

Министерство образования и науки РФ
Алтайский государственный университет
Физико-технический факультет

В.В. Пашнев

Надежность электронной аппаратуры

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

Барнаул 2016

© В.В. Пашнев, 2016

© ФГБОУ ВО «Алтайский государственный университет», 2016

Об издании – [1](#), [2](#)

сведения об издании

УДК 621.3.019.3(075.8)

ББК 30.14я73

П 224

Автор: Владимир Валентинович Пашнев

Рецензенты: кандидат технических наук, доцент Ю.Г. Скурыдин, кандидат технических наук, доцент А.С. Шатохин

П 224 Пашнев В.В. Надежность электронной аппаратуры: учебное пособие [Электронный ресурс] / В.В. Пашнев. – Электрон. текст. дан. (2,5 Мб). – Барнаул: ФГБОУ ВО «Алтайский государственный университет», 2016. – 1 эл. оп. диск (CD-R). – Систем. требования: PCI, Intel Pentium, 1 ГГц; 256 Мб опер. памяти; 30 Мб свобод. диск. пространства; CD-ROM; ОС Windows XP и выше; Adobe Reader. – Загл. с экрана.

Учебное электронное издание

Излагаются основные аспекты теории надежности, показатели надежности и зависимости между ними. Приведены математические модели расчета эксплуатационной безотказности элементов, расчет надежности изделий на этапе проектирования. Рассмотрен расчет надежности систем без резерва и резервированных систем. Пособие предназначено для студентов направления «Информатика и вычислительная техника» изучающих дисциплину «Конструкторско-технологическое обеспечение производства ЭВМ».

© В.В. Пашнев, 2016

© ФГБОУ ВО «Алтайский государственный университет», 2016

производственно-технические сведения

Публикуется в авторской редакции

Верстка: В. В. Пашнев

Дата подписания к использованию: 08.07.2016

Объем издания: 2,5 Мб

Комплектация издания: 1 эл. оп. диск (CD-R).

Тираж 50 дисков

ФГБОУ ВО «Алтайский государственный университет»
656049, Барнаул, ул. Ленина, 61

Оглавление

Введение

1. Основные понятия надежности ЭА

1.1. Показатели надежности ЭА

1.2. Классификация отказов

1.3. Факторы, влияющие на снижение надежности ЭА

2. Количественные показатели надежности ЭА

3. Основные законы распределения показателей надежности ЭА

4. Коэффициент электрической нагрузки и учет влияния условий эксплуатации на надежность элементов

4.1 Коэффициент электрической нагрузки

4.2 Учет влияния на надежность рабочей температуры элемента

5. Показатели надежности восстанавливаемых устройств

6. Структурная схема надежности аппаратуры

6.1. Последовательные структурные схемы надежности

6.2. Параллельное соединение элементов в структурных схемах надежности

6.3 Структурные схемы надежности со смешанным и произвольным соединением элементов

7. Резервирование ЭА

Библиографический список

Приложение 1

Приложение 2

Приложение 3

Приложение 4

Введение

Дисциплина «Конструкторско-технологическое обеспечение производства ЭВМ» является одной из завершающих в программе подготовки по направлению 09.03.01 «Информатика и вычислительная техника». Одним из важнейших вопросов, если не главным, при проектировании и конструировании вычислительной техники является вопрос надежности, как показателя качества, устройства. Повышение надежности вычислительной техники имеет множество аспектов, такие как повышение качества элементной базы электронного изделия так и профессионального мастерства разработчиков и качества производственных работ. Надежность устройства характеризуется различными факторами носящими случайный характер и поэтому в качестве показателей надежности используют вероятностные характеристики, которые базируются на математической статистики и теории вероятности. Оценка надежности изделия позволяет прогнозировать долговечность изделия, а также обоснованность принятых решений при сравнении аналогичных устройств на этапе проектирования.

В учебном пособии изложены вопросы по оценке показателей безотказности, математические основы теории надежности, которым подчиняются отказы. Рассмотрены методы количественного измерения надежности и инженерные методы расчета показателей безотказности. Рассмотрены вопросы резервирования, как способа повышения надежности изделий. Приведены необходимые справочные данные необходимые для расчета эксплуатационных показателей безотказности вычислительной техники так и при выполнении лабораторной работы в рамках изучаемого курса.

1. Основные понятия надежности ЭА

Один из основных параметров ЭА – надежность – определяется не только надежностью используемой элементной базы, так и от схемотехнических и конструкторских решений, соблюдения технологических требований при производстве изделия. Показатели надежности зависят от соблюдения условий эксплуатации и правильно проводимых регламентных работ. Продолжительность работы используемых компонентов во многом зависит от температурного режима их работы и электрической нагрузки. Вопросам повышения надежности ЭА уделяется большое внимание на всех этапах её проектирования и производства.

1.1. Показатели надежности ЭА

Надежность – свойство ЭА выполнять заданные функции, сохраняя во времени значения установленных эксплуатационных показателей в заданных пределах, при соблюдении режимов эксплуатации, правил технического обслуживания, хранения и транспортировки. Продолжительность работы ЭА до предельного состояния, установленного в нормативно-технической документации, называют *ресурсом* изделия. Надежность это комплексное понятие позволяющее оценить важнейшие характеристики изделий, такие как работоспособность, долговечность, безотказность, ремонтпригодность, сохраняемость и др.

Безотказность – способность ЭА непрерывно сохранять заданные функции, в течение установленного в технической документации времени.

Долговечность - свойство РЭА сохранять работоспособность до предельного состояния с необходимыми перерывами для технического обслуживания и ремонтов. Предельное состояние определяется технической непригодностью РЭА из-за снижения эффективности эксплуатации или требований техники безопасности и оговаривается в технической документации. Предельное состояние наступает не из-за допущенных

производственных дефектов, а в результате естественных процессов износа и старения. Долговечность оценивается *сроком службы*, под которым понимают суммарное рабочее или календарное время от начала работы изделия до разрушения или иного предельного состояния. Часть общего срока службы составляет *гарантийный срок службы*, представляющей собой суммарное рабочее или календарное время, в течении которого изготовитель производит замену изделия или его ремонт, в случае неисправности или поломки изделия. Изделия однократного применения могут иметь относительно небольшую долговечность.

Сохраняемость - свойство изделия сохранять эксплуатационные показатели в течение заданного срока хранения.

Ремонтопригодность – свойство изделия, заключающееся в его приспособленности к предупреждению и обнаружению причин возникновения отказов, поддержанию и восстановлению работоспособности путем проведения ремонтов и технического обслуживания.

Срок службы – календарная продолжительность эксплуатации (в том числе, хранение, ремонт и т. п.) от ее начала до наступления предельного состояния.

Работоспособность – это состояние ЭА, при котором значение всех параметров, характеризующих способность выполнять заданные функции, соответствует требованиям нормативно - технической или конструкторской документации.

Отказ - событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния объекта. *Отказ* – событие, приводящее к полной или частичной утрате работоспособности изделия. По причине возникновения различают три вида отказов: конструкционные, производственные и эксплуатационные.

Возникновение отказов носит случайный характер и описывается сложными вероятностными законами. В инженерной практике для оценки надежности РЭА вводят количественные характеристики, основанные на

обработке статистических данных, и требуют длительного наблюдения за работой изделий.

1.2. Классификация отказов

По *типу* отказы подразделяются на: *отказы функционирования* (выполнение основных функций объектом прекращается); *отказы параметрические* (некоторые параметры объекта изменяются в недопустимых пределах).

По своей *природе* отказы могут быть:

случайные, обусловленные непредусмотренными перегрузками, дефектами материала, ошибками персонала или сбоями системы управления и т. п.;

систематические, обусловленные закономерными и неизбежными явлениями, вызывающими постепенное накопление повреждений: усталость, износ, старение, коррозия и т. п.

По характеру изменения параметров аппаратуры *отказы* подразделяют на внезапные и постепенные.

Внезапные (катастрофические) отказы характеризуются скачкообразным изменением одного или нескольких параметров аппаратуры и возникают в результате внезапного изменения одного или нескольких параметров элементов, из которых построена ЭА (обрыв или короткое замыкание). Устранение внезапного отказа производят заменой отказавшего элемента исправным или его ремонтом.

Постепенные отказы характеризуются изменением одного или нескольких параметров аппаратуры с течением времени. Они возникают в результате постепенного изменения параметров элементов до тех пор, пока значение одного из параметров не выйдет за некоторые пределы, определяющие нормальную работу элементов (например, потеря емкости электролитического конденсатора). Это может быть последствием старения

элементов, воздействия колебаний температуры, влажности, давления, механических воздействий, и т.п. Устранение постепенного отказа связано либо с заменой, ремонтом, регулировкой параметров отказавшего элемента, либо с компенсацией за счет изменения параметров других элементов.

По взаимосвязи между собой различают отказы независимые, не связанные с другими отказами, и зависимые. По повторяемости возникновения отказы бывают одноразовые (сбои) и перемежающиеся. *Сбой* - однократно возникающий самоустраняющийся отказ, *перемежающийся* — многократно возникающий сбой одного и того же характера.

По наличию внешних признаков различают отказы явные - имеющие внешние признаки появления, и неявные (скрытые), для обнаружения которых требуется провести определенные действия.

По причине возникновения различают отказы: *конструкционные отказы*, вызванные недостатками и неудачной конструкцией изделия еще на этапе проектирования; *производственные отказы*, связанные с ошибками на этапе производства, например с нарушением технологии, при производстве; *эксплуатационные отказы*, вызванные нарушениями правил эксплуатации изделия.

По характеру устранения отказы делятся на устойчивые и самоустраняющиеся. Устойчивый отказ устраняется заменой отказавшего элемента (модуля), а самоустраняющийся исчезает сам, но может повториться. Самоустраняющийся отказ может проявиться в виде сбоя или в форме перемежающегося отказа. Появление сбоев обуславливается внешними и внутренними факторами.

К внешним факторам относятся колебания напряжения питания, вибрации, температурные колебания. Специальными мерами (стабилизации питания, амортизация, термостатирование и др.) влияние этих факторов может быть значительно ослаблено. К внутренним факторам относятся флуктуационные колебания параметров элементов, несинхронность работы отдельных устройств, внутренние шумы и наводки.

1.3. Факторы, влияющие на снижение надежности ЭА

Распределение отказов электронной аппаратуры по причине их возникновения можно разделить на три группы: схемно-конструкционные отказы (~ 45%), производственно-технологические отказы (~ 43%) и эксплуатационные отказы (~ 13%). Отказы изделия в процессе эксплуатации происходят вследствие воздействия физических, физико-химических и биологических факторов. Также важное значение играют объективные и субъективные возможности персонала, задействованного в эксплуатации изделия.

Физические факторы, влияющие на надежность изделия можно разделить на внешние и внутренние. Внешние факторы обусловлены совокупностью параметров внешней окружающей среды, влияющих на надежность ЭА. К таким факторам относятся высокая или низкая температура окружающей среды, высокая или чрезмерно низкая влажность воздуха, низкое атмосферное давление, наличие пыли, электромагнитные явления. К внутренним факторам можно отнести такие процессы, которые во время функционирования изделия влияют на состояние и режимы работы как изделия в целом, так и его составных частей. В результате длительного воздействия физических факторов происходит износ деталей изделия и их старение характеризующиеся постепенным изменением отдельных элементов конструкции и структурными изменениями материалов из которых изготовлены отдельные узлы. Все эти изменения ведут к ухудшению рабочих характеристик. К основным негативным процессам, протекающим в ЭА, относятся: вибрации, приводящие к механическим разрушениям, интерметаллизация, электромиграция, температура окружающей среды и взаимосвязанный с ней электротепловой пробой, плавление, старение.

Достаточно большое число отказов происходит вследствие механических разрушений, приводящих к обрывам проводников, нарушению целостности металлизации, пластических деформаций и появлению микротрещин в материале.

Отказы в зоне контакта разнородных металлов часто происходят в результате образования интерметаллических соединений или фазовых превращений в зоне контакта. Интерметаллизация в результате приводит к увеличению электрического сопротивления в месте контакта, а также возможен обрыв сварных соединений.

При большой локальной плотности постоянного тока через проводник происходит электромиграция – перенос массы металла. Этот процесс может приводить к нарушению металлизации, пробое защитных пленок и короткому замыканию в многослойной плате. Механизм электропереноса в интегральных схемах обычно обусловлен движением ионов по границам поверхности металла. Дрейф ионов металла связан с взаимодействием электронов проводимости с ионами алюминия. Данный эффект особенно заметен при повышении температуры до 100-200 °C и плотности тока 10^4 - 10^6 А/мм². В сочетании с диффузией и температурным градиентом все это может приводить к утончению проводника и образованию пустот и обрыву.

Внутренние дефекты металлизации, плохое соединение кристалла с корпусом в полупроводниковых структурах могут привести за счет концентрации тока в локальной области полупроводника к разогреву и в результате электротепловому пробое. Данный процесс приводит к необратимым разрушениям и отказу элемента.

Плавление проводников возможно при значительном уменьшении сечения токоведущего проводника и большом токе.

При длительной эксплуатации и также хранении возможно старение материалов в результате изменения физико-химических и механических свойств и структур материалов.

К физико-химическим факторам влияющими на надежность ЭА относят химические реакции, происходящие внутри изделий под влиянием внешней среды и физических процессов в самих устройствах. Химические реакции приводят к изменению молекулярного состава материалов и часто к отказу.

2. Количественные показатели надежности ЭА

К основным показателям надежности невосстанавливаемых объектов (показатели безотказности) относятся: *вероятность безотказной работы*; *частота отказов* (плотность распределения отказов); *интенсивность отказов*; *средняя наработка на отказ* (до отказа). В оценке надежности сложной электронной аппаратуры используется иерархический подход, вначале определяются показатели надежности отдельных элементов изделия. Полученные показатели надежности являются исходными для оценки показателей безотказности блоков, модулей, так и изделия в целом.

Интенсивность отказов - число отказов в единицу времени, отнесенное к среднему числу изделий, безотказно функционирующих в указанный промежуток времени. Интенсивность отказов наиболее полно характеризует надежность неремонтируемой ЭА в целом и отдельных модулей и блоков.

$$\lambda(t) = \frac{\Delta n_i}{N_{cp} \Delta t_i}, \text{ интенсивность отказов}$$

где $\Delta n_i = N_i + N_{i+1}$ - число отказов, $N_{cp} = (N_i + N_{i+1})/2$ - среднее число работоспособных изделий, N_i и N_{i+1} - кол-во работоспособных изделий в начале и в конце промежутка времени Δt_i .

Таким образом, интенсивность отказов в момент времени t определяет вероятность отказов в единицу времени при условии, что до момента времени t отказов не было. Зависимость интенсивности отказов от времени определяется экспериментально. Типичный вид такой зависимости представлен на рис. 1.

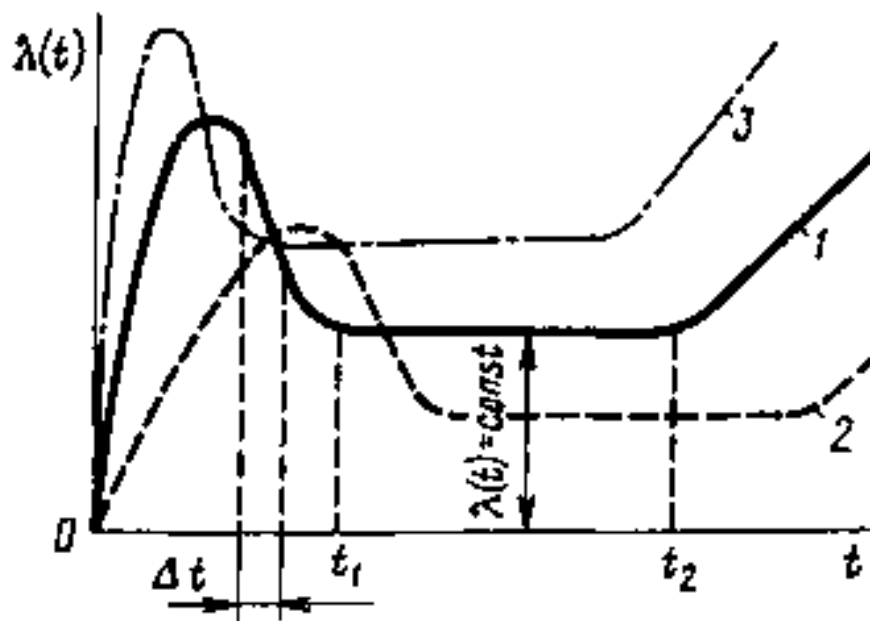


Рис.1. Зависимость интенсивности отказов от времени

Данная зависимость характеризуется тремя временными интервалами:

- 1) (от 0 до t_1) – время приработки прибора, обычно не превышает 1,5% от всего времени испытаний, наблюдается повышенное число отказов, обусловленное проявлением технологических и производственных дефектов;
- 2) (от t_1 до t_2) – время нормальной работы, характеризуется практически постоянным значением интенсивности отказов;
- 3) (от t_2) – время старения.

При изменении условий испытаний (при ослаблении (2) или ужесточении (3) условий), зависимость интенсивности отказов изменится, но три характерных временных интервала сохранятся.

Как видно из рисунка в средней части кривой наблюдается участок, на котором интенсивность отказов практически не меняется. Если предполагается работа элементов изделия в этот период, то надежность можно выразить через одно значение интенсивности отказов λ .

Учитывая, что при возрастании количества испытываемых изделий статистические значения сходятся к математическим, получаем:

$$\lambda(t) = \frac{q(\Delta t)}{\Delta t},$$

где $q(\Delta t)$ – вероятность отказа элемента.

Или интенсивность отказов можно определить

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{p(t)},$$

где $f(t)$ - распределение плотности вероятности безотказной работы (частота отказов), $p(t)$ - известная вероятность безотказной работы. Данные понятия будут определены ниже. Следовательно, интенсивность отказов можно определить как вероятность отказа элемента в единицу времени после данного момента времени при условии, что отказ до этого момента не возник. В общем случае интенсивность отказов зависит от времени, а также от режима использования элемента в конкретном блоке, условий окружающей среды и равна:

$$\lambda(t) = \lambda_0 \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \dots \alpha_n$$

где λ_0 - значение интенсивности отказов для нормальных условий; $\alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \dots \alpha_n$ - поправочные коэффициенты, учитывающие зависимость интенсивности отказов от электрической нагрузки элементов, температурного режима работы элемента, прочие факторы использования и условия окружающей среды.

Значения интенсивности отказов λ_0 определяются при нормальной температуре и атмосферном давлении, относительной влажности $65 \pm 15\%$, естественном фоне радиации, коэффициенте электрической нагрузки $K_n = 1$.

Когда известны интенсивность отказов отдельных элементов входящих в конструкцию, интенсивность отказов изделия определяются по формуле $\lambda = \sum_{i=1}^n \lambda_{0i}$, где λ_{0i} - интенсивность отказов отдельного элемента; n – количество элементов. Интенсивность отказов является основной характеристикой надежности элементов приводимой в справочниках и технической документации на изделие. На практике используют ускоренные испытания позволяющие получить данные о надежности элементов. При определении λ также используют расчет и прогнозирование, учитывая данные из опыта эксплуатации аналогичных элементов. Интенсивность отказов современных элементов находится в пределах $10^{-10} \dots 10^{-5}$ 1/ч. Также в качестве размерности используют процент на 1000 ч работы изделия и для высоконадежных элементов единицу *фит* (1 фит= 10^{-9} 1/ч).

Безотказность изделий характеризуется **вероятностью безотказной работы $P(t)$ и частотой отказов $f(t)$** .

$$P = \frac{N - n}{N} \quad , \quad f = \frac{n}{Nt}$$

где N - число изделий в начале испытания, n - число отказавших изделий за время испытания, t - время испытания.

Если число изделий большое, то P совпадает с вероятностью $P(t)$, а частота с $f(t)$. Функцию частоты можно записать следующим образом:

$$f(t) = [q(t + \Delta t) - q(t)]/\Delta t$$

где $q(t)$ - вероятность отказа, вероятность того, что в заданном интервале времени и при заданных условиях эксплуатации произойдет хотя бы один отказ изделия. Функция $q(t)$ – интегральная функция распределения

времени исправной работы t (рис. 2) и связана с вероятностью безотказной работы следующим образом $q(t) = 1 - P(t)$.

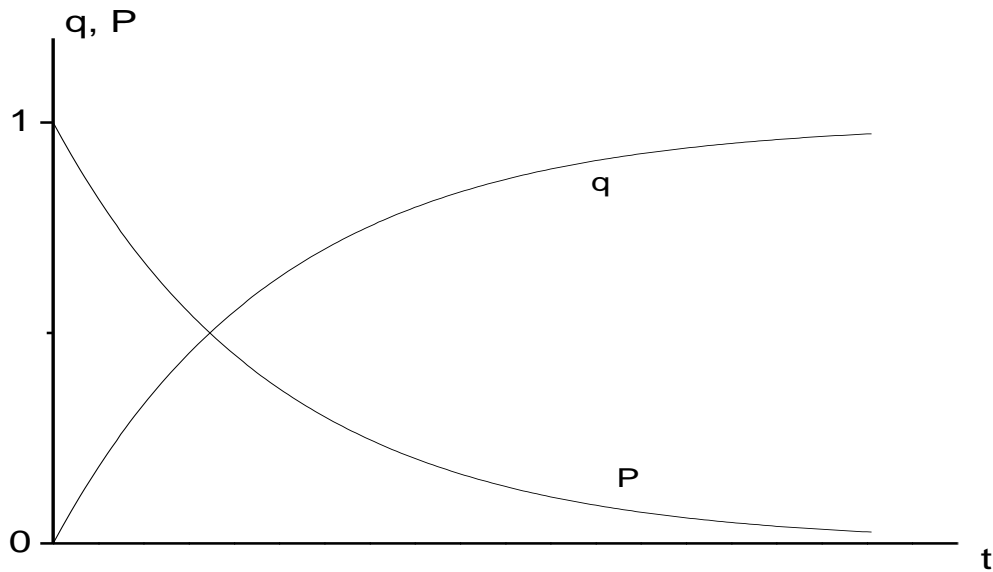


Рис. 2. Зависимость вероятности отказов и ВБР от времени

Если вероятность отказа дифференцируема, то безотказность работы изделия будет характеризоваться плотность вероятности времени исправной работы.

$$q(t) = \int_0^t f(t) dt$$

соответственно:

$$P(t) = 1 - \int_0^t f(t) dt$$

$\frac{dP(t)}{dt} = -f(t)$ –т.е. $f(t)$ - характеризует скорость снижения надежности во времени. Так как определение плотности распределения отказов сопряжено с большими трудностями данное выражение для определения

вероятности безотказной работы практически не используется. Поэтому считая, что элемент еще не работал, т.е. $t_1 = 0$, вероятность безотказной работы можно определить следующим образом:

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

Данное соотношение сохраняется при любом законе изменения интенсивности отказов и поэтому его называют первым общим законом надежности. В частном случае при $\lambda(t) = \lambda_0 = const$ соотношение для вероятности безотказной работы принимает вид:

$$P(t) = \exp(-\lambda_0 t)$$

Это выражение наиболее часто используется для расчета вероятности безотказной работы.

Если ЭА содержит N последовательно соединенных элементов то $\lambda_N(t) = N\lambda(t)$.

Важной характеристикой безотказности изделий также является **средняя наработка на отказ** T_{cp} , определяемая как математическое ожидание времени исправной работы элементов.

Статистически T_{cp} определяются так:

$$T_{cp} = \sum_{i=1}^m \Delta n_i t_{cpi} / N_i$$

$$\text{где } t_{cpi} = (t_i + t_{i+1})/2 \quad m = t/\Delta t$$

Δn_i – количество отказавших изделий за интервал времени $\Delta t_{cp} = t_{i+1} - t_i$ ($t_1 = 0$),

t – интервал времени, за который отказали все изделия,

m – число интервалов испытаний.

Средняя наработка до отказа может быть вычислена и по основным показателям надежности элементов. Например, если известна плотность распределения времени работы до отказа, то

$$T_{cp} = \int_0^{\infty} t f(t) dt$$

Можно вычислить T_{cp} и через вероятность безотказной работы

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

т.е. средняя до отказа равна площади, ограниченной кривой вероятности работы и осями координат. Можно показать, что средняя наработка до отказа связана с интенсивностью отказов, т.е. $\lambda(t) = \lambda_0 = const$

$$T_{cp} = \int_0^{\infty} e^{-\lambda_0 t} dt = \frac{1}{\lambda_0}$$

Для определения параметров надежности аппаратуры используются различные виды распределений $P(t)$.

3. Основные законы распределения показателей надежности ЭА

При проведение расчетов характеристик надежности ЭА в качестве исходных данных берутся параметры, полученные по результатам статистических испытаний невосстанавливаемых одинаковых объектов элементной базы используемой в изделии. Статистические данные, полученные в результате испытаний, входят в законы распределения, применяемые для определения параметров надежности данного типа аппаратуры. Выбор закона распределения состоит в подборе аналитической функции хорошо аппроксимирующей эмпирические функции распределения. Во многом процедура выбора процедура субъективная и зависит от знаний об изделии, его свойствах, условиях работы. Чаще всего в качестве исходных данных для расчетов параметров надежности используют интенсивность отказов или частоту отказов.

Распределение Вейбулла (применяется для аппаратуры содержащей большое число однотипных неремонтируемых элементов). Практическое применение распределения Вейбулла обусловлено его простотой и гибкостью в использовании. Меняя значения параметров, мы можем менять характер модели в широких пределах. Данная модель была предложена шведским ученым В. Вейбуллом для оценки прочности материалов, в дальнейшем математически обоснована российским ученым Б.В. Гнеденко. Поэтому данное распределение иногда называют распределением Вейбулла-Гнеденко. Вероятность безотказной работы в данном случае определяется следующим образом:

$$P(t) = \exp(-\lambda_0 t^b), \quad t \geq 0, \quad \lambda_0 > 0, \quad b > 0$$

В данном распределение используется два параметра: λ_0 задает масштаб кривой распределения по оси абсцисс, а параметр b – асимметрию распределения. Для электронных устройств с убывающей функцией

интенсивности отказов $b=0,2\div 0,4$. Другие показатели надежности соответствующие распределению Вейбулла могут, получены из следующих выражений:

частота отказов

$$f(t) = -P'(t) = \lambda_0 b t^{b-1} \exp(\lambda_0 t^b)$$

наработка до отказа

$$T_{cp} = \int_0^{\infty} P(t) dt = \lambda_0^{-1/b} \Gamma\left(1 + \frac{1}{b}\right)$$

где $\Gamma\left(1 + \frac{1}{b}\right) = \int_0^{\infty} x^{1/b} e^{-x} dx$ - гамма функция,

интенсивность отказов

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{P(t)} = \lambda_0 b t^{b-1}$$

При $b>1$ интенсивность отказов начинается с нуля и возрастает со временем. А при $b<1$ интенсивность отказов уменьшается со временем. Такое поведение функции распределения при изменении всего одного параметра позволяет применять её для описания для различных статистических закономерностей. Часто распределение Вейбулла применяют для нахождения параметров надежности в период приработки изделия ($b<1$) и при ускоренных испытаниях ЭА в жестких режимах ($b>1$).

При $b=1$ распределение Вейбулла переходит в наиболее широко применяемое экспоненциальное распределение.

Экспоненциальное распределение (частный случай распределения Вейбула, основанный на предположении постоянной во времени интенсивности отказов, хорошо применим для устройств одноразового применения, содержащей большое число неремонтируемых компонентов).

Если исключить из рассмотрения время приработки элементов, т.е. в результате сдаточных испытаний отбракованы все элементы, имеющие скрытые дефекты, а также, если не использовать изделие дольше назначенного ресурса, можно также исключить период старения изделия. В этом случае для промежутка времени соответствующего основному периоду работоспособности элементов, можно считать, что $\lambda(t)$ не зависит от времени и что $\lambda(t) = \lambda = const$. Выражение для вероятности безотказной работы упростится, и будет иметь следующий вид

$$P(t) = \exp(-\lambda t)$$

и называется экспоненциальным законом надежности. Данный вид распределение находит широкое применение в практике в силу его простоты и так как охватывает широкий круг изделий: системы с большим числом компонентов, вычислительная техника, системы автоматического управления и другие. Следует сказать, что интенсивность отказов, как постоянная величина для изделий, является самым распространенным параметром, приводящимся в документации, характеризующим надежность большинство электронных компонентов.

Вероятность отказа определяется выражением

$$q(t) = 1 - P(t) = 1 - \exp(-\lambda t)$$

Соответственно частота отказов будет иметь вид

$$f(t) = \lambda \exp(-\lambda t)$$

Наработка на отказ соответствующая данному случаю

$$T_{cp} = \int_0^{\infty} \exp(-\lambda t) dt = 1/\lambda$$

Графики изменения показателей безотказности при экспоненциальном законе распределения приведены на рис. 3.

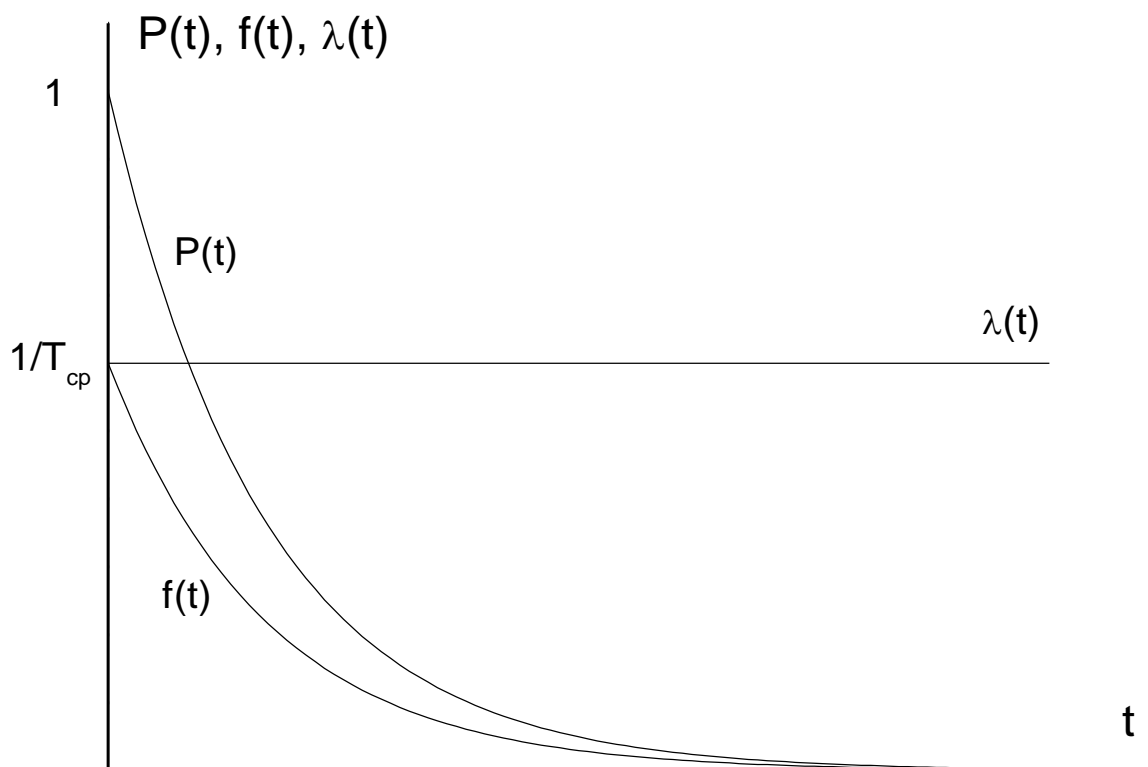


Рис.3. Показатели безотказности при экспоненциальном законе распределения

При экспоненциальном законе распределения надежности интенсивность отказов и наработка на отказ взаимно обратные величины. С

учетом этого вероятность безотказной работы можно определить следующим образом

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

За время соответствующее времени наработке на отказ вероятность безотказной работы уменьшается до уровня 0,37. При оценки надежности для промежутков времени много меньше времени наработке на отказ ($t \ll T_{cp}$) можно воспользоваться приближенными значениями для определения надежности изделия

$$P(t) = 1 - t/T_{cp} \quad \text{и} \quad q(t) = t/T_{cp}$$

Данный вид распределения хорошо применим не только для оценки надежности отдельных элементов, но используется и для определения показателей безотказности сложных систем. Экспоненциальный закон описывает надежность изделий, для которых период старения и износа не наступил, сами изделия хорошо отработаны в процессе конструирования и производства и основные причины отказов устранены. Возникновение отказов в изделии носит случайный характер, и вероятность отказа в заданный промежуток времени не зависит от отказов за время предыдущей работы.

Распределение Гаусса (для постепенных отказов). Данное распределение применяется, прежде всего, при расчете надежности в период износа и старения изделия. Для отказов в этот период характерно то, что для них нельзя указать определенные моменты времени начала и конца появления отказов. Время возникновения постепенных отказов хорошо описывается нормальным законом распределения вокруг среднего времени

безотказной работы T_{cp} , определяемого из условий появления только износных отказов.

Считаем, что плотность распределения отказов нормально распределена и описывается выражением:

$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-(t-T_{cp})^2/2\sigma^2}$$

где T_{cp} и σ – математическое ожидание и среднее квадратичное отклонение, которые по результатам испытаний принимаются равными средней наработки и дисперсии, T_{cp} является центром симметрии распределения и при $t = T_{cp}$ функция плотности распределения отказов достигает максимума. Дисперсия характеризует форму кривой частоты отказов. Чем меньше, σ тем выше и острее функция $f(t)$.

Соответственно вероятность безотказной работы определяется следующим соотношением:

$$P(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_0^{\infty} e^{-(t-T_{cp})^2/2\sigma^2} dt$$

На практике часто используют функцию Лапласа распределения положительных значений случайной величины X в следующем виде:

$$\Phi(x) = \int_0^x f(x)dx = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-(x)^2/2} dx$$

Показатели надежности изделия определяются через $\Phi(x)$ следующим образом:

$$q(t) = 0,5 + \Phi(x); \quad P(t) = 0,5 - \Phi(x)$$

Использование нормального распределения возможно при $T_{cp} \geq 3\sigma$, так как при малых значениях T_{cp} и большом значении σ функция частоты отказов может иметь отрицательные значения. В этом случае используют усеченное распределение, получаемого из классического ограничением интервала возможных значений времени до отказа. Плотность распределения отказов для интервала (t_1, t_2) при усеченном нормальном распределении определяется следующим образом $\bar{f}(t) = cf(t)$, где c - нормирующий множитель, который находится из условия, что площадь под кривой $cf(t)$ равна единице. Показатели безотказности для усеченного нормального распределения с использованием функции Лапласа для интервала (t_1, t_2) :

$$\bar{q}(t) = 1 - c(0,5 + \Phi(x)); \quad \bar{P}(t) = c(0,5 - \Phi(x))$$

Закон Эрланга (используется для восстанавливаемых изделий)

$$P(t) = \left(1 + 2t/T_{cp}\right) \exp\left(-2t/T_{cp}\right)$$

При длительной работе РЭА для планирования ее ремонта важно знать не вероятность возникновения отказов, а их число за определенный период эксплуатации. В этом случае применяют **распределение Пуассона**, позволяющее подсчитать вероятность появления любого числа случайных событий за некоторый период времени, если время между отдельными отказами распределено экспоненциально с параметром λ . Распределение Пуассона применимо для оценки надежности ремонтируемой РЭА с

простейшим потоком отказов. Распределение Пуассона может быть также применено для описания параметров надежности систем с резервированием, в которых находятся одновременно как исправные, так и отказавшие элементы. Вероятность отсутствия отказов за время t

$$P_0 = \exp(-\lambda t),$$

а вероятность i отказов за то же время

$$P_i = \frac{\lambda^i t^i \exp(-\lambda t)}{i!}$$

где $i=1, 2, 3 \dots$ - число отказов.

Особенность закона Пуассона заключается в том, что математическое ожидание и дисперсия равны между собой и в данном случае это среднее число событий в простейшем потоке отказов за время t и равны λt .

Распределение Релея (описывает поведение ЭА и её состояние с явными признаками старения и износа)

$$P(t) = \exp\left(-t^2/2C^2\right),$$

$$f(t) = \frac{t}{C^2} \exp\left(-t^2/2C^2\right),$$

$$\lambda(t) = t/C^2, \quad T_{cp} = C \sqrt{\pi/2}$$

C – параметр распределения.

4. Коэффициент электрической нагрузки и учет влияния условий эксплуатации на надежность элементов

Значения интенсивностей отказов радиоэлементов приводящиеся в технической документации соответствуют нормальным (лабораторным) условиям эксплуатации. На практике необходимо учитывать зависимость интенсивности отказов элементов от электрического режима работы элемента и условий эксплуатации. Производится перерасчет интенсивности отказов элементов, с использованием поправочных коэффициентов учитывающих различные факторы, влияющие на работу изделия.

$$\lambda(t) = \lambda_0 \prod_{i=1}^n \alpha(x_i)$$

где λ_0 – базовое значение интенсивности отказов элемента (справочное), (приложение 1);

$\alpha(x_i)$ - поправочный коэффициент, учитывающий влияние внешнего фактора x_i .

В качестве факторов влияющих на надежность элементов рассматриваются коэффициент электрической нагрузки, температура, давление, вибрации, влажность и тд. Поправочные коэффициенты, учитывающие различные условия эксплуатации приведены в приложение 3. Важнейшими взаимосвязанными факторами, влияющими на работу элементов, являются коэффициент электрической нагрузки и температура. Так как справочные данные интенсивности отказов соответствуют коэффициенту электрической нагрузки равной единице, на практике коэффициент нагрузки задают меньше, что позволяет задать более жесткие условия эксплуатации соответствующие реальным условиям эксплуатации изделия.

4.1 Коэффициент электрической нагрузки

Значение коэффициента электрической нагрузки определяется из соотношения:

$$K_n = \frac{F_{раб}}{F_{ном}}$$

где $F_{раб}$ - электрическая нагрузка элемента соответствующая его рабочей нагрузке в данной схеме;

$F_{ном}$ - номинальная или предельная электрическая нагрузка радиоэлемента.

В качестве нагрузки элемента F выбирают такие электрические характеристики, которые в наибольшей степени оказывают влияние на его надежность. Формулы для определения коэффициентов электрической нагрузки элементов приведены в приложении 4. Для одинаковых элементов схемы принимают наибольший из определенных коэффициентов, т.е. учитывают наихудший случай. В случае превышения полученного коэффициента нагрузки ($K_n > 1$) допустимого значения необходимо провести корректировку принципиальной схемы или замену типа элемента на элемент с большими предельными параметрами. Для транзисторов, диодов и аналоговых микросхем в качестве определяющего параметра берут тот где $K_n \geq 0.01 \dots 0.05$. Если коэффициент электрической нагрузки превышает значение 0.05, в качестве определяющего параметра используется рассеиваемая мощность. Рекомендованные значения K_n приведены в приложение 5. На практике для учета только влияния коэффициента электрической нагрузки без учета температуры можно использовать примерное соотношение

$$\lambda(t) = \lambda_0 K_n^b$$

где b – показатель степени, зависящий от вида элемента ($b=3\dots5$ для конденсаторов; $b=1\dots2$ для других элементов).

4.2 Учет влияния на надежность рабочей температуры элемента

Выбор режим работы элемента со значением коэффициента электрической нагрузки меньше единицы, позволяет выбрать более жесткие условия эксплуатации, прежде всего по рабочей температуре. Для учета влияния этих факторов (коэффициента электрической нагрузки и температуры) необходимо найти произведение поправочных коэффициентов. Для определения поправочных коэффициентов можно воспользоваться номограммами, построенными по результатам экспериментальных исследований (рис. 4).

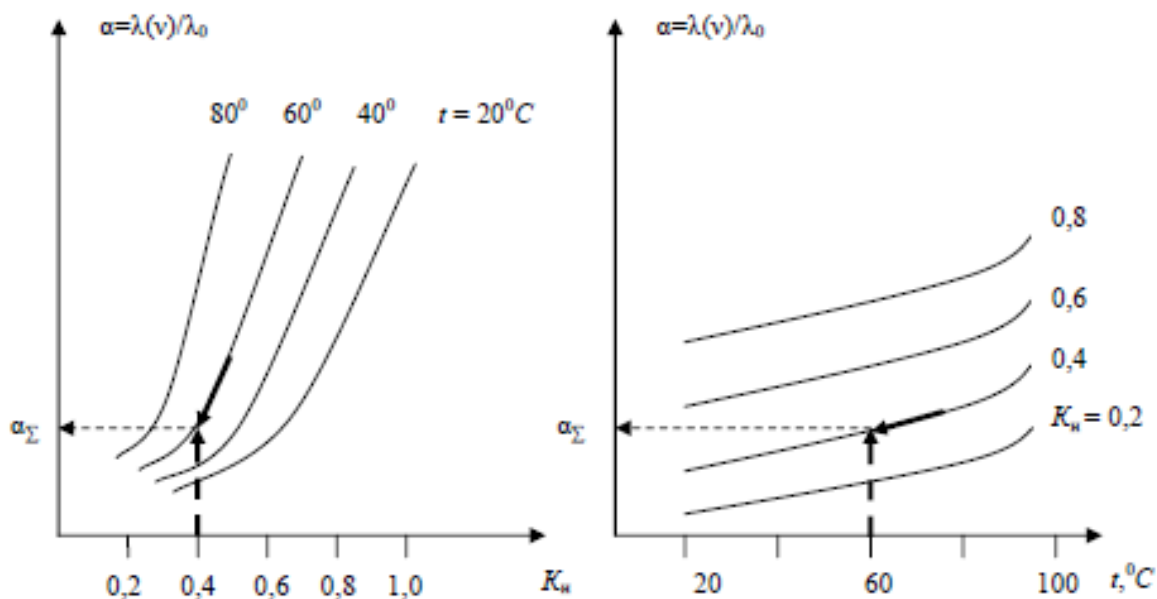


Рис. 4. Номограммы поправочных коэффициентов

Итоговый (суммарный) поправочный коэффициент находится как произведение двух коэффициентов

$$\alpha_{\Sigma} = \alpha(K_n) * \alpha(t^0)$$

где $\alpha(K_n)$ - поправочный коэффициент обусловленный влиянием коэффициента электрической нагрузки;

$\alpha(t^0)$ - поправочный коэффициент, учитывающий влияние температуры.

Также суммарный поправочный коэффициент может быть найден из таблицы, приведенной в приложении 2.

Для микросхем при одновременном учете температуры и электрической нагрузки итоговое значение интенсивности отказов может быть найдено из следующей инженерной формулы

$$\lambda(t) = \lambda_0 * 1.38^{(T-20^0C)} * 0.267^{1-K_n}$$

5. Показатели надежности восстанавливаемых устройств

Большинство электронных устройств относятся к восстанавливаемым системам – системам для которых предусмотрен ремонт в случае отказа или выработки элементом предусмотренного срока эксплуатации. После ремонта возобновляется работа устройства до его предельного состояния или следующего ремонта. Таким образом в реальных условиях эксплуатации надежность устройства зависит не только от его безотказности, но и от ремонтпригодности. При расчете показателей надежности восстанавливаемых объектов используют следующие допущения:

- экспоненциальное распределение наработки между отказами
- экспоненциальное распределение времени восстановления.

Считаем, что восстановленное изделие обладает теми же характеристиками как и до отказа. При этом допущении надежность устройства после восстановления не зависит от того сколько раз оно отказывало в прошлом. Одной из основных характеристик восстанавливаемых устройств является *ремонтпригодность* определяемая как вероятность восстановления изделия за определенный интервал времени при заданных условиях ремонта.

$$p(T_{\text{рем}}) = p(T_{\text{в}} < T_{\text{рем}})$$

где $T_{\text{в}}$ - время восстановления; $T_{\text{рем}}$ - заданное время ремонта.

Коэффициент ремонтпригодности

$$K_p = \frac{T}{T + T_{\text{в}}}$$

определяет приспособленность изделия к обнаружению и устранению отказов. Скорость восстановления определяется не только ремонтпригодностью, но службой снабжения, наличием приборов контроля, квалификацией работников.

Для восстанавливаемых устройств в дополнение к основным характеристикам надежности (вероятность безотказной работы, интенсивность отказов, средняя наработка на отказ) используются показатели ремонтпригодности (среднее время восстановления) и комплексный показатель коэффициент готовности.

Среднее время восстановления – математическое ожидание времени восстановления работоспособности устройства после отказа.

$$T_{\text{с}} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \tau_i$$

где τ_i - время, затраченное на восстановление изделия при i отказе; m – общее число восстановлений.

Среднее время восстановления устройства в целом может быть определено из известной средней интенсивности ремонта μ :

$$T_{\text{в}} = \frac{1}{\mu}$$

Интенсивность ремонта может быть найдена из следующего соотношения:

$$\mu = \sum_{i=1}^m N_i \mu_i$$

где m – число групп элементов с одинаковыми статистическими значениями интенсивностями ремонта μ_i для отдельных элементов, входящих в устройство; N_i - число элементов в i –ой группе.

На практике для оценки времени восстановления используют таблицы затрат времени на устранение отказов для типовых радиоэлементов.

Таблица 5.1

Затраты времени на устранение отказов

Тип элемента	Интервал времени восстановления $t_{\min} - t_{\max}$
Транзисторы	1,75 – 3,18
Диоды, стабилитроны, варикапы и ...	1,1 – 2,51
Резисторы	0,3 – 1,275
Конденсаторы	0,4 – 1,7
Трансформаторы	0,6 – 2,848
Реле	0,7 – 2,975
Переключатели	0,25 – 1,063
Измерительные приборы	0,4 – 1,7
Индикаторные лампы	0,03 - 0,128
Элементы коммутации	0,575 – 2,444

Коэффициент готовности – определяет вероятность того, что устройство будет в работоспособном состоянии в произвольный момент времени кроме периодов, когда устройство не используется. Коэффициент готовности определяется отношением среднего времени исправной работы (T) к сумме времени восстановления (T_e) и времени работы.

$$K_e = \sum_{i=1}^m t_i / \sum_{i=1}^m t_i + \sum_{i=1}^m \tau_i = T / (T + T_e)$$

Коэффициент готовности зависит не только от надежности изделия, но и от степеней приспособленности устройства к проведению ремонтных работ. Зная интенсивность отказов и интенсивность ремонта изделия можно найти коэффициент готовности и коэффициент ремонтпригодности следующим образом;

$$K_g = \frac{\lambda}{\lambda + \mu}$$

$$K_p = \frac{\mu}{\lambda + \mu}$$

С учетом времени, затраченным на профилактические работы и на цикл наработки и простоя, коэффициент готовности равен

$$K_g = \frac{T}{T + T_{\text{в}} + T_{\text{проф}}}$$

При ограниченном числе работников службы ремонта, появляется дополнительное время – время ожидания T_0 и тогда коэффициент готовности:

$$K_g = \frac{T + T_0}{T + T_{\text{в}}}$$

Коэффициент вынужденного простоя –

$$K_n = 1 - K_g$$

6. Структурная схема надежности аппаратуры

Любое изделие можно разделить на отдельные блоки и модули, которые в свою очередь состоят из отдельных элементов. Структурная надежность любого изделия это его результирующая надежность при известной структурной схеме надежности и известных значениях надежности всех элементов, составляющих структурную схему.

При этом под элементами понимаются как интегральные микросхемы, транзисторы, диоды и другие электронные компоненты, выполняющие определенные функции и включенные в общую электрическую схему ЭА. Так же в структурную схему входят и элементы вспомогательные, не входящие в структурную схему ЭА: соединения паяные, разъемные, элементы крепления и т. д. Структурные схемы надежности нельзя отождествлять с принципиальными, функциональными, структурными электрическими схемами, хотя в частности они могут и совпадать.

При дальнейшем определении показателей надежности ЭА будем исходить из того, что надежность элементов, входящих в изделие, задана однозначно. Выбираем число элементов, которое должно быть учтено при расчете вероятности безотказной работы. Учитываем только те элементы, выход из строя которых приводит к отказу изделия в целом. Для нахождения показателей безотказности составляем структурную схему устройства, указываем элементы устройства (блоки, модули) и связи между ними. Затем производим анализ схемы и выделяем элементы и связи, которые определяют выполнение основной функции данного устройства. Из выделенных основных элементов и связей составляем функциональную схему, причем в ней выделяют элементы не по конструктивному, а по функциональному признаку, чтобы при расчете были конструктивно оформленные блоки. При составлении отдельных структурных схем надежности иногда следует объединять те конструктивные элементы, отказы которых взаимосвязаны, но не влияют на отказы других элементов.

Структурные схемы надежности можно свести к четырем типам: последовательному; параллельному; смешанному и произвольному.

6.1. Последовательные структурные схемы надежности

Последовательное соединение элементов в структурной схеме надежности – это соединение при котором отказ одного элемента приводит к отказу в всей системы в целом (рис. 6.1).

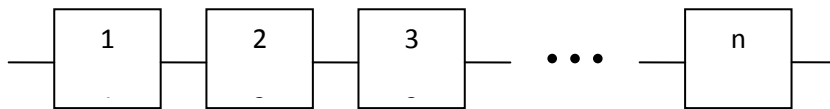


Рис.6.1. Последовательное соединение элементов в структурной схеме надежности

При последовательном включении элементов (рис. 6.1) для надежной работы схемы необходима работа всех функциональных элементов.

Тогда вероятность безотказной работы схемы будет равна произведению вероятностей безотказной работы всех функциональных элементов:

$$P(t) = P_1(t)P_2(t) \dots P_n(t) = \prod_{i=1}^n P_i(t)$$

где n – число элементов схемы, $P_i(t)$ - вероятность безотказной работы i элемента.

Суммарная интенсивность отказов n последовательно соединенных элементов находится как сумма интенсивностей отказов отдельных элементов:

$$\lambda(t) = \sum_{i=1}^n \lambda_i(t)$$

или для случая равнонадёжных элементов: $\lambda(t) = n\lambda_i(t)$.

Для случая экспоненциального распределения наработки до отказа $P_i(t) = \exp(-\lambda_i t)$ среднее время наработки на отказ составит:

$$T_{cp} = 1 / \sum_{i=1}^n \lambda_i$$

Таким образом при увеличении числа последовательно соединенных элементов необходимо снижать интенсивность отказов отдельных элементов чтобы обеспечить требуемое значение вероятности безотказной работы. Вероятность безотказной работы последовательного соединения всегда ниже вероятности безотказной работы отдельного элемента схемы.

6.2. Параллельное соединение элементов в структурных схемах надежности

Для другого простейшего случая построения структурной схемы параллельного соединения элементов (рис. 6.2) при вероятности отказов $q_i(t)$ для каждого из элементов, входящих в схему, отказ всей схемы будет иметь место тогда, когда откажут все элементы, т.е.

$$q(t) = q_1(t)q_2(t) \dots q_n(t) = \prod_{i=1}^n q_i(t)$$

где n - число параллельно соединенных элементов. При этом вероятность безотказной работы всей схемы:

$$P(t) = 1 - q(t) = 1 - \prod_{i=1}^n q_i(t)$$

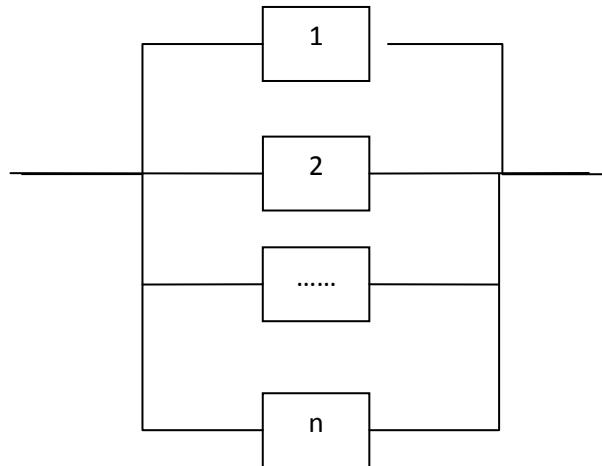


Рис.6.2. Параллельное соединение элементов в структурной схеме надежности

С учетом интенсивности отказов и экспоненциального распределения потока отказов

$$P(t) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - e^{\int_0^t \lambda_i(t) dt})$$

а для элементов имеющих одинаковую интенсивность отказов и при $\lambda = \text{const}$ выражение принимает вид

$$P(t) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - e^{-\lambda t})$$

Для экспоненциального распределения наработки до отказа среднее время наработки на отказ составит

$$T_{cp}(t) = \frac{1}{\lambda} + \frac{1}{2\lambda} + \dots + \frac{1}{n\lambda}$$

6.3. Структурные схемы надежности со смешанным и произвольным соединением элементов

В общем случае, при смешанном параллельно-последовательном соединении элементов следует найти вероятность безотказной работы для каждой из цепочек параллельно включенных элементов, а затем для всей схемы, считая их соединение последовательным.

В случае, когда нельзя представить структурную схему в виде последовательной, параллельной или смешанной, мы имеем дело с так называемой схемой произвольной структуры. Для такого типа схем расчет надежности производится методом прямого перебора всех возможных состояний. Рассмотрим расчет надежности на примере наиболее часто встречающейся мостовой схеме (рис. 6.3).

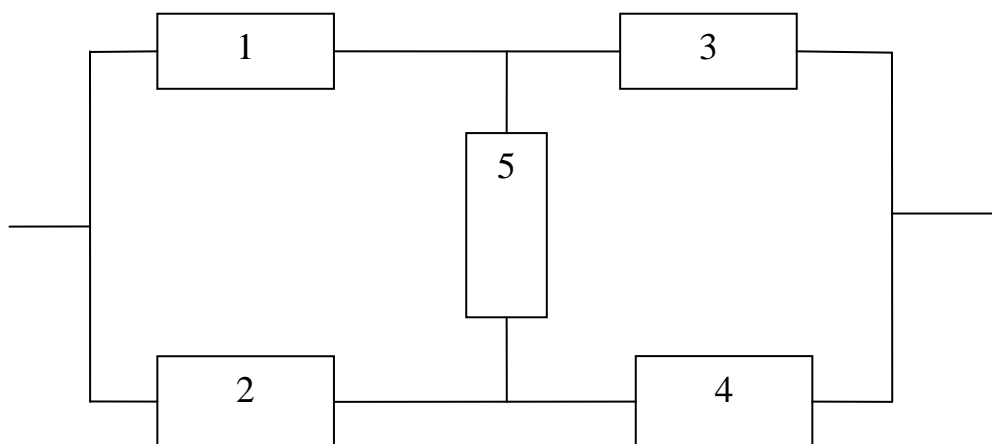


Рис. 6.3. Произвольная структурная схема надежности

Для данной схемы возможны, пять вариантов, когда схема будет находиться в работоспособном состоянии: все элементы работают; пять случаев отказа по одному элементу; восемь вариантов отказа по два элемента схемы; два варианта отказа по три элемента. Тогда для элементов имеющих одинаковую интенсивность отказов вероятность безотказной работы можно найти следующим образом

$$P(t) = p^5(t) + 5p^4(t)q(t) + 8p^3(t)q^2(t) + 2p^2(t)q^3(t)$$

где $P(t)$ – вероятность безотказной работы всей схемы; $p(t)$ – вероятность безотказной работы одного элемента схемы; $q(t)$ – вероятность отказа одного элемента.

Следует сделать следующее важное замечание, что схема электрическая принципиальная не всегда совпадает со структурной схемой надежности. Например, электрически последовательно соединенные два конденсатора могут привести к отказу только в случае пробоя (короткого замыкания) обоих элементов, что соответствует параллельной структурной схем надежности. Отказ же в виде обрыва одного из конденсаторов приведет к отказу всей схемы, что соответствует последовательной структурной схеме надежности.

7. Резервирование ЭА

При недостаточной надежности элементов, входящих в устройство, хорошим способом обеспечения необходимого уровня надежности ЭА является резервирование. Под резервированием понимают включение в устройство дополнительных (избыточных) элементов или узлов, позволяющих скомпенсировать отказы отдельных частей устройства и обеспечить более высокую надежность в целом. Резервирование предусматривает быструю замену (автоматически или вручную) элементов или узлов основного устройства резервными, которые забирают на себя выполнение рабочих функций отказавших основных элементов. Аппаратная избыточность резервируемых устройств характеризуется кратностью резерва. *Кратность резерва* – отношение числа резервных элементов к числу резервируемых, выраженное несократимой дробью. Дублирование – это резервирование с кратностью резерва равной единице.

Различают следующие виды резервирования: структурное (элементное) резервирование; функциональное резервирование (способность элементов выполнять дополнительные функции в место основных и наряду с ними); информационное резервирование (использование избыточной информации сверх минимально необходимой для выполнения задач). Для расчета и обеспечения надежности электронной аппаратуры необходимо рассматривать в первую очередь структурное резервирование. Способы структурного резервирования в зависимости от подключения резервных элементов и устройств представлены на рисунке 7.1.

К еще одному виду резервирования можно отнести так называемое временное резервирование. Временное резервирование предусматривает использование дополнительного рабочего времени, использующаяся для повторение операции или для устранения неисправного состояния технического устройства.

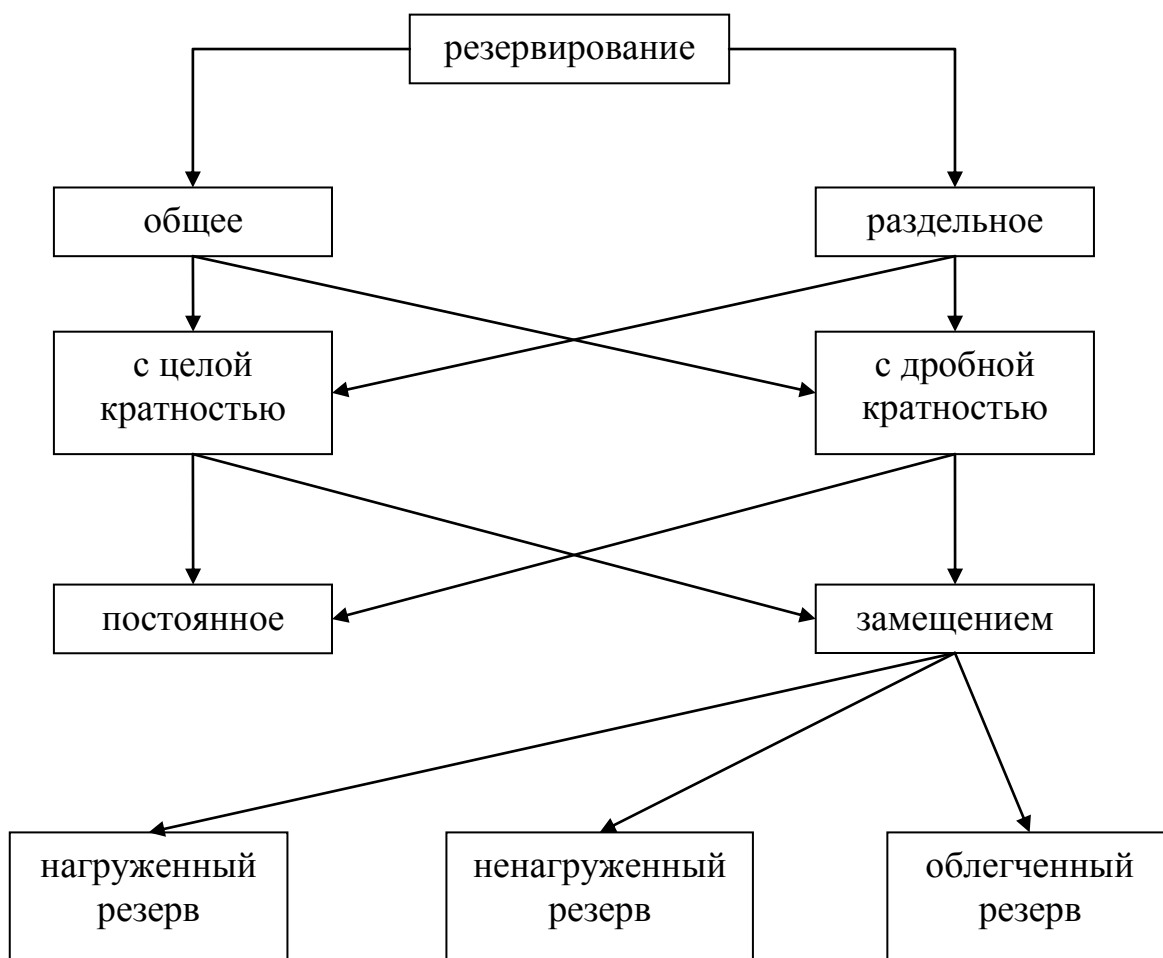


Рис. 7.1 Способы структурного резервирования

Общее резервирование (рис. 7.2) предусматривает резервирование отдельного узла или всего устройства в целом.

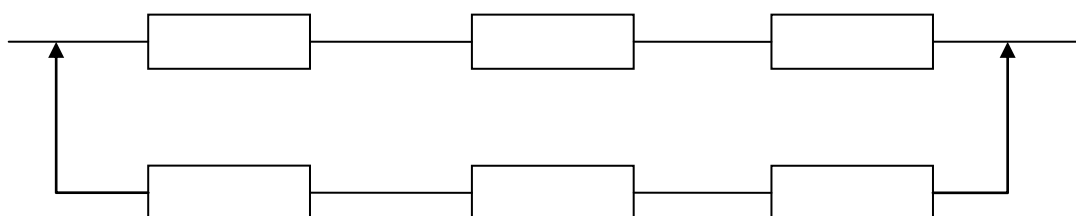


Рис. 7.2. Общее резервирование

Общее резервирование может быть с постоянным подключением либо с замещением. В качестве резервного используется аналогичное основному устройство. Этот способ не всегда экономически оправдан, так как при отказе одного элемента в основном устройстве необходимо заменять весь технологический узел.

Раздельное резервирование – это когда резервируются отдельные элементы или группы элементов (рис. 7.3.).

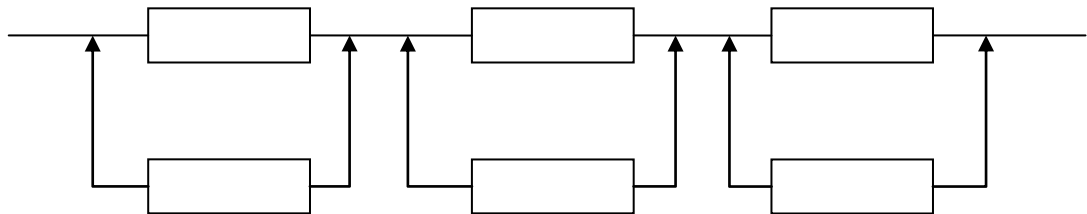


Рис. 7.3. Раздельное резервирование (постоянное или замещением)

По элементное резервирование дает наибольший эффект в повышение надежности, но это приводит к усложнению конструкции, увеличению размеров устройства и к его удорожанию.

По схеме включения элементов различают постоянное резервирование, мажоритарное резервирование, резервирование замещением с целой кратностью, скользящее резервирование.

Постоянное резервирование – это резервирование, при котором при отказе любого элемента в резервированной группе выполнение устройством необходимых функций обеспечивается оставшимися элементами без переключений. При постоянном резервировании резервные элементы функционируют наравне с основными, поэтому можно сказать, что деление на основной элемент и резервный достаточно условно. В случае отказа основного элемента резервный продолжает выполнять его функции без перерыва на переключение, так как он вводится в действие одновременно с

основным. В большинстве случаев отказавшие элементы не ремонтируются, поэтому работает до тех пор, пока исправен хотя бы один резервный элемент.

Вероятность отказа устройства

$$q(t) = q_1(t)q_2(t) \dots q_n(t)$$

где $q_i(t)$ – вероятность отказа одного элемента, n – количество элементов.

Таким образом, вероятность безотказной работы резервированного устройства

$$P_p(t) = 1 - [1 - P_0(t)]^n$$

где $P_0(t)$ - вероятность безотказной работы одного элемента.

Средняя наработка на отказ резервированного устройства

$$T_p = \frac{1}{\lambda} \left[1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \dots + \frac{1}{n} \right]$$

где средняя наработка на отказ одного элемента $T = 1/\lambda$, λ – интенсивность отказа одного элемента.

Постоянное резервирование применяется в основном в аппаратуре низкого уровня, в силу существенного усложнения конструкции и её удорожания, а также там, где не допустим даже кратковременный перерыв в работе устройства. Следует отметить, что при отсутствии восстановления элементов, прирост надежности не велик. Чтобы увеличить наработку на отказ в два раза необходимо четыре элемента.

Резервирование замещением – это резервирование когда подключение резервного элемента происходит только после отказа основного элемента.

Переключение на резервный элемент может осуществляться как автоматически, так и вручную. При практических расчетах надежности предполагают, что переключатели, с помощью которых происходит замещение основного элемента на резервный абсолютно надежны. В сравнении с постоянным резервированием, резервирование с замещением обеспечивает заметно большее увеличение надежности изделия. Но в то же время данный способ резервирования предусматривает, хоть и кратковременный, перерыв в работе устройства на период переключения на резервный элемент схемы. Предполагаем, что отказать могут только основные элементы, поэтому средняя наработка на отказ определяется числом элементов

$$T_p = \frac{n}{\lambda} = nT$$

А вероятность безотказной работы при резервировании замещением равна

$$P_p(t) = \sum_{i=0}^{n-1} \frac{(\lambda t)^i}{i!} e^{-\lambda t}$$

В случае кратности резерва один к одному

$$P_p(t) = (1 + \lambda t)e^{-\lambda t}$$

Частным случаем резервирования замещением является *скользящее резервирование* (резервирование с дробной кратностью). В этом случае для группы одинаковых основных элементов используется несколько резервных элементов (число резервных меньше числа основных элементов) каждый из которых может заменить любой из отказавших элементов из основной

группы. Преимуществом данного вида резервирования является заметное сокращение числа резервных элементов. Устройство состоит из m основных и n резервных элементов (рис. 7.4).

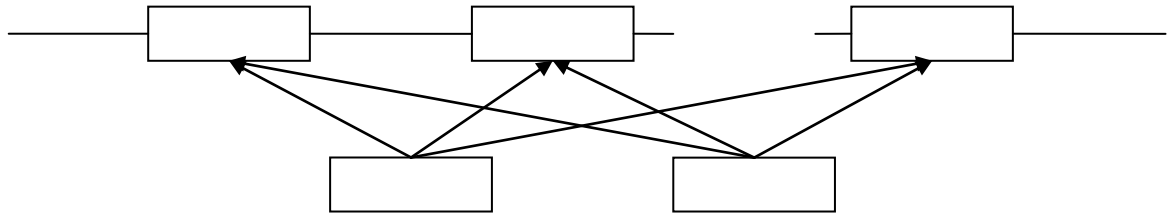


Рис.7.4. Скользящее резервирование

Для практического применения наиболее интересен режим работы при ненагруженном резерве. Средняя наработка на отказ в данном случае определяется таким образом

$$T_p = \frac{n+1}{\lambda m} = \frac{n+1}{m} T$$

Вероятность безотказной работы для устройства со скользящим резервированием

$$P_p(t) = \sum_{i=0}^n \frac{(m\lambda t)^i}{i!} e^{-m\lambda t}$$

Мажоритарное резервирование – частный случай постоянного резервирования (рис. 7.5). Мажоритарное резервирование в основном применяют в случае получения достоверной информации от датчиков и других элементов, выдающих информацию. Число элементов резервированном устройстве должно быть обязательно нечетным. Выходы одинаковых элементов (датчиков) подключаются мажоритарному узлу М.

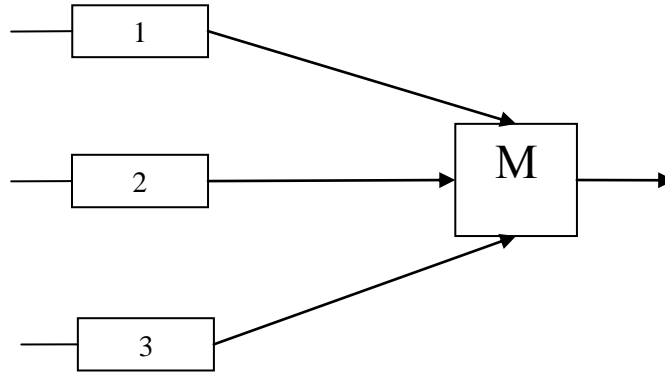


Рис. 7.5. Мажоритарное резервирование

Условием безотказной работы при мажоритарном резервировании является безотказная работа мажоритарного узла и любых двух элементов (например, двух из трех, как на рисунке). Если один из трех элементов отказал, то на вход М поступает два одинаковых и один неверный сигналы. На выходе мажоритарного узла будет сигнал такой же, как большинство одинаковых сигналов. Вероятность безотказной работы в случае мажоритарного резервирования

$$P_p(t) = P_M(t)[3P_0^2(t) - 2P_0^3(t)]$$

где P_0 – вероятность безотказной работы одного элемента, P_M – вероятность безотказной работы мажоритарного узла.

Относительное увеличение вероятности безотказной работы от числа элементов и их надежности представлены на рис. 7.6.

В случае трех элементов, относительное увеличение вероятности безотказной работы определяется следующим образом

$$\frac{P_p(t)}{P_0(t)} = P_M(t)P_0(t)[3 - 2P_0(t)]$$

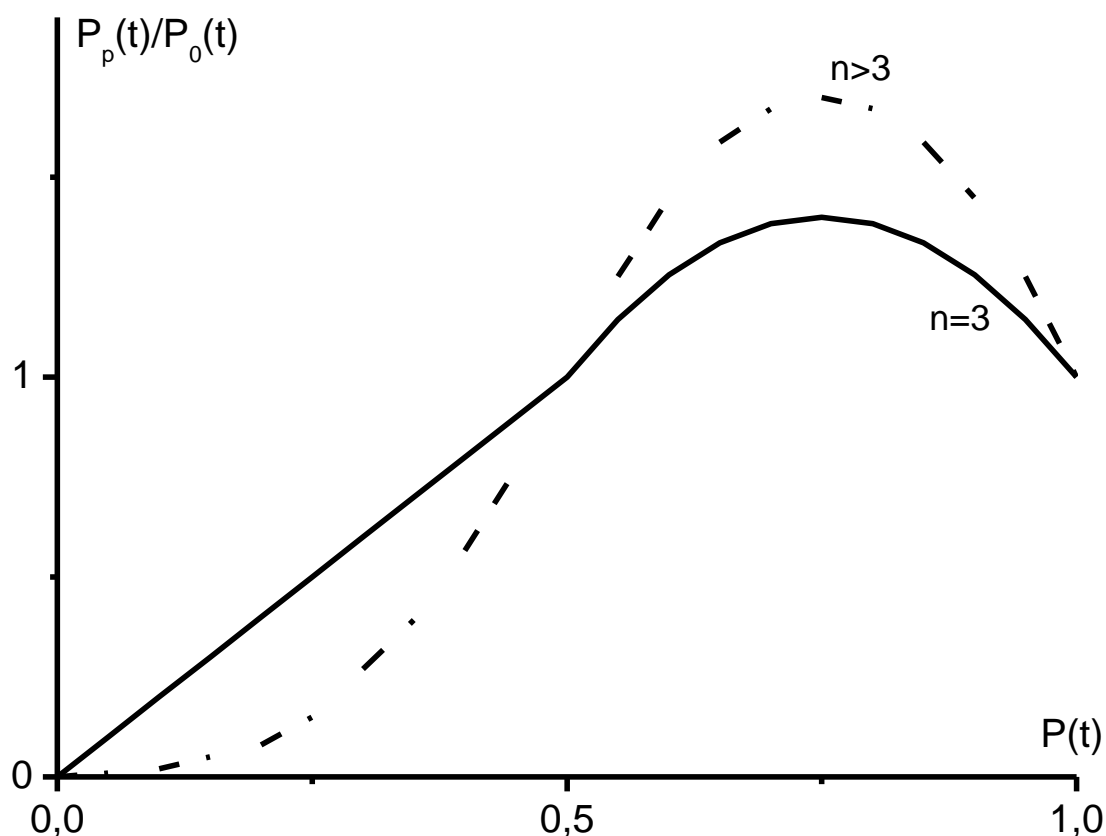


Рис. 7.6. Относительное увеличение вероятности безотказной работы при мажоритарном резервировании

Из графика видно, что резервирование нецелесообразно при вероятности безотказной работы одного элемента $P_0(t) > 0,5$. При невыполнении данного условия надежность устройства не увеличивается при любом числе элементов в резервированной группе.

В зависимости от режима работы резервных элементов различают нагруженный, облегчённый и ненагруженный резерв. В нагруженном резерве все резервные элементы находятся в том же режиме электрической нагрузки, что и основной элемент и имеют такую же интенсивность отказов.

Резервирование с восстановлением – эффективный способ повышения надежности аппаратуры для систем длительного пользования. Отказавшие устройства ремонтируются и вновь вводятся в эксплуатацию. Отказы не

накапливаются и надежность устройства при той же кратности резерва существенно возрастает. Виды резервирования такие же, что и для систем без восстановления. Неисправный элемент, в случае отказа, поступает в службу ремонта. После ремонта через случайный промежуток времени, распределенный по экспоненциальному закону, элемент возвращается в устройство. Показатели надежности для резервирования с восстановлением, в случае дублированного устройства зависят от λ – интенсивности отказов и μ – интенсивности восстановления, а также от их отношения $M = \lambda/\mu$.

Если $M \geq 0,01$, вероятность безотказной работы определяется следующим образом

$$P_d(t) = \frac{a+b}{2a} \exp\left[-\frac{1}{2}(b-a)t\right] + \frac{a-b}{2a} \exp\left[-\frac{1}{2}(a+b)t\right]$$

$$\text{где } a = \sqrt{\lambda^2 + 6\lambda\mu + \mu^2}; b = \mu + 3\lambda$$

Средняя наработка на отказ устройства

$$T_d = \frac{1+3M}{2M} T$$

При $M < 0,01$, вероятность безотказной работы дублированного устройства рассчитывается по приближенной формуле

$$P_d \approx \exp\left(-t/T_d\right)$$

Коэффициент готовности дублированного устройства может, определен из следующей формулы

$$K_r = \frac{1+2M}{1+2M+2M^2}$$

Библиографический список

1. Бацула А.П. Конструирование радиоэлектронных устройств: Учебное пособие. – Томск: Томский межвузовский центр дистанционного образования. 2002. – 231 с.
2. Боровиков С.М., Цыпельчук И.Н., Троян Ф.Д.; под ред. С.М. Боровикова Расчет показателей надежности радиоэлектронных средств: учеб.-метод. пособие/– Минск: БГУИР, 2010. – 68 с.: ил.
3. Громов Ю.Ю., Иванова О.Г., Мосягина Н.Г., Набатов К.А. .Надёжность информационных систем: учебное пособие / - Тамбов: Изд-во ГОУ ВПО ТГТУ, 2010. – 160 с.
4. Григорьян С.Г. Конструирование электронных устройств систем автоматизации и вычислительной техники – Ростов н/Д: Феникс, 2007. – 303,[1] с.
5. Конструкторско-технологическое проектирование электронной аппаратуры: учеб. для вузов / К. И. Билибин, А. И. Власов, Л. В. Журавлева и др.; ред. В. А. Шахнов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. – 528 с.
6. Механцев Е. Б. Обеспечение надежности электронных средств: конспект лекций. Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2001
7. Опарина, Н. М. Надежность информационных систем : учеб. пособие. В 2 ч. Ч. 1 / – Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2007. – 122 с.: ил.
8. Основы проектирования электронных средств [Электронный ресурс] : электрон. учеб.-метод. комплекс дисциплины / С. И. Трегубов [и др.] ; Сиб. федерал. ун-т. - Красноярск: ИПК СФУ, 2008.
- 9.Преснухин Л.Н., Шахнов В.А. Конструирование электронных вычислительных машин и систем: Учеб. для вузов. – М.: Высшая школа, 1986. – 572 с.
10. Савельев М.В. Конструкторско-технологическое обеспечение производства ЭВМ: Учеб. Пособие для вузов. – М.: Высш. Шк. 2001. – 319 с.: ил.

Базовые значения интенсивности отказов радиоэлементов и элементов конструкции изделия

Наименование элемента	$\lambda_0 \cdot 10^{-6}$ [1/ч]
Микросхемы полупроводниковые цифровые: логические, арифметические, микропроцессоры и микропроцессорные комплекты, регистры сдвига и др.	0,023
оперативные запоминающие устройства (ОЗУ)	0,03
постоянные запоминающие устройства (ПЗУ, ППЗУ, РПЗУ)	0,018
Микросхемы со средней степенью интеграции	0,013
Большие интегральные схемы	0,010
Микросхемы полупроводниковые аналоговые	0,028
Гибридные ИМС	0,043
Транзисторы германиевые до 2 мВт	0.40
Транзисторы германиевые до 20 мВт	0.70
Транзисторы германиевые до 200 мВт	0.60
Транзисторы германиевые свыше 200 мВт	1.91
Транзисторы кремниевые до 150 мВт	0.84
Транзисторы кремниевые до 1 Вт	0.50
Транзисторы кремниевые до 4 Вт	0.74
Транзисторы кремниевые субминиатюрные двойные	2.60
Транзисторы кремниевые микроволновые	9.66
Транзисторы полевые кремниевые	0,065
Транзисторы полевые арсенидогаллиевые	0,578
Транзисторы СВЧ малой и средней мощности	0,064
Транзисторы СВЧ большой мощности	0,18

Продолжение приложения 1

Наименование элемента	$\lambda_0 \cdot 10^{-6}$ [1/ч]
Диоды кремниевые	0.20
Диоды кремниевые карбидные	0.10
Диоды германиевые	0.157
Диоды субминиатюрные двойные	0.85
Диоды СВЧ:	
кремниевые	0,162
кремниевые умножительные и настроечные	1,61
арсенидогаллиевые	0,21
Мосты выпрямительные	0,21
Стабилитроны	0,0041
Варикапы	0,022
Тиристоры кремниевые	0,20
Фотодиоды	0,185
Фототранзисторы	0,15
Фоторезисторы	1,8
Светодиоды	0,034
Оптопары диодные и транзисторные	0,051
Оптопары тиристорные, резисторные, микросхемы оптоэлектронные	0,19
Конденсаторы бумажные	0.05
Конденсаторы керамические	0.15
Конденсаторы керамические переменные	0.02
Конденсаторы слюдяные	0.075
Конденсаторы стеклянные	0.06
Конденсаторы электролитические	0.035

Продолжение приложения 1

Наименование элемента	$\lambda_0 \cdot 10^{-6}$ [1/ч]
Конденсаторы воздушные переменные	0.034
Конденсаторы танталовые	0.6
Конденсаторы пластиковые	0.135
Конденсаторы нейлоновые	0.01
Резисторы композиционные 0.25 Вт	0.016
Резисторы композиционные 0.5 Вт	0.06
Резисторы композиционные 2 Вт	0.071
Резисторы композиционные переменные	0.053
Резисторы пленочные	0.03
Резисторы металлопленочные	0.2
Резисторы пленочные прецизионные	0.004
Резисторы проволочные	0.087
Резисторы проволочные прецизионные	0.073
Резисторы угольные	0.045
Резисторы нелинейные	0.11
Терморезисторы	0,007
Потенциометры	0.26
Индикаторы полупроводниковые:	
буквенно-цифровые	0,42
дисплеи с диодной матрицей	0,21
Индикаторы вакуумные люминесцентные:	
цифровые	0,83
буквенно-цифровые	0,69
Индикаторы вакуумные накаливаемые цифровые	0,31
Индикаторы жидкокристаллические многоразрядные	0,88

Наименование элемента	$\lambda_0 \cdot 10^{-6}$ [1/ч]
Индикаторы газоразрядные:	
цифровые	0,79
буквенно-цифровые	2,25
Трансформаторы входные	1.09
Трансформаторы выходные	0.09
Трансформаторы высокочастотные	0.045
Трансформаторы звуковой частоты	0.02
Трансформаторы силовые	0.025
Трансформаторы импульсные	0.17
Трансформаторы разделительные	0.03
Трансформаторы регулировочные	0.1
Автотрансформаторы	0.06
Дроссели низкочастотные	0.175
Дроссели высокочастотные	2.1
Катушки индуктивности	0.02
Обмотки электродвигателя	0.08
Электродвигатели асинхронные	8.6
Электродвигатели синхронные	0.359
Электродвигатели вентиляторные	2.25
Электродвигатели постоянного тока	9.36
Сельсины	0.35
Умформеры	3.8
Тиратроны маломощные	6.0
Тиратроны мощные	5.0
Тиратроны субминиатюрные	1.7

Продолжение приложения 1

Наименование элемента	$\lambda_0 \cdot 10^{-6}$ [1/ч]
Лампы неоновые	0.1
Лампы накаливания	0.64
ЭЛТ с магнитным отклонением	1.65
ЭЛТ с электрическим отклонением	1.02
Датчики оптические	4.7
Аккумуляторы	7.2
Батареи одноразрядные	30
Батареи заряжаемые	1.4
Антенны	0.36
Волноводы жесткие	1.1
Волноводы гибкие	2.6
Микрофоны динамические	20
Громкоговорители динамические	4
Тумблеры	0.06
Выключатели быстродействующие	0.4
Выключатели магнитные	0.358
Выключатели термические	0.3
Гнезда	0.01
Соединители штепсельные	0.062
Соединители с контрольным гнездом	0.0004
Контакты	0.25
Реле малогабаритные	0.25
Переключатели кнопочные	0.07
Переключатели блокировочные	0.5
Переключатели миниатюрные	0.25

Продолжение приложения 1

Наименование элемента	$\lambda_0 \cdot 10^{-6}$ [1/ч]
Переходные колодки	5.2
Клеммы, зажимы	0.0005
Выводы высокочастотные	2.63
Провода соединительные	0.015
Кабели	0.475
Предохранители плавкие	0.5
Изоляторы	0.05
Изолирующие шайбы, прокладки	0.001
Плата печатной схемы	0.7
Пайка печатного монтажа	0.01
Пайка навесного монтажа	0.03
Пайка объемного монтажа	0.02

**Поправочные коэффициенты к интенсивности отказов в
зависимости от электрической нагрузки и температуры**

Тип элемента	t	Коэффициент нагрузки, K _н								
	°C	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
Транзисторы кремниевые	20	0.16	0.18	0.20	0.35	0.43	0.52	0.63		
	30	0.16	0.19	0.22	0.37	0.46	0.55	0.67		
	40	0.17	0.20	0.23	0.40	0.51	0.59	0.72		
	50	0.18	0.21	0.24	0.45	0.55	0.65	0.78		
	60	0.19	0.22	0.26	0.50	0.61	0.71	0.85		
	70	0.20	0.23	0.27	0.56	0.70	0.81	0.97		
Транзисторы германиевые	20	0.23	0.26	0.35	0.42	0.50	0.70	0.74		
	30	0.27	0.32	0.45	0.52	0.65	0.83	0.95		
	40	0.32	0.40	0.55	0.66	0.81	1.04	1.22		
	50	0.42	0.50	0.68	0.84	1.08	1.31	1.50		
	60	0.52	0.63	0.86	1.10	1.38	1.65	1.90		
	70	0.63	0.80	1.11	1.40	1.73	2.05	2.35		
Диоды кремниевые	20	0.77	0.78	0.79	0.81	0.83	0.85	0.88		
	30	0.85	0.85	0.86	0.88	0.90	0.92	0.97		
	40	0.92	0.92	0.94	0.97	1.00	1.04	1.08		
	50	0.98	1.00	1.02	1.05	1.09	1.13	1.19		
	60	1.04	1.08	1.11	1.16	1.22	1.30	1.39		

Тип элемента	t °C	Коэффициент нагрузки, K _н								
		0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
Диоды германиевые	20	0.15	0.22	0.30	0.39	0.50	0.62	0.74		
	30	0.19	0.26	0.35	0.45	0.55	0.66	0.79		
	40	0.23	0.32	0.41	0.51	0.63	0.76	0.91		
	50	0.32	0.45	0.60	0.76	0.95	1.15	1.41		
	60	0.53	0.66	0.86	1.13	1.40	1.75	2.13		
Конденсаторы слюдяные негерметичные	30			0.08	0.11	0.22	0.27			
	40			0.09	0.13	0.28	0.35			
	50			0.10	0.15	0.36	0.46			
	60			0.12	0.20	0.45	0.62			
	70			0.15	0.26	0.60	0.83			
	80			0.22	0.43	0.92	1.46			
	90			0.38	0.82	1.70	2.40			
	100			0.57	1.36	3.0	3.40			
Конденсаторы слюдяные герметичные	20			0.36	0.49	0.18	0.23			
	30			0.38	0.50	0.22	0.27			
	40			0.42	0.54	0.28	0.35			
	50			0.49	0.63	0.36	0.46			
	60			0.61	0.75	0.45	0.62			
	70			0.76	0.96	0.60	0.83			
	80			0.97	1.40	0.92	1.46			
	90			1.360	2.80	1.70	2.40			
	100			1.70	4.50	3.00	3.40			

Тип элемента	t °C	Коэффициент нагрузки, K _н								
		0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
Конденсаторы стеклянные, плёночные. металлобумажные	20			0.36	0.49	0.64	0.80			
	30			0.38	0.50	0.70	0.94			
	40			0.42	0.54	0.80	1.10			
	50			0.49	0.63	0.95	1.43			
	60			0.61	0.75	1.19	2.00			
	70			0.76	0.96	1.58	2.30			
	80			0.97	1.40	2.10	2.80			
	90			1.30	2.80	2.70	3.80			
	100			1.70	4.50	3.50	5.00			
Конденсаторы электролитические с алюминиевым анодом	20			0.48	0.40	0.48	0.65			
	30			0.60	0.48	0.60	0.82			
	40			0.90	0.64	0.90	1.24			
	50			1.40	1.17	1.40	1.73			
	60			2.10	1.80	2.10	2.30			
	70			3.60	2.90	3.60	4.30			
	80			5.60	4.40	5.60	7.00			
	90			8.00	6.50	8.00	11.0			
	100			11.4	9.00	11.4	18.00			

Тип элемента	t	Коэффициент нагрузки, К _н								
	°C	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
Конденсаторы электролитические с танталовым анодом	20			0.20	0.20	0.20	0.39			
	30			0.22	0.22	0.22	0.41			
	40			0.30	0.30	0.30	0.47			
	50			0.40	0.40	0.40	0.57			
	60			0.50	0.50	0.50	0.70			
	70			0.65	0.65	0.65	0.86			
	80			0.80	0.80	0.80	1.05			
	90			1.00	1.00	1.00	1.30			
	100			1.25	1.25	1.25	1.65			
Резисторы непроволочные	20	0.20	0.26	0.35	0.42	0.50	0.60	0.72	0.84	1.00
	30	0.27	0.34	0.43	0.51	0.62	0.75	0.88	1.07	1.26
	40	0.33	0.42	0.51	0.60	0.76	0.94	1.11	1.38	1.71
	50	0.40	0.50	0.59	0.71	0.92	1.17	1.38	1.76	2.22
	60	0.47	0.57	0.67	0.82	1.08	1.43	1.70	2.17	2.81
	70	0.54	0.64	0.75	0.94	1.26	1.72	2.04	2.69	3.52
	80	0.6	0.71	0.84	1.07	1.46	2.05	2.48	3.31	4.40
	90	0.70	0.79	0.92	1.20	1.66	2.4	2.99	4.04	5.40

Тип элемента	t	Коэффициент нагрузки, К _н								
	°С	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
Резисторы проволочные	20	0.02	0.02	0.05	0.10	0.20	0.34	0.51	0.73	1.00
	30	0.04	0.04	0.08	0.14	0.26	0.43	0.60	0.81	1.10
	40	0.06	0.06	0.11	0.19	0.32	0.53	0.69	0.92	1.29
	50	0.09	0.09	0.15	0.27	0.43	0.68	0.88	1.16	1.71
	60	0.11	0.11	0.18	0.32	0.51	0.79	1.04	1.43	2.18
	70	0.13	0.14	0.21	0.37	0.61	0.91	1.24	1.80	2.89
	80	0.16	0.17	0.24	0.43	0.73	1.07	1.50	2.26	3.65
	90	0.18	0.19	0.28	0.49	0.88	1.24	1.82	2.80	4.49
	100	0.18	0.20	0.30	0.52	0.96	1.33	2.00	3.15	5.00
Моточные изделия, трансформаторы, обмотки	20		0.1	0.1	0.1	0.2	0.3	0.6	0.8	1.0
	30		0.1	0.1	0.2	0.3	0.6	1.0	1.4	1.6
	40		0.1	0.2	0.2	0.5	1.2	1.8	2.4	3.0
	50		0.2	0.2	0.3	0.8	1.8	2.8	4.0	5.2
	60		0.2	0.3	0.4	1.2	2.5	4.1	6.4	8.6
	70		0.3	0.4	0.6	2.0	4.2	7.2	10.7	14.0

Влияние условий эксплуатации на надежность радиоэлементов

Таблица 1. Объединенный поправочный коэффициент для оценки воздействия влажности и температуры

Относительная влажность, %	Температура, °C	Поправочный коэффициент, $\alpha_{\text{вл}}$
60-70	20-40	1,0
90-98	20-25	2,0
90-98	30-40	2,5

Таблица 2. Поправочные коэффициенты для оценки воздействия механических факторов на неамортизированную аппаратуру

Условия эксплуатации аппаратуры	Вибрация	Ударные нагрузки	Суммарные воздействия
Лабораторные	1,00	1,00	1,07
Стационарные (полевые)	1,04	1,03	1,07
Автофургонные	1,30	1,05	1,37
Железнодорожные	1,4	1,10	1,54
Самолетные	1,46	1,13	1,65
Корабельные	1,30	1,05	1,37

Таблица 3. Поправочный коэффициент в зависимости от высоты

Высота, км	α_{∂}	Высота, км	α_{∂}
0-1	1,00	8-10	1,25
1-2	1,05	10-15	1,30
2-3	1,10	15-20	1,35
3-5	1,14	20-25	1,38
5-6	1,16	25-30	1,40
6-8	1,20	30-40	1,45

Таблица 4. Поправочный коэффициент влияния атмосферного давления

Давление, кПа	Поправочный коэффициент
0,1...1,3	1,45
1,3...2,4	1,40
2,4...4,4	1,35
4,4...12,0	1,35
12,0...24,0	1,30
24,0...32,0	1,25
32,0...42,0	1,20
42,0...50,0	1,16
50,0...65,0	1,14
65,0...80,0	1,10
80,0...100,0	1,00

**Электрические характеристики и формулы используемые для
определения коэффициента электрической нагрузки K_n**

Элемент	Формулы для определения K_n	Характеристика
Резистор	$P_{\text{раб}}/P_{\text{ном}}$	Рассеиваемая мощность
Конденсатор	$U_{\text{раб}}/U_{\text{ном}}$	Напряжение
Транзистор биполярный и полевой	$I_{\text{раб}}/I_{\text{max}}$ $U_{\text{раб}}/U_{\text{max}}$ $U_{\text{раб}}/U_{\text{max}}$	Ток коллектора (стока), напряжение коллектор – эмиттер (сток – исток), рассеиваемая мощность коллектор – эмиттер (сток – исток).
Диод выпрямительный и импульсный	$I_{\text{раб}}/I_{\text{max}}$ $U_{\text{раб}}/U_{\text{max}}$	Прямой ток, обратное напряжение
Варикапы, диоды СВЧ	$U_{\text{раб}}/U_{\text{max}}$	Рассеиваемая мощность
Стабилитроны	$I_{\text{раб}}/I_{\text{max}}$ $U_{\text{раб}}/U_{\text{max}}$	Ток стабилизации, рассеиваемая мощность
Тиристоры	$I_{\text{раб}}/I_{\text{max}}$ $U_{\text{раб}}/U_{\text{max}}$	Средний прямой ток, рассеиваемая мощность

Элемент	Формулы для определения K_n	Характеристика
Трансформаторы	$U_{раб}/U_{max}$	Мощность
Дроссели, катушки индуктивности	$I_{раб}/I_{max}$	Ток подмагничивания, протекающий ток
Полупроводниковые индикаторы	$I_{раб}/I_{max}$	Средний прямой ток
Реле	$I_{раб}/I_{max}$	Коммутируемый ток
Разъёмы, переключатели, тумблеры, кнопки и тп.	$I_{раб}/I_{max}$	Протекающий ток
Цифровые интегральные микросхемы	$\sum_{i=1}^n I_{раб} / \sum_{i=1}^n I_{max}$	Суммарный выходной ток при номинальном напряжении питания
Аналоговые микросхемы	$I_{раб}/I_{max}$ $U_{раб}/U_{max}$	Выходной ток, рассеиваемая мощность при номинальном напряжении питания