

Министерство образования и науки Российской Федерации  
ФГБОУ ВПО  
Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого

---

**Ф. В. Голик**

# **ОСНОВЫ ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ РЭА**

**Учебно-методическое пособие**



Великий Новгород  
2013

Министерство образования и науки Российской Федерации  
ФГБОУ ВПО  
Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого

---

**Ф. В. Голик**

# **ОСНОВЫ ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ РЭА**

**Учебно-методическое пособие**

Великий Новгород  
2013

**УДК 621.38 (075.8)**  
**ББК 32.85я73**

*Рецензент*

Доктор технических наук, профессор **Л. А. Рассветалов**

Основы теории надежности РЭА: Учеб.-метод. пособие / Сост. Ф. В. Голик, НовГУ им. Ярослава Мудрого. – Великий Новгород, 2013. – 52 с.

Рассмотрены основные положения теории надежности радиоэлектронных устройств и систем. Приведены расчетные формулы, используемые при оценке основных показателей надежности невосстанавливаемых, восстанавливаемых и резервированных объектов. Приведена методика ориентировочного расчета надежности, а также методические рекомендации по написанию раздела «Надежность» выпускной квалификационной работы бакалавра.

Содержание пособия отвечает образовательным стандартам и предназначено для подготовки бакалавров по направлению 210400.62 – «Радиотехника» по профилю «Радиотехнические средства передачи, приема и обработки сигналов».

**УДК 621.38 (075.8)**  
**ББК 32.85я73**

© ФГБОУ ВПО НовГУ им. Ярослава Мудрого, 2013  
© Голик Ф. В., 2013

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Проблема обеспечения надежности радиоэлектронной аппаратуры была сформулирована в 50-х годах 20-го века. С этого периода времени надежность и стоимость жизненного цикла стали главными целями в расчетах, проектировании, производстве и эксплуатации аппаратуры. Одновременно с формулировкой проблемы надежности появилась потребность разработки теории, позволяющей решать поставленную проблему. Так появилась теория надежности, которая к настоящему времени благодаря усилиям тысяч ученых приобрела законченный вид.

Теория надежности изучает природу и процессы возникновения отказов в технических системах и методы борьбы с этими отказами. На основании теории устанавливаются общие правила, которых следует придерживаться на стадиях разработки, производства и эксплуатации изделий.

Теория позволяет определять закономерности возникновения в изделиях различного рода отказов, разрабатывать методы проведения испытаний на надежность, находить эффективные способы контроля надежности, оптимизировать последовательность и периодичность профилактических работ при эксплуатации изделий.

По теории надежности существует обширная литература. Можно отметить фундаментальную работу коллектива авторов под редакцией И. А. Ушакова [1], которая содержит ответы практически на все вопросы, возникающие при решении проблем надежности.

Однако, несмотря на разнообразие литературы по теории надежности, испытывается недостаток в учебных пособиях, которые могут быть рекомендованы студентам, выполняющим расчет показателей надежности при выполнении курсовых и выпускных квалификационных работ. Настоящее пособие отвечает требованиям стандартов направления подготовки 210400.62 «Радиотехника».

В пособии приведены основные понятия и термины, используемые в теории надежности. Рассмотрены типовые законы распределения времени наработки и восстановления. Приведены методики расчета показателей надежности невосстанавливаемых, восстанавливаемых объектов, а также объектов с резервированием.

## ТЕРМИНЫ И ПОНЯТИЯ НАДЕЖНОСТИ [1]

Рассмотрим основные термины и определения, принятые в теории надежности.

### **Общие понятия**

**Объект** – техническое изделие определенного назначения, рассматриваемое в периоды проектирования, производства, испытаний и эксплуатации.

**Надежность** – свойство объекта способность выполнять заданные функции.

**Система** – объект, представляющий собой совокупность элементов, взаимодействующих в процессе выполнения определенного круга задач и взаимосвязанных функций.

**Элемент** системы – объект, представляющий собой простейшую часть системы, отдельные части которого не представляют самостоятельного интереса в рамках конкретного рассмотрения.

**Работоспособность** – состояние объекта, при котором он способен выполнять заданные функции, сохраняя значения параметров в пределах, установленных нормативно-технической документацией.

**Исправность** – состояние объекта, при котором он соответствует всем требованиям, установленным нормативно-технической документацией.

**Неработоспособность** – состояние объекта, при котором значение хотя бы одного заданного параметра, не соответствует требованиям нормативно-технической документации.

**Неисправность** – состояние объекта, при котором он не соответствует хотя бы одному из требований, установленных нормативно-технической документацией.

**Безотказность** – свойство объекта непрерывно сохранять работоспособность в течение некоторой наработки или в течение некоторого времени.

**Предельное состояние** – состояние объекта, при котором его дальнейшее применение по назначению должно быть прекращено из-за неустранимого нарушения требований безопасности или неустранимого отклонения заданных параметров за установленные пределы, недопустимого увеличения эксплуатационных расходов или необходимости проведения капитального ремонта.

**Долговечность** – свойство объекта сохранять работоспособность до наступления предельного состояния.

**Ремонтпригодность** – свойство объекта, заключающееся в его приспособленности к предупреждению и обнаружению отказов и повреждений, к восстановлению работоспособности и исправности в процессе технического обслуживания и ремонта.

**Повреждение** – событие, заключающееся в нарушении исправности объекта при сохранении его работоспособности.

**Отказ** – событие, заключающееся в нарушении работоспособности объекта.

**Восстановление** – процесс обнаружения и устранения отказа (повреждения) с целью восстановления его работоспособности (исправности).

**Восстанавливаемый объект** – объект, работоспособность которого в случае возникновения отказа подлежит восстановлению в рассматриваемых условиях.

**Невосстанавливаемый объект** – объект, работоспособность которого в случае возникновения отказа не подлежит восстановлению в рассматриваемых условиях.

**Показатель надежности** – техническая характеристика, количественным образом определяющая одно или несколько свойств, составляющих надежность объекта.

**Наработка** – продолжительность или объем работы объекта.

**Технический ресурс** – наработка объекта от начала его эксплуатации до достижения предельного состояния.

**Срок службы** – календарная продолжительность эксплуатации объекта от ее начала до наступления предельного состояния.

**Срок сохраняемости** – календарная продолжительность хранения и (или) транспортирования объекта в заданных условиях, в течение и после которой сохраняются значения установленных показателей в заданных пределах.

## **Характеристики отказов**

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

**Постепенный отказ** – отказ, характеризующийся постепенным изменением одного или нескольких основных параметров объекта.

**Независимый отказ элемента** – отказ элемента объекта, не обусловленный повреждениями или отказами других элементов объекта.

**Зависимый отказ элемента** – отказ элемента объекта, обусловленный повреждениями или отказами других элементов объекта.

**Полный отказ** – отказ, после возникновения которого использования объекта по назначению возможно, но при этом значения одного или нескольких основных параметров находятся вне допустимых пределов, т. е. работоспособность объекта понижена.

**Перемежающийся отказ** – многократно возникающий и самоустраняющийся отказ одного и того же характера.

**Конструкционный отказ** – отказ, возникающий вследствие ошибок конструктора.

**Производственный отказ** – отказ, возникающий вследствие нарушения или несовершенства технологического процесса изготовления объекта или комплектующего изделия.

**Эксплуатационный отказ** – отказ, возникающий вследствие нарушения установленных правил эксплуатации или вследствие влияния непредусмотренных внешних воздействий.

## **Резервирование**

**Резервирование** – метод повышения надежности объекта введением дополнительных элементов и функциональных возможностей сверх минимально необходимых для выполнения объектом заданных функций.

**Структурное резервирование** – метод повышения надежности объекта, предусматривающий использование избыточных элементов, входящих в физическую структуру объекта.

**Временное резервирование** – метод повышения надежности объекта, предусматривающий использование избыточного времени, выделенного для выполнения задачи.

**Информационное резервирование** – метод повышения надежности объекта, предусматривающий использование избыточной информации сверх минимально необходимой для выполнения задачи.

**Функциональное резервирование** – метод повышения надежности объекта, предусматривающий использование способности элементов выполнять дополнительные функции вместо основных или наряду с ними.

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

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

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

**Общее резервирование** – резервирование, при котором резервируется объект в целом.

**Раздельное резервирование** – резервирование, при котором резервируются отдельные элементы объекта или их группы.

**Скользящее резервирование** – резервирование замещением, при котором группа основных элементов объекта резервируется одним или несколькими резервными элементами, каждый из которых может заменить любой отказавший основной элемент в данной группе.

**Нагруженный резерв** – резервный элемент, находящийся в том же режиме, что и основной.

**Облегченный резерв** – резервный элемент, находящийся в менее нагруженном режиме, чем основной.

**Ненагруженный резерв** – резервный элемент, практически не несущий нагрузки.

**Восстанавливаемый резерв** – резервный элемент, работоспособность которого в случае отказа подлежит восстановлению в процессе функционирования объекта.

**Невосстанавливаемый резерв** – резервный элемент, работоспособность которого в случае отказа не подлежит восстановлению в рассматриваемых условиях функционирования объекта.

**Кратность резервирования** – отношение числа резервных элементов к числу резервируемых элементов объекта.

**Дублирование** – резервирование, при котором одному основному элементу придается один резервный.

### **Показатели безотказности и ремонтпригодности**

**Наработка до отказа** – вероятность того, что в пределах заданной наработки отказ объекта не возникнет.

**Средняя наработка до отказа** – математическое ожидание случайной наработки объекта до первого отказа.

**Средняя наработка между отказами** – математическое ожидание случайной наработки объекта между отказами.

**Средняя наработка на отказ** – отношение наработки восстанавливаемого объекта за некоторый период времени к математическому ожиданию числа отказов в течение этой наработки.

**Заданная наработка** – наработка, в течение которой объект должен безотказно работать для выполнения своих функций.

**Среднее время простоя** – математическое ожидание случайного времени вынужденного нерегламентированного пребывания объекта в состоянии неработоспособности.

**Среднее время восстановления** – математическое ожидание случайной продолжительности восстановления работоспособности.

**Нестационарный коэффициент готовности** – вероятность того, что объект окажется работоспособным в заданный момент времени, отсчитываемый от начала работы.

**Средний коэффициент готовности** – усредненное на заданном интервале времени значение нестационарного коэффициента готовности.

**Стационарный коэффициент готовности** – вероятность того, что восстанавливаемый объект окажется работоспособным в произвольно выбранный момент времени в установившемся режиме эксплуатации.



**Нестационарный коэффициент оперативной готовности** – вероятность того, что объект, находящийся в режиме ожидания, окажется работоспособным в заданный момент времени, отсчитываемый от начала работы, и начиная с этого момента времени будет работать безотказно в течение заданного интервала времени.

**Средний коэффициент оперативной готовности** – усредненное на заданном интервале значение нестационарного коэффициента оперативной готовности.

**Стационарный коэффициент оперативной готовности** – вероятность того, что восстанавливаемый объект окажется работоспособным в произвольный момент времени, и с этого момента будет работать безотказно в течение заданного интервала времени.

**Параметр потока отказов** – отношение числа отказов объекта за определенный момент времени к длительности этого интервала.

## **ЗАКОНЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СЛУЧАЙНЫХ ВЕЛИЧИН, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ В ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ [4]**

В теории надежности оперируют случайными величинами двух видов: непрерывными и дискретными. Непрерывные случайные величины описывают характеристики, связанные с наработкой. При анализе радиоэлектронных систем под наработкой чаще всего понимают время. Дискретными случайными величинами оперируют при анализе числа событий, например, количества отказов, возникших в течение заданного промежутка времени.

Случайные величины описываются своими законами распределения. Для непрерывных величин это функция распределения (интегральный закон)  $F_X(x) = \text{Ver}\{X < x\}$  и плотность распределения вероятностей (дифференциальный закон)  $f_X(x) = \frac{dF_X(x)}{dx}$ <sup>1</sup>.

Дискретные случайные величины описываются функцией распределения  $F_X(k) = \text{Ver}\{X < k\}$  и законом распределения  $p_k = \text{Ver}\{X = k\}$ .

В теории надежности оперируют понятиями отказа и работоспособности. Вероятность того, что объект не отказал при наработке  $x$  называют вероятностью безотказной работы, а ее зависимость от наработки – функцией надежности. В общем случае функция надежности равна:  $P(x) = 1 - F_X(x)$ .

Вид закона распределения случайной величины зависит от физических свойств объекта или принятой модели, описывающей состояния объекта.

К сожалению, на практике достоверно определить вид закона распределения удастся далеко не всегда. Однако основываясь на опыте или исходя из

---

<sup>1</sup> Для упрощения набора формул, обычно опускают индекс, указывающий на принадлежность закона конкретной величине  $X$ .

общих соображений, можно сформулировать качественные свойства случайных величин, характеризующих наработку, время восстановления и др.

Известно, что многие физические объекты в процессе эксплуатации подвержены износу. Это означает, что с течением времени увеличивается вероятность отказа и возрастает интенсивность отказов. Распределения, описывающие такого рода явления, называются стареющими.

Встречаются ситуации, когда с течением времени объекты улучшают свои свойства. В этом случае используют термин «молодеющие распределения».

Свойства старения (молодения) принято оценивать функцией интенсивности отказов (функции интенсивности). Она описывает вероятность отказа в течение малого промежутка времени, при условии, что отказ не наступил в начале промежутка и равна:

$$\lambda(x) = \frac{f_X(x)}{1 - F_X(x)}.$$

Если  $\lambda(x)$  растет с увеличением аргумента, то распределений стареющее, в противном случае молодеющее. И в то и другом случае процесс, описывающий состояние объекта нестационарный.

Ресурсные испытания и наблюдения над большими выборками объектов показывают, что в большинстве случаев функция интенсивности изменяется во времени так, как показано на рис. 1.

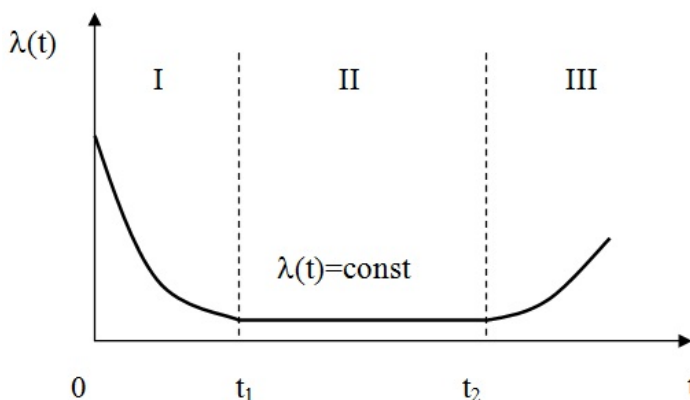


Рис. 1. Типичная кривая функции интенсивности

Из этой кривой видно, что весь период работы объекта можно условно поделить на три периода: период приработки, период нормальной эксплуатации, период износа.

Прирабочные отказы являются, как правило, результатом наличия у объекта дефектов и дефектных элементов, надежность которых значительно ниже требуемого уровня. При увеличении числа элементов в изделии даже при самом строгом контроле не удастся полностью исключить возможность попадания в сборку элементов, имеющих те или иные скрытые дефекты. Кроме то-

го, к отказам в этот период могут приводить и ошибки при сборке и монтаже, а также недостаточная освоенность объекта обслуживающим персоналом.

В период нормальной эксплуатации приработочные отказы уже закончились, а отказы, связанные с износом, еще не наступили. Этот период характеризуется исключительно внезапными отказами нормальных элементов, наработка на отказ которых очень велика.

Период нормальной эксплуатации заканчивается, когда начинают возникать износные отказы.

### **Закон распределения Пуассона**

Распределение Пуассона играет особую роль в теории надежности, поскольку оно описывает закономерность появления случайных отказов в сложных системах.

Случайная величина  $X$  распределена по закону Пуассона, если вероятность того, что она примет определенное значение  $k$ , выражается формулой

$$P_k = \frac{\lambda^k}{k!} e^{-\lambda}$$

где  $\lambda$  — параметр распределения (некоторая положительная величина);

$k = 0, 1, 2, \dots, m = 0, 1, 2, \dots$

Математическое ожидание и дисперсия равны  $M_X = D_X = \lambda$ .

Закон Пуассона однопараметрический. Графики закона распределения приведены на рис. 2.

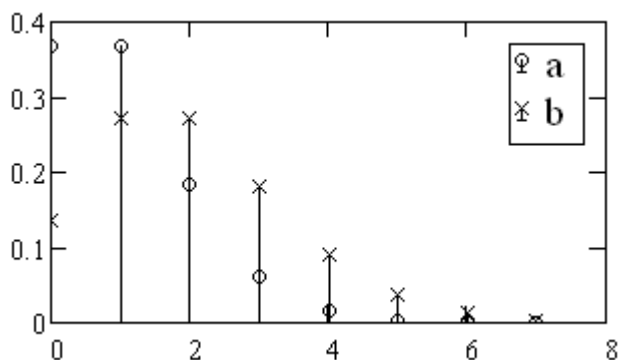


Рис. 2. Графики вероятности  $P_k$  при: (a)  $\lambda = 1$ , (b)  $\lambda = 2$ .

### **Экспоненциальное распределение**

Экспоненциальный закон распределения часто используют для оценки показателей надежности в период нормальной эксплуатации изделий, когда постепенные отказы еще не проявились и надежность характеризуется внезапными отказами. Эти отказы вызываются неблагоприятным стечением многих обстоятельств и поэтому имеют постоянную интенсивность.

Экспоненциальное распределение находит широкое применение в теории массового обслуживания, описывает распределение наработки на отказ сложных изделий, время безотказной работы элементов радиоэлектронной аппаратуры.

Широкое применение экспоненциального закона обусловлено простотой практического использования. Это объясняется наличием важного свойства величин, описываемых экспоненциальным законом. Оно называется свойством отсутствия последействия. В терминах теории надежности это означает, что при экспоненциальном законе вероятность безотказной работы зависит только от длительности интервала и не зависит от времени предшествующей работы.

Плотность распределения экспоненциального закона (рис. 3) описывается соотношением

$$f(x) = \lambda e^{-\lambda x}, x \geq 0;$$

а функция распределения (рис. 4):

$$F(x) = 1 - e^{-\lambda x};$$

функция надежности равна

$$P(x) = 1 - F(x) = e^{-\lambda x};$$

функция интенсивности

$$\lambda(x) = \lambda;$$

математическое ожидание

$$M_X = \int_0^{\infty} x \lambda e^{-\lambda x} dx = \frac{1}{\lambda};$$

дисперсия

$$D_X = \int_0^{\infty} x^2 \lambda e^{-\lambda x} dx - \frac{1}{\lambda^2} = \frac{1}{\lambda^2}.$$

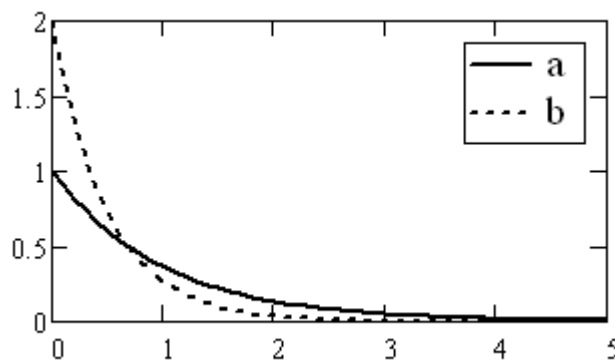


Рис.3. Графики плотности экспоненциального распределения при: (a)  $\lambda = 1$ , (b)  $\lambda = 2$ .

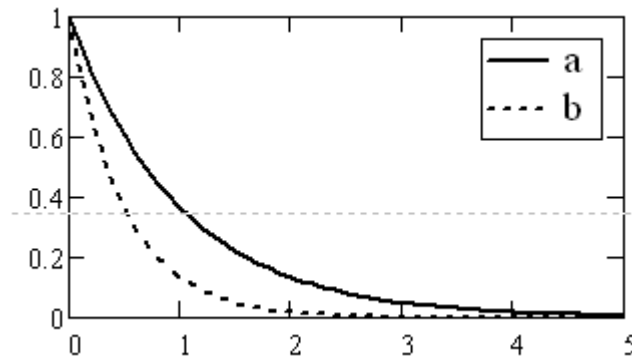


Рис. 4. Графики функции надежности при экспоненциальном распределении наработки при:  
(a)  $\lambda = 1$ , (b)  $\lambda = 2$ .

### Нормальный закон распределения

Нормальный закон распределения (закон Гаусса) играет важную роль и часто используется на практике. Он является предельным законом, к которому приближаются многие законы распределения. Случайная величина распределена по нормальному закону, если ее значение обусловлено влиянием многих, примерно равнозначных факторов.

В теории надежности его используют для описания постепенных отказов, когда распределение времени безотказной работы в начале периода эксплуатации имеет низкую плотность, затем максимальную и далее плотность снижается.

Нормальный закон распределения описывается плотностью вероятности

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}\right),$$

где  $m = \int_{-\infty}^{\infty} xf(x)dx$  - математическое ожидание и  $\sigma^2 = D_X = \int_{-\infty}^{\infty} (x-m)^2 f(x)dx$  - дисперсия, а  $\sigma = \sqrt{D_X}$  - среднее квадратическое отклонение.

Функция распределения имеет вид

$$F(x) = \int_{-\infty}^x f(t)dt = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp\left(-\frac{(t-m)^2}{2\sigma^2}\right)$$

а вероятность отказа и вероятность безотказной работы соответственно равны  $Q(x) = F(x)$  и  $P(x) = 1 - F(x)$ .

Определенный интеграл от плотности нормального распределения нельзя представить элементарными функциями. Поэтому для функции распределения составлены таблицы стандартного нормального распределения с параметрами  $m = 0$ ,  $\sigma = 1$ . При этом плотность вероятности имеет

$$f_0(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{z^2}{2\sigma^2}} \cdot z = \frac{x-m}{\sigma}.$$

Функция распределения соответственно запишется в виде:

$$F_0(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^z e^{-\frac{t^2}{2}} dt$$

Из этого уравнения следует, что  $F_0(z) + F_0(-z) = 1$  и  $F_0(-z) = 1 - F_0(z)$ .

Вместо интегральной функции распределения  $F_0(x)$  используется функция Лапласа

$$\Phi(z) = \int_0^z f_0(t) dt = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^z e^{-\frac{t^2}{2}} dt$$

Очевидно, что  $F_0(z) = \int_{-\infty}^0 f_0(t) dt + \int_0^z f_0(t) dt = 0.5 + \Phi(z)$ .

Вероятности отказа и безотказной работы, выраженные через функцию Лапласа, равны:

$$Q(x) = 0.5 + \Phi\left(\frac{x-m}{\sigma}\right), P(x) = 0.5 - \Phi\left(\frac{x-m}{\sigma}\right)$$

Вероятность попадания случайной величины  $X$  в заданный интервал значений от  $a$  до  $b$  равна:

$$Ver\{a < X < b\} = \Phi\left(\frac{b-m}{\sigma}\right) - \Phi\left(\frac{a-m}{\sigma}\right)$$

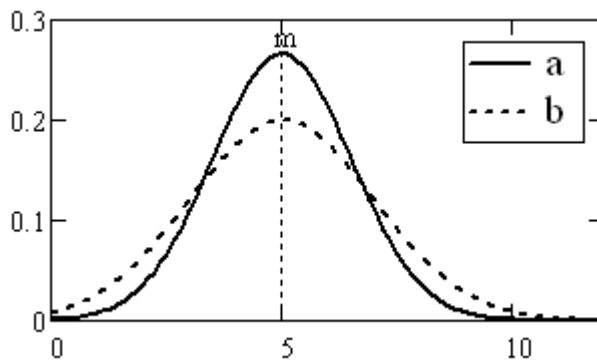


Рис. 5. Кривые плотности распределения нормальной случайной величины при: (a)  $m = 5, \sigma = 1.5$ , (b)  $m = 5, \sigma = 2$ .

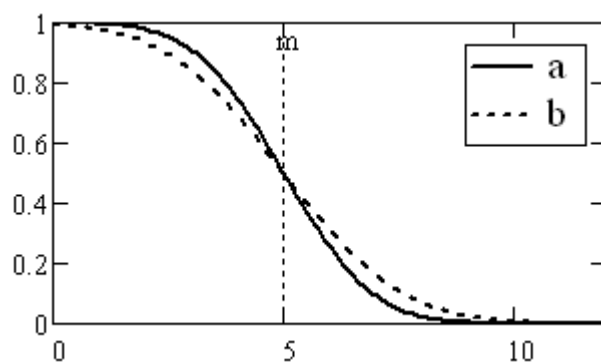


Рис. 6. Графики функции надежности при нормальном распределении наработки при: (a)  $m = 5, \sigma = 1.5$ , (b)  $m = 5, \sigma = 2$ .

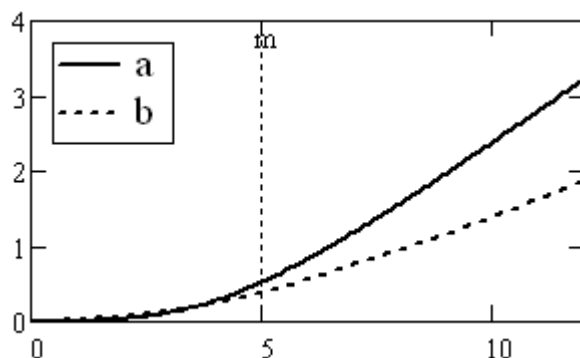


Рис. 7. Кривые функции интенсивности при нормальном распределении наработки при: (a)  $m = 5, \sigma = 1.5$ , (b)  $m = 5, \sigma = 2$ .

Из рис. 7 следует, что нормальное распределение относится к классу стареющих.

### **Логарифмически нормальное распределение**

Нормальная случайная величина может принимать значения на интервале  $(-\infty, \infty)$ , но наработка по определению не может быть отрицательной. Поэтому применимость распределения Гаусса в теории надежности ограничена. В некоторых случаях используют модель надежности в предположении, что логарифм наработки распределен по нормальному закону. Такая величина распределена по логарифмически нормальному распределению.

Это распределение применяют для описания наработки до отказа изделий с расходуемым ресурсом. К ним относятся практически все элементы, используемые в РЭА - электронные лампы, транзисторы, резисторы, электролитические конденсаторы и др.

Говорят, что неотрицательная случайная величина распределена логарифмически нормально, если ее логарифм распределен нормально. Плотность распределения описывается зависимостью

$$f(x) = \frac{1}{xd\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\ln x - m)^2}{2d^2}\right)$$

где  $m, d$  - параметры распределения.

Математическое ожидание и дисперсия соответственно равны:

$$M_X = \exp\left(m + \frac{d^2}{2}\right), D_X = \exp(2m + d^2) \cdot [\exp(d^2) - 1]$$

На рис. 8 и 9 приведены кривые плотность распределения и функции надежности при различных значениях параметра  $d$ .

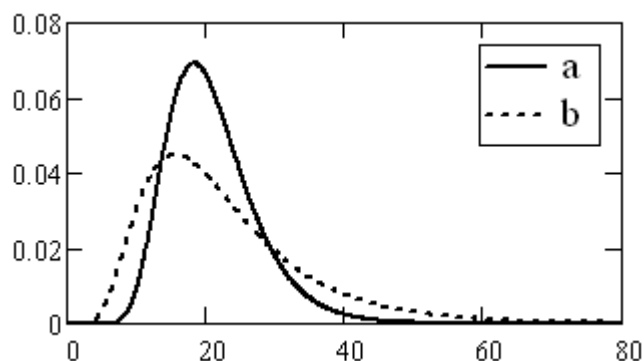


Рис. 8. Кривые плотности распределения логарифмически нормальной случайной величины при: (a)  $m = 3, d = 0.3$ , (b)  $m = 3, d = 0.5$ .

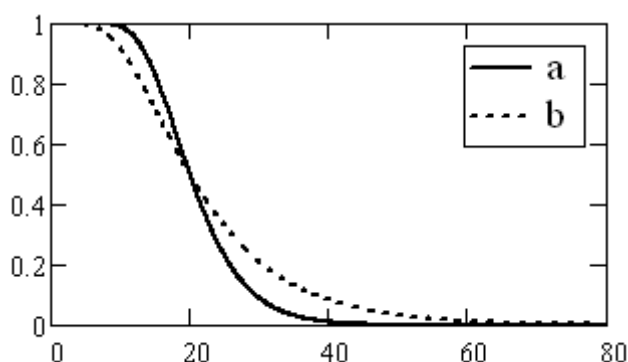


Рис. 9. Графики функции надежности логарифмически нормальной случайной величины при: (a)  $m = 3, d = 0.3$ , (b)  $m = 3, d = 0.5$ .

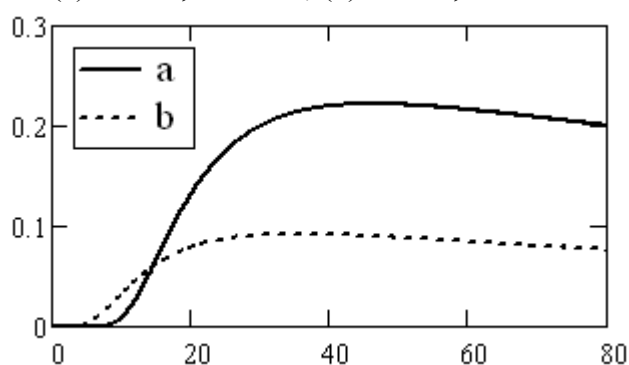


Рис. 10. Кривые функции интенсивности логарифмически нормальной случайной величины при: (a)  $m = 3, d = 0.3$ , (b)  $m = 3, d = 0.5$ .

Функция интенсивности имеет максимум. Это означает, что в начале периода эксплуатации объект описывается стареющим распределением, а затем молодеющим.



## Распределение Вейбулла

Закон Вейбулла представляет собой двухпараметрическое распределение. Этот закон является универсальным. При соответствующих значениях параметров он превращается в нормальное, экспоненциальное и другие виды распределений. В теории надежности распределение Вейбулла широко используется для описания времени безотказной работы технических устройств.

Плотность и функция распределения описываются зависимостями:

$$f(x) = \delta \lambda x^{\delta-1} \exp(-\lambda x^{\delta}), x \geq 0,$$

$$F(x) = 1 - \exp(-\lambda x^{\delta}), x \geq 0$$

где  $\delta$  — параметр формы кривой распределения;  $\lambda$  — параметр масштаба.

Графики плотности распределения и функции надежности приведены на рис. 10 и 11 соответственно.

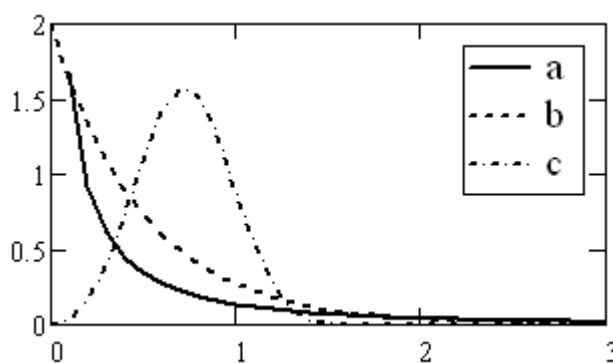


Рис. 11. Кривые плотности распределения Вейбулла: (a)  $\delta = 0.5, \lambda = 2$ ; (b)  $\delta = 1, \lambda = 2$ ;  $\delta = 3.3, \lambda = 2$

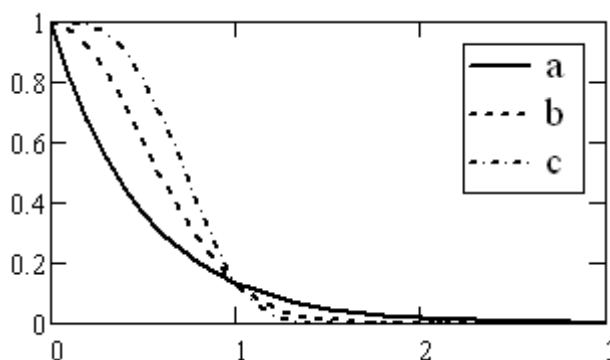


Рис. 12. Графики функции надежности распределения Вейбулла: (a)  $\delta = 0.5, \lambda = 2$ ; (b)  $\delta = 1, \lambda = 2$ ;  $\delta = 3.3, \lambda = 2$

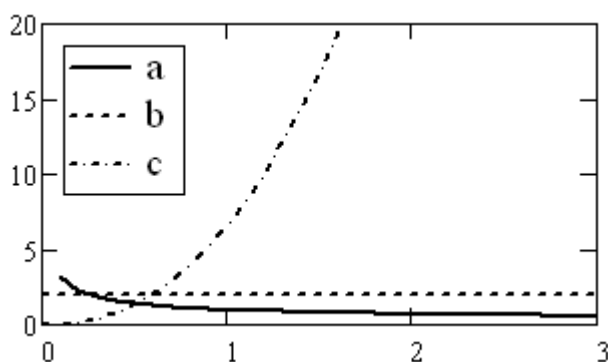


Рис. 13. Кривые функции интенсивности распределения Вейбулла: (a)  $\delta = 0.5, \lambda = 2$ ; (b)  $\delta = 1, \lambda = 2$ ; (c)  $\delta = 3.3, \lambda = 2$ .

Математическое ожидание и дисперсия равны:

$$M_X = \left(\frac{1}{\lambda}\right)^{\frac{1}{\delta}} \Gamma\left(1 + \frac{1}{\delta}\right), \quad D_X = \left(\frac{1}{\lambda}\right)^{\frac{2}{\delta}} \left[ \Gamma\left(1 + \frac{2}{\delta}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{\delta}\right) \right]$$

где  $\Gamma(z)$  - гамма-функция.

Распределение Вейбулла содержит дополнительный параметр  $\delta$ . Подбирая параметры  $\delta$  и  $\lambda$ , можно получить лучшее соответствие расчетных значений опытным данным по сравнению с экспоненциальным законом, который является однопараметрическим (параметр  $\lambda$ ).

Для изделий, у которых имеются скрытые дефекты, но которые длительное время не стареют, опасность отказа имеет наибольшее значение в начальный период, а потом быстро падает. Функция надежности для такого изделия хорошо описывается законом Вейбулла с параметром  $\delta < 1$ . Распределение молодое. Функция интенсивности убывает (см. рис. 13 а).

Если изделие хорошо контролируется при изготовлении и почти не имеет скрытых дефектов, но подвергается быстрому старению, то функция надежности описывается законом Вейбулла с параметром  $\delta > 1$ . Распределение стареющее (см. рис. 13 с). При  $\delta = 3.3$  распределение Вейбулла близко к нормальному.

При  $\delta = 1$  распределение Вейбулла превращается в экспоненциальное с постоянной функцией интенсивности (рис. 13 б).

### **Гамма-распределение**

Гамма-распределение занимает важное место в теории надежности вследствие своей универсальности. Его широко применяют при описании отказов стареющих элементов, времени восстановления, наработки на отказ резервированных систем. При различных параметрах гамма-распределение принимает разнообразные формы, что и объясняет его широкое применение.

Плотность вероятности и функция распределения определяются равенствами:

$$f(x) = \frac{\lambda^\alpha x^{\alpha-1}}{\Gamma(\alpha)} e^{-\lambda x}, \alpha > 0, \lambda > 0, x \geq 0, F(x) = \frac{\Gamma(\alpha, x\lambda)}{\Gamma(\alpha)}$$

где  $\Gamma(z, b)$  - неполная гамма-функция.

Графики плотности распределения и функции надежности приведены на рис. 10 и 11 соответственно.

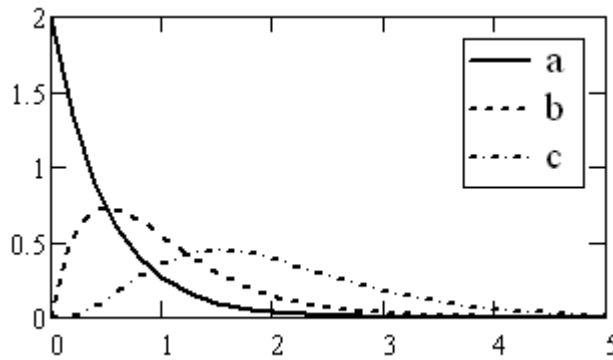


Рис. 14. Кривые плотности гамма-распределения: (a)  $\alpha = 1, \lambda = 2$ ; (b)  $\alpha = 2, \lambda = 2$ ; (c)  $\alpha = 4, \lambda = 2$

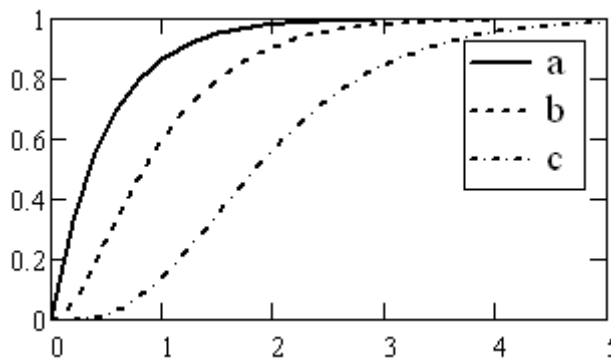


Рис. 15. Графики функции надежности гамма-распределения: (a)  $\alpha = 1, \lambda = 2$ ; (b)  $\alpha = 2, \lambda = 2$ ; (c)  $\alpha = 4, \lambda = 2$

При  $\alpha = 1$  гамма-распределение совпадает с экспоненциальным распределением. При  $\alpha > 10$  гамма-распределение приближается к нормальному. Если  $\alpha$  принимает значения произвольных целых положительных чисел, то такое гамма-распределение называют распределением Эрланга. Если  $\lambda = 1/2$ , а значение  $\alpha$  кратно  $1/2$ , то гамма-распределение совпадает с распределением  $\chi^2$  (хи-квадрат).

## ПОКАЗАТЕЛИ НАДЕЖНОСТИ

Количественные значения показателей надежности можно рассчитать, сделав определенные допущения относительно модели надежности — законах распределения времени наработки, восстановления, свойствах функций интенсивностей отказов и восстановлений и др. Понятно, что достоверность результатов зависит от степени адекватности модели. Поэтому для оценки показателей надежности используют и другой метод, основанный на испытаниях. Испытания на надежность заключаются в том, что определенное число изделий ставится на «прогон» и фиксируется число изделий, отказавших к концу испыта-

ний, а так же время наработки до отказа каждого изделия. Понятно, что достоверность результатов зависит, как и при любых статистических экспериментах, от объема выборки, т. е. от количества испытуемых изделий и времени испытаний. Эти параметры ограничены соображениями экономической целесообразности, обусловленной допустимыми затратами на испытания.

Ниже приводятся расчетные формулы как для теоретического (вероятностного) так и для экспериментального (статистического) методов оценки показателей надежности.

## **Невосстанавливаемые объекты [\[1\]](#)**

### **Обозначения**

$f_1(t)$  – плотность распределения времени наработки  $\xi$ .

$\xi_1$  – случайная наработка до первого отказа.

$F_1(t) = \text{Ver}\{\xi_1 < t\}$  – распределение времени до первого отказа.

$n(t)$  – число отказавших объектов к моменту времени  $t$ .

$N(t)$  – число работоспособных объектов к моменту времени  $t$ .

$\Delta n(t, t')$  – число объектов, отказавших на интервале времени  $[t, t']$ .

$\xi_1^{(i)}$  – реализация случайной величины  $\xi_1$  для  $i$ -го объекта.

1. Вероятность безотказной работы объекта в интервале времени от 0 до  $t_0$ .

Вероятностное определение

$$P(t_0) = P\{\xi_1 \geq t_0\} = 1 - F_1(t_0)$$

Статистическое определение

$$\hat{P}(t_0) = \frac{N(t_0)}{N(0)} = 1 - \frac{n(t_0)}{N(0)}$$

2. Вероятность отказа объекта в интервале времени от 0 до  $t_0$

$$Q(t_0) = 1 - P(t_0), \quad \bar{Q}(t_0) = 1 - \bar{P}(t_0)$$

3. Вероятность безотказной работы объекта в интервале времени от  $t$  до  $t + t_0$

Вероятностное определение

$$P(t, t + t_0) = P\{\xi_1 \geq t + t_0 \mid \xi_1 > t\} = \frac{P(0, t + t_0)}{P(0, t)} = \frac{P(t + t_0)}{P(t)}$$

Статистическое определение

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

4. Вероятность отказа объекта в интервале времени от  $t$  до  $t+t_0$

$$Q(t, t+t_0) = 1 - P(t, t+t_0) = \frac{P(t) - P(t+t_0)}{P(t)}$$

$$\hat{Q}(t, t+t_0) = 1 - \hat{P}(t, t+t_0)$$

5. Плотность распределения потока отказов

Вероятностное определение

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

Статистическое определение

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

6. Интенсивность отказов объекта в момент времени  $t$

Вероятностное определение

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

Статистическое определение

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

7. Средняя наработка объекта до отказа

Вероятностное определение

$$T_1 = M\{\xi_1\} = \int_0^{\infty} x f(x) dx = \int_0^{\infty} x dQ(x) = \int_0^{\infty} P(x) dx$$

Статистическое определение

$$\hat{T}_1 = \frac{1}{N(0)} \sum_{i=1}^{N(0)} \xi_1^{(i)}$$

## **Восстанавливаемые объекты [\[1\]](#)**

### **Обозначения**

$g(t)$  - плотность распределения времени восстановления;

$G(t) = P\{\eta \leq t\}$  - функция распределения времени восстановления;

$n(t, t')$  - число объектов, неработоспособных в момент времени  $t$ , или отказавших хотя бы один раз в интервале  $[t, t']$ ;

$n_g(t)$  - число объектов, восстановление которых длилось меньше времени  $t$ ;

$N_g(t)$  - число объектов, восстановление которых длилось больше времени  $t$ ;

$t_\infty$  - произвольный достаточно удаленный момент времени, соответствующий стационарному режиму случайного процесса;

$\Delta n_g(t, t')$  - число объектов, восстановление которых длилось больше  $t$ , но меньше  $t'$ ;

$\xi_k$  - случайная наработка (случайное время работы) объекта перед  $k$ -м отказом (после  $(k-1)$ -го восстановления);

$\xi_k^{(i)}$  - реализация  $\xi_k$  для  $i$ -го объекта;

$\eta_k$  - случайное время восстановления (простоя) объекта после  $k$ -го отказа;

$\eta^{(i)}$  -  $i$ -я реализация времени восстановления.

1. Средняя наработка между отказами.

Вероятностное определение

$$T = T_\infty = \lim_{k \rightarrow \infty} M\{T_k\} = \lim_{k \rightarrow \infty} \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k T_j$$

Здесь  $T_k$  - средняя наработка объекта от момента окончания  $(k-1)$ -го восстановления до  $k$ -го отказа, определяется как

$$T_k = M\{\xi_k\} = \int_0^\infty t f_k(t) dt = \int_0^\infty P_k(t) dt$$

Статистическое определение

$$\hat{T}_k = \frac{1}{N(0)} \sum_{i=1}^{N(0)} \xi_k^{(i)}$$

где  $N(0)$  – общее число объектов, начавших работать после  $(k-1)$ -го восстановления.

2. Параметр потока отказов (интенсивность потока)

$$\lambda = \frac{1}{T}$$

$T$  – средняя наработка между отказами в стационарном режиме.

Статистическое определение

$$\hat{\lambda} = \frac{1}{\hat{T}}$$

3. Средняя наработка на отказ

Вероятностное определение

$$T(t_0) = \frac{t_0}{M\{n(t_0)\}} - \text{отношение суммарной наработки } t_0 \text{ за данный период к}$$

математическому ожиданию числа отказов за этот же период.

Статистическое определение

$$\hat{T}(t_0) = \frac{t_0}{n(t_0)} - \text{отношение суммарной наработки } t_0 \text{ за время наблюдения}$$

за объектом к числу отказов за это же время.

4. Среднее время восстановления объекта.

Вероятностное определение

$$\tau = M\{\eta\} = \int_0^{\infty} tg(t)dt = \int_0^{\infty} [1 - G(t)]dt$$

Статистическое определение

$$\hat{\tau} = \frac{1}{N(0)} \sum_{i=1}^{N(0)} \eta^{(i)}$$

5. Интенсивность восстановления объекта в момент времени  $t$ , отсчитываемый от момента начала восстановления

Вероятностное определение

$$\mu(t) = \frac{g(t)}{1 - G(t)}$$

Статистическое определение

$$\hat{\mu}(t) = \frac{n_e(t + \Delta t) - n_e(t)}{N_e(t)\Delta t} = \frac{N_e(t + \Delta t) - N_e(t)}{N_e(t)\Delta t} = \frac{\Delta n_e(t, t + \Delta t)}{N_e(t)\Delta t}$$

- отношение числа восстановлений в интервале  $[t, t + \Delta t]$  к произведению числа объектов еще не восстановленных к моменту  $t$ , на длительность интервала времени  $\Delta t$ .

6. Нестационарный коэффициент оперативной готовности.

Вероятностное определение

$$R(t, t+t_0) = \sum_{k=1}^{\infty} P\{[t, t+t_0] \in \theta_k\}$$

- вероятность того, что объект окажется работоспособным в момент  $t$  и проработает безотказно в течение заданного времени  $t_0$ , или вероятность того, что интервал времени  $[t, t+t_0]$  целиком попадает внутрь одного из интервалов состояния работоспособности  $\theta_k, k=1,2,\dots$

Статистическое определение

$$\hat{R}(t, t+t_0) = \frac{N(0) - n(t, t+t_0)}{N(0)} = \frac{N(t, t+t_0)}{N(0)}$$

- отношение числа объектов, работоспособных в момент времени  $t$  и проработавших безотказно до момента времени  $t+t_0$  к общему числу объектов в момент времени  $t$ .

7. Стационарный коэффициент оперативной готовности или стационарная вероятность безотказной работы объекта в течение заданного времени.

Вероятностное определение

$$R(t_0) = \lim_{t \rightarrow \infty} R(t, t+t_0)$$

или для любого распределения наработки между отказами справедливо выражение

$$R(t_0) = \frac{1}{T + \tau} \int_{t_0}^{\infty} P_{\infty}(t) dt$$

где  $T$  – среднее значение наработки между отказами,  $\tau$  - среднее время восстановления, а  $P_{\infty}(t) = 1 - F_{\infty}(t)$ ,  $F_{\infty}(t)$  - функция распределения наработки между отказами в стационарном режиме.

Статистическое определение

$$\hat{R}(t_0) = \frac{N(t_{\infty}, t_{\infty} + t_0)}{N(0)}$$

- отношение числа объектов, работоспособных в произвольный достаточно удаленный момент времени и проработавших затем безотказно в течение заданного времени  $t_0$  к общему числу объектов.

8. Нестационарный коэффициент готовности объекта.

Вероятностное определение

$$K(t) = R(t, t_0 = 0)$$

- вероятность того, что в момент времени  $t$  объект находится в состоянии работоспособности.



Статистическое определение

$$\hat{K}(t) = \frac{N(t)}{N(0)} = 1 - \frac{n(t)}{N(0)}$$

- отношение числа объектов, находящихся в момент  $t$  в состоянии работоспособности к общему числу объектов.

#### 9. Стационарный коэффициент готовности

Вероятностное определение

$$K = \lim_{t \rightarrow \infty} K(t) = R(t_0 = 0) = \frac{T_{\infty}}{T_{\infty} + \tau}$$

Статистическое определение

$$\hat{K} = \frac{N(t_{\infty})}{N(0)} = 1 - \frac{n(t_{\infty})}{N(0)}$$

#### 10. Нестационарный коэффициент простоя

$$k(t) = 1 - K(t) \quad \text{и} \quad \hat{k}(t) = 1 - \hat{K}(t)$$

#### 11. Стационарный коэффициент простоя (коэффициент простоя)

$$k = 1 - K, \quad \hat{k} = 1 - \hat{K}.$$

### **Задание требований по надежности**

Одним из обязательных пунктов технического задания на объект является пункт, содержащий требования по надежности. Эти требования задаются по-разному в зависимости от вида объекта: системы, подсистемы или элемента. Ниже рассматриваются способы задания требований по надежности для объектов перечисленных выше типов.

#### **Задание требований на систему**

1. Экспертное задание основывается на инженерной интуиции и практическом опыте.

2. Задание требований по прототипу основывается на имеющейся статистической информации о надежности уже существующих технических объектов, близких к рассматриваемому по назначению, структуре и элементной базе.

3. Задание оптимального уровня надежности возможно, если:

- выходной эффект от функционирования системы измерим в тех же единицах, что и затраты на ее создание;
- достоверно известны данные о надежности элементной базы;
- полностью определены принципы построения как структуры, так и процессов функционирования системы (возможность резервирования, использова-

ние различной элементной базы, режим использования, регламент технического обслуживания и т. п.).

В этом случае задание требования по надежности сводится к максимизации целевой функции

$$F_k(R) = E_k(R) - C_k(R)$$

где  $R$  – показатель надежности системы, зависящий от выбранного  $k$ -го варианта структуры системы  $S_k$  и от надежности  $r_i$  элементов  $i$ -го типа:

$$R = R(S_k, r_i, k = 1, \dots, m, i = 1, \dots, n)$$

$m$  – число рассматриваемых вариантов структуры;

$n$  – число типов комплектующих элементов;

$E_k(R)$  – эффект от функционирования  $k$ -го варианта структуры системы в стоимостном выражении при уровне надежности  $R$ ;

$C_k(R)$  – затраты на обеспечение уровня надежности, равного  $R$ , для  $k$ -го варианта структуры системы.

Для корректной постановки задачи оптимизации необходимо ввести ограничение на предельные затраты или минимально допустимый уровень надежности.

### Задание требований на подсистему

Требования на подсистему задаются, если показатели надежности системы уже заданы (показатель надежности системы  $R$  известен).

1. Метод равномерного распределения. Если система состоит из  $N$  примерно близких по сложности подсистем, то можно заданный показатель надежности  $R$  распределить между подсистемами по правилу

$$R_i = \sqrt[N]{R}, i = 1, 2, \dots, N$$

При этом показатель надежности  $R$  должен иметь вероятностный смысл – вероятность безотказной работы или коэффициент оперативной готовности или коэффициент готовности.

Средняя наработка  $i$ -й подсистемы в этом случае приближенно равна  $T_i = NT$ , где  $T$  – средняя наработка системы.

2. Метод пропорционального распределения. Если  $n_i$  – число элементов  $i$ -й подсистемы, то

$$R_i = \sqrt[n_i]{R}, i = 1, 2, \dots, N, a_i = \frac{n_i}{\sum_{j=1}^N n_j}$$

Под  $n_i$  в этом случае следует понимать число в некотором смысле «приведенных» элементов. Если известны интенсивности отказов элементов  $j$ -го типа, то метод пропорционального распределения можно модифицировать, положив

$$a_i = \frac{\sum_{j=1}^M \lambda_j n_{i,j}}{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \lambda_j n_{i,j}}$$

где  $M$  – число типов элементов.

3. Метод оптимального распределения. Если при задании требований по надежности на систему в целом ( $R$ ) известны структура система ( $S$ ) и методы повышения надежности подсистем, т. е. функции  $R_i(C_i)$ , где  $C_i$  – ресурс, затрачиваемый на обеспечение надежности подсистемы, то можно найти оптимальное распределение требований по надежности для двух случаев:

- максимум показателя надежности системы при ограничении на суммарный ресурс  $C^0$ :

$$\max_C \left\{ R(S, R_i(C_i)) \mid \sum_{i=1}^N C_i \leq C^0 \right\}, C = (C_1, C_2, \dots, C_N)$$

- минимум затрат на систему при достижении заданного показателя надежности  $R^0$ :

$$\min \{ C(S, R_i(C_i)) \mid R^0 \}$$

Обе задачи решаются методами дискретного программирования, как задачи на условную оптимизацию.

## МЕТОДЫ РАСЧЕТА НАДЕЖНОСТИ

### *Надежность элемента*

Деление объектов на системы, подсистемы и элементы является относительным, зависящим от задач исследования и характера объекта. Например, при анализе надежности РЛС элементами можно считать отдельные блок, а при анализе радиолокационного комплекса сама РЛС может рассматриваться как элемент.

В теории надежности под элементом системы понимают самостоятельную и четко выделенную ее часть, дальнейшая детализация которой нецелесообразна.

## Невосстанавливаемый элемент

Простая система, разбиение которой в рамках проводимого исследования не имеет смысла, может рассматриваться как элемент. Для расчета показателей надежности элемента необходимо определить закон распределения наработки (см. раздел «Законы распределения случайных величин, используемые в теории надежности»).

1. **Экспоненциальное распределение.** В табл. 1 приведены основные показатели надежности для элемента с экспоненциальным распределением наработки до отказа.

Таблица 1

Невосстанавливаемый элемент. Экспоненциальное распределение наработки

| Показатель   | Точное значение        | Приближенное значение |
|--|------------------------|-----------------------|
| $P(t_0) = P(t, t + t_0)$<br>вероятность безотказной работы | $e^{-\lambda t_0}$     | $1 - \lambda t_0$     |
| $Q(t_0) = Q(t, t + t_0)$<br>вероятность отказа             | $1 - e^{-\lambda t_0}$ | $\lambda t_0$         |
| $T$<br>среднее время наработки                             | $\frac{1}{\lambda}$    | -                     |
| $\lambda(t)$<br>интенсивность отказов                      | $\lambda$              | -                     |

2. **«Стареющее распределение»** - распределение с возрастающей функцией интенсивности отказов (ВИФ). Используется при расчете элементов, которые в процессе эксплуатации расходуют ресурс. Происходит старение элемента. В этом случае удастся найти верхние и нижние границы вероятности безотказной работы. При этом полагают, что среднее время  $T$  наработки известно. Таблицы с граничными значениями вероятности безотказной работы приведены в [1].

3. **Вероятность безотказной работы при случайной длительности выполнения задачи.** Если время  $t_0$  выполнения элементом задачи является случайной величиной с плотностью распределения  $\omega(t)$ , то вероятность безотказной работы элемента можно записать в виде:

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

Выражения для  $P$  приведены в табл. 2. Через  $m_k$  обозначен  $k$ -й начальный момент распределения  $\omega(t)$ .

Таблица 2

Невосстанавливаемый элемент. Вероятность безотказной работы при случайной длительности выполнения задачи

| Распределение $\omega(t)$   | Точное выражение   | Приближенное выражение                                     |
|---|--|--|
| <p>Экспоненциальное</p> $\omega(t) = \frac{1}{t_0} e^{-\frac{1}{t_0} t}$                                    | $\frac{1}{1 - \lambda t_0}$                                    | $1 - \lambda t_0 + (\lambda t_0)^2$                        |
| <p>Нормальное</p> $\omega(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(t_0 - t)^2}{2\sigma^2}\right)$ | $\exp\left(-\lambda t_0 + \frac{\sigma^2 \lambda^2}{2}\right)$ | $1 - \lambda t_0 + \frac{\lambda^2 (t_0^2 + \sigma^2)}{2}$ |
| Произвольное  | $1 - \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k \frac{\lambda^k m_k}{k!}$      | $1 - \lambda t_0 + \frac{\lambda^2 (t_0^2 + \sigma^2)}{2}$ |

## Восстанавливаемый элемент

**1. Предварительные замечания.** Процесс функционирования восстанавливаемого элемента можно описать как последовательность чередующихся интервалов работоспособности и простоя:  $\xi_1, \eta_1, \xi_2, \eta_2, \dots$

Чаще всего полагают, что все  $\xi_i$  имеют одно и то же распределение  $F(t)$ , а все  $\eta_i$  распределение  $G(t)$ , причем все  $\xi_i, \eta_i$  взаимонезависимы.

**2. Произвольные распределения наработки до отказа и времени восстановления.** Значения средней наработки до отказа  $T$  и среднего времени восстановления  $\tau$  находятся стандартным образом на основании известных законов распределения  $F(t)$  и  $G(t)$ . Стационарный коэффициент готовности определяется как

$$K = \frac{T}{T + \tau}.$$

Стационарный коэффициент оперативной готовности

$$R(t_0) = \frac{1}{T + \tau} \int_{t_0}^{\infty} P(x) dx.$$

Если известно, что распределение наработки между отказами является стареющим (ВФИ), то оперативный коэффициент готовности  $R(t_0)$  имеет следующие нижнюю и верхнюю границы:

$$K \cdot \left(1 - \frac{t_0}{T}\right) \leq R(t_0) \leq K \exp\left(-\frac{t_0}{T}\right)$$

**3. Экспоненциальные распределения наработки между отказами  $F(t)$  и времени восстановления  $G(t)$ .** В табл. 3 приведены основные показатели надежности восстанавливаемого элемента для экспоненциальных законов распределения наработки между отказами  $F(t) = 1 - e^{-\lambda t}$  и времени восстановления  $G(t) = 1 - e^{-\mu t}$ . Коэффициенты  $K(t)$  и  $k(t)$  соответствуют случаю, когда в момент времени  $t = 0$  элемент находится в состоянии работоспособности. Коэффициенты  $K^0(t)$  и  $k^0(t)$  соответствуют случаю, когда в момент времени  $t = 0$  элемент находится в состоянии отказа.

Таблица 3

Восстанавливаемый элемент. Экспоненциальные распределения наработки между отказами и времени восстановления

| Показатель                                 | Точное значение   | Приближенное значение |
|--|---|-----------------------|
| $P(t_0)$<br>вероятность безотказной работы | $e^{-\lambda t_0}$                                      | $1 - \lambda t_0$     |
| $Q(t_0)$<br>вероятность простоя            | $1 - e^{-\lambda t_0}$                                  | $\lambda t_0$         |
| $T$<br>среднее время наработки             | $\frac{1}{\lambda}$                                     | -                     |
| $\tau$<br>среднее время восстановления     | $\frac{1}{\mu}$   | -                     |
| $K$<br>стационарный коэффициент готовности | $\frac{\mu}{\lambda + \mu} = \frac{T}{T + \tau}$        | -                     |
| $k$<br>стационарный коэффициент простоя    | $\frac{\lambda}{\lambda + \mu} = \frac{\tau}{T + \tau}$ | -                     |

|  |  |  |
|--|--|--|
| $K(t)$<br>оперативный коэффициент готовности                     | $K + ke^{-(\lambda+\mu)t}$                   | $1 - \frac{\lambda}{\mu}(1 - e^{-\mu t})$  |
| $K^0(t)$<br>оперативный коэффициент готовности                   | $K(1 - e^{-(\lambda+\mu)t})$                 | $\left(1 - \frac{\lambda}{\mu}\right)(1 - e^{-\mu t})$                             |
| $k(t)$<br>оперативный коэффициент простоя                        | $k(1 - e^{-(\lambda+\mu)t})$                 | $\frac{\lambda}{\mu}(1 - e^{-\mu t})$  |
| $k^0(t)$ оперативный коэффициент простоя                         | $k + Ke^{-(\lambda+\mu)t}$                   | $e^{-\mu t} + \frac{\lambda}{\mu}(1 - e^{-\mu t})$                                 |
| $R(t_0)$<br>стационарный оперативный коэффициент готовности      | $Ke^{-\lambda t_0}$                          | $1 - \frac{\lambda}{\mu} - \lambda e_0$  |
| $R(t, t_0)$<br>нестационарный оперативный коэффициент готовности | $(K + ke^{-(\lambda+\mu)t})e^{-\lambda t_0}$ | $\left[1 - \left(1 - \frac{\lambda}{\mu}\right)e^{-\mu t}\right](1 - \lambda t_0)$ |

## **Системы без восстановления**

### **Последовательное соединение элементов**

1. **Предварительные замечания.** При расчете надежности последовательным называется такое соединение элементов, при котором отказ хотя бы одного из них приводит к отказу всего соединения в целом. Последовательное соединение в указанном смысле не всегда совпадает с физическим соединением элементов.

2. **Система из независимых элементов.** Случайная наработка  $\theta^{(1)}$  до отказа системы из  $m$  последовательно соединенных невосстанавливаемых элементов определяется минимальным значением случайных наработок  $\theta_i^{(1)}$  ее элементов, т. е.

$$\theta^{(1)} = \min_{1 \leq i \leq m} \theta_i^{(1)}.$$

Если известны распределения наработок до отказа отдельных элементов, то для независимых элементов вероятность безотказной работы равна

$$P(t_0) = \prod_{i=1}^m P_i(t_0).$$

В общем случае точное значение средней наработки можно вычислить по формуле

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

Интенсивность отказов системы равна  $\Lambda = 1/T$ .

**3. Экспоненциальное распределение.** В табл. 4 приведены основные показатели надежности для системы с последовательным соединением невосстанавливаемых взаимно независимых элементов, у каждого из которых распределение времени наработки до отказа является экспоненциальным:

$$P_i(t_0) = e^{-\lambda_i t_0}$$

Интенсивность отказов системы равна  $\Lambda = \sum_{i=1}^m \lambda_i$ .

Таблица 4

Показатели надежности последовательной системы

| Показатель      | Точное выражение       |
|-----------------|------------------------|
| $P(t_0)$        | $e^{-\Lambda t_0}$     |
| $Q(t_0)$        | $1 - e^{-\Lambda t_0}$ |
| $P(t, t + t_0)$ | $e^{-\Lambda t_0}$     |
| $Q(t, t + t_0)$ | $1 - e^{-\Lambda t_0}$ |
| $T$             | $1/\Lambda$            |

**4. Последовательное соединение зависимых элементов.** Предположение о независимости элементов на практике часто оказывается неверным. Зависимость элементов может проявляться, если на все элементы одновременно оказывает влияние один и тот же внешний фактор – температура, вибрация, радиация и т. п. Расчет показателей надежности в этом случае весьма сложен и реализуется с использованием специализированных программ.

## Нагруженный резерв

**1. Предварительные замечания.** Предполагается, что отказы элементов обнаруживаются мгновенно после их возникновения и переключения на резерв



осуществляется без прерывания работы системы. При этом считается, что переключатель абсолютно надежен, а индикация отказа достоверна. Кроме того, считается, что при переходе на резервный элемент не возникают какие-либо переходные режимы, нарушающие нормальное функционирование системы.

**2. Резервирование одного основного элемента.** Структурная схема резервной группы, состоящей из одного основного и  $m$  ненагруженных резервных элементов, представлена на рис. 16.

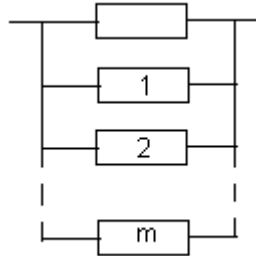


Рис. 16 Структурная схема из одного основного и  $m$  резервных элементов

#### Вероятность безотказной работы

$$P(t_0) = 1 - \prod_{i=1}^{m+1} q_i(t_0)$$

где  $q_i(t_0)$  - вероятность отказа  $i$ -го элемента за время  $t_0$ .

Для экспоненциального распределения наработки элементов до отказа, т. е. для  $q_i(t) = 1 - e^{-\lambda_i t}$  при малых  $t_0$  справедлива следующая простая оценка снизу:

$$\tilde{P}(t_0) = 1 - t_0^{m+1} \prod_{i=1}^{m+1} \lambda_i$$

Средняя наработка до отказа в общем случае может быть найдена только численным интегрированием по формуле

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

Для идентичных резервных элементов с экспоненциальным распределением наработки среднее время наработки равно

$$T = \lambda^{-1} \sum_{k=1}^{m+1} \frac{1}{k};$$

при большом  $m$  можно пользоваться приближенным выражением

$$\tilde{T} = \lambda^{-1} \left[ C + \ln(m+1) + (2m+2)^{-1} \right]$$

где  $C=0.577\dots$  - константа Эйлера.

**3. Скользящее резервирование.** Резервная группа состоит из  $n$  основных и  $m$  резервных элементов, находящихся в нагруженном режиме (рис.17). Расчетные формулы для показателей надежности приведены в [1, стр. 46]. Здесь приведем лишь выражение для среднего времени наработки до отказа системы с идентичными элементами и экспоненциальным распределением наработки:

$$T = \frac{1}{\lambda} \sum_{j=0}^m \frac{1}{n + m - j}.$$

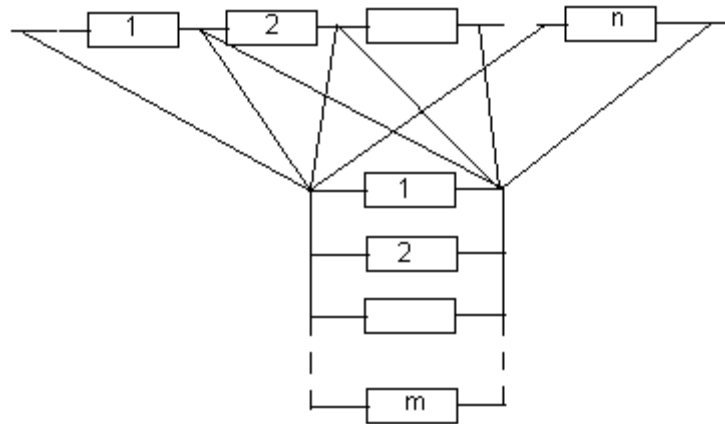


Рис. 17. Структурная схема из  $n$  основных и  $m$  резервных элементов

**4. Поэлементное резервирование.** Система состоит из  $n$  основных элементов, каждый из которых резервируется  $m_i$  элементами (рис. 18).

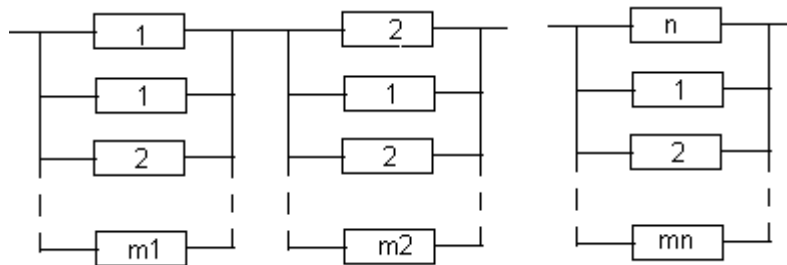


Рис. 18 Структурная схема системы с поэлементным резервированием

Вероятность безотказной работы  $i$ -й группы элементов равна

$$P_i(t_0) = 1 - \prod_{j=1}^{m_i+1} q_{j,i}(t_0),$$

а вероятность безотказной работы системы равна

$$P(t_0) = \prod_{i=1}^n P_i(t_0).$$

Для системы, состоящей из идентичных элементов и одинаковой кратностью резерва, формула упрощается

$$P(t_0) = [1 - q(t_0)^{m+1}]^n.$$

**5. Общее резервирование.** В этом случае резервируется вся система, состоящая из  $n$  последовательно соединенных основных элементов. Кратность резерва  $m$ . При отказе основного элемента заменяется вся система в целом (рис. 19).

Вероятность безотказной работы  $j$  системы (основной или резервной) равна

$$P_j(t_0) = \prod_{i=1}^n P_{i,j}(t_0),$$

а вероятность безотказной работы всей системы равна

$$P(t_0) = 1 - \prod_{j=1}^{m+1} [1 - P_j(t_0)].$$

При идентичных элементах

$$P(t_0) = 1 - [1 - p(t_0)^n]^{m+1}$$

где  $p(t_0)$  - вероятность безотказной работы элемента.

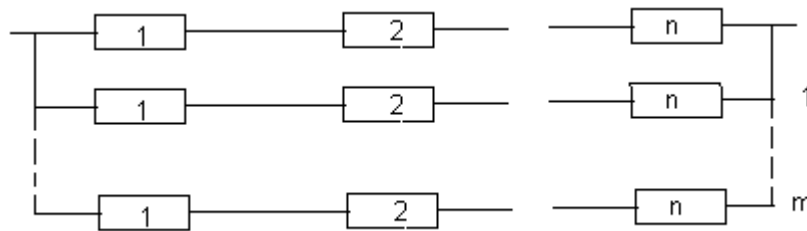


Рис. 19 Структурная схема системы с общим резервированием

### Ненагруженный резерв

1. Резервирование одного основного элемента. Вероятность безотказной работы резервной группы из одного основного и  $m$  одинаковых резервных элементов определяется по рекуррентной формуле

$$P(t_0) = r_{m+1}(t_0) = \int_0^{t_0} r_m(t_0 - x) f(x) dx$$

где  $f(x)$  - плотность распределения наработки до отказа.

Для экспоненциального распределения

$$P(t_0) = \sum_{k=0}^m \frac{(\lambda t_0)^{k+1}}{(k+1)!} e^{-\lambda t_0}$$

Средняя наработка до отказа системы равна

$$T_{\Sigma} = (m+1)T$$

2. Скользящее резервирование. Резервная группа состоит из  $n$  основных и  $m$  резервных элементов, которые находятся в ненагруженном режиме. Все элементы идентичные.

При экспоненциальном распределении наработки до отказа вероятность безотказной работы равна

$$P(t_0) = e^{-n\lambda t_0} \sum_{k=0}^{m+1} \frac{(n\lambda t_0)^k}{k!}.$$

Среднее время наработки системы:

$$T_{\Sigma} = \frac{m+1}{n} T.$$

### **Ориентировочный расчет нерезервированного функционального узла РЭА с учетом влияния внешних воздействий**

Надежность функционального модуля является одним из факторов, существенно влияющих на интенсивность отказа изделия в целом. При расчете показателей надежности необходимо учитывать зависимость интенсивности отказов элементов от конструкции, качества изготовления, условий эксплуатации и от электрических нагрузок в схеме.

Расчетные формулы:

- вероятность безотказной работы за время  $t_0$ :

$$P(t_0) = \exp(-\lambda_{\Sigma} t_0) \quad (1)$$

где  $\lambda_{\Sigma}$  - суммарная интенсивность отказов элементов схемы;

- средняя наработка до отказа:

$$T = \frac{1}{\lambda_{\Sigma}} \quad (2)$$

- интенсивность отказов  $\lambda_{\Sigma}$  объекта равна сумме интенсивностей отказов всех элементов. При расчете интенсивности удобно сгруппировать элементы по типу – резисторы, конденсаторы, катушки индуктивности и т. п. Кроме того, следует учесть интенсивность отказов печатной платы и паек.

Надежность элементов зависит от нагруженности, обусловленной режимом работы.

Коэффициенты нагрузки:

- для транзисторов

$$K_n = \frac{P_{\kappa}}{P_{\kappa \max}} \quad (3)$$

где  $P_k$  - фактическая мощность, рассеиваемая на коллекторе;  $P_{k\max}$  - максимально допустимая мощность рассеивания на коллекторе.

- для диодов

$$K_n = \frac{I}{I_{\max}} \quad (4)$$

где  $I$  - фактически выпрямленный ток;  $I_{\max}$  - максимально допустимый выпрямленный ток.

- для конденсаторов

$$K_n = \frac{U}{U_{\text{ном}}} \quad (5)$$

где  $U$  - фактическое напряжение;  $U_{\text{ном}}$  - номинальное напряжение конденсатора.

- для резисторов и трансформаторов

$$K_n = \frac{P}{P_{\text{ном}}} \quad (6)$$

где  $P$  - фактическая мощность рассеивания на радиокомпоненте;  $P_{\text{ном}}$  - номинальная мощность.

При увеличении коэффициента нагрузки, интенсивность отказа увеличивается. Интенсивность отказа увеличивается так же, если радиокомпонент эксплуатируется в более жестких условиях: с повышенной температурой окружающего воздуха и влажности, увеличенных вибрациях, ударах и т. д.

В настоящее время наиболее изучено влияние на надежность коэффициента нагрузки и температуры.

В табл. П1 приведены ориентировочные значения интенсивности отказов для некоторых групп радиокомпонентов<sup>2</sup>. Эти значения получены для случая, когда коэффициент нагрузки  $K_n=1$  и температура  $t = 20^\circ\text{C}$  и обозначаются  $\lambda_0$ .

Влияние на надежность фактического значения коэффициента нагрузки и температуры учитываем при помощи коэффициента влияния  $\alpha$ , значения которого для некоторых групп радиокомпонентов приведены в табл. П2.

Интенсивность отказов при заданном значении температуры окружающей среды и нагрузки определяется по формуле:

$$\lambda = \lambda_0 \alpha \quad (7)$$

### Исходные данные для расчета.

---

<sup>2</sup> Подробные справочные данные по надежности современной элементной базы приведены в [\[5\]](#).

1. Схема ЭП.
2. Перечень используемых компонентов.
3. Температура окружающей среды.
4. Фактические значения коэффициентов нагрузки.
5. Конструктивные особенности радиокомпонентов.

Для удобства расчета, однотипные компоненты, находящиеся при одинаковых (близких) температурах и работающих при одинаковых (близких) электрических нагрузках, можно объединять в одну группу.

Исходные и расчетные данные заносятся в табл. 5.

Таблица 5.

Расчет надежности функционального модуля.

| Наименование | Тип | Количество<br>n | $t^{\circ}, C$ | $K_n$ | $\alpha$ | $\lambda_0$ | $\lambda_i = \alpha\lambda_{0i}$ | $\lambda_{n,i} = \lambda_i n$ |
|--------------|-----|-----------------|----------------|-------|----------|-------------|----------------------------------|-------------------------------|
| 1            | 2   | 3               | 4              | 5     | 6        | 7           | 8                                | 9                             |

### Расчет

4. По данным, содержащимся в технических условиях на радиокомпонент, рассчитывается значение параметра, определяющего надежность, а так же структурную характеристику радиокомпонента (для транзистора - кремниевый, для конденсатора - керамический и т. д.). Эти данные заносятся в таблицу 5.

5. По [формулам \(3-6\)](#) определяются коэффициенты нагрузки.

6. По [табл. П2](#) определяют значение коэффициента  $\alpha$  при расчетной температуре окружающей среды и коэффициентах нагрузки из табл. 5.

7. Из [табл. П1](#) выбирают значения  $\lambda_0$  для радиокомпонентов схемы.

8. По [формуле \(7\)](#) рассчитывается интенсивность отказа  $\lambda_i$  каждой группы радиокомпонентов.

9. По формуле  $\lambda_{n,i} = n\lambda_i$ , где n - количество радиокомпонентов в группе, а  $\lambda_{n,i}$  - интенсивность отказов i-й группы радиокомпонентов, работающих в одинаковых условиях.

10. По формуле  $\lambda_{\Sigma} = \sum_{(i)} \lambda_{n,i}$  находят интенсивность отказов для всего устройства.

11. По [формуле \(2\)](#) определяется среднее время наработки до отказа.

12. При заданном времени, в течение которого изделие должно работать безотказно, определяется вероятность безотказной работы по [формуле \(1\)](#).

# МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО НАПИСАНИЮ РАЗДЕЛА "НАДЕЖНОСТЬ" КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ БАКАЛАВРА

Раздел "Надежность" является обязательным разделом пояснительной записки выпускной квалификационной работы бакалавра тематика, которой связана с разработкой радиоэлектронного устройства или системы. Его содержание зависит от конкретных особенностей проектируемого устройства или системы и определяется студентом по согласованию с руководителем. Однако в любом случае должны быть рассмотрены следующие вопросы:

- идентификация проектируемой системы (устройства) по классификационным признакам;
- расчет показателей надежности нерезервированной системы (устройства);
- обоснование методов повышения надежности и выбор модели;
- постановка задачи оптимизации надежности;
- математическая формулировка задачи;
- решение задачи;
- обсуждение результатов.

Рассмотрим указанные вопросы более подробно.

## ***Идентификация системы (устройства)***

Идентификация осуществляется по классификационным признакам.

Различают восстанавливаемые (ремонтируемые) и невосстанавливаемые (одноразового применения) системы (устройства).

По числу каналов различают одноканальные и многоканальные. В многоканальных системах каналы могут быть идентичными или неидентичными. В последнем случае отличие может быть структурным (каналы разной структуры) или функциональным (каналы выполняют функции, множества которых пересекаются частично). Неидентичные каналы, как правило, имеют неодинаковые показатели надежности.

В системах обработки информации процедура обработка обычно выполняется поэтапно. Каждый этап реализуется соответствующим устройством, которое может быть одно- или многоканальным. В теории надежности этапы обработки называют фазами. При этом система с многоэтапной последовательной обработкой называется многофазной.

Следующим классификационным признаком является признак наличия *очереди*, которая технически реализуется как буфер, предназначенный для накопления данных (сигналов). Очередь характеризуется *числом мест (объемом буфера)* и *организацией очереди*. Чаще всего используются стратегии:

- "первым пришел - первым обслужен";
- "последним пришел - первым обслужен".

Классификация по *типу потока* требований (заявок) является важной для систем обработки потоков сигналов. Требованием может быть единичный сигнал, группа сигналов, радиолокационная цель и т. п. По статистическим характеристикам потоки классифицируются по признакам стационарности, ординарности и степени последствия. Следует иметь в виду, что наиболее полно разработана теория для систем с простейшим (пуассоновским) потоком. Поэтому, если в техническом задании на проект нет прямого указания на невозможность применения в качестве модели потока простейший поток (например, сказано, что сигналы поступают с постоянным периодом), то следует использовать именно эту модель.

Требования могут иметь одинаковый или разный *приоритет* обслуживания. При классификации системы нужно указать на приоритеты требований, которые могут состоять в том, что при поступлении требования с более высоким приоритетом обслуживание требования с меньшим приоритетом прекращается. Возможны приоритеты по занятию места в очереди - приоритетное ставится в начало очереди. Могут быть и другие способы реализации приоритета.

И, наконец, системы классифицируются по типу и характеристикам *процедуры обслуживания*. Наиболее важными характеристиками являются вид закона распределения времени обслуживания и среднее время обслуживания. Наиболее полно исследованы системы с показательным (экспоненциальным) и вырожденным (постоянное время обслуживания) распределениями.

В результате выполнения данного параграфа должна быть сформулирована классификационная характеристика проектируемого устройства (системы). Она может содержать необязательно все перечисленные выше квалификационные признаки. Например, для вещательного радиоприемника она сводится к указанию только одного признака и формулируется следующим образом: *восстанавливаемое радиоэлектронное устройство*. Если проектируется многоканальный радиоприемник телеметрической информации с временным разделением каналов и амплитудно-импульсной модуляцией, то классификационная характеристика может выглядеть так: *восстанавливаемое многоканальное радиоэлектронное устройство с регулярным потоком требований, постоянным временем бесприоритетного обслуживания без очереди*. Если проектируется приемник цифровых сигналов, то в характеристике может появиться признак *с очередью и процедурой обслуживания "первым пришел - первым обслужен"*, если приемник содержит буферное устройство, информация с которого считывается в порядке поступления.

### ***Расчет показателей надежности нерезервированной системы***

Необходимо рассчитать основные показатели надежности проектируемого устройства, используя показательную (экспоненциальную) модель потока отказов. Расчет сводится к определению интенсивности отказов системы путем



суммирования интенсивностей отказов ее элементов ([см. раздел](#) «Ориентировочный расчет нерезервированного функционального узла РЭА с учетом влияния внешних воздействий»). При этом предполагается, что отказ любого элемента приводит к отказу системы. Если возможны частичные отказы, то это надо учесть, используя соответствующую методику расчета. По найденной интенсивности отказов системы рассчитать основные (заданные в техническом задании) показатели надежности. Сравнить найденные показатели с заданными в техническом задании и, если они не удовлетворяют требованиям, выбрать и обосновать методы повышения надежности, рассмотренные в следующем параграфе.

### ***Выбор и обоснование методов повышения надежности. Выбор модели***

В этом параграфе необходимо разработать методы повышения надежности, которые сводятся к выбору оптимальных по надежности схмотехнических и конструкторских решений, резервированию и обслуживанию в процессе эксплуатации.

Вопросы выбора схем и обоснования конструкции рассматриваются в соответствующих разделах пояснительной записки. Выбор методов резервирования и обслуживания должны быть рассмотрены в данном разделе.

Резервирование позволяет повысить надежность благодаря введению дополнительных (избыточных) элементов и функциональных возможностей сверх минимально необходимых. Различают:

- структурное резервирование - введение избыточных (резервных) элементов; применяют общее, раздельное и скользящее резервирование;
- временное резервирование - использование избыточного (дополнительного) времени для выполнения задачи;
- информационное резервирование - использование избыточной информации;
- функциональное резервирование - использование способности элементов выполнять дополнительные функции вместо основных или наряду с ними;
- нагрузочное резервирование - использование способности элементов воспринимать дополнительные нагрузки.

Понятно, что многие виды резервирования требуют внесения изменений в структурную и принципиальные схемы устройства (системы). Поэтому обоснование методов резервирования обычно выполняют на начальном этапе проектирования (эскизный проект).

Обслуживание в процессе эксплуатации заключается в профилактическом обслуживании и восстановлении (ремонте) отказавших элементов.

При выборе стратегии профилактического обслуживания задаются интервалом между контрольными проверками. В отдельных случаях контроль состояния системы может быть постоянным.

Стратегия восстановления зависит от назначения системы и условий ее эксплуатации. Различают ограниченное восстановление, при котором число ремонтных бригад меньше общего числа комплектов аппаратуры. Если за каждым комплектом закреплена отдельная ремонтная бригада, то восстановление неограниченное. Бригады могут работать с взаимопомощью и без взаимопомощи, ремонтируя только закрепленные за ними комплекты. Восстановление может начинаться сразу после выявления отказа или с задержкой. Это зависит от условий эксплуатации системы. Отказавший элемент (комплект) может заменяться на резервный автоматически с помощью контрольно-переключающего устройства (КПУ). При этом КПУ может иметь надежность, значительно более высокую, чем система (идеальное КПУ) или ограниченную надежность (ненадежное КПУ).

В результате анализа методов повышения надежности необходимо выбрать модель системы. Например: дублированная система с ограниченным обслуживанием и ненадежным КПУ.

В приложении 3 приведен перечень часто используемых моделей со ссылкой на литературу.

### ***Постановка задачи оптимизации надежности***

Задача оптимизации может быть сформулирована одним из следующих способов:

- **обеспечить максимум надежности при условии, что стоимость системы не превышает допустимого (заданного) значения;**
- **спроектировать систему минимальной стоимости при условии, что ее надежность не менее заданной.**

Переменные, по которым осуществляется оптимизация в зависимости от выбранной модели могут быть:

- число резервных комплектов;
- тип стратегии обслуживания;
- величина резервного времени;
- типы основного и резервного комплектов, отличающиеся надежностью и стоимостью;
- типы ремонтных бригад, отличающиеся производительностью и затратами на их содержание.

Возможны и другие переменные, которые используются в конкретных моделях надежности.

Стоимость системы зависит от затрат, в состав которых обычно входят:

- стоимость основного и резервного комплектов;
- затраты на восстановление и обслуживание системы;
- затраты, обусловленные применением штрафных санкций при отказе системы, ее простое, при потере информации.

Кроме указанных выше формулировок задачи оптимизации на практике часто встречается задача оптимального распределения показателей надежности по структурным элементам системы ([см раздел](#) «Задание требований по надежности»). Например, при проектировании многоканальной системы обработки информации задается вероятность правильного приема сигнала (требования). Необходимо определить показатели надежности каналов, при которых гарантируется правильный прием сигнала с заданной вероятностью.

*Выбор конкретного варианта задачи осуществляет студент по согласованию с руководителем.*

В заключение этого параграфа должна быть дана словесная формулировка задачи оптимизации.

### **Математическая формулировка задачи**

На основании результатов, полученных в предыдущих параграфах, необходимо сформулировать задачу в математической форме.

Обязательными пунктами такой формулировки являются:

- краткое словесное описание модели надежности системы;
- задание целевой функции (функции, подлежащей оптимизации - стоимость, основной показатель надежности или показатели надежности структурных элементов);
- исходные данные - значения варьируемых переменных и ограничения на стоимость или надежность;
- аналитические соотношения для показателей надежности, используемых в модели.

### **Решение задачи оптимизации**

Необходимо разработать алгоритм решения задачи и реализовать его в среде любого из доступных и обладающих необходимыми вычислительными возможностями программных средств.

### **Обсуждение результатов**

В этом параграфе следует привести сводные результаты оптимизации, представленных в виде таблиц, графиков. Необходимо сформулировать выводы, из которых должно быть ясно, что дало решение задачи оптимизации и какие еще существуют пути улучшения характеристик системы.

## Список литературы

### Основная литература

1. Надежность технических систем: Справочник / Ю. К. Беляев, В. А. Богатырев, В. В. Болотин и др.; под ред. И. А. Ушакова. – М.: Радио и связь, 1985. – 608 с., ил.
2. Овчаров Л.А. Прикладные задачи теории массового обслуживания.- М.: Машиностроение.- 1969.
3. Надежность обслуживаемых радиоэлектронных систем. / Демьянчук В.С., Броди С.М.- Киев: Вища школа.-1976.
4. Случайные процессы в параметрических моделях надежности / Е. С. Переверзев. – Киев: Наук. думка, 1987. – 240 с.
5. Яипурин Н. П. Основы надежности электронных средств: учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений /Н. П. Яипурин, А. В. Баранова; под ред. Н. П. Яипурина. – М.: Издательский центр «Академия», 2010. – 240 с.

### Дополнительная литература

6. Гуськов, А.В., Милевский, К.Е. Надежность технических систем и техногенный риск: учеб. пособие: ч. 2 / А.В. Гуськов, К.Е. Милевский. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2004. – 152 с.
7. Голинкевич Т. А. Прикладная теория надежности: Учебник для вузов. – М.: Высш. Шк., 1985. – 168 п., ил.
8. Екимов А. В. , Ревяков М. И. Надежность средств электроизмерительной техники. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние. 1986. – 208 с.: ил.
9. Кеджян Г. А. Прогнозирование надежности микроэлектронной аппаратуры на основе БИС. – М.: Радио и связь, 1987. – 152 с.: ил.
10. Ивлев В. В. Надежность систем из однотипных элементов. – М.: Радио и связь, 1986. -96 с.: ил.
11. Ксенз С. П. Диагностика и ремонтпригодность радиоэлектронных средств. – М.: Радио и связь, 1989. – 248 с.: ил.
12. Давыдов П. С. Техническая диагностика радиоэлектронных устройств и систем. М.: - Радио и связь, 1988. – 256 с.: ил.

## ПРИЛОЖЕНИЕ 1 Интенсивность отказов радиокомпонентов

Таблица П1

| Наименование радиокомпонентов.                    | Интенсивность отказов ( $\lambda_0 10^6$ ). |                  |
|---|---|------------------|
| 1   | 2   |                  |
| Диоды.  | Для германие-вых                            | Для кремние-вых. |
| Выпрямительные точечные.                          | 0,7   | 2                |
| Выпрямительные микроплоскостные.                  |   | 0,7              |
| Выпрямительные плоскостные.                       |   | 5,0              |
| Выпрямительные плоскостные повышенной надежности. |   | 2,5              |
| Импульсные точечные.                              |   |                  |
| Мезодиоды.  | 3   |                  |
| Импульсные сплавные.                              | 2   | 2,5              |
| Стабилитроны.                                     |   | 0,6              |
| Варикапы.   |   | 5                |
| Выпрямительные столбы.                            |   | 5                |
|   | 4.2   | 4,5              |
| Транзисторы.                                      |   |                  |
| Маломощные НЧ.                                    |   |                  |
| Мощные НЧ.  | 3   | 4                |
| Маломощные ВЧ.                                    | 4.6   |                  |
| Мощные ВЧ.  | 2.6   |                  |
| Микромодульные.                                   | 5   | 1,7              |
| Полевые.  | 1   | 1                |
| Микросхемы.                                       |   |                  |
| Полупроводниковые ИС.                             |   | 8                |
| Полупроводниковые БИС.                            |   | 0,8*10           |
| Гибридные тонкопленочные.                         |   | 10               |
| Гибридные толстопленочные.                        |   | 10               |
|   |   | 10               |
| Непроволочные резисторы.                          |   |                  |
| МЛТ-0,25.   |   |                  |
| МЛТ-0,5.  |   | 0,4              |
| МЛТ-1,0.  |   | 0,5              |
| ВС-0,5.   |   | 1,0              |
| ВС-1,0.   |   | 0,8              |
| ТВО-1,0.  |   | 1,35             |
| СП-1,0.   |   | 0,45             |
| СПО-1,0.  |   | 0,8              |
|   |   | 0,7              |

Продолжение табл. П1

| Наименование радиокомпонентов.   | Интенсивность отказов ( $\lambda_0$ ). |
|----------------------------------|--|
| 1                                | 2                                      |
| Проволочные резисторы.           |  |
| ПЭВ 2 ... ПЭВ 100                | 2,6 - 12,0                             |
| ПКВ-2 ... ПЭВ-5                  | 2,0 - 2,5                              |
| ПТН-1                            | 1,4                                    |
| ПП 3                             | 10,0                                   |
| РП-2                             | 3,0                                    |
| Конденсаторы.                    |  |
| Бумажные.                        | 2,0                                    |
| Металлобумажные.                 | 1,8                                    |
| Слюдяные.                        | 1,2                                    |
| Стеклянные.                      | 1,6                                    |
| Керамические.                    | 1,4                                    |
| Пленочные.                       | 2,0                                    |
| Электролитические алюминиевые.   | 2,4                                    |
| Электролитические танталовые.    | 2,2                                    |
| Моточные изделия.                |  |
| Автотрансформаторы.              | 5,0                                    |
| Импульсные.                      | 0,5                                    |
| Дроссели.                        | 1,0                                    |
| Катушки индуктивности.           | 0,5                                    |
| Линии задержки.                  | 5,0                                    |
| Соединители.                     |  |
| РМ.                              | 0,003                                  |
| СНЦ.                             | 0,002                                  |
| РН.                              | 0,02                                   |
| СНП.                             | 0,005                                  |
| Переключатели и другие элементы. |  |
| Кнопочные.                       | 20,0                                   |
| Пакетные.                        | 50,0                                   |
| Галетные.                        | 30,0                                   |
| Микровыключатели.                | 30,0                                   |
| Тумблеры.                        | 70,0                                   |
| Предохранители.                  | 12,0                                   |
| Держатели предохранителей.       | 0,2                                    |
| Разъемы штепсельные.             | 0,5                                    |
| Разъемы коаксиальные.            | 0,04                                   |
| Гнезда контактные.               | 0,2                                    |
| Лампы сигнальные.                | 0,3                                    |
| Ламповые панели.                 | 10,0                                   |
| Пайка.                           | 0,004                                  |
| Волноводная секция.              | 1,5                                    |
| Вывод высокочастотный.           | 2,6                                    |
| Магниты.                         | 5,6                                    |

## ПРИЛОЖЕНИЕ 2 Коэффициенты влияния $\alpha$

Таблица П2

| t°, C | Значение $\alpha$ при различных значениях $K_H$ . |             |             |             | Наименование элементов                            |
|-------|---|-------------|-------------|-------------|---|
| 1     | 2   | 3           | 4           | 5           | 6   |
| 20    | $K_H = 0,2$                                       | $K_H = 0,4$ | $K_H = 0,7$ | $K_H = 1,0$ | резисторы типа<br>ОВС, ОМЛТ, МТ, СПО,<br>УЛИ, УЛМ |
| 40    | 0,18  | 0,22        | 0,52        | 1,0         |   |
| 60    | 0,2   | 0,3         | 0,62        | 1,3         |   |
| 20    | 0,2   | 0,42        | 0,9         | 2,2         | плёночные<br>углеродистые<br>резисторы            |
| 40    | $K_H = 0,2$                                       | $K_H = 0,4$ | $K_H = 0,7$ | $K_H = 1,0$ |   |
| 60    | 0,3   | 0,4         | 0,6         | 1,0         |   |
| 20    | 0,4   | 0,6         | 0,8         | 2,0         | композиционные<br>резисторы                       |
| 40    | 0,57  | 0,75        | 1,0         | 4,0         |   |
| 60    | $K_H = 0,2$                                       | $K_H = 0,4$ | $K_H = 0,7$ | $K_H = 1,0$ |   |
| 20    | 0,78  | 0,79        | 0,9         | 1,0         | проволочные<br>резисторы                          |
| 40    | 0,81  | 0,9         | 1,2         | 1,4         |   |
| 60    | 1,2   | 1,4         | 1,6         | 2,0         |   |
| 20    | $K_H = 0,25$                                      | $K_H = 0,5$ | $K_H = 0,7$ | $K_H = 1,0$ | переменные<br>проволочные<br>резисторы            |
| 40    | 0,1   | 0,1         | 0,3         | 1,0         |   |
| 60    | 0,3   | 0,4         | 0,7         | 1,4         |   |
| 20    | 0,4   | 0,6         | 1,1         | -           | конденсаторы<br>с бумажной изоляцией              |
| 40    | $K_H = 0,3$                                       | $K_H = 0,5$ | $K_H = 0,8$ | $K_H = 1,0$ |   |
| 60    | 0,1   | 0,20        | 0,55        | 1,0         |   |
| 20    | 0,11  | 0,25        | 0,65        | 1,2         | конденсаторы<br>со слюдяным<br>изолятором         |
| 40    | 0,12  | 0,35        | 0,75        | 1,3         |   |
| 60    | $K_H = 0,3$                                       | $K_H = 0,5$ | $K_H = 0,8$ | $K_H = 1,0$ |   |
| 20    | 0,045   | 0,08        | 0,5         | 1,1         | конденсаторы<br>СКМ                               |
| 40    | 0,06  | 0,09        | 0,65        | 2,2         |   |
| 60    | 0,07  | 0,12        | 0,85        | 4,0         |   |
| 20    | $K_H = 0,2$                                       | $K_H = 0,4$ | $K_H = 0,8$ | $K_H = 1,0$ | конденсаторы<br>с керамическим<br>изолятором      |
| 40    | 0,1   | 0,18        | 0,45        | 1,0         |   |
| 60    | 0,12  | 0,3         | 0,62        | 1,7         |   |
| 20    | 0,3   | 0,65        | 1,0         | 2,8         | K50-3   |
| 40    | $K_H = 0,2$                                       | $K_H = 0,4$ | $K_H = 0,7$ | $K_H = 1,0$ |   |
| 60    | 0,2   | 0,6         | 0,6         | 1,0         |   |
| 20    | 0,3   | 6,6         | 0,7         | 1,5         | электrolитические<br>танталовые                   |
| 40    | 0,5   | 0,7         | 1,7         | 3,0         |   |
| 60    | $K_H = 0,2$                                       | $K_H = 0,4$ | $K_H = 0,7$ | $K_H = 1,0$ |   |
| 20    | 0,01  | 0,1         | 0,35        | 1,0         |   |
| 40    | 0,05  | 0,1         | 0,4         | 1,35        |   |
| 60    | 0,08  | 0,13        | 0,6         | 1,8         |   |
| 20    | $K_H = 0,3$                                       | $K_H = 0,5$ | $K_H = 0,8$ | $K_H = 1,0$ |   |
| 40    | 0,65  | 0,45        | 0,8         | 1,0         |   |
| 60    | 1,0   | 0,65        | 1,2         | 2,0         |   |
| 20    | 2,8   | 2,0         | 3,8         | 5,8         |   |
| 40    | $K_H = 0,4$                                       | $K_H = 0,7$ | $K_H = 0,8$ | $K_H = 1,0$ |   |
| 60    | 0,2   | 0,38        | 0,55        | 1,0         |   |
| 20    | 0,35  | 0,45        | 0,65        | 1,3         |   |
| 40    | 0,5   | 0,65        | 1,0         | 2,7         |   |
| 60    |   |             |             |             |   |

Продолжение табл. П2

|       |                       |                      |                       |                      |                                     |
|-------|-----------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|-------------------------------------|
| t°, C | K <sub>н</sub> = 0,2  | K <sub>н</sub> = 0,4 | K <sub>н</sub> = 0,6  | -                    |                                     |
| 20    | 0,3                   | 0,4                  | 0,6                   | -                    | катушки индуктивности               |
|       | K <sub>н</sub> = 0,2  | K <sub>н</sub> = 0,4 | K <sub>н</sub> = 0,8  | -                    | трансформаторы                      |
| 20    | 0,1                   | 0,2                  | 0,3                   | -                    |                                     |
| 40    | 0,1                   | 1,0                  | 2,0                   | -                    |                                     |
| 60    | 0,1                   | 1,0                  | 6,0                   | -                    |                                     |
|       | K <sub>н</sub> = 0,25 | -                    | K <sub>н</sub> = 0,5  | K <sub>н</sub> = 1,0 | плоскостные<br>германиевые<br>диоды |
| 20    | 0,25                  | -                    | 0,55                  | 1,1                  |                                     |
| 30    | 0,4                   | -                    | 0,7                   | 1,4                  |                                     |
| 40    | 0,7                   | -                    | 1,4                   | 4,9                  |                                     |
| 50    | 2,0                   | -                    | 6,5                   | -                    |                                     |
|       | K <sub>н</sub> = 0,25 | -                    | K <sub>н</sub> = 0,5  | K <sub>н</sub> = 1,0 | кремниевые<br>точечные<br>диоды     |
| 20    | 0,1                   | -                    | 0,5                   | 1,0                  |                                     |
| 40    | 0,18                  | -                    | 0,38                  | 1,3                  |                                     |
| 60    | 0,3                   | -                    | 1,2                   | 1,8                  |                                     |
|       | K <sub>н</sub> = 0,25 | K <sub>н</sub> = 0,5 | K <sub>н</sub> = 0,75 | K <sub>н</sub> = 1,0 | плоскостные<br>кремниевые<br>диоды  |
| 20    | 0,18                  | 0,29                 | 0,55                  | 1,0                  |                                     |
| 40    | 0,19                  | 0,45                 | 0,85                  | 1,6                  |                                     |
| 60    | 0,2                   | 0,8                  | 1,4                   | -                    |                                     |
|       | K <sub>н</sub> = 0,2  | K <sub>н</sub> = 0,4 | K <sub>н</sub> = 0,7  | K <sub>н</sub> = 1,0 | германиевые<br>транзисторы          |
| 20    | 0,25                  | 0,4                  | 0,7                   | 1,0                  |                                     |
| 40    | 0,4                   | 0,6                  | 1,25                  | 1,7                  |                                     |
| 60    | 0,6                   | 0,95                 | 1,6                   | 2,6                  |                                     |
|       | K <sub>н</sub> = 0,25 | K <sub>н</sub> = 0,5 | K <sub>н</sub> = 0,75 | K <sub>н</sub> = 1,0 | германиевые<br>ВЧ транзисторы       |
| 20    | 0,1                   | 0,3                  | 0,4                   | 1,0                  |                                     |
| 40    | 0,12                  | 0,35                 | 0,8                   | 1,7                  |                                     |
| 60    | 0,2                   | 0,7                  | 1,5                   | 2,6                  |                                     |
|       | K <sub>н</sub> = 0,2  | K <sub>н</sub> = 0,4 | K <sub>н</sub> = 0,8  | K <sub>н</sub> = 1,0 | кремниевые<br>транзисторы           |
| 20    | 0,15                  | 0,2                  | 0,65                  | 1,0                  |                                     |
| 40    | 0,15                  | 0,2                  | 0,75                  | 1,2                  |                                     |
| 60    | 0,15                  | 0,25                 | 0,85                  | 1,45                 |                                     |
|       | K <sub>н</sub> = 0,2  | K <sub>н</sub> = 0,4 | K <sub>н</sub> = 0,8  | K <sub>н</sub> = 1,0 | кремниевые<br>ВЧ транзисторы        |
| 20    | 0,3                   | 0,5                  | 0,8                   | 1,1                  |                                     |
| 40    | 0,4                   | 0,7                  | 1,1                   | 1,3                  |                                     |
| 60    | 0,7                   | 1,2                  | 2,0                   | 2,4                  |                                     |



## **ПРИЛОЖЕНИЕ 3** Модели надежности восстанавливаемых систем с резервом

1. n-канальная система массового обслуживания с отказами и простейшим потоком требований. [2, стр. 104...121].

2. n-канальная система массового обслуживания с отказами и недостоверным обслуживанием. Поток требований - простейший. [2, стр. 122...127].

3. n-канальная система массового обслуживания с отказами и полной взаимопомощью между каналами. Поток требований простейший. [2, стр. 127...141].

4. n-канальная система массового обслуживания с отказами и частичной взаимопомощью между каналами. Поток требований простейший. [2, стр. 141...151].

5. n-канальная система массового обслуживания с отказами и случайным распределением заявок по всем каналам. Поток требований простейший. [2, стр. 151...156].

6. n-канальная система массового обслуживания с отказами, взаимопомощью между каналами и отсутствием информации о результатах обслуживания. Поток требований простейший. [2, стр. 156...171].

7. n-канальная система массового обслуживания с ожиданием. Потоки требований и обслуживаний простейшие. [2, стр. 173...192].

8. n-канальная система массового обслуживания с ожиданием и полной взаимопомощью между каналами. Потоки требований и обслуживаний простейшие. [2, стр. 192...204].

9. Одноканальная система массового обслуживания с ожиданием и приоритетом в обслуживании. Потоки требований и обслуживаний простейшие. [2, стр. 204...213].

10. n-канальная система массового обслуживания с отказами, ограниченным временем пребывания заявки в системе и упорядоченным обслуживанием. Потоки требований и обслуживаний простейшие. [2, стр. 215...219].

11. n-канальная система массового обслуживания с отказами, ограниченным временем пребывания заявки в системе, упорядоченным обслуживанием и возможностью "дообслуживания" заявки. Потоки требований и обслуживаний простейшие. [2, стр. 219...231].

12. n-канальная система массового обслуживания с ожиданием, ограниченным временем пребывания заявки в системе и взаимопомощью между каналами. Потоки требований и обслуживаний простейшие. [2, стр. 232...237].

13. n-канальная система массового обслуживания с ограниченным временем нахождения заявки в очереди и неограниченным временем нахождения заявки на обслуживании. Потоки требований и обслуживаний простейшие. [2, стр. 237...243].

14. n-канальная система массового обслуживания с ограниченным временем нахождения заявки на обслуживании и неограниченным временем нахождения заявки в очереди. Поток требований простейший. [2, стр. 243...246].

15. Замкнутая система массового обслуживания без взаимопомощи между каналами. Поток требований простейший. [2, стр. 275...288].

16. Замкнутая система массового обслуживания с частичной взаимопомощью между каналами. Поток требований простейший. [2, стр. 288...295].
17. Замкнутая система массового обслуживания с полной взаимопомощью между каналами. Поток требований простейший. [2, стр. 296...298].
18. Дублированные РЭС с идеальным КПУ. Ограниченное восстановление. [3, стр. 32...43].
19. Дублированные РЭС с идеальным КПУ. Неограниченное восстановление. [3, стр. 43...61].
20. Дублированные РЭС с КПУ ограниченной надежности. Ограниченное восстановление. [3, стр. 61...70].
21. Дублированные РЭС с КПУ ограниченной надежности. Неограниченное восстановление. [3, стр. 70...79].
22. Дублированные РЭС с разнонадежными комплектами. [3, стр. 79...85].
23. Дублированные РЭС с ограниченным контролем работоспособности. [3, стр. 85...87].
24. Системы с неавтоматизированным введением резерва. [3, стр. 89...91].
25. Резервированные многоканальные системы, восстанавливаемые с задержкой. [3, стр. 91...95].
26. Системы с автоматизированным введением резерва. [3, стр. 95...100].
27. Системы с поэлементным скользящим резервом. [3, стр. 100...103].
28. Системы с дублированием на различных уровнях. [3, стр. 103...105].
29. Резервированные системы с профилактическим обслуживанием. [3, стр. 106...111].
30. Радиально-узловые системы передачи информации. [2, 119...123]. Файл 30@mcd.
31. Оптимизация кратности резервирования многоканальных РТС. [3, стр. 123...128].
32. Нерегулярно используемая многоканальная РТС. [3, стр. 128...131].
33. Нерегулярно используемая РТС с ограничением на время пребывания требования. [3, стр. 131...134].
34. Нерегулярно используемая РТС с ограничением на длину очереди. [3, стр. 134...137].
35. Дублированные системы, обслуживающие случайный поток требований. Одновременное обслуживание не более одного требования. [3, стр. 137...141].
36. Дублированные системы, обслуживающие случайный поток требований. Одновременное обслуживание более одного требования. [3, стр. 141...142].
37. Система ограниченной надежности с обслуживанием приоритетных потоков. [3, стр. 143...144].
38. Система ограниченной надежности с обслуживанием неприоритетных потоков. [3, стр. 144...146].
39. Методика определения требований по надежности к РТС. [3, стр. 146...149].
40. Двухфазные РЭС ограниченной надежности с ожиданием. [3, стр. 149...152].

41. Двухфазные РЭС ограниченной надежности с частичной потерей требований. [3, стр. 152...154].
42. Многофазные системы с параллельными каналами ограниченной надежности. [3, стр. 154...156].
43. Одноканальные системы с резервом времени и необесценивающими отказами. [1, стр. 133...149].
44. Одноканальные системы с резервом времени и обесценивающими отказами. [1, стр. 149...153].
45. Одноканальные системы с резервом времени и случайной загрузкой. [3, стр. 153...159].
46. Многоканальные системы с резервом времени. [1, стр. 159...169].

## СОДЕРЖАНИЕ

|   |    |
|---|----|
| ПРЕДИСЛОВИЕ .....   | 4  |
| ТЕРМИНЫ И ПОНЯТИЯ НАДЕЖНОСТИ [1] .....  | 4  |
| Общие понятия.....  | 4  |
| Характеристики отказов .....  | 6  |
| Резервирование .....  | 7  |
| Показатели безотказности и ремонтпригодности.....   | 8  |
| ЗАКОНЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СЛУЧАЙНЫХ ВЕЛИЧИН, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ В ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ [4].....                             | 9  |
| Закон распределения Пуассона .....  | 11 |
| Экспоненциальное распределение .....  | 11 |
| Нормальный закон распределения .....  | 13 |
| Логарифмически нормальное распределение .....   | 15 |
| Распределение Вейбулла .....  | 17 |
| Гамма-распределение.....  | 18 |
| ПОКАЗАТЕЛИ НАДЕЖНОСТИ.....  | 19 |
| Невосстанавливаемые объекты [1].....  | 20 |
| Восстанавливаемые объекты [1].....  | 21 |
| Задание требований по надежности .....  | 25 |
| Задание требований на систему.....  | 25 |
| Задание требований на подсистему.....   | 26 |
| МЕТОДЫ РАСЧЕТА НАДЕЖНОСТИ.....  | 27 |
| Надежность элемента.....  | 27 |
| Невосстанавливаемый элемент.....  | 28 |
| Восстанавливаемый элемент .....   | 29 |
| Системы без восстановления.....   | 31 |
| Последовательное соединение элементов.....  | 31 |
| Нагруженный резерв .....  | 32 |
| Ненагруженный резерв .....  | 35 |
| Ориентировочный расчет нерезервированного функционального узла РЭА с учетом влияния внешних воздействий ..... | 36 |
| МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО НАПИСАНИЮ РАЗДЕЛА "НАДЕЖНОСТЬ" КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ БАКАЛАВРА.....                | 39 |
| Идентификация системы (устройства).....   | 39 |
| Расчет показателей надежности нерезервированной системы.....  | 40 |
| Выбор и обоснование методов повышения надежности. Выбор модели .....  | 41 |
| Постановка задачи оптимизации надежности .....  | 42 |
| Математическая формулировка задачи.....   | 43 |
| Решение задачи оптимизации.....   | 43 |
| Обсуждение результатов.....   | 43 |
| Список литературы .....   | 44 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ 1 Интенсивность отказов радиокомпонентов .....   | 45 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ 2 Коэффициенты влияния $\alpha$ .....  | 47 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ 3 Модели надежности восстанавливаемых систем с резервом .....                                      | 49 |