ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»

Кафедра конструирования и производства радиоаппаратуры

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к практическим работам по дисциплине
«Методы и устройства испытания ЭС»
для студентов направлений 12.03.01 «Приборостроение»
(профиль «Приборостроение)
и 11.03.03 «Конструирование и технология электронных средств»
(профиль «Проектирование и конструирование радиоэлектронных средств)
очной формы обучения

Воронеж 2016

Составители: канд. техн. наук Л.Н. Никитин,
канд. техн. наук И.С. Бобылкин

УДК 621.382

Методические указания к практическим работам по дисциплине «Методы и устройства испытания ЭС» для студентов направления 12.03.01 «Приборостроение» (профиль «Приборостроение) и 11.03.03 «Конструирование и технология электронных средств» (профиль «Проектирование и конструирование радиоэлектронных средств) очной формы обучения / ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»; сост. Л.Н. Никитин, И.С. Бобылкин. Воронеж, 2016. 37 с.

Методические указания содержат краткие теоретические и практические сведения о проведение испытаний на воздействие тепла, холода и механической нагрузки.

Методические указания подготовлены в электронном виде и содержатся в файле Практ. раб.pdf.

Табл. 1. Ил. 14. Библиогр.: 11 назв.

Рецензент канд. физ.-мат. наук, доц. В.С. Скоробогатов

Ответственный за выпуск зав. кафедрой д-р техн. наук, проф. А.В. Муратов

Издается по решению редакционного-издательского совета Воронежского государственного технического университета

© ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», 2016

ВВЕДЕНИЕ

Целью практических работ является закрепление и расширение знаний, полученных студентами при изучении дисциплины «Методы и устройства испытания ЭС». К выполнению практических и лабораторных работ допускаются студенты, подготовленные к занятиям.

Для оказания максимальной помощи студентам в овладении методами определения надежности ЭС приводятся необходимый комплект вопросов для пяти практических и шести лабораторных работ:

• первая практическая работа содержит основные термины и определения;

• вторая практическая работа содержит характеристики надежности радиоэлектронных средств (РЭС) при внезапных отказах;

• третья практическая работа содержит законы распределения случайных величин, используемых при анализе надежности РЭС;

• четвертая практическая работа содержит описание структурных схем надежности РЭС;

• пятая практическая работа содержит вопросы резервирования РЭС.

Лабораторные работы отражают наиболее важные разделы курса и имеют единую структуру. Перед выполнением лабораторной работы следует ознакомиться с требованиями и последовательностью ее выполнения, изложенными в настоящих указаниях.

Отчеты по лабораторным работам и все необходимые расчеты к ним, в том числе с применением ЭВМ, каждый студент выполняет отдельно.

Методические указания предназначены для бакалавров, обучающихся по направлению 12.03.01 «Приборостроение» и 11.03.03 «Конструирование и технология ЭС». Они могут быть также использованы бакалаврами других направлений при выполнении различных видов учебных занятий и в самостоятельной работе.

ПРАКТИЧЕСКИЕ РАБОТЫ

1. ОСНОВНЫЕ ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ

1.1. Понятия надежности

Рост сложности радиоэлектронной аппаратуры после второй мировой войны привел к снижению ее надежности, что стимулировало, в свою очередь, развитие соответствующего научного направления — теории надежности [1].

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

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

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

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

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

Работоспособность - состояние изделия, при котором оно

способно выполнять заданные функции с параметрами, установленными требованиями технической документации.

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

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

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

Сохраняемость - свойство изделия поддерживать свои эксплуатационные показатели в течение и после срока хранения и транспортировки, установленного технической документацией [2].

1.2. Отказы и неисправности

Отказ - случайное событие, заключающееся в нарушении работоспособности изделия.

Отказы классифицируются по различным признакам.

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

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

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

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

Самоустраняющиеся отказы проявляются в виде сбоя или в форме перемежающегося отказа. *Сбоем* называется однократно возникающий и самоустраняющийся отказ. Отказ представляет собой один из видов неисправности изделия. Неисправность — это несоответствие изделия одному или нескольким требованиям, предъявляемым к нему техническими условиями. Причем не все неисправности являются отказами. Неисправности, которые не приводят к отказу в процессе эксплуатации, называются дефектами.

1.3. Системы и элементы

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

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

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

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

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

По характеру влияния отказов элементов на выходной параметр системы подразделяются на простые и сложные. *Простые* системы при отказе элементов либо полностью теряют работоспособность, либо продолжают выполнять свои функции в полном объеме, если отказавший элемент зарезервирован. Такие системы могут находиться только в двух состояниях: рабочем и нерабочем. *Сложные* системы обладают способностью при отказе элементов выполнять свои функции, но с меньшей эффективностью, т.е. они могут находиться в нескольких рабочих состояниях. К сложным системам обычно относятся многоканальные комплексы с разветвленной структурой, состоящие из нескольких самостоятельных, но взаимосвязанных устройств, например компьютерные сети.

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

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

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

Контрольные вопросы

1. Какие нормативные документы устанавливают терминологию в теории надежности?
2. Дайте определение понятия надежности ЭС.
3. Что такое работоспособность, долговечность, безотказность, ремонтопригодность и сохраняемость ЭС?
4. Что называется отказом ЭС?
5. Какие виды отказов ЭС вы знаете?
6. Что представляет собой сбой в ЭС?
7. Что называется системой в ЭС?
8. Какие виды систем используются в ЭС?
9. Какие системы являются простыми и какие сложными?
10. Что называется элементом в ЭС?
11. Определите, к какому виду относятся следующие неисправности телевизора:

а) при включении перегорел предохранитель;
б) четкость изображения ухудшилась;
в) иногда изображение распадается на отдельные крупноразмерные фрагменты.

2. ХАРАКТЕРИСТИКИ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ ПРИ ВНЕЗАПНЫХ ОТКАЗАХ

2.1. Единичные показатели безотказности

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

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

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

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

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

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

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

Функция *P*(*t*) обладает следующими основными свойствами:

$$0 \leq P(t) \leq 1, P(0) = 1, \lim_{t\to\infty} P(t) = 0.$$

Типичный график функции P(t), называемый в литературе кривой убыли изделий, приведен на рис. 1.

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

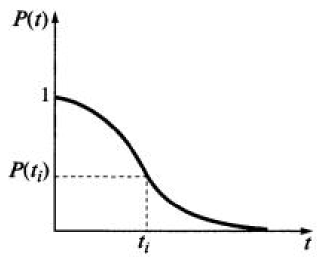

Рис.1. Изменение вероятности безотказной работы изделия во времени

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

где *N*(*t*) – число изделий, исправных на момент времени *t*;
N_0 – общее число изделий, поставленных на испытания;
n(*t*) — число изделий, отказавших в интервале времени (0, *t*).
При $N_0 \to \infty$ функции (2.1) и (2.2) будут равны.

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

Условная вероятность определяется по следующей формуле:

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

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

Статистически условная вероятность безотказной работы определяется выражением откуда очевидно, что при t_0=0 она преобразуется к виду (2).

$$\overline{P}(t_0, t) = N(t)/N(t_0), \qquad (2.4)$$

Помимо основного показателя $P(t)$ в теории надежности используются и следующие вспомогательные показатели: вероятность отказа $Q(t)$ и ее производная по времени $\phi(t)$ - плотность распределения наработки до отказа.

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

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

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

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

Статистически вероятность отказа определяется отношением

$$\overline{Q}(t) = n(t)/N_0. \qquad (2.7)$$

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

$$\phi(t) = \mathrm{dQ}(t)/\mathrm{dt}, \qquad (2.8)$$

или с учетом (4)

$$\phi(t) = -\mathrm{dP}(t)/\mathrm{dt}, \qquad (2.9)$$

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

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

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

(2.10)

где $\Delta n(t)$ - число отказов в интервале времени Δt. Особенностью данного показателя является наличие размерности [1/ч].

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

$$P_\gamma = 1 - \int_0^{T_\gamma} \phi(t)\mathrm{dt}. \tag{2.11}$$

Статистическое определение гамма-процентной наработки следующее:

$$\overline{P}(T_\gamma) = \overline{P}_\gamma = N(T_\gamma)/N_0, \tag{2.12}$$

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

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

$$\lambda(t) = \frac{\mathrm{dQ}(t)}{\mathrm{dt}} \cdot \frac{1}{1-Q(t)} = \frac{\phi(t)}{P(t)}, [1/\text{ч}]. \tag{2.13}$$

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

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

$$\overline{\lambda}(t) = \frac{n(t+\Delta t) - n(t)}{N(t)\Delta t} = \frac{\Delta n}{N(t)\Delta t}, [1/\text{ч}], \tag{2.14}$$

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

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

Опыт эксплуатации РЭС показывает, что изменение интенсивности отказов системы длительного действия происходит следующим образом (рис. 2.):

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

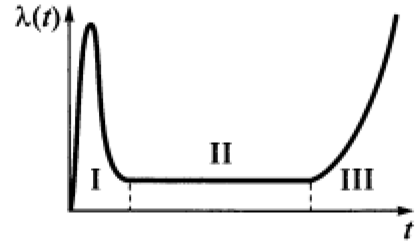

Рис. 2. Кривая жизни системы: I – период приработки; II – период нормальной эксплуатации; III – период массового износа и старения

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

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

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

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

$$T_{\text{ср}} = \int_0^{\infty} t\phi(t)\text{dt}. \tag{2.15}$$

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

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

$$\overline{T}_{\text{ср}} = \sum_{i=1}^{N_0} \theta_i / N_0\,, \tag{2.16}$$

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

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

$$T_0 = \int_0^{\infty} \text{dF}_k(t), \tag{2.17}$$

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

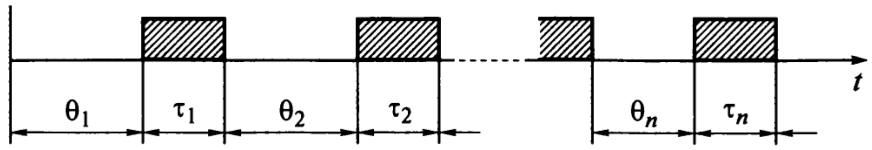

Рис. 3. Распределение отказов во времени

Статистически наработка на отказ определяется как среднее арифметическое значение реализаций случайного времени $\theta_{k,i}$ исправной работы изделия между (k – 1)-м и k-м отказами без учета времени ремонта (рис. 3):

$$\overline{T}_0 = \sum_{i=1}^{m} \theta_{k,i}/m, \tag{2.18}$$

где m – число отказов испытываемых изделий.

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

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

$$V(t) = \lim_{\Delta t \to 0} (p\,\{t, t + \Delta t\}/\Delta t). \tag{2.19}$$

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

$$\overline{V}(t) = \Delta\, n'/(\,N_0 \Delta t). \tag{2.20}$$

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

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

Ординарный поток событий имеет место, когда вероятность появления двух и более отказов в единичном интервале времени пренебрежимо мала по сравнению с вероятностью появления одного отказа.

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

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

2.2. Зависимости между отдельными показателями надежности

1. Определим связь между частотой отказов $\phi(t)$ и вероятностью безотказной работы $P(t)$. Проинтегрировав правую и левую части соотношения (2.8) для $Q(t)$ в пределах от 0 до t, получим выражение $Q(t) = \int_t^\infty \phi(t)\mathrm{dt}$, подставив которое в формулу (2.6), запишем:

$$P(t) = 1 - \int_0^t \phi(t)\mathrm{dt} = \int_t^\infty \phi(t)\mathrm{dt}. \qquad (2.21)$$

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

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

$$\overline{\lambda}(t) = \frac{\Delta n/(N_0\Delta t)}{(N(t)\Delta t)/(N_0\Delta t)} = \frac{\Delta n/(N_0\Delta t)}{N(t)/N_0}. \qquad (2.22)$$

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

$$\overline{\lambda}(t) = \overline{\phi}(t)/\overline{P}(t), \qquad (2.23)$$

что полностью соответствует формуле (2.11).

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

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

$$\lambda(t) = -\frac{\mathrm{dP}(t)}{\mathrm{dt}} \cdot \frac{1}{P(t)} = -\frac{d}{\mathrm{dt}}\ln P(t). \qquad (2.24)$$

Проинтегрировав (2.22) от 0 до t, запишем:

$$\ln P(t) = -\int_0^t \lambda(t)\mathrm{dt}, \qquad (2.25)$$

или, потенцируя окончательно, получим:

$$P(t) = \exp\left(-\int_0^t \lambda(t)\mathrm{dt}\right). \qquad (2.26)$$

Формула (2.24) является одной из важнейших в теории надежности невосстанавливаемых изделий.

Для практически важного случая $\lambda(t) = \lambda = \mathrm{const}$ из (2.24) можно записать :

$$P(t) = \exp(-\lambda t), \qquad (2.27)$$

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

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

Для определения величины $T_{\text{ср}}$ подставим выражение (2.8) в формулу (2.13):

$$T_{\text{ср}} = \int_0^\infty t\left(-\frac{\mathrm{dP}(t)}{\mathrm{dt}}\right)\mathrm{dt} = -\int_0^\infty P(t)\mathrm{dt}. \quad (2.28)$$

Проинтегрировав полученное выражение по частям, получим:

$$T_{\text{ср}} = -\mathrm{tP}(t)|_0^\infty + \int_0^\infty P(t)\mathrm{dt}, \quad (2.29)$$

где первый интеграл равен нулю, следовательно,

$$T_{\text{ср}} = \int_0^\infty P(t)\mathrm{dt}. \quad (2.30)$$

Выражение (2.24) показывает, что кривая убыли радиоизделий (рис. 1.) обладает следующими свойствами: площадь, ограниченная ею и осями координат, численно равна среднему времени безотказной работы $T_{\text{ср}}$. В случае когда $\lambda = \text{const}$, из формулы (2.27) имеем

$$T_{\text{ср}} = 1/\lambda. \quad (2.31)$$

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

$$P(t) = \exp(-t/T_{\text{ср}}). \quad (2.32)$$

5. Определим связь между гамма-процентной наработкой до отказа T_γ и средней наработкой до отказа $T_{\text{ср}}$.

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

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

$$T_\gamma = -T_{\text{ср}}\ln(P_\gamma) = -T_{\text{ср}}\ln(\gamma/100). \quad (2.33)$$

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

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

2.3. Единичные показатели восстанавливаемости

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

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

Количественно восстанавливаемость системы оценивается следующими показателями: вероятностью восстановления $P_{\text{В}}(\tau)$, средним временем восстановления $T_{\text{в}}$ и интенсивностью восстановления $\mu(t)$, которые математически соответствуют рассмотренным показателям надежности: вероятности отказа $Q(t)$, среднему времени наработки на отказ T_0 и интенсивности отказов системы $\lambda(t)$.

Под ***вероятностью восстановления*** понимается вероятность того, что система будет восстановлена после отказа в течение заданного времени при определенных условиях ремонта. По аналогии с вероятностью отказа этот показатель можно представить как вероятность того, что случайное время восстановления системы ε будет не больше заданного:

$$P_{\text{В}}(\tau) = P\{\varepsilon \le \tau\}. \tag{2.34}$$

Статистически вероятность восстановления можно записать в виде

$$\overline{P}_B(\tau) = n_B(\tau)/N_B, \tag{2.35}$$

где $n_B(\tau)$ - число изделий, восстановленных за время τ; $N_{\text{В}}$ – число изделий, которое надо восстановить.

Следовательно, $P_{\text{В}}(\tau)$ является функцией распределения, или интегральным законом распределения, времени восстановления.

Количественно функция $P_{\text{В}}(\tau)$ обычно определяется через другие показатели восстанавливаемости: среднее время восстановления и интенсивность восстановления.

Наиболее наглядным показателем восстанавливаемости является среднее ***время восстановления***, под которым понимается математическое ожидание случайной величины – времени восстановления:

$$T_B = \int_0^\infty \tau\phi(\tau)\mathrm{dt}. \tag{2.36}$$

Статистически среднее время восстановления можно представить в виде

$$\overline{T}_B = \sum_{i=1}^{N_B} \tau_{\text{Bi}}/N_B, \tag{2.37}$$

где τ_{Bi} - интенсивность восстановления i-го изделия, $i = \overline{1, N_{\text{В}}}$.

Известно, что для некоторых законов распределения случайной величины (экспоненциального, нормального и др.) наилучшей статистической оценкой математического ожидания является среднее арифметическое. В этих случаях определение статистического значения величины $\overline{T}_{\text{В}}$ аналогично определению среднего времени наработки на отказ. Например, если за определенный период эксплуатации аппаратуры произошло n отказов, то, просуммировав промежутки времени восстановления, можно найти среднее время восстановления по следующей формуле:

$$\overline{T}_{\text{В}} = \sum_{i=1}^{n} \tau_i/n. \tag{2.38}$$

Если имеется несколько комплектов однотипной аппаратуры, следует просуммировать промежутки времени восстановления по всем экземплярам и разделить эту сумму на общее число отказов.

Значение $T_в$ показывает, сколько в среднем затрачивается времени на обнаружение и устранение одного отказа, и при заданных условиях обслуживания характеризует ремонтопригодность аппаратуры.

Как и при определении T_0, точность значения $T_в$ тем выше, чем больше используется статистических данных при расчете.

Заметим, что значение $T_в$ в значительной мере зависит от технической подготовки обслуживающего персонала и наличия у него опыта по обнаружению и устранению отказов. Следовательно, при вычислении $T_в$ и оценке ремонтопригодности аппаратуры необходимо обобщать данные по большому числу однотипных экземпляров, обслуживаемых разным техническим персоналом с целью снизить влияние субъективного фактора и получить усредненный результат.

Под ***интенсивностью восстановления*** системы понимается число восстановлений, произведенных в единицу времени.

В случае экспоненциального закона распределения интенсивность восстановления статистически определяется как отношение числа восстановлений системы за некоторый период времени к суммарному времени восстановления за тот же период:

$$\overline{\mu} = т/\sum_{i=1}^{n} \tau_i, \text{ [1/ч]}. \quad (2.39)$$

Этот показатель характеризует производительность восстановительных работ. Нетрудно заметить, что $\mu = 1/T_в$.

2.4. Комплексные показатели надежности ЭС

В настоящее время существуют три комплексных показателя надежности ЭС: коэффициенты готовности $K_г$, технического использования $K_{т.и}$ и оперативной готовности $K_{о.г}$.

Коэффициент готовности – это вероятность того, что изделие окажется работоспособным в произвольный момент времени его работы $t_{раб}$:

$$K_г = T_0/(T_0 + T_в), \quad (2.40)$$

где T_0 – наработка на отказ, определяемая по формуле (2.15).

Статистически коэффициент готовности можно представить в виде

$$\overline{К}_г = t_{раб\Sigma}/(t_{раб\Sigma} + t_{рем\Sigma}), \quad (2.41)$$

где $t_{раб\Sigma}$ и $t_{рем\Sigma}$ - соответственно суммарное время работы и ремонта.

На практике также часто используется вспомогательный показатель надежности – ***коэффициент простоя*** $\boldsymbol{K_п}$, характеризующий вероятность того, что изделие неработоспособно в произвольный момент времени:

$$К_п = T_в/(T_0 + T_в). \quad (2.42)$$

Очевидно, что $K_г$ и $K_п$ образуют полную группу событий, т.е. $K_г + K_п = 1$.

Коэффициент технического использования – это отношение математического ожидания времени пребывания изделия в работоспособном состоянии к сумме математических ожиданий времени его работы, ремонта и технического обслуживания ($T_{обсл}$):

$$К_{т.и} = T_0/(T_0 + T_в + T_{обсл}). \quad (2.43)$$

Статистически коэффициент технического использования можно записать в виде

$$\overline{К}_{т.и} = t_{раб\Sigma}/(t_{раб\Sigma} + t_{рем\Sigma} + t_{обсл\Sigma}), \quad (2.44)$$

где $t_{обсл\Sigma}$ - суммарное время технического обслуживания.

Коэффициент оперативной готовности – это вероятность того, что электронное изделие окажется работоспособным в произвольный момент времени и, начиная с этого момента, безотказно проработает время $t_{раб}$:

$$К_{о.г} = P_{н.ф} = К_г P(t_{раб}), \quad (2.45)$$

где $P_{н.ф}$ - вероятность нормального функционирования, учитывающая начальное состояние изделия, его безотказность и восстанавливаемость; $P(t_{раб})$ - вероятность безотказной работы изделия в заданное время.

2.5. Рекомендации по выбору показателей надежности для различных электронных средств

Рассмотренные ранее показатели позволяют достаточно полно определить надежность сложных изделий (систем), в том числе современных ЭС, содержащих большое число электронных изделий.

Наиболее полно надежность системы характеризуется частотой ее отказов $\phi_с(t)$, так как эта величина является плотностью распределения, а следовательно, содержит в себе всю информацию о случайном явлении – времени безотказной работы [4].

Другие показатели надежности (в том числе интенсивность отказов) только лишь в совокупности позволяют охарактеризовать надежность сложной системы.

Время безотказной работы, или средняя наработка до первого отказа $T_{ср}$, является достаточно наглядной характеристикой надежности изделий. Однако применение этого показателя для оценки надежности не рекомендуется в следующих случаях:

• время работы системы значительно меньше среднего времени безотказной работы ($T_{раб} << T_{ср}$);

• закон распределения времени безотказной работы не одно параметрический и для достаточно полной оценки требуются моменты высших порядков;

• при наличии системы резервирования;

• при непостоянной интенсивности отказов;

• при разном времени работы отдельных частей сложной системы.

Интенсивность отказов является наиболее удобной для практического использования характеристикой надежности простейших элементов, так как обеспечивает наиболее простое вычисление числовых значений надежности сложной системы, а также ее легко получить экспериментально в период нормальной эксплуатации (см. рис. 2).

Наиболее целесообразно при определении надежности сложной системы использование вероятности безотказной работы, так как этот показатель:

• входит в качестве сомножителя в другие, более общие, характеристики системы, например в эффективность и стоимость;

• характеризует изменение надежности во времени;

• сравнительно просто рассчитывается в процессе проектирования системы и оценивается в процессе ее испытания.

На основании изложенного можно утверждать, что показатели надежности современных ЭС могут быть различными и определяются областью их использования.

Для невосстанавливаемых резервированных и нерезервированных систем с длительным временем работы (самолетных, спутниковых блоков и т.д.) в качестве показателей надежности используют $P(t)$ (в этом случае необходимо задать интервал времени t), λ или $T_{ср}$.

Для нерезервируемых невосстанавливаемых систем с коротким временем работы (ракетных блоков, радиовзрывателей и т.д.) в качестве показателей надежности используют $P(t)$ или λ. Применение в этом случае в качестве показателя надежности $T_{ср}$ не рекомендуется.

Для восстанавливаемых резервированных и нерезервированных систем следует определять: $K_{г}$ или $K_{о.г}$, T_0 или $T_{в}$, а также λ - интенсивность отказов в стационарном режиме.

Контрольные вопросы

1. Перечислите основные показатели надежности.
2. Что такое вероятность безотказной работы?
3. Начертите кривую убыли изделия и поясните ее физический смысл.
4. Что называется частотой отказов и что она характеризует?
5. Что характеризует гамма-процентная наработка до первого отказа?
6. Что такое интенсивность отказов?
7. Начертите кривую жизни изделия и поясните ее вид.
8. Что называется средней наработкой до первого отказа?
9. Что называется средней наработкой на отказ?
10. Что такое параметр потока отказов?
11. Какие потоки отказов являются простейшими?
12. Выведите следующие формулы связи:

• частоты отказов и вероятности безотказной работы;

• частоты отказов, вероятности безотказной работы и интенсивности отказов;

• вероятности безотказной работы и интенсивности отказов;

• средней наработки до первого отказа и вероятности безотказной работы;

• гамма-процентной наработки до отказа и средней наработки на отказ.

13. Какие единичные показатели ремонтопригодности вы знаете?
14. Какие комплексные показатели надежности вы знаете?
15. Что такое коэффициент готовности и чем он отличается от коэффициента оперативной готовности?

3. ЗАКОНЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СЛУЧАЙНЫХ ВЕЛИЧИН ПРИ АНАЛИЗЕ НАДЕЖНОСТИ РЭС

3.1. Биномиальный закон распределения

Большинство процессов, приводящих к возникновению отказов РЭС, основываются на общих закономерностях. Следовательно, распределения случайных величин, описывающие реальные процессы возникновения отказов в РЭС, можно приближенно заменять известными в теории вероятностей распределениями.

В теории надежности наибольшее распространение для дискретных случайных величин получили биномиальный закон распределения и распределение Пуассона, а для непрерывных случайных величин — экспоненциальный и нормальный законы распределения, закон Вейбулла, гамма-распределение и распределение Рэлея.

Биномиальный закон распределения характеризует вероятность появления события v в m независимых опытах. Если вероятность появления события v в одном опыте равна p (соответственно вероятность его непоявления $q = 1 - p$), а число независимых испытаний равно m то вероятность появления n раз события v в серии из m опытов можно представить следующим выражением:

$$P_m^n = C_m^n p^n (1-p)^{m-n}. \tag{3.1}$$

Здесь число сочетаний m по n

$$C_n^m = \frac{m!}{n!\,(m-n)!} \tag{3.2}$$

При этом следует иметь в виду, что C_n^m представляет собой целое положительное число. Очевидно, что вероятности p являются членами разложения по биному Ньютона.

Основные характеристики биномиального распределения следующие:

• математическое ожидание $M(v) = \mathrm{pn}$;

• дисперсия $\sigma^2(v) = M(v)q$;

• среднеквадратическое отклонение $\sigma(v) = \sqrt{M(v)q}$.

Биномиальный закон распределения применяется обычно при статистическом контроле качества, т. е. когда очень мало сведений о поведении изделий, а их необходимо разделить на годные и бракованные.

3.2. Распределение Пуассона

Распределение Пуассона используется в тех случаях, когда в некотором интервале времени (0, t) случайное событие v появляется с малой вероятностью p. При этом события v, следующие друг за другом, образуют поток. Если поток событий v удовлетворяет требованиям стационарности, ординарности и отсутствия последействия, т.е. является простейшим потоком, то распределение Пуассона описывается выражением

$$P_m = \frac{A^m}{m!} e^{-A}, \tag{3.3}$$

где P_m - вероятность появления m событий v в заданном интервале t; A - математическое ожидание (среднее число) событий в интервале времени t.

Среднее число отказов изделия в заданном интервале времени t в теории надежности принято называть показателем надежности.

Для простейшего потока отказов $A = \lambda t$, тогда

$$P_m = \frac{(\lambda t)^m}{m!} e^{-\lambda t}, \tag{3.4}$$

где λ - интенсивность случайного события, часто называемая параметром закона Пуассона.

Основные характеристики распределения Пуассона следующие:

• математическое ожидание $M(v) = \lambda t$;

• дисперсия $\sigma^2(v) = \lambda t$,

причем $M(v) = \sigma^2(v)$, что является особенностью данного распределения.

Распределение Пуассона рассматривается как предельный случай биномиального распределения при вероятности p, стремящейся к нулю (соответственно $q = 1 - p \to 1$).

На практике это совпадение приемлемо при $p < 0{,}1$. Однако в отличие от биномиального распределения, при котором $m \leq n$, в распределении Пуассона на m не накладывается верхнее ограничение ($m > 0$).

При $m = 0$ согласно формуле (3.3) вероятность безотказной работы за время t можно записать в виде

$$P_0 = P(t) = \exp(-\lambda t), \tag{3.5}$$

следовательно, экспоненциальный закон надежности является частным случаем распределения Пуассона.

Биномиальное распределение приемлемо для любого значения p, а распределение Пуассона – только для малого p. Следовательно, с позиции математики закон распределения Пуассона уже биномиального распределения, но с позиции физики он шире вследствие своей применимости. Так, для ремонтируемого РЭС после окончания периода приработки, когда $\lambda = 1/T_{\text{ср}} = \text{const}$, случайное число отказов в процессе эксплуатации распределяется по закону Пуассона, а вероятность появления событий

$$P_m(t) = \frac{1}{m!}\left(\frac{1}{T_{\text{ср}}}\right)^m e^{-t/T_{\text{ср}}}. \tag{3.6}$$

Распределение Пуассона обычно применяют для определения вероятности появления некоторого числа событий (отказов) в заданном интервале времени при условии независимости и несовместности этих событий (отказов).

3.3. Экспоненциальное распределение

Экспоненциальный закон распределения наиболее часто применяется в инженерной практике. Так, промежуток времени между двумя соседними отказами в простейшем потоке отказов есть непрерывная случайная величина, распределенная по экспоненциальному закону (рис. 4. а):

$$\phi(t) = \lambda_0 \exp(-\lambda_0 t), t \geq 0. \tag{3.7}$$

Соответствующая выражению (3.7) интегральная функция распределения имеет вид

$$F(t) = Q(t) = \int_0^t \phi(t)\text{dt} = 1 - e^{-\lambda_0 t}. \tag{3.8}$$

В период нормальной эксплуатации время работы РЭС между отказами подчинено экспоненциальному закону распределения с показателем $\lambda(t) = \lambda_0 = \text{const}$ (рис. 4., б), а вероятность безотказной работы

$$P(t) = 1 - Q(t) = e^{-\lambda_0 t}. \tag{3.9}$$

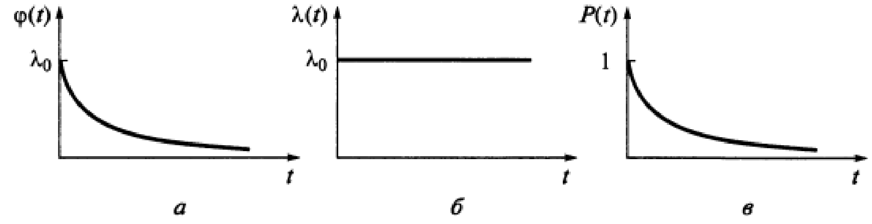

Рис. 4. Изменение различных показателей надежности РЭС при экспоненциальном законераспределения между отказами: а – в соответствии с формулой (3.7); б – при$\gamma = \gamma_0 = \mathrm{const}$; в – в соответствии с формулой (3.9)

Соответствующая формуле (3.9) кривая приведена на рис. 4, в. Независимость интенсивности отказов от времени – главная особенность экспоненциального распределения. Условие $\lambda(t) = \mathrm{const}$ означает, что интенсивность и среднее время безотказной работы равны соответственно параметру простейшего потока отказов и наработке на отказ:

$$\begin{gathered}\lambda(t) = V(t) = \mathrm{const};\\ T_{\text{ср}} = T_0.\end{gathered} \tag{3.10}$$

Поясним смысл среднего времени безотказной работы Tcv, для чего подставим в формулу (3.9) $t = T_{\text{ср}}$ и получим $P(T_{\text{ср}}) = e^{-1} \approx 0{,}37$, т.е. $T_{ср}$ – это время, в течение которого вероятность безотказной работы изделия уменьшается в e раз.

Поясним смысл показателя надежности $A = \lambda t$, для чего будем считать $A \ll 1$ и, разложив e^{-A} в ряд Тейлора и ограничившись двумя первыми членами этого разложения, получим $P(T_{\text{ср}}) = e^{-A} \approx 1 - A$, откуда

$$Q(t) \approx A, \tag{3.11}$$

т.е. среднее число отказов при $\lambda t \ll 1$ равно вероятности отказа за время t.

Особенностью рассматриваемого распределения является инвариантность вероятности безотказной работы РЭС в интервале времени $(t_0, t_0 + \Delta t)$ к расположению начала интервала времени Δt по оси абсцисс. Действительно, пусть в момент времени t_0 РЭС работоспособно, тогда вероятность его безотказной работы $P(\Delta t)$ в интервале времени Δt согласно уравнению (2.3) с учетом формулы (3.9) будет иметь вид

$$P(\Delta t) = \exp[-\lambda_0(t_0 + \Delta t)]/\exp(-\lambda_0 t_0) = \exp(-\lambda_0 \Delta t). \tag{3.12}$$

Из полученного выражения следует, что $P(\Delta t)$ действительно не зависит от времени наработки t_0 к началу интервала времени Δt. Физически это означает, что экспоненциальный закон распределения не учитывает предыстории текущего процесса. Теоретически этот закон можно применять только к РЭС, которые не подвержены износу в процессе эксплуатации и старению во времени, что противоречит самой их природе. Следовательно, на практике этот закон распределения применим только в тех случаях, когда процессы старения и износа в РЭС протекают достаточно медленно и анализируется сравнительно небольшой период их «жизни».

Как правило, экспоненциальный закон используют при оценке надежности сложных изделий, отказы которых обусловлены большим числом входящих в их состав компонентов, а также при определении времени наработки на отказ невосстанавливаемых изделий и случайного времени между соседними отказами в восстанавливаемых изделиях.

3.4. Нормальное распределение

В теории надежности нормальное распределение используется наиболее часто. *С его помощью описывается работоспособность РЭС в процессе износа и естественного старения,* а также при возникновении отказов в виде ухода параметров за пределы заданных допусков вследствие воздействия температуры, радиации и других факторов, т.е. параметрических отказов. Данный закон еще называют предельным, так как к нему приближаются другие законы распределения и их композиции в часто встречающихся типичных условиях. Плотность распределения случайной величины x для такого распределения имеет вид

$$\phi(x) = \frac{1}{b\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x-a)^2}{2b^2}\right]. \quad (3.13)$$

Здесь a и b постоянные величины, называемые параметрами закона нормального распределения, причем b – положительная, а a может быть положительной, отрицательной и равной нулю [20].

Основные характеристики нормального распределения следующие:

• математическое ожидание $M(x) = a$;

• дисперсия $\sigma^2(x) = b$.

Вероятность попадания величины х в диапазон значений (x_1, x_2) вычисляется по формуле

$$P_x = P(x_1 \le x \le x_2) = \Phi(z_2) - \Phi(z_1). \quad (3.14)$$

Здесь функция Лапласа или интеграл вероятности имеет вид

$$\Phi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^z e^{-\frac{t^2}{2}} \mathrm{dt}; \quad (3.15)$$

$$z_1 = \frac{x_1 - a}{\sigma};\ z_2 = \frac{x_2 - a}{\sigma}. \quad (3.16)$$

Интеграл вероятности, являющийся табличным интегралом, значения которого можно найти в справочниках или учебниках по теории вероятности и математической статистике [1], - это нечетная функция $\Phi(-z) = \Phi(z)$..

Если требуется найти вероятность попадания случайной величины x в пределы симметричного поля с параметрами $a-\delta$ и $a+\delta$, где δ - половина поля допуска, то $P_x = 2\Phi(\delta/\sigma)$. При этом если $\delta = 3\sigma$, то $P_x = 0{,}9973$. Этот уровень вполне достаточен при определении надежности по параметрическим отказам, поэтому вероятность выхода параметров РЭС за пределы $\pm 3\sigma$ в большинстве случаев можно не учитывать.

Графики функций нормального распределения при разных значениях a и b приведены на рис. 5., где дисперсия определяется по уровню 0,695 от максимального значения функции распределения.

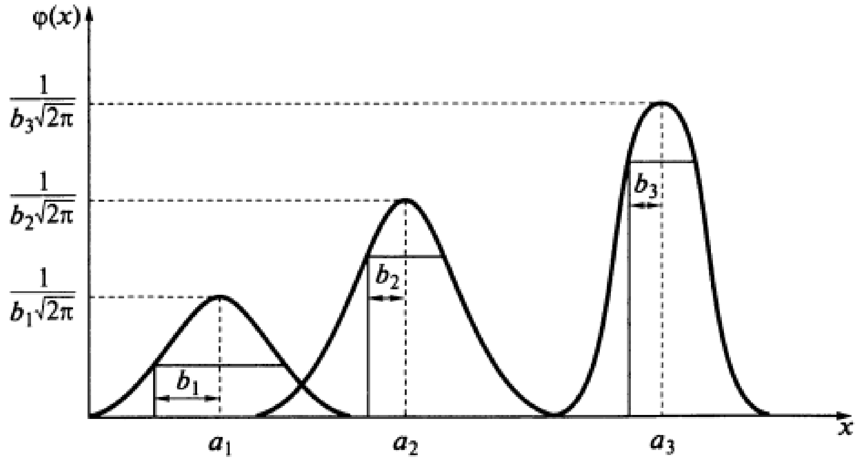

Рис. 5. Влияние математического ожидания *a* и дисперсии *b* на график нормального распределения случайной величины *x*

3.5. Распределение Вейбулла

Распределение Вейбулла характеризует распределение непрерывной случайной величины при $t \geq 0$. Частота отказов $\phi(t)$ в законе Вейбулла имеет вид

$$\phi(t) = \lambda_0 \mathrm{k} \mathrm{t}^{k-1} e^{-\lambda_0 t^k}. \quad (3.17)$$

Тогда согласно формуле (2.19) вероятность безотказной работы

$$P(t) = 1 - \int_0^t \phi(t)\mathrm{dt} = e^{-\lambda_0 t^k}, \quad (3.18)$$

а интенсивность отказов и среднее время безотказной работы соответственно

$$\lambda(t) = \phi(t)/P(t) = \lambda_0 \mathrm{k} \mathrm{t}^{k-1};$$
$$T_{\text{ср}} = \int_0^\infty P(t)\mathrm{dt} = \Gamma\left(\frac{1}{k} + 1\right) \lambda_{0^{-1/k}}, \quad (3.19)$$

где $\Gamma(1/k + 1)$ - гамма-функция; λ_0 и k – параметры распределения Вейбулла (постоянные величины, имеющие определенные значения для каждого класса изделий).

Семейство соответствующих функций представлено на рис.6.

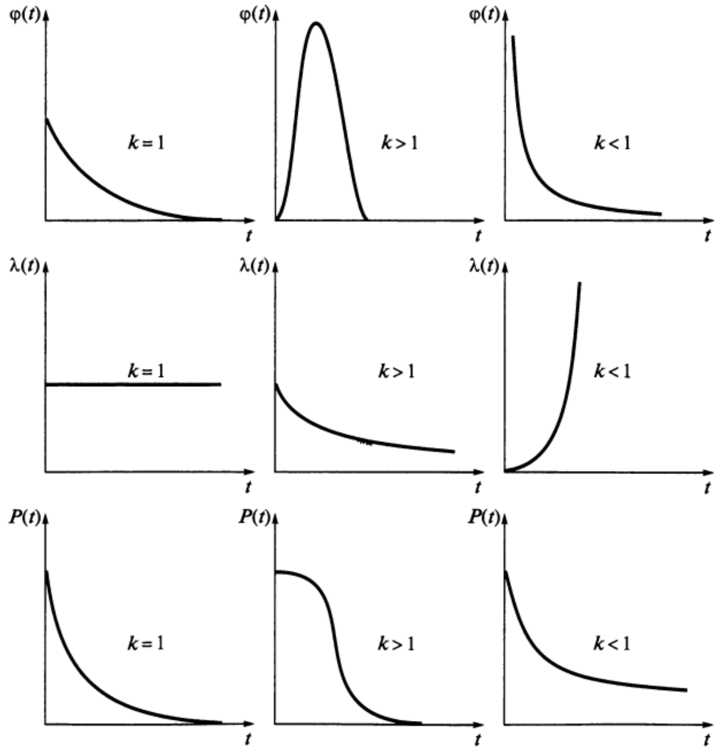

Рис. 6. Влияние параметра k на различные показатели надежности для распределения Вейбулла

Распределение Вейбулла в теории надежности широко используется при исследовании характеристик надежности полупроводниковых приборов (k < 1), ускоренных испытаниях компонентов РЭС в форсированных режимах и исследовании их надежности в период приработки (k < 1), а также при описании работоспособности изделий в процессе износа и старения (k > 1).

3.6. Гамма-распределение

В гамма-распределении показатели надежности определяются следующим образом:

• частота отказов

$$\phi(t) = \lambda_0^k t^{k-1} e^{-\lambda_0 t} / (k-1)!; \tag{3.20}$$

• вероятность безотказной работы

$$P(t) = e^{-\lambda_0 t} \sum_{i=0}^{k-1} \frac{(\lambda_0 t)^i}{i!}. \tag{3.21}$$

• интенсивность отказов

$$\lambda(t) = \frac{\lambda_0^k t^{k-1}}{(k-1)! \sum_{i=0}^{k} \frac{(\lambda_0 t)^i}{i!}}; \tag{3.22}$$

• среднее время безотказной работы

$$T_{\text{ср}} = \int_0^\infty P(t)\text{dt} = \frac{k}{\lambda_0}. \quad (3.23)$$

Параметры λ_0, k и зависимости (3.19) ... (3.22) гамма-распределения аналогичны соответствующим параметрам и графикам распределения Вейбулла, поэтому подробно здесь не анализируются.

Основные характеристики гамма-распределения:

• математическое ожидание $M(t) = \lambda_0^k$;

• дисперсия $\sigma^2(t) = \lambda_0^2 k$.

Гамма-распределение используется в теории надежности при оценке характеристик надежности компонентов систем и радиоизделий в начальный период эксплуатации ($k > 1$), а также при исследовании электромеханических, механических устройств и элементов высоконадежных систем с интенсивностью отказов, уменьшающейся во времени ($k < 1$). Гамма-распределение позволяет описывать распределение времени отказов системы, резервированной способом замещения, т. е. когда наработка на отказ основной и резервной систем описывается экспоненциальным законом. В этом случае параметр k равен общему числу используемых систем, включая и основную.

При $k = 1$ гамма-распределение переходит в экспоненциальное, причем чем больше k, тем распределение более симметричное, а при $k > 1$ оно переходит в нормальный закон распределения.

В ряде случаев параметр k имеет наглядный физический смысл. Например, если отказ наблюдается при выходе из строя более k элементов системы, то формула (3.21) описывает частоту ее отказов при интенсивности отказов каждого элемента λ.

3.7. Распределение Рэлея

При распределении времени возникновения отказов ЭС по закону Рэлея основные показатели надежности описываются следующим образом:

$$\phi(t) = (t/\sigma^2)\exp(-t^2/2\,\sigma^2); \quad (3.24)$$

$$P(t) = \exp(-t^2/2\,\sigma^2); \quad (3.25)$$

$$\lambda(t) = t/\sigma^2\,; \quad (3.26)$$

$$T_{\text{ср}} = \sigma\sqrt{\pi/2}, \quad (3.26)$$

где σ - дисперсия времени безотказной работы.

Зависимости, построенные согласно формулам (3.23) ... (3.25), приведены на рис. 7. График зависимости $\lambda(t)$ демонстрирует особенность данного распределения: линейное возрастание интенсивности отказов во времени. По этой причине *закон Рэлея используется для описания характеристик надежности компонентов систем с явно выраженным эффектом старения.*

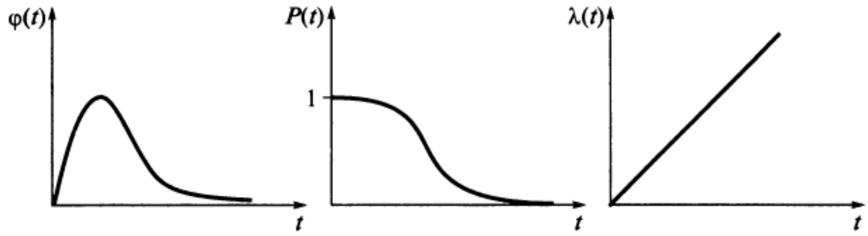

Рис. 7. Изменение различных показателей надежности при распределении времени возникновения отказов ЭС по закону Рэлея

Контрольные вопросы

1. Назовите наиболее распространенные законы распределения случайных величин, применяемые в теории надежности.
2. Дайте определение биномиального закона распределения.
3. Запишите вероятность появления m событий в интервале времени t (закон распределения Пуассона).
4. Каковы показатели надежности при экспоненциальном распределении случайных величин?
5. Дайте определение нормального закона распределения случайной величины.
6. Каковы показатели надежности при распределении Вейбулла?
7. Запишите показатели надежности при гамма-распределении.
8. Каковы показатели надежности распределения Рэлея?

4. АНАЛИЗ СТРУКТУРНЫХ СХЕМ НАДЕЖНОСТИ РЭС

4.1. Основные сведения

В инженерной практике для предварительной оценки надежности РЭС широко применяются структурные модели надежности, представляющие собой структурные схемы, в которых выделены элементы и связи, выполняющие их основные функции.

Графические модели надежности являются наиболее простыми и информативными. Составляются они следующим образом:

1) при исследовании функционирования изучаемого РЭС выявляются возможные отказы его элементов и оценивается их влияние на работоспособность РЭС;

2) исследуемое РЭС разделяется таким образом, чтобы отдельные его части были независимы в отношении отказов.

Каждая часть РЭС (каждый компонент модели надежности) может находиться в двух состояниях: работоспособном и неработоспособном.

При составлении модели надежности функциональные и электрические связи между отдельными частями РЭС заменяются логическими, характеризующими его безотказную работу, причем в модель вносятся лишь элементы, необходимые для выполнения основной функции изделия.

Наиболее универсальными моделями надежности являются последовательная, параллельная и смешанная – сочетание последовательного и параллельного соединений элементов.

Рассмотрим основные свойства этих моделей.

Последовательная модель надежности. Последовательная модель надежности (рис. 8) состоит из нескольких (не менее двух) элементов РЭС, соединенных последовательно. При таком соединении отказ одного элемента приводит к отказу РЭС в целом.

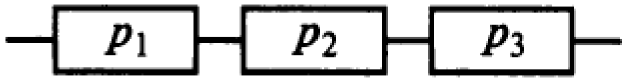

Рис. 8. Последовательная модель надежности

Приняв относительно компонентов модели надежности системы следующие допущения: отказы элементов не зависят друг от друга и являются случайными событиями, отказ одного элемента приводит к отказу всей системы, а отказавшие элементы не восстанавливаются, вероятность безотказной работы всей системы согласно теореме умножения вероятностей запишем в следующем виде:

$$P_c(t) = \prod_{i=1}^{N} p_i(t), \tag{4.1}$$

где N – число элементов системы; $p_i(t)$ - вероятность безотказной работы i-го элемента системы (i = 1...N).

В этом случае вероятность отказа системы за время t

$$Q_c(t) = 1 - P_c(t) = 1 - \prod_{i=1}^{N} p_i(t), \tag{4.2}$$

а средняя наработка системы до первого отказа

$$T_{\text{ср.с}} = \int_0^{\infty} P_c(t)\text{dt}. \tag{4.3}$$

Конкретизируем соотношение (4.1), выразив характеристики элементов системы через наиболее распространенный показатель надежности λ. Для этого подставим выражение (2.22) в формулу (4.1) и получим

$$P_c(t) = \exp\left(\sum_{i=0}^{N} \int_0^t \lambda_i(t)\text{dt}\right). \tag{4.4}$$

При наличии в системе большого числа однотипных элементов с примерно одинаковой надежностью, числе типов этих элементов s и числе элементов в каждом типе N_j (j = 1...5) формула (4.4) будет иметь следующий вид:

$$P_c(t) = \exp\left(-\sum_{j=1}^{s} N_j \int_0^t \lambda_j(t)\text{dt}\right). \tag{4.5}$$

Выражения (4.4) и (4.5) являются общими формулами оценки надежности системы, справедливыми при любых $\lambda_i(t)$. Для случая нормальной эксплуатации системы, когда

$\lambda_i(t) = \lambda_i = \text{const}$и справедлив экспоненциальный закон оценки надежности, эти формулы имеют вид

$$P_c(t) = \exp(-\lambda_c t) = \exp\left(-t\sum_{i=1}^{N}\lambda_i\right); \tag{4.6}$$

$$P_c(t) = \exp(-\lambda_c t) = \exp\left(-t\sum_{j=1}^{s}N_j\lambda_j\right), \tag{4.7}$$

откуда следует, что

$$\lambda_c(t) = \sum_{i=1}^{N}\lambda_i\,; \tag{4.8}$$

$$\lambda_c = \sum_{j=1}^{s}N_j\lambda_j\,. \tag{4.9}$$

В силу соотношения (2.25) среднее время безотказной работы системы запишем следующим образом:

$$T_{\text{ср.с}} = 1/\sum_{i=1}^{N}\lambda_i\,; \tag{4.10}$$

$$T_{\text{ср}} = 1/\sum_{j=1}^{s}N_j\lambda_j\,. \tag{4.11}$$

При оценке надежности системы с неодновременно работающими элементами удобно использовать показатель надежности $A = \lambda t$. Обозначив $A_c = \lambda_c t_c$ и $A_i = \lambda_i t_i$, запишем

$$A_c = \sum_{i=1}^{N}A_i\,; \tag{4.12}$$

$$A_c = -\ln P_c(t). \tag{4.13}$$

Формулы (4.7)...(4.13) широко используются для расчета надежности при последовательном, или основном, соединении элементов ЭС.

Параллельная модель надежности. Параллельная модель надежности РЭС состоит из двух или более элементов, соединенных параллельно (рис. 9.).

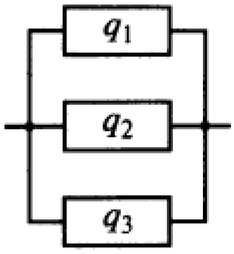

Рис. 9. Параллельная модель надежности

При таком соединении реальная система работоспособна, если хотя бы один из этих элементов исправен. Поскольку отказ системы наступает только при отказе всех элементов, входящих в нее, то, считая отказы независимыми, можем записать

$$Q_c(t) = \prod_{i=1}^{m} q_i(t), \qquad (4.14)$$

где $Q_c(t)$ - вероятность отказа системы; $q_i(t)$ - вероятность отказа i-го элемента системы ($i = \overline{1, m}$); m – число элементов.

Тогда вероятность безотказной работы системы :

$$P(t) = 1 - Q_c(t) = 1 - \prod_{i=1}^{m} q_i(t) = 1 - \prod_{i=1}^{m} [1 - p_i(t)]. \qquad (4.15)$$

Если надежности элементов (блоков, модулей) системы подчиняются экспоненциальному закону распределения, то результирующая надежность уже не будет экспоненциальной.

Действительно, если $p_i(t) = e^{-\lambda_i t}$, то из выражения (4.15) запишем

$$P_c(t) = 1 - \prod_{i=1}^{m} (1 - e^{-\lambda_i t}). \qquad (4.16)$$

Если $\lambda_i t$<<1, то $1 - e^{-\lambda_i t} \approx \lambda_i t$ и $P_c(t) \approx e^{-t^m \prod_{i=1}^{m} \lambda_i}$, откуда видно, что интенсивности отказов высоконадежных элементов перемножаются, что характерно для закона Вейбулла (см. подразд. 3.5).

Соотношения (4.14) и (4.15) используются для оценки надежности системы с общим, поэлементным и смешанным резервированием.

4.2. Метод преобразования сложной логической структуры по базовому элементу

В инженерной практике при оценке надежности РЭС встречаются случаи, когда условия работоспособности исследуемой исходной системы не позволяют сразу представить ее простейшими параллельно-последовательными структурными логическими схемами надежности, которые легко преобразуются. В связи с этим разработаны методы замены сложных схем надежности более простыми - эквивалентными.

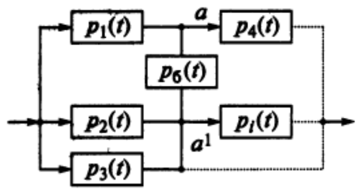

Рис. 10. Сложная логическая модель

Рассмотрим один из наиболее простых способов преобразования сложных структур, основанный на теореме сложения вероятностей несовместных событий [1, 10]. Суть этого метода состоит в следующем.

В исходной сложной модели надежности системы (рис. 10.) выбирают такой элемент, называемый базовым, который не позволяет представить ее в виде сочетания простейших структур. На рис. 10. вероятность безотказной работы такого элемента обозначается $p_6(t)$.

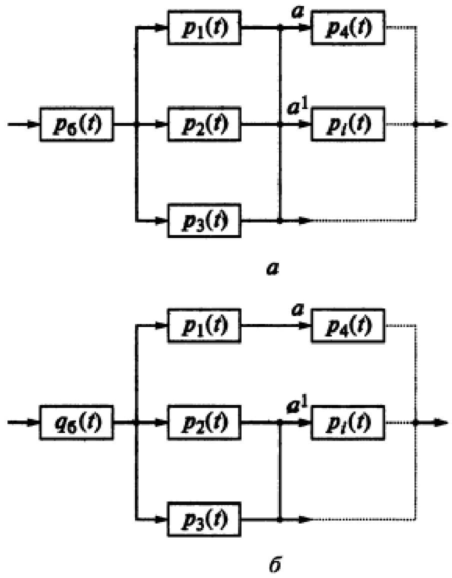

Рис. 11. Параллельно-последовательные модели надежности, соответствующие крайним состояниям схемы, показанной на рис. 10: а – базовый элементв работоспособном состоянии б – базовый элемент в состоянии отказа

Рассмотрим два крайних состояния базового элемента:

• базовый элемент находится в работоспособном состоянии и обладает абсолютной проводимостью сигнала (рис. 11., а);

• базовый элемент находится в состоянии отказа, и сигнал через него вообще не проходит (рис. 11., б).

Состояние базового элемента в эквивалентной схеме на рис. 11., а имитируется коротким замыканием цепи aa^1, а его состояние в эквивалентной схеме на рис. 11., б представляется разрывом этой цепи.

Для обеспечения адекватности эквивалентных схем исходной схемы, показанной на рис. 10., в схеме на рис. 11., а последовательно включен элемент с вероятностью безотказной работы $p_6(t)$, а в схеме на рис. 11., б – элемент с вероятностью отказа $q_6(t)$.

Для полученных эквивалентных параллельно-последовательных схем надежности определим вероятности безотказной работы $P_1(t)$ и $P_2(t)$. Тогда вероятность безотказной работы исходной системы $P_c(t)$ (см. рис. 10.) будет равна сумме вероятностей несовместных событий. Поскольку принятые крайние состояния, в которых может находиться базовый элемент, несовместны, можно записать

$$P_c(t) = P_1(t) + P_2(t) \qquad (4.17)$$

Контрольные вопросы

1. Как определяется вероятность безотказной работы при использовании последовательной модели надежности?
2. Как определяется вероятность безотказной работы при использовании параллельной модели надежности?
3. В каком случае используется метод преобразования структуры по базовому элементу для определения надежности устройства?

5. РЕЗЕРВИРОВАНИЕ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

5.1. Методы резервирования

Резервирование – это применение дополнительных средств и (или) возможностей в целях сохранения работоспособного состояния объекта при отказе одного или нескольких его элементов.

Резервирование является одним из средств обеспечения заданного уровня надежности объекта при наличии недостаточно надежных радиоэлементов, что особенно важно для обеспечения безотказности РЭС.

Любой метод резервирования основан на принципе избыточности. Это означает, что наряду с основными единицами (системами, устройствами, элементами), предназначенными для выполнения какой-либо функции, предусматриваются резервные единицы, которые не являются функционально необходимыми, а служат лишь для замены соответствующих основных единиц в случае их отказа.

Виды резервирования определяются способом включения резерва, видом соединения и условиями работы резервных элементов. Рассмотрим некоторые из них.

По способу включения резерва различают *резервирование замещением* и *постоянное резервирование*.

При резервировании замещением система проектируется таким образом, чтобы при отказе элемента она перестраивалась и восстанавливала свою работоспособность посредством замещения отказавшего элемента резервным. Данный способ требует наличия переключающих устройств, системы контроля работоспособности и обнаружения неисправного сменного узла, а также исполнительных устройств для включения резерва. Использование дополнительных устройств понижает общую надежность системы и повышает ее стоимость, поэтому этот способ используется преимущественно при резервировании сложных систем.

Замещение может осуществляться автоматически или вручную. В первом случае резервирование называется автоматическим.

При постоянном резервировании резервные элементы присоединены к основным в течение всего времени работы системы и находятся в одинаковом с ними рабочем режиме. Постоянное включение резерва является единственно возможным в системах, для которых недопустим даже кратковременный перерыв в работе, неизбежный при переключении с основного элемента на резервный.

Система с постоянным резервированием проектируется таким образом, чтобы отказ одного или даже нескольких элементов не повлиял на ее работу, т. е. соединение элементов в этом случае постоянное, перестройки схемы при отказах не происходит и вышедший из строя элемент не отключается.

Преимуществами постоянного резервирования является простота реализации и отсутствие даже кратковременных перерывов в работе, необходимых для переключения элементов.

Данный способ чаще всего применяется при резервировании сравнительно несложных элементов (каскадов, субблоков, узлов).

По виду соединения резервных элементов различают резервирование *общее*, *раздельное* и *смешанное* [1.,9.].

Общее резервирование – это резервирование всей системы в целом. Благодаря своей простоте этот способ резервирования наиболее широко распространен, особенно его разновидность – дублирование, при котором используется только одна резервная система.

Раздельное резервирование – это резервирование системы по отдельным участкам. Систему с общим резервированием замещением можно считать частным случаем системы с раздельным резервированием, имеющей один участок резервирования. Раздельное резервирование возможно как для сравнительно крупных узлов и блоков системы, так и для отдельных ее элементов или даже внутриэлементных связей. В первом случае такое резервирование называется одиночным, во втором – внутриэлементным.

При смешанном резервировании в системе резервируются как отдельные устройства, так и некоторые первичные элементы.

Различают *три вида условий работы резервных элементов* до момента включения их в работу. Для первого вида характерно полное совпадение условий, в которых находится резерв, с условиями, в которых находится рабочая система, поэтому он называется *нагруженным* (*горячим*) резервом. Ресурс нагруженных резервных элементов начинает расходоваться с момента включения системы в работу, так как при этом закон распределения вероятности времени ее безотказной работы остается неизменным.

Для второго вида условий работы резерва характерны облегченные условия нахождения резерва до момента включения системы в работу, поэтому он называется *облегченным* (*теплым*) резервом. Ресурс резервных элементов также начинает расходоваться с момента включения всей системы в работу, однако интенсивность его расхода до момента включения резервных элементов вместо отказавших значительно ниже, чем в обычных рабочих условиях системы.

Третий вид условий работы резерва – *ненагруженный* (*холодный*) резерв. В этом случае условия, в которых находятся резервные элементы, настолько легче рабочих условий системы, что практически ресурс этих элементов начинает расходоваться только с момента включения их в работу взамен отказавших. Этот вид условий работы резервных элементов встречается в надежных стационарных радиотехнических и связных установках.

Если пренебречь влиянием на надежность переключающих устройств, то при нагруженном резерве вероятность безотказной работы системы, резервированной способом замещения, равна вероятности безотказной работы системы с постоянным включением резерва. При использовании облегченного и ненагруженного резервов включение их способом замещения должно увеличить вероятность безотказной работы системы, так как в этом случае выше вероятность безотказной работы резервных элементов за тот же промежуток времени.

Приведем основные расчетные формулы для такого резервирования :

$$P_c(t) = e^{-\lambda_0 t} \sum_{i=0}^{m} \frac{(\lambda_0 t)^i}{i!} (5.1)$$

$$T_{\text{ср.с}} = T_{\text{ср}0}(m+1), (5.2)$$

где λ_0, $T_{\text{ср}0}$ - интенсивность отказов и средняя наработка до первого отказа основного (нерезервированного) устройства.

Надежность систем с резервированием определяется числом резервных устройств, или элементов Z, приходящихся на один рабочий элемент. Это число, называемое кратностью резервирования, рассчитывается по формуле

$$r = \frac{Z}{n} = \frac{N-n}{n} = m - 1, \quad (5.3)$$

где n – число элементов в основной системе; N – число всех элементов системы (основных и запасных); m – порядок резервирования, $m = N/n$.

Эффект от введения резерва характеризуется коэффициентом повышения надежности G, определяемым по вероятности безотказной работы, вероятности отказа, среднему времени безотказной работы и интенсивности отказов с использованием следующих формул:

$$G_P = \frac{P_{\text{рез}}}{P_{\text{нерез}}};\ G_Q = \frac{Q_{\text{нерез}}}{Q_{\text{рез}}};\ G_T = \frac{T_{\text{рез}}}{T_{\text{нерез}}};\ G_\lambda = \frac{\lambda_{\text{нерез}}}{\lambda_{\text{рез}}}. \quad (5.4)$$

Цель резервирования – обеспечение отказоустойчивости объекта в целом, т. е. сохранение его работоспособности, когда возник отказ одного или нескольких элементов.

5.2. Общее резервирование

Резервированная система включает в себя основную и m – 1 резервных систем (рис. 12.). Пусть каждая резервная система содержит по n элементов, тогда в соответствии с соотношениями (4.1) и (4.2) вероятность безотказной работы основной системы (j = 1) $P_{c1}(t)$ и вероятность появления в ней отказа $Q_{c1}(t)$ можно записать следующим образом:

$$P_{c1}(t) = \prod_{i=1}^{n} p_{i1}(t);\ Q_{c1} = 1 - \prod_{i=1}^{n} p_{i1}(t). \quad (5.5)$$

При $j = \overline{2,m}$ получим аналогичные показатели для любой из m – 1 резервных систем.

Вероятность безотказной работы системы с общим резервированием

$$[P_n(t)]_m = 1 - \prod_{j=1}^{m}\left[1 - P_{\text{cj}}(t)\right], \quad (5.6)$$

а вероятность появления в ней отказов

$$[Q_n(t)]_m = \prod_{j=1}^{m}\left[1 - P_{\text{cj}}(t)\right]. \quad (5.7)$$

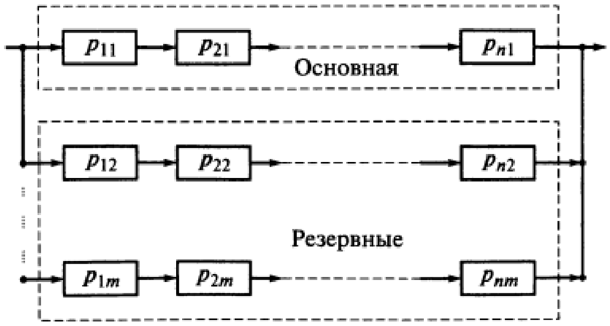

Рис. 12. Структурная модель системы с общим резервированием

Здесь значения $P_{cj}(t)$ определяются по выражению (5.6). Если элементы основной и резервной систем характеризуются равновероятными отказами, т.е. $p_{11}(t) = p_{12}(t) = \dots = p_{n1}(t) = p(t)$, то из формул (5.7) и (5.8) получим

$$\begin{gathered}[P_n(t)]_m = 1 - [1 - p^n(t)]^m; \\ [Q_n(t)]_m = [1 - p^n(t)]^m.\end{gathered} \quad (5.8)$$

Коэффициент повышения надежности G_Q при общем резервировании показывает, во сколько раз снижается вероятность отказа в резервированной системе по сравнению с нерезервированной. Из формул (5.6) и (4.15) найдем

$$G_Q = \frac{Q_n(t)}{[Q_n(t)]_m} = \frac{1 - p^n(t)}{[1 - p^n(t)]^m} \quad (5.9)$$

Считая вероятность $p(t)$ близкой к единице, что возможно при $\lambda t << 1$, и использовав соотношение $p^n(t) = \exp(-n\lambda t) \approx 1 - n\lambda t$, получим $1 - p^n(t) \approx n\lambda t$. Тогда из формулы (5.9) получим :

$$G_Q = \frac{n\lambda t}{(n\lambda t)^m} = \frac{1}{(n\lambda t)^{m-1}}. \quad (5.10)$$

С помощью формул (5.4) можно решить и обратную задачу, т. е. по известной надежности нерезервированной системы $P_n(t) = p^n(t)$ получить требуемую надежность $[P_n(t)]_m$, оценив порядок резервирования:

$$m \geq \frac{\ln\{1 - [P_n(t)]_m\}}{\ln[1 - P_n(t)]}. \quad (5.11)$$

5.3. Поэлементное резервирование

Оценим надежность системы по модели резервирования, представленной на рис. 13. Данная система состоит из основной и $m - 1$ резервных систем, каждая из которых содержит n элементов. Вероятности безотказной работы основной системы и появления в ней отказа определяются выражениями (5.6). Вероятность безотказной работы i-й резервирующей системы для любой i-й группы ($i = \overline{1,n}$) согласно формуле (4.15)

$$P_{\text{cj}} = 1 - \prod_{j=1}^{m}[1 - p_{\text{ij}}(t)], \qquad (5.12)$$

а вероятность возникновения отказа в ней

$$Q_{\text{cj}} = \prod_{j=1}^{m}[1 - p_{\text{ij}}(t)]. \qquad (5.13)$$

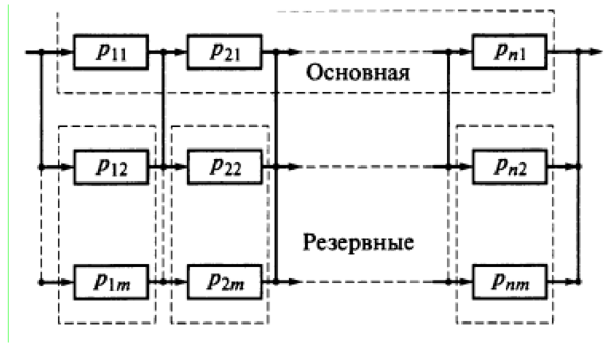

Рис. 13. Структурная модель системы с поэлементным резервированием

Тогда вероятность безотказной работы системы с поэлементным, или раздельным, резервированием и вероятность появления отказа в этой системе соответственно можно записать в виде

$$[P_m(t)]_n = \prod_{i=1}^{n}\left\{1 - \prod_{j=1}^{m}[1 - p_{\text{ij}}(t)]\right\};$$
$$[Q_m(t)]_n = 1 - \prod_{i=1}^{n}\left\{1 - \prod_{j=1}^{m} q_{\text{ij}}(t)\right\}. \qquad (5.14)$$

Если элементы, входящие в резервированную систему, равнонадежны, т.е. $p_{\text{ij}} = p(t)$, получим

$$[P_m(t)]_n = \{1 - [1 - p(t)]^m\}^n. \qquad (5.15)$$

Используя формулу (5.15), оценим выигрыш в надежности G_Q для рассматриваемого варианта резервирования. Считая $q(t) << 1$, запишем

$$[1 - q^m(t)]^n \approx 1 - \text{nq}^m(t) \approx 1 - n(\lambda t)^m. (5.16)$$

откуда

$$G_Q = \frac{Q_n(t)}{[Q_n(t)]_m} = \frac{n\lambda t}{1 - [1 - n(\lambda t)^m]} \approx \frac{1}{(\lambda t)^{m-1}}. \qquad (5.17)$$

Сравнив выражения (5.17) и (5.11), увидим, что поэлементное резервирование обеспечивает при малых интенсивностях отказов элементов надежность в n^{m-1} раз большую, чем общее резервирование. Следовательно, поэлементное резервирование наиболее эффективно для сравнительно простых узлов.

На основе соотношения (5.16) можно оценить, сколько резервных систем m необходимо для достижения требуемой надежности $[P_n(t)]_m$, если известна надежность $P_n(t) = p^n(t)$ нерезервированной системы:

$$m \geq \frac{\ln\left(1 - \sqrt[n]{[P_m(t)]_n}\right)}{\ln\left(1 - \sqrt[n]{P_n(t)}\right)}. \qquad (5.18)$$

5.4. Смешанное резервирование

Обобщенная модель системы со смешанным резервированием представлена на рис.14. В этой модели выделены три группы (I...III) элементов с одинаковыми методами резервирования. Вероятность безотказной работы такой системы

$$P_c(t) = P_I(t)P_{\mathrm{II}}(t)P_{\mathrm{III}}(t). \qquad (5.19)$$

Вероятности безотказный работы выделенных групп элементов следующие:

$$P_I(t) = 1 - \prod_{j=1}^{m}\left[1 - P_{\mathrm{cj}}(t)\right]; \qquad (5.20)$$

$$P_{\mathrm{II}}(t) = \prod_{i=n+1}^{k}\left\{1 - \prod_{j=1}^{r}\left[-p_{\mathrm{ij}}(t)\right]\right\}; \qquad (5.21)$$

$$P_{\mathrm{III}}(t) = \prod_{i=k+1}^{e} p_i(t). \qquad (5.22)$$

Таким образом, независимо от сложности реальной системы, структурную схему ее надежности можно представить комбинацией последовательных, параллельных и последовательно-параллельных соединений элементов.

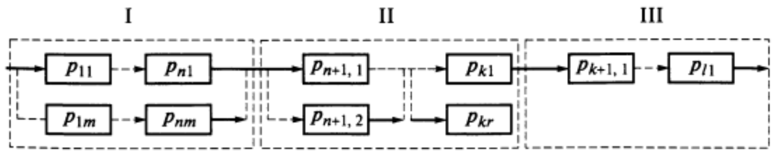

Рис. 14. Обобщенная структурная модель системы со смешанным резервированием

5.5. Мажоритарное резервирование

В отличие от рассмотренных видов структурного резервирования, применяемых как для аналоговых, так и для цифровых систем, мажоритарное резервирование используется только для цифровых РЭС. При мажоритарном резервировании сигнал в двоичном коде (логический 0 или 1) подается на нечетное число идентичных элементов. С выходов этих элементов сигналы поступают на вход так называемого решающего элемента. Назначение этого элемента состоит в выделении безошибочного сигнала из групп сигналов, среди которых могут быть и ошибочные. Выходной сигнал формируется на основе закона, определяющего функционирование решающего элемента. Простейшим и наиболее распространенным законом функционирования элемента является закон большинства, или мажоритарный закон, поэтому решающий элемент, реализующий этот закон, называется мажоритарным. Выходной сигнал такого элемента всегда принимает значение, равное значению большинства входных сигналов. Наиболее распространены мажоритарно резервированные элементы, реализующие операцию «два из трех» (рис. 15.).

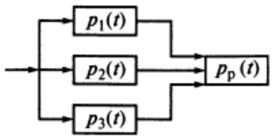

Рис. 15. Простейшая схема мажоритарно резервированного элемента

Определим вероятность безотказной работы мажоритарно резервированного элемента, если известны надежности идентичных элементов $p_i(t)$ $(i = 1...3)$ и решающего $p_р(t)$. Для наглядности используем таблицу истинности таблица, отражающую все возможные состояния элементов (0 – отказ элемента, 1 – работоспособный элемент) в схеме на рис. 15.

Возможные состояния элементов

Первый элемент	Второй элемент	Третий элемент	Четвертый элемент
0	1	1	1
0	0	1	0
0	1	0	0
0	0	0	0
1	1	1	1
1	0	0	0
1	1	0	1
1	0	1	1

Считая $p_i(t) = p(t)$, $i = \overline{1,3}$ и используя данные таблицы, можно найти вероятность безотказной работы мажоритарно резервированного элемента $P_м(t)$ в предположении, что решающий элемент обладает идеальной надежностью $p_р(t)$ = 1. Выбирая в таблице только строки с единицами в последнем столбце, можно записать

$$P_м(t) = q_1(t)p_2(t)p_3(t) + p_1(t)p_2(t)p_3(t) + \\ +p_1(t)p_2(t)q_3(t) + p_1(t)q_2(t)p_3(t). \qquad (5.23)$$

Подставив в формулу (5.23) выражения $q_i(t) = 1 - p(t)$ и $p_i(t) = p(t)$, получим

$$P_м = p^2(t)[3 - 2p(t)]. \qquad (5.24)$$

Заметим, что формулу (5.24) можно также получить воспользовавшись биномиальным законом распределения, однако приведенное решение нагляднее.

Если решающий элемент неидеален,

$$P_{м} = p^2(t)p_p(t)[3 - 2p(t)]. \qquad (5.25)$$

Помимо мажоритарных элементов, реализующих операцию «два из трех», используются и более сложные элементы, например реализующие операцию «три из пяти».

В заключение укажем, что резервирование применяется обычно в сложных технических системах, отказы в которых недопустимы по условиям работы, например в бортовых системах космических аппаратов, цифровых РЭС высоких уровней и т.д. Применяя резервирование, следует помнить, что оно усложняет структурную схему РЭС, увеличивает их массу, габаритные размеры и стоимость.

Контрольные вопросы

1. Какова цель резервирования, используемого в РЭС?
2. Какие виды резервирования вы знаете?
3. Как определяется вероятность безотказной работы систем с общим и поэлементным резервированием?
4. Как определяется кратность резервирования и чем характеризуется его эффективность?
5. Как оценивается выигрыш в надежности при общем и поэлементном резервировании?
6. Как находится порядок резервирования при общем и поэлементном резервировании?
7. Что такое мажоритарное резервирование?

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Глудкин О.П. Методы и устройства испытания РЭС и ЭВС [Текст] / О.П. Глудкин. – М.: Высш. шк., 2001. – 335 с

2. Испытания радиоэлектронной, электронно-вычислительной аппаратуры и испытательное оборудование [Текст] / под ред. А.И. Коробова. М.: Радио и связь, 2002. - 272 с.

3. Млицкий В.Д. Испытание аппаратуры и средства измерений на воздействие внешних факторов [Текст] / В.Д. Млицкий, В.Х. Беглария, Л.Г Дубицкий. М.: Машиностроение, 2003. – 567 с

4. Малинский В.Д. Контроль и испытания радиоаппаратуры [Текст] / В.Д. Малинский. М.: Энергия, 1970. - 336 с.

5. Заездный А.М. Основы расчетов по статической радиотехнике [Текст] / А.М. Заездный. – М.: Связь, 1969. – 447 с.

6. Испытательная техника: справочник [Текст]: в 2-х кн. / под ред. В. В. Клюева. - М.: Машиностроение, 1982. Кн. 1. - 528 с.

7. Никитин Л.Н. Учебное пособие по выполнению практических занятий для бакалавров, обучающихся по направлению 211000.(62) «Конструирование и технология электронных средств» [Текст]: ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный технический институт»; сост. Л. Н. Никитин. Воронеж, 2015. 123 с.

8. Кейзман В. Б. Оценка и обеспечение надежности радиоэлектронной аппаратуры [Текст]: учеб. пособие / В.В. Кейзман. – Воронеж: ВПИ, 1987 – 82 с.

9. Ефремов Г.С. Испытание РЭА на надежность. Планирование и оценка показателей [Текс] / Г.С. Ефремов, Б.Д. Забегалов. - Горький, 1974. - 44 с.

10. Бродский М.А. Аудио-и видеомагнитофоны [Текст] / М.А. Бродский. – Минск: Высш. шк., 1995. - 476 с.

11. Надежность технических систем: справочник [Текст] / под ред. И.А. Ушакова. – М.: Радио и связь, 1985. – 608 с.

СОДЕРЖАНИЕ

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к практическим работам по дисциплине
«Методы и устройства испытания ЭС»
для студентов направлений 12.03.01 «Приборостроение»
(профиль «Приборостроение)
и 11.03.03 «Конструирование и технология электронных средств»
(профиль «Проектирование и конструирование радиоэлектронных средств)
очной формы обучения

Составители:
Никитин Леонид Николаевич
Бобылкин Игорь Сергеевич

В авторской редакции

Компьютерная набор Л.Н. Никитина

Подписано к изданию 14.04.2016.
Уч.-изд. л. 4,7.

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический
университет»
394026 Воронеж, Московский просп., 14