесь выборки сравнительно большого объема.

Под эксплуатационными испытаниями понимают испытания изделий, размещенных на рабочем объекте. Эти испытания проводятся при реальных (или близких к реальным) условиях эксплуатации.

По времени лабораторные испытания могут быть обычные и ускоренные.

Обычные соизмеримы по длительности со средней долговечностью испытываемых изделий.

Ускоренные (в отличие от обычных) проводятся при заведомо завышенных нагрузках, когда интенсивность отказов изделий десятки и сотни раз превышает норму. При ускоренных испытаниях информацию о надежности можно получить в течение времени, значительно меньшем, чем долговечность изделий.

Ускоренные испытания в зависимости от уровня нагрузок могут быть:

- в нормальном режиме;
- в форсированном режиме.

При нормальном режиме ни одна из нагрузок не превышает предельного значения, заданного ТУ. В основу нормального режима положены принципы прогнозирования случайных процессов.

При форсированном режиме хотя бы одна из нагрузок превышает предельное значение.

По методу проведения испытания могут быть:

- 1) на надежность изделий заданного объема выборки;
- 2) на надежность изделий методами однократной или двукратной выборки;
- 3) на надежность изделий последовательным методом.

Испытания на надежность *методом выборки заданного объема* проводятся для получения истинных значений числовых характеристик надежности изделий. Объем выборки задается. О точности оценки показателей надежности судят по доверительным интервалам.

Испытания на надежность *методами однократной или двукратной выборки* требуют предварительного расчета объема выборки и оценочного норматива надежности, гарантирующих прием или браковку изделий с вероятностью ошибок, не выше заданной.

Суть метода однократной выборки: из контролируемой партии изделий отбирается случайная выборка заранее рассчитанного объема n . Также заранее рассчитывается оценочный норматив надежности γ .

Выборка изделий подвергается испытаниям, по результатам которых определяется параметр надежности. Сравнивая этот параметр с оценочным нормативом, делают заключение об уровне надежности всей партии: если параметр надежности больше γ , то надежность партии считается удовлетворительной, и партия принимается; если параметр надежности меньше γ , то надежность партии считается неудовлетворительной, и партия бракуется.

Суть метода двукратной выборки

Выборка проводится в два этапа.

На 1-м этапе испытывается выборка изделий объемом n_1 . Если найденный по результатам испытаний параметр надежности γ_1 больше оценочного вычисленного γ (т. е. $\gamma_1 > \gamma$), то партия принимается, если $\gamma_1 < \gamma$ – партия бракуется.

На 2-м этапе берется произвольно вторая выборка объемом n_2 и проводятся испытания на надежность. Если параметр надежности γ_2 , определенный по результатам испытаний этого этапа на выборке объема $(n_1 + n_2)$ больше оценочного γ , то партия принимается, меньше – бракуется.

Методы одной и двукратной выборки относятся к классу задач, решаемых теорией принятия статистических гипотез.

Суть последовательного метода испытаний на надежность.

Если одно- и двукратная выборки в методе испытаний на надежность основывались на использовании выборки заранее рассчитанного и неизменного объема и решение о надежности партии изделий принималось лишь после окончания испытаний, то особенностью последовательного метода (метода Вальда) является то, что решение о надежности партии принимается в процессе испытаний в зависимости от результатов уже выполненных наблюдений. Объем выборки заранее не определяется.

Алгоритм последовательного метода

Из контрольной партии изделий случайным образом берется выборка произвольного объема n , которая подвергается испытаниям. По результатам испытаний определяется некоторый показатель γ , характеризующий надежность изделий (например число отказов).

В зависимости от величины γ в соответствии с заранее установленным правилом выбирается одно из трех решений:

- 1) надежность партии удовлетворяет требованиям (например $T_{\text{стат}} > T_{\text{расч}}$);
- 2) надежность партии не удовлетворяет требованиям (например $T_{\text{стат}} < T_{\text{расч}}$);
- 3) при $T_{\text{стат}} \approx T_{\text{расч}}$ о надежности партии на данном этапе нельзя сделать определенное заключение.

При принятии 1-й или 2-й гипотез испытания заканчиваются.

Если принимается 3-я гипотеза, то испытания продолжаются до тех пор, пока не будет выполнена одна из первых двух гипотез. Тогда испытания прекращаются и принимается одно из решений (удовлетворяет или не удовлетворяет).

Таким образом, при последовательном методе испытания продолжаются до тех пор, пока некоторый показатель надежности не достигнет зоны приемки или зоны отбраковки.

3. ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ИЗДЕЛИЙ НА ЭТАПЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ

3.1. Факторы, влияющие на надежность изделий при эксплуатации

При обеспечении надежности изделий на этапе эксплуатации учитывают как объективные, так и субъективные факторы.

К объективным факторам при эксплуатации изделия относят влияние на надежность внешней среды и условий эксплуатации.

Климатические условия, снижающие надежность при эксплуатации:

- температура;
- влажность;
- плотность воздуха;
- уровень радиации.

Влияние температуры на надежность элементов и материалов изделий

Климатическая карта зон СНГ представлена на рис. 3.1.



Рис. 3.1

На рис. 3.1:

I – холодная зона (до $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$) (в январе);

II – умеренная (до $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$);

III – теплая влажная (до $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$);

IV – жаркая (до $-17\text{ }^{\circ}\text{C}$);

V – очень холодная (до $-65\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Климатические условия – температура.

Норма для эксплуатации по ГОСТ: $+20 \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

На Севере – до $-50 \dots -70\text{ }^{\circ}\text{C}$.

В Антарктиде – до $-88\text{ }^{\circ}\text{C}$.

На Юге – до $+55\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Степи и пустыни: $+50 \dots +55\text{ }^{\circ}\text{C}$ при относительной влажности 50 % (сухая жара).

В тропиках: +25 ... +35 °С при относительной влажности 90 ... 98 %.

С увеличением высоты на 1 км температура воздуха уменьшается на 4 ... 8 °С.

При повышении температуры воздуха:

- механические свойства узлов и деталей снижаются;
- сопротивление диэлектриков уменьшается;
- диэлектрическая проницаемость материалов повышается.

При понижении температуры воздуха:

- пластичность материалов падает (материалы становятся хрупкими, механическая прочность снижается, изоляционные материалы растрескиваются);
- диэлектрическая проницаемость снижается (например, при –40 °С и ниже емкость электролитических конденсаторов падает до нуля);
- смазка густеет.

Колебания температуры от «+» к «–» и обратно приводят к:

- появлению трещин;
- ослаблению механических соединений;
- отпотеванию аппаратуры;
- деформации элементов и материалов (что ведет к нарушению герметичности в паяных корпусах, в проходных изоляторах и т. п.).

Низкие температуры влияют на техническую готовность изделий автомобильной техники:

- пуск двигателя затруднен или вовсе невозможен из-за увеличения вязкости масла; износ двигателя увеличивается в 4...5 раз, мощность снижается на 4...6 %, расход топлива увеличивается на 6...12 %;
- мощность стартера при понижении температуры до –30 °С снижается на 60...70 %; возникает опасность замерзания электролита в аккумуляторной батарее (если она разряжена на 25–30 %);
- вязкость топлива с понижением температуры от +40 до –10 °С увеличивается на 75 %;
- дизельное топливо в нормальных условиях (при +20 ±5 °С) воспламеняется при температуре в конце такта сжатия не менее +300 °С; с изменением от +20 до –30 °С эта температура уменьшается до +100 °С, задержка самовоспламенения увеличивается в 2...3 раза; для увеличения температуры в конце такта сжатия осуществляют предпусковую тепловую подготовку двигателя.

Влияние высоких температур на надежность (техническую готовность) изделий автомобильной техники:

- вязкость масла с увеличением температуры понижается; температура масла увеличивается до +95 ... +105 °С, что приводит к отложению нагара в виде смолистых веществ;
- в системе охлаждения образуется накипь, которая нарушает температурный режим двигателя (норма: температура охлаждающей жидкости +80...90 °С при температуре окружающего воздуха +40...45 °С);

- уровень электролита аккумуляторных батарей при более +30 °С снижается до 2 мм в сутки;
- при повышении температуры плотность воздуха уменьшается, состав горючей смеси обогащается, что приводит к нарушению теплового баланса (перегреву двигателя);
- в гидросистемах рабочее давление снижается; тормозная жидкость испаряется, что приводит к образованию паровых пробок и, как результат, отказу работы тормозов;
- сроки службы материалов, пластмасс (из-за увеличения коэффициента термического расширения), электроизоляционных материалов, резиновых изделий снижаются; при сочетании высоких температур с повышенной влажностью процессы старения, окисления, разложения и др. значительно ускоряются (особенно в зонах жаркого и влажного климата – см. рис. 3.1);
- высокая температура является причиной запыленности воздуха, что приводит к:
 - а) попаданию пыли к трущимся деталям (что приводит к абразивному изнашиванию деталей), в систему смазки, охлаждения, в топливо;
 - б) содержание пыли в воздухе на современных трассах – 0,003 ... 0,005 г/м³; в городских условиях – от 0,15 ... 0,2 г/м³ и выше; в сельской местности, в степях и пустыне запыленность воздуха, поступающая к воздушному фильтру, достигает 1,3 ... 1,7 г/м³ и выше (до 3 г/м³);
 - в) высокая температура повышает агрессивность химических примесей, входящих в состав воздуха (например сернистый газ, хлор и др.).

Влияние влажности воздуха на надежность элементов и материалов изделий

Относительной влажностью воздуха называют отношение упругости пара, содержащегося в воздухе, к упругости насыщенного пара при данной температуре.

Норма: 65+15 %.

Влияние влаги (водяная пыль, водяные пары, брызги, туман) на элементы (материалы) и на надежность изделий:

- механические повреждения и разрушения;
- ухудшение контактов;
- влага поглощает электромагнитную энергию (радиоволны затухают);
- коррозия металла;
- образование грибковой плесени (при отсутствии проветривания и наличия тепла) ниже +7 °С и выше +40 °С и влажности воздуха менее 75 % плесень гибнет, но споры остаются и с ростом влажности выше 85 % споры возрождаются и вновь образуются плесень;
 - появление емкостного эффекта у элементов и материалов;
 - влага уменьшает пробивное напряжение изоляторов;
 - добротность катушек индуктивностей при повышении влажности снижается до 40 %;
 - до 0,5 % отказов изделий вызывает биологическая среда: насекомые и

грызуны (термиты, красные муравьи, черви, тараканы, крысы, мыши, белки).

Способы защиты от влияния влаги:

- создание микроклимата для изделий (в рабочем состоянии и при хранении);
- покрытие деталей консервантами; нанесение лакокрасочного покрытия;
- консервация летучими ингибиторами коррозии или ингибированной бумагой (ингибиторы – вещества, которые при введении в незначительном количестве в коррозионную среду заметно снижают скорость коррозии металла);
- обработка деревянных, текстильных и резиново-технических изделий специальными профилактическими водоотталкивающими средствами;
- применение смазочных материалов с антикоррозийными присадками;
- герметизация узлов влагозащитными присадками;
- заполнение волноводов сухим воздухом.

Влияние атмосферного давления (плотности воздуха) на надежность элементов и изделий

Нормальное давление: 760 ± 30 мм рт. ст.

При подъеме на высоту давление убывает на 1 мм рт. ст. каждые 100 м на первом километре, дальше убывает – по геометрической прогрессии.

На высоте 5000 м давление – 430 мм рт. ст., что составляет 57 % от нормального, а плотность воздуха – $0,75 \text{ кг}\cdot\text{с}/\text{м}^3$ (т. е. 59,5 % от нормального).

При понижении атмосферного давления:

- снижается воздушное охлаждение (из-за недостаточной плотности воздуха);
- разрушаются заливочные составы;
- уменьшается величина пробивного напряжения в изоляторах, волноводах, между проводниками монтажа;
- изменяется емкость воздушного конденсатора.

Влияние проникающей радиации на надежность элементов и изделий

Виды ионизирующей (проникающей) радиации:

- естественная (солнце, космические излучения, распад радиоактивных элементов);
- искусственная (атомные и термоядерные взрывы, атомные реакторы, ускорители высоких энергий).

Поражающие факторы ядерного взрыва:

- корпускулярная радиация (поток нейтронов и α -частиц);
- электромагнитная радиация (γ -лучи);
- ударная волна;
- тепловое излучение.

Допустимые (пороговые) значения последствий ядерных взрывов:

- избыточное давление – $0,35 \text{ кг}/\text{см}^2$;
- тепловое излучение – $100 \text{ кал}/\text{см}^2$;
- доза γ -излучения – 10^{-6} Р ;
- поток нейтронов – 10^{13} нейтрон/ см^2 .

Характеристика γ -излучения

При взаимодействии γ -излучения с веществом существует 3 механизма его поглощения и рассеяния:

- фотоэффект;
- комптон-эффект;
- образование электронно-позитронных пар.

При фотоэффекте квант γ -излучения полностью передает энергию одному из электронов оболочки атома вещества и выбивает электрон за пределы атома. На вакантное место может перейти электрон с более высокой энергией, что сопровождается испусканием излучения.

При комптоновском рассеянии γ -квантов (компон-эффект) кванты γ -излучения, ударяя электрон, теряют часть энергии и изменяют направление движения (цепная реакция). Энергия, переданная электрону, расходуется на отрыв его от атома и придания ему скорости (кинетическая энергия).

При взаимодействии γ -кванта с кулоновским полем ядра проявляется эффект образования электронно-позитронных пар. В результате такого взаимодействия γ -квант полностью теряет энергию, при этом образуется пара отталкивающихся друг от друга частиц: позитрона и электрона (цепная ядерная реакция).

Наиболее сильное влияние ядерная реакция оказывает на материалы кристаллических структур, на изоляцию, стекло, электролиты.

При облучении быстрыми нейтронами смещаются атомы в кристаллической решетке, нарушая нормальную работу германиевых, кремниевых диодов, фотосопротивлений, термисторов и т. д.

Под действием ядерной реакции происходит ионизация воздуха, что ведет к сильному возрастанию проводимости, пробоям.

3.2. Меры по обеспечению надежности изделий при эксплуатации

Влияние механических нагрузок на надежность элементов (механизмов).

Виды механических нагрузок:

- вибрация;
- ветровые и ударные нагрузки;
- контактные (рабочие) усилия в разъемах и реле.

При вибрации:

- изменяется расстояние между отдельными деталями;
- появляются виброшумы в электронных приборах;
- изменяется контактное сопротивление в реле.

При ударах происходит:

- сжатие (остаточная деформация);
- колебания с затухающей амплитудой (может быть на собственной частоте конструкции), что приводит к трещинам, изломам, разрушению;
- ускорение при ударе ведет к изменению силы тяжести.

Меры по обеспечению надежности при механических воздействиях:

- при проектировании – расчет конструкций на прочность;

- собственная частота колебаний элементов (устройств) должна лежать за пределами допустимого диапазона частот эксплуатации;
- демпфирование (в виде вязких наполнителей).

Влияние электрических нагрузок на надежность элементов (изделий).

Электрические нагрузки возникают при:

- передаче сигналов;
- подаче питающих напряжений;
- перенапряжении.

Изменение электрических нагрузок ведет к изменению температурного режима, короткому замыканию, разрывам в цепи, потере нормальной работоспособности изделия в целом.

Учет субъективных факторов при эксплуатации изделий

Для исключения субъективных факторов необходимо:

- улучшить организацию эксплуатации (путем грамотного планирования профилактических работ; обеспечения эксплуатации необходимой диагностической и контрольно-измерительной аппаратурой; автоматизации контроля состояния изделий; правильного планирования необходимого ЗИПа и т. д.);

- организовать и провести повышение квалификации обслуживающего персонала, предусматривающее углубленное изучение: конкретного изделия, особенностей его эксплуатации; диагностической и контрольно-измерительной аппаратуры; технологии поиска неисправностей, ремонта и восстановления работоспособного состояния изделия.

Влияние человека на эффективность функциональных систем

Человек в автоматизированных системах управления – элемент изделия, обеспечивающий его функционирование с заданной производительностью.

С появлением полностью автоматических изделий функции человека (как элемента системы) передаются устройствам, в которых заранее запрограммированы операции по управлению всем изделием.

Человек – источник предпосылок к отказам.

Вмешательство человека в аппаратуру – предпосылки к отказу. Статистика утверждает, что обслуживающий персонал является причиной от 20 % до 53 % отказов. Чем сложнее изделие, тем больше процент отказов.

Человек – элемент изделия, поддерживающий его надежность на заданном уровне.

Сфера обслуживания изделий в основном – сфера деятельности персонала. А всякое обслуживание приводит не только к тому, что восстанавливаются исходные характеристики изделия, но и возникают дополнительные отказы.

Человек – элемент изделия, обеспечивающий его восстановление.

Персонал влияет не только на ухудшение надежности изделий.

Роль персонала также и положительна, поскольку персонал устраняет предпосылки к отказам, проводит восстановление изделий, создает условия для нормального их функционирования.

Техническое обслуживание при эксплуатации изделий

Под ТО понимают совокупность мероприятий, выполняемых на изделии в определенной последовательности с целью обеспечения его работоспособности с заданной эффективностью.

Виды технического обслуживания:

- регламентные работы;
- контроль функционирования (ручной, автоматический, полуавтоматический);
- прогнозирование отказов.

Для проведения регламентных работ аппаратура должна иметь такие качества, как обслуживаемость и доступность.

Допуски на параметры надежности, которые контролируются по ТО, вырабатываются на этапе испытаний изделия.

Показатели ТО:

- периодичность;
- продолжительность;
- трудоемкость;
- стоимость.

Методы определения периодичности ТО:

- по изменению внешнего вида машин, механизмов и применяемых материалов;
- по требованиям обеспечения безопасности работы (вероятность безотказной работы должна быть в пределах 0,958 ... 0,99);
- по технико-экономическим показателям;
- по статистическим данным.

Периодичность технического обслуживания:

- для изделий повседневного пользования: ежедневное ТО; ТО №1 (до определенного ресурса, например до 1000 часов работы, или до 1000 км пробега автомобильной техники); ТО №2 (например 5 тыс. часов работы, или 6...8 тыс. км пробега); сезонные (4 раза в год);
- для изделий, находящихся на хранении: ежемесячное ТО; полугодовое ТО; годовое ТО; регламентные работы.

Техническое диагностирование изделий предназначено для контроля функционирования и прогнозирования отказов.

Под технической диагностикой понимают процесс объективного определения технического состояния и ресурса безотказной работы изделия (без его разборки) с использованием специального оборудования.

Области применения технической диагностики:

- при производстве изделий (в процессе наладки и приемки);
- при эксплуатации (в процессе ТО, при испытаниях, хранении и транспортировке изделий);
- при ремонте (перед ремонтом и после ремонта).

Виды технической диагностики:

- по степени охвата изделия (общее и локальное);

- по характеру взаимодействия изделия и средств диагностики (функциональное и тестовое);
- по степени автоматизации (ручное, автоматизированное и автоматическое).

Техническое диагностирование требует наличия на изделиях встроенных средств контроля (например стандартные или программные датчики).

Библиотека БГУИР

Часть вторая. Типовые задачи

Тема №1. Основные понятия теории надежности и теории вероятностей

1. Основные понятия теории надежности:
 - безотказность;
 - ремонтпригодность;
 - долговечность;
 - сохраняемость.
2. Основные свойства надежности:
 - состояние изделия;
 - восстановление;
 - ремонт;
 - техническое обслуживание.
3. Понятия теории вероятностей, используемые в теории и практике надежности:
 - случайная функция;
 - закон и плотность распределения случайной величины;
 - математическое ожидание;
 - дисперсия;
 - доверительный интервал;
 - доверительная вероятность.
4. Основные законы распределения случайных величин:
 - биномиальный;
 - Пуассона;
 - Вейбулла – Гнеденко;
 - экспоненциальный;
 - Рэлея;
 - нормальный закон (Гаусса).

Тема №2. Расчет показателей надежности для изделий с последовательно и параллельно включенными элементами

Задача №1



Определить показатели безотказной работы системы ($P(t)$, $Q(t)$, T), состоящей из двух одинаковых элементов, включенных в структурную схему надежности (ССН) последовательно, и построить графики вероятности безотказной работы $P(t)$ и вероятности отказов $Q(t)$.

Закон распределения наработки до отказа – экспоненциальный.

Интенсивности отказов элементов: $\lambda_1 = 0,5 \cdot 10^{-3}$ 1/ч, $\lambda_2 = 0,3 \cdot 10^{-4}$ 1/ч.

Для построения графиков $P(t)$ и $Q(t)$ принять текущее время $t = 100, 200, 300, 400, 500$ ч.

Решение

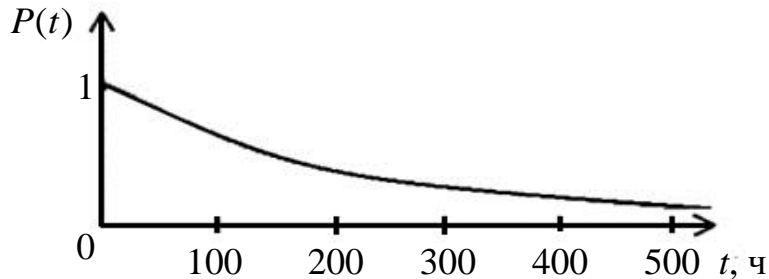
Интенсивность отказов:

$$\lambda(t) = \lambda_1(t) + \lambda_2(t) = \lambda_1 + \lambda_2 = 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ 1/ч} + 0,3 \cdot 10^{-4} \text{ 1/ч} = 0,53 \cdot 10^{-3} \text{ 1/ч.}$$

Вероятность безотказной работы:

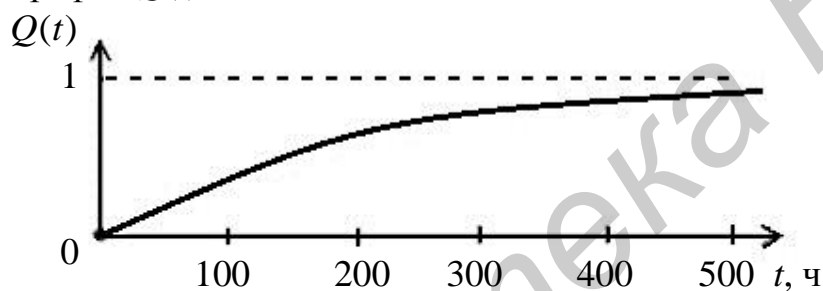
$$P(t) = \prod_{i=1}^2 P_i(t) = P_1(t) \cdot P_2(t) = e^{-\lambda_1(t)} \cdot e^{-\lambda_2(t)} = e^{-(\lambda_1 + \lambda_2)t} = e^{-0,53 \cdot 10^{-3} t}.$$

График $P(t)$:



Вероятность отказа изделия: $Q(t) = 1 - P(t) = 1 - e^{-0,53 \cdot t}$.

График $Q(t)$:



Средняя наработка до отказа: $T = \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{0,53 \cdot 10^{-3}} = \frac{100}{53} \cdot 10^3 \approx 2 \cdot 10^3 \approx 2000 \text{ ч.}$

Задача №2

Определить и построить графики вероятности безотказной работы изделия $P(t)$ и вероятности отказа изделия $Q(t)$ при $\lambda_1 =$

$$= 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ 1/ч; } \lambda_2 = 0,3 \cdot 10^{-4} \text{ 1/ч; } \lambda_3 = 0,8 \cdot 10^{-3} \text{ 1/ч.}$$

Решение

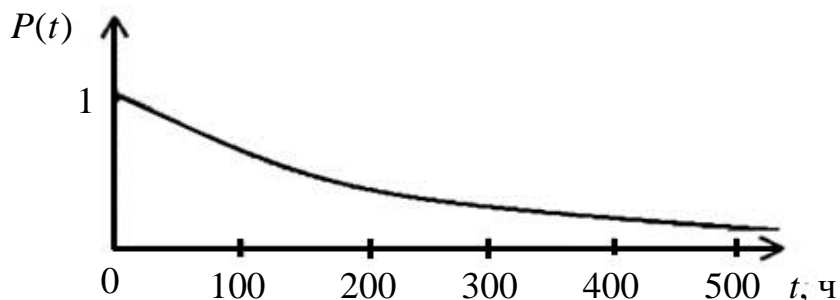
Интенсивность отказов:

$$\lambda(t) = \lambda_1(t) + \lambda_2(t) + \lambda_3(t) = 0,5 \cdot 10^{-3} + 0,3 \cdot 10^{-4} + 0,8 \cdot 10^{-3} = 1,33 \cdot 10^{-3} \text{ 1/ч.}$$

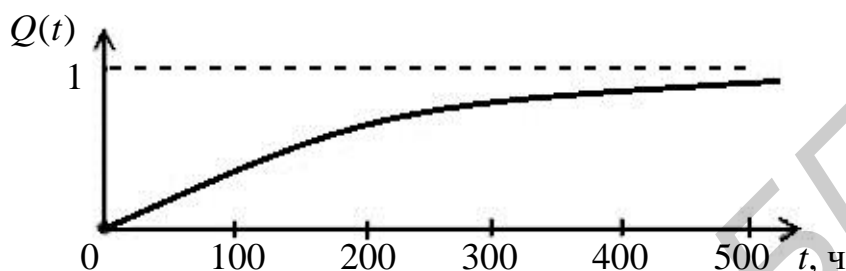
Вероятность безотказной работы:

$$P(t) = \prod_{i=1}^3 P_i(t) = P_1(t) \cdot P_2(t) \cdot P_3(t) = e^{-\lambda_1(t)} \cdot e^{-\lambda_2(t)} \cdot e^{-\lambda_3(t)} = e^{-1,33 \cdot 10^{-3} t}.$$

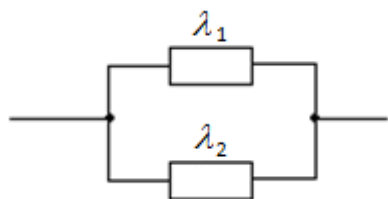
График $P(t)$ (при $t = 100, 200, 300, 400, 500$ ч):



Вероятность отказа изделия: $Q(t) = 1 - P(t) = 1 - e^{-1,33 \cdot 10^{-3} t}$. График $Q(t)$:



Задача №3



Определить показатели безотказной работы системы ($P(t)$, $Q(t)$, T), состоящей из двух одинаковых элементов, включенных в структурную схему надежности (ССН) параллельно, и построить графики вероятности безотказной работы $P(t)$ и

вероятности отказов $Q(t)$.

Закон распределения наработки до отказа – экспоненциальный.

Интенсивности отказов элементов одинакова: $\lambda_1 = \lambda_2 = 0,5 \cdot 10^{-3}$ 1/ч.

Для построения графиков $P(t)$ и $Q(t)$ принять текущее время $t = 100, 200, 300, 400, 500$ ч.

Решение

Поскольку закон распределения наработки до отказа экспоненциальный и интенсивность отказов $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda = 0,5 \cdot 10^{-3}$ 1/ч, то вероятность отказа системы:

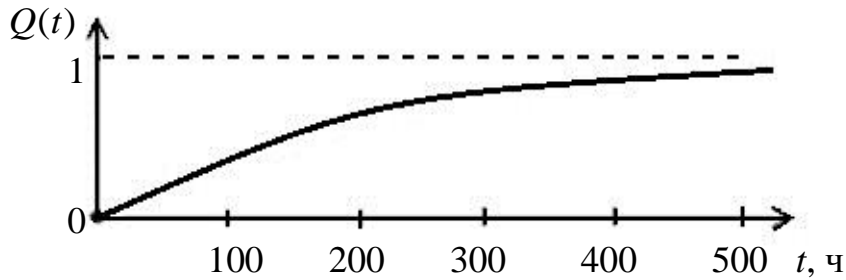
$$Q(t) = \prod_{i=1}^2 Q_i(t) = \prod_{i=1}^2 (1 - P_i(t)) = [1 - P_1(t)] \cdot [1 - P_2(t)].$$

Но при экспоненциальном законе наработки до отказа

$$P_1(t) = P_2(t) = P(t) = e^{-\lambda t}, \text{ тогда } Q(t) = [1 - P(t)]^2 = 1 - e^{-\lambda t} =$$

$$= 1 - 2e^{-\lambda t} + e^{-2\lambda t}.$$

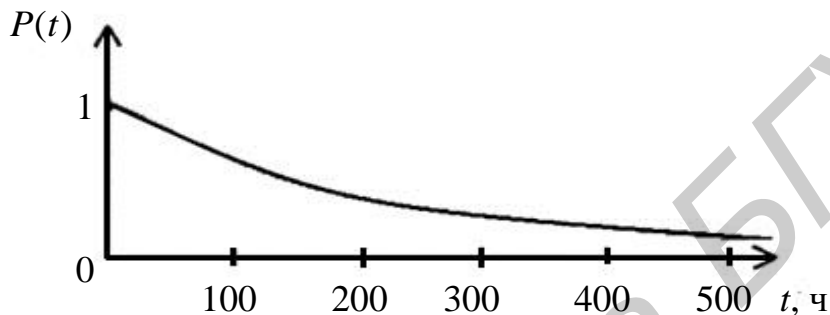
График $Q(t)$:



Вероятность безотказной работы системы:

$$P(t) = 1 - Q(t) = 1 - [1 - 2e^{-\lambda t} + e^{-2\lambda t}] = 2e^{-\lambda t} - e^{-2\lambda t}.$$

График $P(t)$:

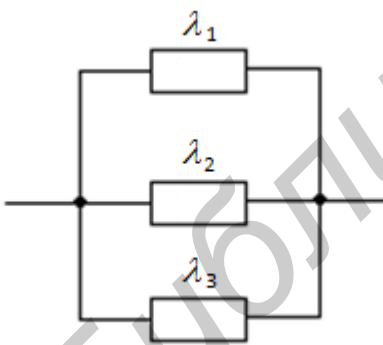


Средняя наработка до отказа:

$$T = \int_0^{\infty} P(t) dt = \int_0^{\infty} (2e^{-\lambda t} - e^{-2\lambda t}) dt = \frac{2}{\lambda} - \frac{1}{2\lambda} = 3 \cdot 10^3 \text{ ч} = 3000 \text{ ч}.$$

Задача №4

Определить показатели безотказной работы системы ($P(t)$, $Q(t)$, T), состоящей из 3-х одинаковых параллельно соединенных элементов. Построить графики вероятности безотказной работы $P(t)$ и вероятности отказов $Q(t)$ при текущем времени $t = 100, 200, 300, 400, 500$ ч.



Закон распределения наработки до отказа – экспоненциальный.

Решение

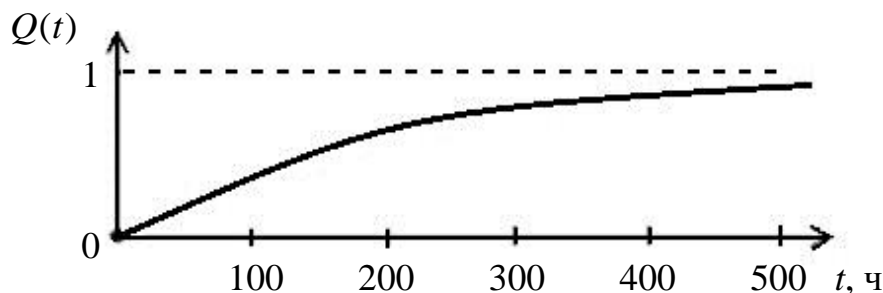
Поскольку закон распределения наработки до отказа экспоненциальный и интенсивность отказов $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = 0,5 \cdot 10^{-3}$ 1/ч, то вероятность отказа системы:

$$Q(t) = \prod_{i=1}^3 Q_i(t) = \prod_{i=1}^3 (1 - P_i(t)) = [1 - P_1(t)] \cdot [1 - P_2(t)] \cdot [1 - P_3(t)].$$

Но при экспоненциальном законе наработки до отказа

$$P_1(t) = P_2(t) = P_3(t) = P(t) = e^{-\lambda t}, \text{ тогда } Q(t) = [1 - P(t)]^3 = [1 - e^{-\lambda t}]^3 = \\ = \{(a - b)^3 = a^3 - 3a^2b + 3ab^2 - b^3\} = 1 - 3e^{-\lambda t} + 3 \cdot e^{-2\lambda t} - e^{-3\lambda t}.$$

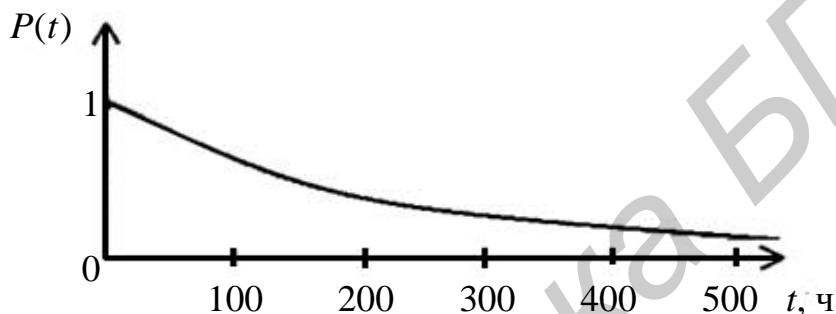
График $Q(t)$ (при $t=0$ $Q(t) = 1 - 3 + 3 - 1 = 0$, при $t \rightarrow \infty$ $Q(t) = 1 - 0 + 0 - 0 = 1$):



Вероятность безотказной работы системы:

$$P(t) = 1 - Q(t) = 1 - [1 - 3e^{-\lambda t} + 3e^{-2\lambda t} - e^{-3\lambda t}] = 3e^{-\lambda t} - 3e^{-2\lambda t} + e^{-3\lambda t}.$$

График $P(t)$ (при $t=0$ $P(t) = 3 - 3 + 1 = 1$, при $t \rightarrow \infty$ $P(t) = 0$):

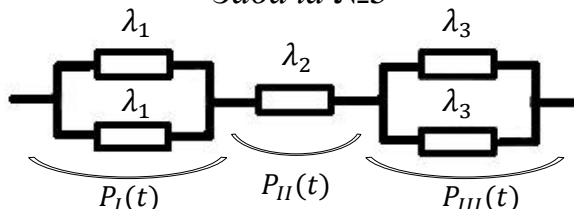


Средняя наработка до отказа:

$$\begin{aligned} T &= \int_0^{\infty} P_t dt = \int_0^{\infty} (3e^{-\lambda t} - 3e^{-2\lambda t} + e^{-3\lambda t}) dt = \frac{3}{\lambda} - \frac{1}{2\lambda} + \frac{1}{3\lambda} = \\ &= \frac{3}{0,5 \cdot 10^{-3}} - \frac{1}{2 \cdot 0,5 \cdot 10^{-3}} + \frac{1}{3 \cdot 0,5 \cdot 10^{-3}} = \frac{1}{0,5 \cdot 10^{-3}} \left[3 - \frac{1}{2} + \frac{1}{3} \right] \approx \frac{2,8}{0,5 \cdot 10^{-3}} \approx \\ &\approx 5,6 \cdot 10^3 \text{ ч} \approx 5600 \text{ ч} \end{aligned}$$

Тема №3. Расчет показателей надежности для изделий со смешанным соединением элементов

Задача №5



Определить среднюю наработку системы до отказа (T) при смешанном соединении ее элементов.

Интенсивности отказов элементов ССН: $\lambda_1 = 0,5 \cdot 10^{-3}$ 1/ч;

$\lambda_2 = 0,3 \cdot 10^{-4}$ 1/ч; $\lambda_3 = 0,8 \cdot 10^{-3}$ 1/ч.

Закон распределения наработки до отказа – экспоненциальный.

Решение

Средняя наработка до отказа

$$T = \int_0^{\infty} P(t) dt.$$

По теореме умножения вероятностей для системы с последовательным соединением элементов

$$P(t) = P_I(t) \cdot P_{II}(t) \cdot P_{III}(t).$$

Так как вероятность отказа

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

то для первой пары параллельно соединенных элементов

$$Q_I(t) = \prod_{i=1}^2 [1 - P_i(t)],$$

но так как интенсивности отказов у двух параллельно соединенных элементов равны $\lambda_1 = \lambda$ и $P(t) = e^{-\lambda t}$, то $Q_I(t) = [1 - P_1(t)]^2$, а

$$P_I(t) = 1 - Q(t) = 1 - [1 - P_1(t)]^2 = 1 - [1 - e^{-\lambda_1 t}]^2.$$

Для второго элемента

$$P_{II}(t) = P_2(t) = e^{-\lambda_2 t}.$$

Для второй пары параллельно соединенных элементов

$$Q_{III}(t) = \prod_{i=1}^2 [1 - P_i(t)] = [1 - P_3(t)]^2,$$

тогда $P_{III}(t) = 1 - Q_{III}(t) = 1 - [1 - P_3(t)]^2 = 1 - [1 - e^{-\lambda_3 t}]^2$.

Подставив эти значения в $P(t)$, получим вероятность безотказной работы всей системы

$$P(t) = P_I(t) \cdot P_{II}(t) \cdot P_{III}(t) = 4P_1(t)P_2(t)P_3(t) - 2P_1^2(t)P_2(t)P_3(t) - 2P_1(t)P_2(t)P_3^2(t) + P_1^2(t)P_2(t)P_3^2(t) = 4e^{-(\lambda_1+\lambda_2+\lambda_3)t} - 2e^{-(2\lambda_1+\lambda_2+\lambda_3)t} - 2e^{-(\lambda_1+\lambda_2+2\lambda_3)t} + e^{-(2\lambda_1+\lambda_2+2\lambda_3)t}.$$

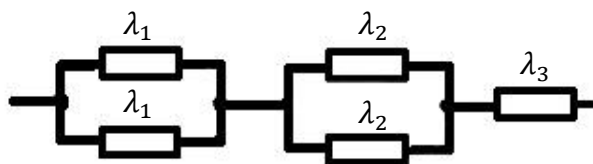
Искомая средняя наработка до отказа равна

$$T = \int_0^{\infty} P(t) dt = \frac{4}{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3} - \frac{2}{2\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3} - \frac{2}{\lambda_1 + \lambda_2 + 2\lambda_3} + \frac{1}{2\lambda_1 + \lambda_2 + 2\lambda_3} = 1359,7 \text{ ч}$$

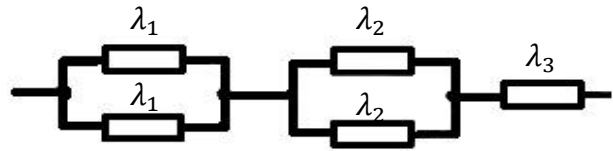
Задача №6

По методике решения задачи №1 определить среднюю наработку системы до отказа (T) при смешанном соединении ее элементов, если:

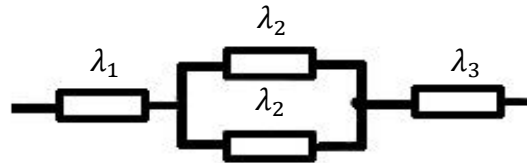
- $\lambda_1 = 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ 1/ч};$
- $\lambda_2 = 0,3 \cdot 10^{-4} \text{ 1/ч};$
- $\lambda_3 = 0,8 \cdot 10^{-3} \text{ 1/ч};$
- $\lambda_4 = 0,6 \cdot 10^{-4} \text{ 1/ч};$
- $\lambda_5 = 0,9 \cdot 10^{-3} \text{ 1/ч}.$



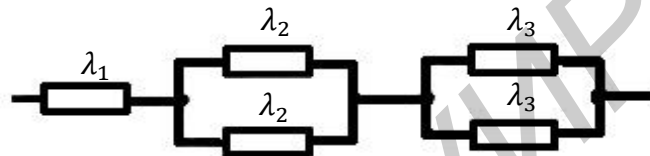
Задача №7



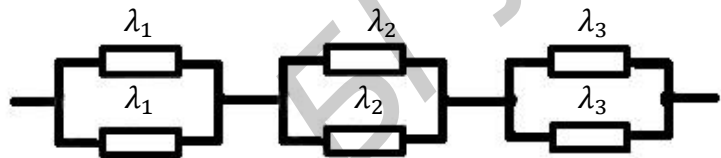
Задача №8



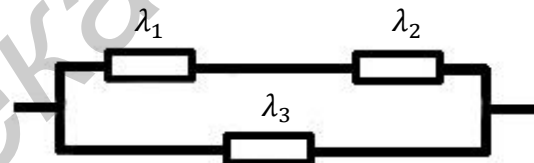
Задача №9



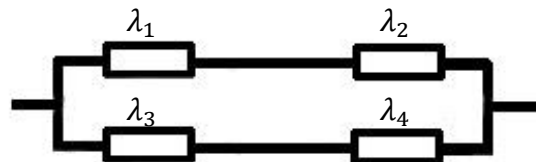
Задача №10



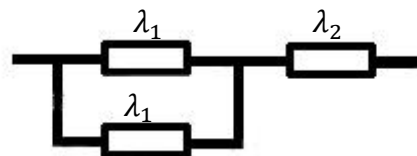
Задача №11



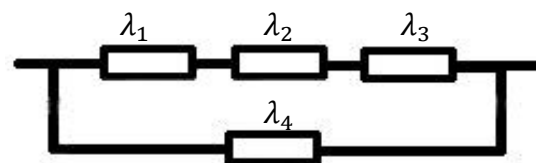
Задача №12



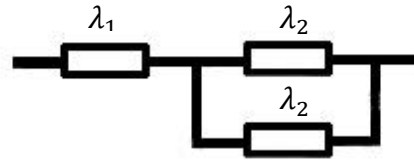
Задача №13



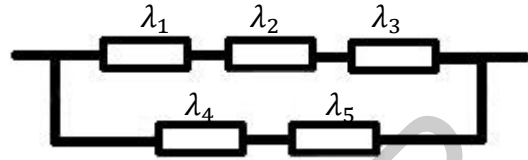
Задача №14



Задача №15



Задача №16



Тема №4. Расчет комплексных показателей надежности изделий
Задача №17

Вероятность безотказной работы изделия в течении 100 ч равна $P(t) = 0,93$. Интервал нормальной работы изделия (при интенсивности отказов $\lambda(t) = \lambda = \text{const}$) удовлетворительно аппроксимируется экспоненциальным законом распределения времени наступления отказов.

Определить среднюю наработку изделия на отказ T на интервале нормальной работы.

Решение

Вероятность безотказной работы изделия при экспоненциальном законе распределения времени наступления отказов

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

Прологарифмируем обе части этого уравнения: $\ln[P(t)] = -\frac{t}{T}$,

отсюда
$$T = -\frac{t}{\ln[P(t)]}$$
,

тогда
$$T = -\frac{100}{\ln(0,93)} \approx 1378 \text{ ч.}$$

Задача №18

Средняя наработка изделия на отказ $T = 2100$ ч. Вероятность отказа $\gamma = 0,99$ %. Интервал нормальной работы изделия (при интенсивности отказов $\lambda(t) = \lambda = \text{const}$) удовлетворительно аппроксимируется экспоненциальным законом распределения времени наступления отказов.

Определить гамма-процентную наработку до отказа (t_γ).

Решение

Гамма-процентная вероятность безотказной работы изделия (при экспоненциальном законе распределения времени наступления отказов)

$$P(t_\gamma) = \frac{\gamma}{100}$$

Так как
$$P(t_\gamma) = e^{-\frac{t_\gamma}{T}},$$

то
$$e^{-\frac{t\gamma}{T}} = \frac{\gamma}{100}.$$

Логарифмируя обе части этого уравнения, получим: $-\frac{t\gamma}{T} = \ln \frac{\gamma}{100},$

тогда
$$t_{\gamma} = -\ln\left(\frac{\gamma}{100}\right) \cdot T = -\ln\left(\frac{99}{100}\right) \cdot 2100 \approx 21 \text{ ч.}$$

Задача №19

Время безотказной работы изделия на интервале нормальной работы равно средней наработке на отказ: $t = T$ ч. Интервал нормальной работы изделия (при интенсивности отказов $\lambda(t) = \lambda = \text{const}$) удовлетворительно аппроксимируется экспоненциальным законом распределения времени наступления отказов.

Определить вероятность безотказной работы изделия $P(t)$ за время $t = T$.

Решение

Вероятность безотказной работы изделия при экспоненциальном законе распределения времени наступления отказов:

$$P(t) = e^{-\frac{t}{T}}.$$

При $t = T$
$$P(t) = e^{-\frac{t}{T}} = e^{-1} \approx 0,37.$$

Задача №20

За время непрерывно работающего изделия в течение года ($t = 8760$ ч) произошло 4 отказа ($N_{\text{отк}} = 4$). Среднее время ремонта $T_{\text{рем}} = 2$ ч. На техническом обслуживании изделие находилось в общей сложности $T_{\text{то}} = 86$ ч.

Определить статистический коэффициент технического использования изделия $\hat{K}_{\text{тн}}$.

Решение

Расчетная формула статистического коэффициента использования

$$\hat{K}_{\text{тн}} = \frac{\sum_{i=1}^I t_{\text{раб}}}{\sum_{i=1}^I T_{\text{раб}} + \sum_{j=1}^J T_{\text{то}} + \sum_{q=1}^Q T_{\text{рем}}}.$$

На ремонте изделие находилось $\sum_{q=1}^Q T_{\text{рем}} = N_{\text{отк}} \cdot T_{\text{рем}} = 4 \cdot 2 = 8$ ч;

на техническом обслуживании изделие находилось $\sum_{j=1}^J T_{\text{то}} = T_{\text{то}} = 86$ ч.

Таким образом, в течение года изделие проработало

$$\sum_{i=1}^I T_{\text{раб}} = 8760 - N_{\text{отк}} \cdot T_{\text{рем}} - T_{\text{то}} = 8760 - 8 - 86 = 8666 \text{ ч,}$$

тогда статистический коэффициент использования изделия равен

$$\hat{K}_{\text{тн}} = \frac{\sum_{i=1}^I T_{\text{раб}}}{t} = \frac{8666}{8760} \approx 0,99.$$

Задача №21

За время непрерывно работающего изделия в течение года ($t = 8760$ ч) произошло 3 отказа ($N_{\text{отк}} = 3$). Среднее время восстановления $T_{\text{в}} = 5$ ч.

Определить статистический коэффициент готовности \hat{K}_r .

Решение

На ремонте изделие находилось

$$\sum_{q=1}^Q T_{\text{рем}} = N_{\text{отк}} \cdot T_{\text{в}} = 3 \cdot 5 = 15 \text{ ч.}$$

Так как в году $t = 8760$ ч, то в течение года изделие применялось

$$t_{\text{пр}} = 8760 - N_{\text{отк}} \cdot T_{\text{в}} = 8760 - 15 = 8745 \text{ ч,}$$

а статистический коэффициент готовности \hat{K}_r равен

$$\hat{K}_r = \frac{t_{\text{пр}}}{t} = \frac{8745}{8760} \approx 0,998.$$

Задача №22

Среднее время восстановления изделия $T_{\text{в}} = 30$ мин, средняя наработка на отказ $T = 800$ ч.

Определить коэффициент оперативной готовности ($K_{\text{ог}}$) изделия в интервале нормальной работы через $t = 100$ ч после включения.

Решение

Пусть интервал нормальной работы изделия (т. е. интенсивность отказов $\lambda(t) = \lambda = \text{const}$) удовлетворительно аппроксимируется экспоненциальным законом распределения времени наступления отказов, тогда

$$P(t) = e^{-\frac{t}{T}},$$

а коэффициент оперативной готовности

$$K_{\text{ог}} = \frac{T}{T+T_{\text{в}}} \cdot P(t) = \frac{800}{800+0,5} \cdot e^{-\frac{100}{800}} \approx 0,882.$$

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Контрольная работа

Цель: закрепление теоретических знаний по расчету и обеспечению надежности систем автотехники на этапах проектирования, изготовления и эксплуатации.

Примерная тематика контрольной работы и рефератов

1. Стадии «жизненного цикла» изделия(й).
2. Нормативная база по качеству изделия(й).
3. Система стандартов «Надежность в технике».
4. Общие понятия надежности изделия(й).
5. Временные показатели надежности изделия(й).
6. Показатели надежности изделия(й).
7. Модели отказов изделия(й).
8. Законы распределения отказов изделия(й).
9. Количественные показатели безотказности изделия(й).
10. Основные понятия теории вероятности, используемые в теории надежности.
11. Количественные показатели долговечности изделия(й).
12. Количественные показатели сохраняемости изделия(й).
13. Количественные показатели ремонтпригодности изделия(й).
14. Комплексные показатели надежности изделия(й).
15. Показатели надежности при различных законах распределения случайных величин.
16. Показатели надежности восстанавливаемого изделия.
17. Характеристики надежности дежурного изделия.
18. Характеристики надежности изделия разового действия.
19. Эксплуатационные свойства изделия(й).
20. Основные состояния изделий при эксплуатации.
21. Показатели безотказности невосстанавливаемых систем.
22. Аналитические методы расчета показателей надежности изделия(й).
23. Расчет надежности изделия(й) по статистическим данным.
24. Влияние объективных факторов на надежность изделия(й).
25. Влияние субъективных факторов на надежность изделия(й).
26. Методы обеспечения (повышения) надежности изделия(й) на этапе проектирования.
27. Методы обеспечения (повышения) надежности изделия(й) на этапе изготовления.
28. Методы обеспечения (повышения) надежности изделия(й) при эксплуатации.
29. Эксплуатационные характеристики работающего изделия.
30. Влияние температуры на надежность изделия(й).
31. Влияние влажности воздуха на надежность изделия(й).
32. Влияние атмосферного давления на надежность изделия(й).

33. Влияние чистоты воздуха на надежность изделия(й).
34. Влияние механических нагрузок на надежность изделия(й).
35. Влияние энергетических нагрузок на надежность изделия(й).
36. Надежность электровакуумных приборов изделия(й).
37. Надежность измерительных приборов изделия(й).
38. Надежность резисторов изделия(й).
39. Надежность катушек индуктивностей изделия(й).
40. Надежность конденсаторов изделия(й).
41. Надежность контактных элементов и устройств изделия(й).
42. Надежность полупроводниковых приборов изделия(й).
43. Надежность интегральных микросхем изделия(й).
44. Надежность изделия(й) на жидких кристаллах.
45. Надежность лазерного(ых) изделия(й).
46. Надежность систем(ы) автоматики атомных электростанций.
47. Надежность систем(ы) автоматики автомобильной техники.
48. Надежность систем(ы) электроники промышленных(ого) изделия(й).
49. Надежность систем(ы) электроники автомобильной техники.
50. Анализ надежности изделия(й) по данным эксплуатации.
51. Анализ влияния ошибок проектирования на надежность изделия(й).
52. Анализ влияния ошибок производства на надежность изделия(й).
53. Анализ влияния ошибок эксплуатации на надежность изделия(й).
54. Оценка достоверности расчетов надежности изделия(й).
55. Оценка параметрической надежности изделия(й).
56. Оценка надежности резервируемого(ых) изделия(й).
57. Прогнозирование надежности изделия(й).
58. Конструктивно-схемные методы повышения надежности изделия(й).
59. Структурные методы повышения надежности изделия(й).
60. Наблюдение за эксплуатацией изделия(й) как метод повышения надежности.
61. Испытания изделия(й) на надежность.
62. Испытания изделия(й) на долговечность.
63. Ускоренные испытания изделия(й) на надежность.
64. Виды и методы испытаний изделия(й) на надежность.
65. Характеристика эксплуатационных свойств изделия(й).
66. Основные характеристики техобслуживания изделия(й).
67. Профилактика изделия(й) как средство обеспечения надежности.
68. Виды и методы профилактики изделия(й) для обеспечения (повышения) надежности.
69. Автоматизация техобслуживания изделия(й).
70. Аппаратура диагностики надежности изделия(й).
71. Автоматизация ремонта изделия(й).
72. Тестование и диагностика надежности изделия(й).
73. Пример диагностики изделия(й).
74. Методы прогнозирования отказов изделия(й).

75. Статистический метод прогнозирования отказов изделия(й).
76. Пример компьютерной диагностики изделия(й).
77. Компьютерная диагностика изделия(й).
78. Прогнозирование отказов по изменению параметров элементов изделия(й).
79. Методы отыскания отказавших элементов (или устройств) в изделии(ях).
80. Наблюдение за эксплуатацией изделия(й).
81. Способы обеспечения износоустойчивости элементов (узлов, блоков, аппаратуры) изделия(й).
82. Входной контроль комплектующих элементов изделия(й) как способ обеспечения надежности.
83. Отбраковка комплектующих как способ обеспечения надежности изделия(й).
84. Стендовые испытания на надежность изделия(й).
85. Лабораторные испытания на надежность изделия(й).
86. Испытания опытных образцов изделия(й) с целью обеспечения надежности.
87. Повышение коэффициента готовности изделия(й) путем изменения типовых технологических карт ремонта.
88. Пример автоматизации операций техобслуживания и ремонта изделия(й) на базе конкретного программного продукта.
89. Схема подключения тестового программного продукта при диагностике изделия(й).
90. Основное меню программы аппаратуры при диагностике изделия(й).
91. Организация наблюдений за эксплуатацией изделия(й) и их регистрация.
92. Обработка результатов наблюдений за эксплуатацией изделия(й).
93. Составление планов повышения надежности изделия(й) по результатам наблюдений.
94. Оценка надежности изделия(й) при старении (изменении) параметров комплектующих элементов.
95. Оценка надежности изделия(й) однократного действия.
96. Оценка надежности изделия(й) многократного действия.
97. Средняя наработка до отказа как показатель надежности невосстанавливаемого изделия.
98. Интенсивность отказов как показатель надежности невосстанавливаемого изделия.
99. Средняя частота отказов как показатель надежности невосстанавливаемого изделия.
100. Коэффициент готовности как показатель надежности невосстанавливаемого изделия.

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Вопросы для самоконтроля

1. Понятие надежности изделия, его безотказности, ремонтпригодности, долговечности и сохраняемости.
2. Свойства изделия: состояние, отказы, предельное состояние, восстановление, ремонт, техническое обслуживание.
3. Временные понятия надежности: наработка до отказа, наработка между отказами.
4. Основные понятия теории вероятностей, используемые в теории надежности: закон распределения случайной величины, функция распределения, плотность распределения, математическое ожидание (МОЖ), дисперсия, доверительный интервал, доверительная вероятность.
5. Законы распределения, используемые для описания дискретных случайных величин: распределение по биномиальному закону, распределение по закону Пуассона.
6. Законы распределения, используемые для описания непрерывных случайных величин: распределение Вейбулла – Гнеденко, экспоненциальное распределение, распределение Рэлея, нормальный закон распределения (закон Гаусса).
7. Показатели безотказности (для невосстанавливаемых изделий): вероятность безотказной работы, вероятность отказа, плотность распределения наработки до отказа, интенсивность отказов, средняя наработка до отказа, гамма-процентная наработка до отказа.
8. Статистические показатели надежности по результатам испытаний: статистическая вероятность безотказной работы, статистическая плотность распределения наработки до отказа, статистическая интенсивность отказов, статистическая средняя наработка до отказа.
9. Показатели безотказности (для восстанавливаемых изделий): вероятность безотказной работы, параметр потока отказов, средняя наработка на отказ.
10. Показатели ремонтпригодности: вероятность восстановления, плотность распределения времени восстановления, интенсивность восстановления, среднее время восстановления.
11. Математические модели ремонтпригодности: экспоненциальное распределение, гамма-распределение и его частный случай – распределение Эрланга.
12. Показатели долговечности: средний ресурс, гамма-процентный ресурс, средний срок службы, гамма-процентный срок службы.
13. Показатели сохраняемости: средний срок сохраняемости (МОЖ срока сохраняемости), гамма-процентный срок сохраняемости.
14. Комплексные показатели надежности: коэффициенты готовности, оперативной готовности, технического использования, сохранения, эффективности.

15. Аналитический метод расчета показателей надежности (при проектировании изделий) для последовательной схемы соединения элементов. Основные расчетные соотношения для показателей безотказной работы (средней наработки до отказа, плотности распределения наработки до отказа, интенсивности отказов).

16. Аналитический метод расчета показателей надежности (при проектировании изделий) для параллельного соединения элементов. Основные расчетные соотношения для показателей безотказной работы (вероятности отказа, вероятности безотказной работы, плотности распределения наработки до отказа, интенсивности отказов).

17. Цели, виды испытаний на надежность изделий (определяющие, контрольные, специальные), их характеристика.

18. Содержание трех этапов решения задачи определения неизвестного закона распределения случайной величины по статистическим данным (построение гистограммы, выбор теоретической функции плотности распределения, проверка согласия теоретической и статистической функций по количественному критерию Пирсона).

19. Точечные и интервальные оценки показателей надежности изделий (критерии, формулы расчета оценок, коэффициенты точности, границы доверительного интервала).

20. Анализ ошибок проектирования изделий.

21. Методы обеспечения надежности изделий на этапе проектирования.

22. Методы резервирования систем при проектировании (общее резервирование, раздельное и смешанное), суть и схемы.

23. Анализ ошибок производства изделий.

24. Методы обеспечения надежности на этапе производства.

25. Методы неразрушающих испытаний опытных изделий на надежность, их суть.

26. Контрольные испытания опытных изделий на надежность (сплошные, выборочные, лабораторные, ускоренные), их содержание.

27. Виды выборок при испытаниях опытных изделий на надежность (однократная, двукратная, последовательная), их содержание.

28. Учет и влияние климатических условий, снижающих надежность изделий при эксплуатации (температура, влажность и плотность воздуха, уровень радиации), способы защиты.

29. Влияние механических и электрических нагрузок на надежность изделий, способы защиты.

30. Учет влияния субъективных факторов на надежность (влияние организации эксплуатации и персонала).

31. Техническое обслуживание изделий при их эксплуатации (виды, периодичность, техническая диагностика).

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Рабочая учебная программа
для студентов дневного обучения (в сокращении).

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

Цели преподавания дисциплины «Надежность систем автомобильной техники»: изучение основ теории надежности применительно к системам автомобильной техники; изучение методов проектирования и изготовления надежных систем автомобильной техники; изучение элементов эксплуатации и тестовой диагностики систем автомобильной техники.

Задача изучения дисциплины: получение знаний об основах обеспечения надежности систем автомобильной техники на всех этапах их жизненного цикла и применение их в практике инженерного проектирования.

Базовыми дисциплинами по курсу «Надежность систем автомобильной техники» являются:

«Теория вероятностей и математическая статистика», «Вычислительные машины и системы».

В результате изучения дисциплины студенты должны знать:

- способы обеспечения надежности систем автомобильной техники на всех этапах их жизненного цикла;
- методы проектной и фактической оценки надежности систем автомобильной техники;
- тенденции и перспективы развития тестового диагностирования систем автомобильной техники;

уметь:

- характеризовать оптимальный в заданных условиях конкретный метод проектной и фактической оценки надежности, а также диагностирования систем автомобильной техники;
- анализировать эффективность применения тех или иных методов проектной или фактической оценки надежности, а также методов тестовой диагностики систем автомобильной техники в заданных условиях;

приобрести навыки: обеспечения надежности систем автомобильной техники на всех этапах их жизненного цикла.

СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

1. Название тем лекционных занятий, их содержание, объем в часах

Таблица П.3.1

№ п/п	Наименование темы	Содержание	Объем в часах (ауд.)
1	2	3	4
1	Общие сведения о надежности систем автотехники	Содержание, основные понятия, термины и определения теории надежности. Показатели надежности: безотказность, долговечность, ремонтпригодность, сохраняемость, комплексные показатели надежности. Восстанавливаемые и невосстанавливаемые изделия. Некоторые понятия теории вероятностей, используемые в теории надежности: функция, закон и плотность распределения случайной величины; математическое ожидание; дисперсия; доверительные интервал и вероятность	4
2	Модели отказов, законы распределения и их основные характеристики	Законы распределения случайных величин, используемые в теории надежности: распределение по биномиальному закону; по закону Пуассона; распределение Вейбулла – Гнеденко; экспоненциальное распределение; распределение Рэля; нормальный закон распределения (закон Гаусса); распределение Эрланга. Методика расчета показателей надежности (аналитическая и по статистическим данным). Понятие о точечной и интервальной оценках показателей надежности. Методика определения точечных и интервальных оценок	8

1	2	3	4
3	Обеспечение надежности при проектировании	Цели и требования к системе сбора информации по надежности. Анализ ошибок проектирования, ведущих к снижению надежности. Факторы, влияющие на надежность. Методы обеспечения надежности на этапе проектирования. Резервирование, как метод повышения надежности. Способы подключения резервных элементов. Методы прогнозирования надежности на этапе проектирования	2
4	Обеспечение надежности при изготовлении	Факторы, влияющие на надежность изделий на этапе производства: дефекты механической сборки и герметизации; ошибки электрического монтажа, настройки изделий при измерениях и считывании результатов; низкое качество применяемых элементов и материалов. Способы обеспечения надежности на этапе производства: сплошной или выборочный контроль элементов и материалов; предварительная тренировка элементов и устройств; испытания на надежность (разрушающие и не разрушающие; лабораторные и эксплуатационные; обычные и ускоренные; однократная и двукратная выборка)	2
5	Профилактика и техническое обслуживание	Учет объективных факторов при эксплуатации (температура, влажность и плотность воздуха, уровень радиации). Влияние механических нагрузок (вибрация, ветровые и ударные нагрузки, контактные (рабочие) усилия в разъемах и реле). Влияние электрических нагрузок на надежность изделий. Учет субъективных факторов при эксплуатации (организация эксплуатации и квалификация обслуживающего персонала). Влияние человека на эффективность функционирования изделий. Техническое обслуживание при эксплуатации, его виды, показатели, методы определения периодичности	2

1	2	3	4
6	Восстановление работоспособного состояния. Автоматизация технического обслуживания и ремонта	Время восстановления работоспособности (обнаружение неисправности, доставка комплектующих, ремонт, настройка). Показатели: вероятность, интенсивность, среднее время и плотность распределения времени восстановления. Техническое диагностирование систем при эксплуатации и ремонте. Виды технической диагностики. Автоматизация операций техобслуживания и ремонта на базе программных продуктов	2
7	Наблюдение за эксплуатацией систем как способ повышения надежности	Цели, виды наблюдений (индивидуальные и групповые), их организация и регистрация. Обработка результатов наблюдений и составления планов повышения надежности	2
Итого:			22

2. Перечень тем практических занятий, их содержание и объем в часах

Таблица П.3.2

№ п/п	Название темы	Содержание	Объем в часах (ауд.)
1	2	3	4
1	Общие понятия о надежности изделий. ПЗ №1	Безотказность, ремонтпригодность, долговечность, сохраняемость. Свойства надежности: состояние изделия, восстановление, ремонт, техническое обслуживание. Понятия теории вероятностей, используемые в теории надежности: функция, закон и плотность распределения случайной величины; математическое ожидание, дисперсия; доверительный интервал. Законы распределения случайных величин: биномиальный; Пуассона; Вейбулла – Гнеденко; экспоненциальный; Рэлея; Гаусса	2

1	2	3	4
2	Показатели надежности для невосстанавливаемых изделий. ПЗ №2 ПЗ №3 ПЗ №4	Расчет показателей безотказности (вероятность безотказной работы, вероятность отказа, интенсивность отказов, средняя наработка до отказа). Связь между показателями безотказности. Комплексные показатели надежности (коэффициент готовности, коэффициент оперативной готовности, коэффициент технического использования, коэффициент сохранения эффективности)	6
3	Обеспечение надежности на этапе проектирования изделий. ПЗ №5	Недостатки проектирования электрических схем, механических конструкций. Методы обеспечения надежности на этапе проектирования. Методы резервирования	2
4	Обеспечение надежности при изготовлении изделий. ПЗ №6	Анализ ошибок производства (дефекты механической сборки; ошибки электрического монтажа и настройки; низкое качество комплектующих). Методы обеспечения надежности на этапе производства. Испытания изделий на надежность. Виды выборки	2
5	Профилактика и техническое обслуживание изделий. ПЗ №7	Учет объективных и субъективных факторов при эксплуатации изделий (климатические условия; влияние человека на эффективность функционирования изделий). Методы определения периодичности технического обслуживания	2
6	Восстановление работоспособного состояния и ремонт изделий. ПЗ №8	Показатели ремонтпригодности (вероятность восстановления; плотность распределения времени восстановления; интенсивность и среднее время восстановления)	2
7	Проведение наблюдений за эксплуатацией изделий. ПЗ №9	Система сбора и регистрации данных по надежности (основные цели и требования). Техническое диагностирование, его виды. Аппаратура	2
Итого:			18

Рабочая учебная программа
для студентов заочного и вечернего обучения (в сокращении)

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

Цели преподавания дисциплины «Надежность систем автомобильной техники»: изучение основ теории надежности применительно к системам автомобильной техники; изучение методов проектирования и изготовления надежных систем автомобильной техники; изучение элементов эксплуатации и тестовой диагностики систем автомобильной техники.

Задача изучения дисциплины: получение знаний об основах обеспечения надежности систем автомобильной техники на всех этапах их жизненного цикла и применение их в практике инженерного проектирования.

Базовыми дисциплинами по курсу «Надежность систем автомобильной техники» являются:

«Теория вероятностей и математическая статистика», «Вычислительные машины и системы».

В результате изучения дисциплины студенты должны знать:

- способы обеспечения надежности систем автомобильной техники на всех этапах их жизненного цикла;
- методы проектной и фактической оценки надежности систем автомобильной техники;
- тенденции и перспективы развития тестового диагностирования систем автомобильной техники;

уметь:

- характеризовать оптимальный в заданных условиях конкретный метод проектной и фактической оценки надежности, а также диагностирования систем автомобильной техники;
- анализировать эффективность применения тех или иных методов проектной или фактической оценки надежности, а также методов тестовой диагностики систем автомобильной техники в заданных условиях;

приобрести навыки: обеспечения надежности систем автомобильной техники на всех этапах их жизненного цикла.

СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

1. Название тем лекционных занятий, их содержание, объем в часах

Таблица П.4.1

№ п/п	Наименование темы	Содержание	Всего часов по дневной форме	Всего часов по заочной форме	Контрольная, самостоятельная работа
1	2	3	4	5	6
1	Общие сведения о надежности систем автотехники	Содержание, основные понятия, термины и определения теории надежности. Показатели надежности: безотказность, долговечность, ремонтпригодность, сохраняемость, комплексные показатели надежности. Восстанавливаемые и невосстанавливаемые изделия. Некоторые понятия теории вероятностей, используемые в теории надежности: функция, закон и плотность распределения случайной величины; математическое ожидание; дисперсия; доверительные интервал и вероятность	6	0,5	2
2	Модели отказов, законы распределения и их основные характеристики	Законы распределения случайных величин, используемые в теории надежности: распределение по биномиальному закону; по закону Пуассона; распределение Вейбулла – Гнеденко; экспоненциальное распределение; распределение Рэля; нормальный закон рас-	10	0,5	2

1	2	3	4	5	6
		<p>пределения (закон Гаусса); распределение Эрланга. Методика расчета показателей надежности (аналитическая и по статистическим данным). Понятие о точечной и интервальной оценках показателей надежности. Методика определения точечных и интервальных оценок</p>			
3	Обеспечение надежности при проектировании	<p>Цели и требования к системе сбора информации по надежности. Анализ ошибок проектирования, ведущих к снижению надежности. Факторы, влияющие на надежность. Методы обеспечения надежности на этапе проектирования. Резервирование, как метод повышения надежности. Способы подключения резервных элементов. Методы прогнозирования надежности на этапе проектирования</p>	4	0,5	2
4	Обеспечение надежности при изготовлении	<p>Факторы, влияющие на надежность изделий на этапе производства: дефекты механической сборки и герметизации; ошибки электрического монтажа, настройки изделий при измерениях и считывании результатов; низкое ка-</p>	4	0,5	2

1	2	3	4	5	6
		<p>чество применяемых элементов и материалов. Способы обеспечения надежности на этапе производства: сплошной или выборочный контроль элементов и материалов; предварительная тренировка элементов и устройств; испытания на надежность (разрушающие и не разрушающие; лабораторные и эксплуатационные; обычные и ускоренные; однократная и двукратная выборка)</p>			
5	Профилактика и техническое обслуживание	<p>Учет объективных факторов при эксплуатации (температура, влажность и плотность воздуха, уровень радиации). Влияние механических нагрузок (вибрация, ветровые и ударные нагрузки, контактные (рабочие) усилия в разъемах и реле). Влияние электрических нагрузок на надежность изделий.</p> <p>Учет субъективных факторов при эксплуатации (организация эксплуатации и квалификация обслуживающего персонала). Влияние человека на эффективность</p>	4	0,5	2

1	2	3	4	5	6
		функционирования изделий. Техническое обслуживание при эксплуатации, его виды, показатели, методы определения периодичности			
6	Восстановление работоспособного состояния	Время восстановления работоспособности (обнаружение неисправности, доставка комплектующих, ремонт, настройка). Показатели: вероятность, интенсивность, среднее время и плотность распределения времени восстановления	4	0,5	2
7	Автоматизация технического обслуживания и ремонта	Техническое диагностирование систем при эксплуатации и ремонте. Виды технической диагностики. Автоматизация операций техобслуживания и ремонта на базе программных продуктов	4	0,5	2
8	Наблюдение за эксплуатацией систем как способ повышения надежности	Цели, виды наблюдений (индивидуальные и групповые), их организация и регистрация. Обработка результатов наблюдений и составления планов повышения надежности	4	0,5	2
Итого:			40	4	16

2. Перечень тем практических занятий, их содержание и объем в часах

Таблица П.4.2

№ п/п	Название темы	Содержание	Всего часов по дневной форме	Всего часов по заочной форме	Контрольная, самостоятельная работа
1	2	3	4	5	6
1	Общие понятия о надежности изделий. ПЗ №1	Безотказность, ремонтпригодность, долговечность, сохраняемость. Свойства надежности: состояние изделия, восстановление, ремонт, техническое обслуживание. Понятия теории вероятностей, используемые в теории надежности: функция, закон и плотность распределения случайной величины; математическое ожидание, дисперсия; доверительный интервал. Законы распределения случайных величин: биномиальный; Пуассона; Вейбулла – Гнеденко; экспоненциальный; Рэля; Гаусса	2	0,25	2
2	Показатели надежности для невосстанавливаемых изделий. ПЗ №2 ПЗ №3 ПЗ №4	Расчет показателей безотказности (вероятность безотказной работы, вероятность отказа, интенсивность отказов, средняя наработка до отказа). Связь между показателями безотказности. Комплексные показа-	6	1,75	2

Продолжение табл. П.4.2

1	2	3	4	5	6
		тели надежности (коэффициент готовности, коэффициент оперативной готовности, коэффициент технического использования, коэффициент сохранения эффективности)			
3	Обеспечение надежности на этапе проектирования изделий. ПЗ №5	Недостатки проектирования электрических схем, механических конструкций. Методы обеспечения надежности на этапе проектирования. Методы резервирования	2	0,25	1
4	Обеспечение надежности при изготовлении изделий. ПЗ №6	Анализ ошибок производства (дефекты механической сборки; ошибки электрического монтажа и настройки; низкое качество комплектующих). Методы обеспечения надежности на этапе производства. Испытания изделий на надежность. Виды выборки	2	0,75	2
5	Профилактика и техническое обслуживание изделий. ПЗ №7	Учет объективных и субъективных факторов при эксплуатации изделий (климатические условия; влияние человека на эффективность функционирования изделий). Методы определения периодичности технического обслуживания	2	0,5	1

1	2	3	4	5	6
6	Восстановление работоспособного состояния и ремонт изделий. ПЗ №8	Показатели ремонтпригодности (вероятность восстановления; плотность распределения времени восстановления; интенсивность и среднее время восстановления)	2	0,25	1
7	Проведение наблюдений за эксплуатацией изделий. ПЗ №9	Система сбора и регистрации данных по надежности (основные цели и требования). Техническое диагностирование, его виды. Аппаратура	2	0,25	1
Итого:			18	4	10

Литература
Основная

1. Надежность и эффективность в технике: справочник. В 10 т. / под ред. Апполонова. – М. : Машиностроение, 1989.
2. Половко, А. М. Основы теории надежности / А. М. Половко, С. В. Гуров; 2-е изд., перераб. и доп. – СПб. : БХВ-Петербург, 2006.
3. Бородин, С. М. Обеспечение надежности при проектировании РЭС : учеб. пособие / С. М. Бородин. – Ульяновск : УлГТУ, 2010.
4. Шишмарев, В. Ю. Надежность технических систем : учебник / В. Ю. Шишмарев. – М., 2010.
5. ГОСТ 27.002–90. Надежность в технике. Основные понятия, термины и определения. – М. : Изд-во стандартов, 1990.
6. ГОСТ 27.005–97. Надежность в технике. Модели отказов. Основные положения. – Минск : Госстандарт, 2005.
7. ГОСТ 27.003–90. Надежность в технике. Состав и общие правила задания требований по надежности. – М. : Изд-во стандартов, 1991.
8. ГОСТ 27.205–97. Надежность в технике. Проектная оценка надежности сложных систем с учетом технического и программного обеспечения и оперативного персонала. – Минск: Госстандарт РБ, 2005.
9. Дружинин, Г. В. Методы оценки и прогнозирования качества / Г. В. Дружинин. – М. : Радио и связь, 1999.
10. Кузнецов, Н. Л. Надежность электрических машин: учеб. пособие / Н. Л. Кузнецов. – М. : МЭИ, 2006.
11. Курулев, А. П. Элементы теории управления качеством систем / А. П. Курулев. – Минск : Наука и техника, 1981.
12. Гольдберг, О. Д. Надежность электроматериалов : учебник / О. Д. Гольдберг, С. П. Халемская. – М., 2010.
13. Тимофеев, Ю. Л. Электрооборудование автомобилей : устранение и предупреждение неисправностей / Ю. Л. Тимофеев, Г. Л. Тимофеев, Н. М. Ильин. – М. : Транспорт, 2000.
14. Федоров, В. Контроль и испытания в проектировании и производстве радиоэлектронных средств / В. Федоров, Н. Сергеев, А. Кондрашин. – М. : Техносфера, 2005.
15. Широков, А. М. Надежность радиоэлектронной аппаратуры / А. М. Широков. – М. : Высш. шк., 1972.

Дополнительная

16. Бачурина, М. Д. Надежность микросборок / М. Д. Бачурина, А. М. Широков. – М. : Знание, 1984.
17. Боровиков, С. М. Надежность РЭС: методическое пособие для студентов специальности «Техническое обеспечение безопасности» / С. М. Боровиков. – Минск : БГУИР, 2007.
18. Шишмарев, В. Ю. Надежность технических систем / В. Ю. Шишмарев. – М., 2010.

19. Глудкин, О. П. Методы и устройства испытания РЭС и ЭВС / О. П. Глудкин. – М. : Высш. шк., 2001.
20. Дубровин, Л. А. Основы теории надежности: надежность РЭС / Л. А. Дубровин. – Йошкар-Ола, 2004.
21. Испытания радиоэлектронной, электронно-вычислительной аппаратуры и испытательное оборудование / под ред. А. И. Коробова. – М. : Радио и связь, 2002.
22. Каштанов, В. А. Теория надежности сложных систем / В. А. Каштанов, А. И. Медведев. – М.: Изд-во «Европейский центр по качеству», 2002.
23. Математические модели сложных систем. Надежность и обработка информации. – Вып. 9. – Л.: ЛГУ, 1986.
24. Сборник задач по теории надежности / под ред. А. М. Половко, И. М. Малинова. – М. : Радио и связь, 1972.
25. Чернышов, А. А. Основы надежности полупроводниковых приборов и интегральных микросхем / А. А. Чернышов. – М. : Радио и связь, 1988.
26. Голиков, В. Ф. Учет априорной информации при оценке надежности / В. Ф. Голиков, В. А. Прохоренко. – Минск : Наука и техника, 1979.
27. Скрипник, В. М. Математические модели надежности / В. М. Скрипник, И. П. Ковриго. – Минск : ВА РБ, 2012.

Содержание

Предисловие	3
Список сокращений и условных обозначений.....	4
Часть первая. Лекционный материал.....	6
1. Теоретические основы надежности.....	6
1.1. Основные понятия, термины и определения теории надежности.....	6
1.2. Некоторые понятия теории вероятности, используемые в теории надежности.....	9
1.3. Некоторые законы распределения случайных величин, используемых в теории надежности	12
1.3.1. Законы распределения для описания дискретных случайных величин.....	12
1.3.2. Законы распределения для описания непрерывных случайных величин.....	13
1.4. Показатели безотказности работы изделий.....	19
1.4.1. Показатели безотказности для невозстанавливаемых изделий.....	19
1.4.2. Показатели безотказности для восстанавливаемых изделий.....	24
1.5. Показатели ремонтпригодности, долговечности и сохраняемости изделий.....	25
1.5.1. Показатели ремонтпригодности.....	25
1.5.2. Показатели долговечности.....	29
1.5.3. Показатели сохраняемости.....	30
1.6. Методика расчета эксплуатационной надежности изделий.....	33
1.6.1. Аналитический метод расчета показателей надежности.....	33
1.6.2. Расчет показателей надежности по статистическим данным.....	38
1.7. Методика решения задачи определения неизвестного закона распределения случайной величины.....	39
1.7.1. Первый этап: построение гистограммы.....	40
1.7.2. Второй этап: выбор теоретической функции плотности распределения.....	41
1.7.3. Третий этап: проверка согласия статистических данных и выбранной теоретической функции с помощью количественного критерия.....	42
2. Обеспечение надежности на этапах проектирования и изготовления изделий.....	50
2.1. Обеспечение надежности изделий на этапе проектирования.....	50
2.1.1. Система сбора данных по надежности.....	50
2.1.2. Анализ ошибок проектирования изделий.....	51
2.1.3. Обеспечение надежности при проектировании изделий.....	52
2.1.4. Повышение надежности изделий на этапе проектирования путем резервирования.....	53
2.2. Обеспечение надежности изделий на этапе производства.....	58
2.2.1. Анализ ошибок производства.....	58

2.2.2. Методы обеспечения надежности изделий на этапе производства.....	60
2.2.3. Испытания изделий на надежность.....	61
3. Обеспечение надежности изделий на этапе эксплуатации.....	64
3.1. Факторы, влияющие на надежность изделий при эксплуатации.....	64
3.2. Меры по обеспечению надежности изделий при эксплуатации.....	68
Часть вторая. Типовые задачи.....	72
Приложение 1. Контрольная работа.....	82
Приложение 2. Вопросы для самоконтроля.....	85
Приложение 3. Рабочая учебная программа для студентов дневного обучения (в сокращении).....	87
Приложение 4. Рабочая учебная программа для студентов заочного и вечернего обучения (в сокращении).....	92
Литература	100

Библиотека БГУИР

Учебное издание

Курулёв Александр Петрович

***НАДЕЖНОСТЬ ИЗДЕЛИЙ
ПРОМЫШЛЕННОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ***

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ

Редакторы *И. В. Ничипор, Е. И. Герман*

Корректор *Е. Н. Батурчик*

Компьютерная правка, оригинал-макет *В. М. Задоля*

Подписано в печать 08.04.2014. Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Гаймс».
Отпечатано на ризографе. Усл. печ. л. 6,16. Уч.-изд. л. 6,1. Тираж 100 экз. Заказ 143.

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий №1/238 от 24.03.2014.

ЛП № 02330/0494175 от 03.04.2009.

2200013, Минск, П. Бровки, 6