

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ

САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П. КОРОЛЕВА

УПРАВЛЕНИЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ПРОГРАММ
СТАУ РЕГИСТ. № 20/28

РАСЧЕТ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

Самара 2007

УДК 621.396.8

Расчет надежности электронных средств. Метод. указ. / Самарский государственный аэрокосмический университет; Сост. А.В.Зеленский, Ньюхалов А.А. Самара, 2007.

Методические указания предназначены для студентов обучающихся по специальности 21.02.01 – проектирование и технологии РЭС. В них изложены вопросы расчета надежности электронных средств и приведены необходимые справочные данные.

Приведенный материал может быть использован студентами при выполнении курсовых и дипломных проектов.

Выполнено на кафедре конструирования и производства РЭС.

Печатается по решению редакционно-издательского совета Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П.Королева

**ВОЗВРАТИТЕ КНИГУ НЕ ПОЗЖЕ
обозначенного здесь срока**

1. Основные понятия

Надежность — свойство объекта выполнять заданные функции, сохраняя во времени и в заданных пределах значения установленных эксплуатационных показателей. При этом объект — техническое изделие определенного целевого назначения, рассматриваемое в периоды проектирования, производства, испытаний и эксплуатации.

Объект — техническое изделие определенного целевого назначения, рассматриваемое в периоды проектирования, производства, испытаний и эксплуатации.

Объектами могут быть различные системы и их элементы.

Элемент — простейшая составная часть изделия, в задачах надежности может состоять из многих деталей.

Система — совокупность совместно действующих элементов, предназначенная для самостоятельного выполнения заданных функций.

Понятия элемента и системы трансформируются в зависимости от поставленной задачи.

Надежность объекта характеризуется следующими основными состояниями и событиями.

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

Работоспособность — состояние объекта, при котором он способен выполнять заданные функции, сохраняя значения основных параметров, установленных нормативно-технической документацией.

Основные параметры характеризуют функционирование объекта при выполнении поставленных задач.

Понятие исправность шире, чем понятие работоспособность. Ботоспособный объект обязан удовлетворять лишь тем требованиям нормативно-технической документации, выполнение которых обеспечивает нормальное применение объекта по назначению. Таким образом, если объект неработоспособен, это свидетельствует о его неисправности. С другой стороны, если объект исправен, то это не означает, что он неработоспособен. Предельное состояние — состояние объекта, при котором его применение по назначению недопустимо или нецелесообразно.

Для некоторых объектов предельное состояние является последним в его функционировании, т.е. объект снимается с эксплуатации, для других — определенной фазой в эксплуатационном графике, требующей проведения ремонтно-восстановительных работ. В связи с этим, объекты могут быть:

- невосстанавливаемые, работоспособность которых в случае возникновения отказа, не подлежит восстановлению;
- восстанавливаемые, работоспособность которых может быть восстановлена, в том числе и путем замены.

К числу невосстанавливаемых объектов можно отнести, например: подшипники качения, полупроводниковые изделия, интегральные схемы и т.п. Объекты, состоящие из многих элементов, например, бытовая электроника, радиолокационная станция и другая электронная аппаратура, являются восстанавливаемыми, поскольку их отказы связаны с повреждениями одного или немногих элементов, которые могут быть заменены.

Отказ — событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния объекта.

Критерий отказа — отличительный признак или совокупность признаков, согласно которым устанавливается факт возникновения отказа. По типу отказы подразделяются на:

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 возникновения:

- внезапный отказ — отказ, проявляющийся в резком (мгновенном) изменении характеристик объекта;
- постепенный отказ — отказ, происходящий в результате медленного, постепенного ухудшения качества объекта.

Внезапные отказы обычно проявляются в виде механических повреждений элементов (трещины — хрупкое разрушение, пробой изоляции, обрывы и т. п.) и не сопровождаются предварительными видимыми признаками их приближения. Внезапный отказ характеризуется независимостью момента наступления от времени предыдущей работы.

Надежность является комплексным свойством, включающим в себя в зависимости от назначения объекта или условий его эксплуатации ряд простых свойств: безотказность, долговечность, ремонтпригодность, сохраняемость.

Безотказность — свойство объекта непрерывно сохранять работоспособность в течение некоторой наработки или в течение некоторого времени. Наработка — продолжительность или объем работы объекта, измеряемая в любых неубывающих величинах (единица времени, число циклов нагружения и т. п.).

Долговечность — свойство объекта сохранять работоспособность до наступления предельного состояния при установленной системе технического обслуживания и ремонтов.

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

Сохраняемость — свойство объекта непрерывно сохранять требуемые эксплуатационные показатели в течение (и после) срока хранения и транспортирования.

В зависимости от объекта надежность может определяться всеми перечисленными свойствами или частью их.

Показатель надежности количественно характеризует, в какой степени данному объекту присущи определенные свойства, обуславливающие надежность. Наиболее важные показатели надежности невозстановливаемых объектов — показатели безотказности, к которым относятся: вероятность безотказной работы, плотность распределения отказов, интенсивность отказов, средняя наработка до отказа.

Показатели надежности представляются в двух формах (определениях): статистическая (выборочные оценки) и вероятностная.

Статистические определения (выборочные оценки) показателей получаются по результатам испытаний на надежность. Допустим, что в ходе испытаний какого-то числа однотипных объектов получено конечное число интересующего нас параметра — наработки до отказа. Полученные числа представляют собой выборку некоего объема из общей «генеральной совокупности», имеющей неограниченный объем данных о наработке до отказа объекта. Количественные показатели, определенные для «генеральной совокупности», являются истинными (вероятностными) показателями, поскольку объективно характеризуют случайную величину — наработку до отказа. Показатели, определенные для выборки, и, позволяющие сделать какие-то выводы о случайной величине, являются выборочными (статистическими) оценками. Очевидно, что при достаточно большом

Вероятностная форма представления показателей удобна при аналитических расчетах, а статистическая – при экспериментальном исследовании надежности.

Статистическая оценка вероятности безотказной работы (эмпирическая функция надежности) определяется:

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

отношением числа $N(t)$ объектов, безотказно проработавших до момента наработки t , к числу объектов, исправных к началу испытаний ($t = 0$) - к общему числу объектов N . Оценку вероятности безотказной работы можно рассматривать как показатель доли работоспособных объектов к моменту наработки t . Поскольку $N(t) = N - n(t)$, то

$$P(t) = 1 - \frac{n(t)}{N} = 1 - Q(t),$$

где $Q(t) = n(t) / N$ – оценка вероятности отказа.

В статистическом определении оценка вероятности отказа представляет эмпирическую функцию распределения отказов. Так как события, заключающиеся в наступлении или не наступлении отказа к моменту наработки t , являются противоположными, то

$$P(t) + Q(t) = 1.$$

Рассмотрим показатель составляющей надежности - долговечность.

Технический ресурс – наработка объекта от начала его эксплуатации или возобновления эксплуатации после ремонта до наступления предельного состояния. Строго говоря, технический ресурс может быть регламентирован следующим образом: до среднего, капитального, от капитального до ближайшего среднего ремонта и т. п. Если регламентация отсутствует, то имеется в виду ресурс от начала эксплуатации до достижения предельного состояния после всех видов ремонтов.

Для невосстанавливаемых объектов понятия технического ресурса и наработки до отказа совпадают. Назначенный ресурс – суммарная наработка объекта, при достижении которой эксплуатация должна быть прекращена независимо от его состояния.

В процессе эксплуатации ЭС подвергаются воздействию комплекса внешних и внутренних факторов (температура, влажность, вибрация, удары, радиация, уровень электрической нагрузки и др.) Одновременное воздействие на ЭС комплекса внешних и внутренних факторов приводит к изменениям электрических и механических свойств материалов, из которых изготовлены элементы ЭС и, следовательно, к изменению параметров этих элементов. Изменения параметров элементов могут происходить как скачкообразно, так и постепенно. Соответственно в зависимости от характера изменения параметра элемента к моменту возникновения отказа различают внезапные и постепенные отказы.

Внезапные отказы наступают из-за внезапной случайной концентрации нагрузок, действующих внутри и вне элемента, обычно приводят к отказу электронных средств и проявляются в виде мгновенного изменения параметра элемента вследствие обрыва, пробоя, короткого замыкания и т.п.

Постепенные отказы проявляются в виде постепенного изменения параметра элемента (уменьшение коэффициента усиления транзистора, увеличение тока утечки, изменение величины сопротивления).

Основной причиной постепенных отказов являются необратимые физико-химические процессы старения материалов. Постепенные отказы могут быть вызваны также непредусмотренными условиями эксплуатации, изменением уровней внешних и внутренних факторов (температура, влажность, напряжение питания и др.). При постепенном изменении параметра какого-либо элемента ЭС может оставаться работоспособной до тех пор, пока хотя бы один из ее выходных параметров не выйдет за допустимые пределы.

Удельный вес постепенных отказов особенно значителен для активных элементов; для резисторов и конденсаторов характерно преобладание внезапных отказов.

2. Расчёт надёжности при проектировании электронных средств

Рассмотрим непосредственно расчёт надёжности технических систем. Прежде всего, определим задачу расчета надежности: определение показателей безотказности системы, состоящей из невосстанавливаемых элементов, по данным о надежности элементов и связях между ними. Далее установим цель расчета надежности:

- обосновать выбор того или иного конструктивного решения;
- выяснить, достижима ли требуемая надежность при существующей технологии разработки и производства;
- если необходимо, выяснить возможность и целесообразность резервирования.

Расчет надежности состоит из следующих этапов:

1. Определение состава рассчитываемых показателей надежности.
2. Составление (синтез) структурной логической схемы надежности (структуры системы), основанное на анализе функционирования системы (какие блоки включены, в чем состоит их работа, перечень свойств исправной системы и т. п.), и выбор метода расчета надежности.

3. Составление математической модели, связывающей рассчитываемые показатели системы с показателями надежности элементов.

4. Выполнение расчета, анализ полученных результатов, корректировка расчетной модели.

Одновременное воздействие на ЭС комплекса внешних и внутренних факторов приводит к изменениям электрических и механических свойств материалов, из которых изготовлены элементы ЭС, и, следовательно, к изменению параметров этих

элементов. Поэтому рассмотрение надёжности ЭС следует начинать с надёжности электрорадиоэлементов, входящих в её состав.

Для решения задач по оценке надёжности и прогнозированию работоспособности объекта необходимо иметь математическую модель, которая представлена аналитическими выражениями одного из показателей $P(t)$, или $f(t)$, или $\lambda(t)$. Основной путь для получения модели состоит в проведении испытаний, вычислении статистических оценок и их аппроксимации аналитическими функциями.

Вид аналитической функции, описывающей изменение показателей надёжности $P(t)$, $f(t)$ или $\lambda(t)$, определяет закон распределения случайной величины, который выбирается в зависимости от свойств объекта, его условий работы и характера отказов.

Выбор закона распределения состоит в подборе аналитической функции наилучшим образом аппроксимирующей эмпирические функции надёжности. Выбор, в значительной мере, процедура неопределённая и во многом субъективная, при этом многое зависит от априорных знаний об объекте, его свойствах и условиях работы.

На основе многолетних статистических исследований было определено, что 95% отказов электронных средств подчиняется экспоненциальному закону, который описывает наработку до отказа объектов, у которых в результате сдаточных испытаний (выходного контроля) отсутствует период приработки, а назначенный ресурс установлен до окончания периода нормальной эксплуатации. Эти объекты можно отнести к «не стареющим», поскольку они работают только на участке с $\lambda(t) = \text{Const}$. Круг таких объектов широк: сложные технические системы с множеством компонентов, средства вычислительной техники и системы автоматического регулирования и т.п. Также экспоненциальное распределение широко применяется для оценки надёжности энергетических объектов.

Условия эксплуатации ЭС оказывают существенное влияние на её надёжность. В том случае

(влажность, температура, пониженное давление, механические воздействия). Поэтому, при расчете надежности по внезапным отказам вводятся поправочные коэффициенты, учитывающие действие вибрации и ударных нагрузок α_m , влажности — α_v , изменения температуры α_t , пониженного давления — α_d . Так как все воздействия ухудшают надежность, поэтому все соответствующие коэффициенты больше или равны 1. Значения указанных коэффициентов для различных условий эксплуатации приведены в приложении, а также можно найти в справочной литературе.

Окончательное значение интенсивности отказов ЭС находится по формуле:

$$\Lambda = \sum \lambda_i n_i \alpha_i,$$

где $\alpha_i = \alpha_{im} \alpha_{it} \alpha_{iv} \alpha_{id}$ соответствующие поправочные коэффициенты, учитывающие влияние механических воздействий (α_{im}), влаги (α_{iv}), температуры (α_{it}) и давления (α_{id}).

Вероятность безотказной работы ЭС определяется по формуле:

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

где t - заданное время непрерывной работы ЭС.

Очевидно, что из приведённого выше описания, и наличия довольно большой номенклатуры электрорадиоэлементов (которая к тому же непрерывно пополняется) следует, что расчёт надёжности ЭС требует достаточно большого объема справочной информации, что ведёт к большим временным затратам и повышенной трудоёмкости.

Наиболее широко в инженерной практике применяются ориентировочный и окончательный расчеты надежности.

Ориентировочный расчет надежности производится на этапе эскизного проектирования, когда отсутствуют точные сведения об электрических режимах работы радиоэлементов, но известно приблизительное число элементов каждого типа.

Окончательный расчет производится на этапе технического проектирования. В этом случае известно точное число элементов каждого типа и уровень электрической нагрузки каждого элемента.

При расчете $P(t)$ в качестве t часто берётся общее требуемое время эксплуатации ЭС. Это неверно, так как при этом не учитывается природа внезапных отказов, вызванных случайными концентрациями нагрузок внутри и вне элемента. Для внезапных отказов, как указывалось ранее, закон распределения времени до отказа является экспоненциальным. Необходимость определения t как заданного времени непрерывной работы теоретически обосновывается характеристическим свойством экспоненциального закона распределения: вероятность безотказной работы на данном интервале $(t \dots t + \tau)$ не зависит от времени предшествующей работы, а зависит только от длины интервала τ . Поэтому для экспоненциального закона распределения времени работы элемента до отказа вероятность безотказной работы $P(t \dots t + \tau)$ равна

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

Это свойство называется характеристическим, так как если оно выполняется для какого-то закона распределения, то этот закон обязательно будет экспоненциальным.

Надежность ЭС зависит не только от выбора схемы и технических характеристик аппаратуры, но и от режимов работы аппаратуры и условий ее эксплуатации; от технологии производства и от используемой в производстве системы контроля качества; от качества исходных материалов и комплектующих элементов; от уровня квалификации производственного, контрольного и эксплуатирующего аппаратуру персонала.

Обеспечить высокую надежность аппаратуры можно суммой мероприятий, выполняемых на всех этапах разработки, производства и эксплуатации. Особое место в этом процессе принадлежит этапу разработки, так как все принципы обеспечения надежности выбирают на этом этапе. Разработчик современной ответственной ЭС должен стремиться обеспечить чрезвычайно высокую надежность

аппаратуры, учитывая все реальные эксплуатационные ситуации. При этом необходимо удовлетворить целый ряд основных требований к изделию: обеспечение ее необходимых технических и тактико-технических характеристик (габариты, масса, чувствительность, точность, быстродействие, время приведения в готовность), ограничение конструктивной сложности, снижение стоимости и сроков разработки и т.д. Разработчик должен выбрать оптимальное решение, обеспечивающее и высокую надежность, и требуемые технические характеристики.

Требования к надежности разрабатываемого изделия задаются в техническом задании на разработку. На ранних стадиях разработки изделия составляется план обеспечения надежности, который на последующих стадиях разработки детализируется и уточняется. Одним из элементов этого плана является расчет надежности проектируемого изделия. Первые расчеты надежности делают на ранних стадиях разработки, а с уточнением сведений об изделии уточняются и расчеты надежности. Существующие методы расчета надежности позволяют получить расчетным путем количественные характеристики надежности разрабатываемого изделия и сопоставить эти характеристики с заданными в техническом задании.

Все расчеты надежности в основном сводятся к определению вероятности безотказной работы $P(t)$ и средней наработки до первого отказа $T_{ср}$ по известным интенсивностям отказов элементов схемы. В зависимости от полноты учета факторов, влияющих на работу изделия и его надежность, последовательно проводят три расчета надежности: прикидочный, ориентировочный, окончательный. Прикидочный расчет позволяет судить о принципиальной возможности обеспечения требуемой надежности изделия. Этот расчет используется при проверке требований по надежности, выдвинутых заказчиком в техническом задании, при сравнительной оценке надежности отдельных вариантов выполнения изделия на ранних стадиях разработки изделия и ряде других случаев. При прикидочном расчете делается допущение, что все элементы схемы равнонадежны, так как принципиальные электрические схемы на изделие и его составные части еще окончательно не

разработаны. Соединение элементов с точки зрения надежности таково, что выход из строя любого элемента приводит к отказу всего изделия.

Ориентировочный расчет проводится тогда, когда на изделие и все его составные части разработаны электрические принципиальные схемы. При ориентировочном расчете учитывается влияние на надежность изделия количества и типов применяемых в схемах элементов. При расчете делаются следующие допущения: все элементы схемы работают в нормальном режиме, предусмотренном техническими условиями на эти элементы; все элементы изделия работают одновременно; интенсивности отказов элементов берутся для периода нормальной работы, т. е. $\lambda_i(t) = \text{Const}$. Интенсивности отказов элементов каждого типа берутся по соответствующим таблицам из справочников по надежности. Таким образом, ориентировочный расчет надежности позволяет определить рациональный состав элементов в изделии и наметить пути повышения надежности.

Окончательный расчет проводится на этапе технического проектирования и учитывает влияние на характеристики надежности режимов работы элементов в схеме и конкретные условия эксплуатации изделия.

Необходимым условием получения наиболее точных характеристик надежности при окончательном расчете является знание зависимости интенсивности отказов элементов от воздействующих внешних факторов.

При расчете характеристик надежности все изделия расчленяются на приборы, приборы на блоки, блоки на крупные узлы, крупные узлы на более мелкие узлы и т. д. При этом расчет производится последовательно от простого к сложному.

Окончательный расчет надежности складывается из следующих этапов: определение типа элементов и их характеристик; выбор метода расчета с последующим подбором определенных номограмм, таблиц, графиков или поправочных коэффициентов; определение электрических нагрузок и влияния внешней среды на каждый элемент; определение по соответствующим таблицам каждого элемента; суммирование всех интенсивностей отказов с учетом количества

элементов каждого типа для определения интенсивности отказов всего изделия; расчет количественных характеристик надежности изделия.

3. Расчет показателей надежности электронных средств

Под расчетом надежности будем понимать определение числовых значений показателей по тем или иным исходным данным. В связи с включением количественных показателей надежности в технические требования на аппаратуру возникает необходимость не только теоретической, но и опытной проверки выполнения этих требований по статистическим данным.

Сложная ЭС состоит из отдельных блоков, узлов, элементов от надежности которых зависит реализации установленных параметров надежности ЭС в целом.

Получив от главного конструктора системы долю надежности i -той подсистемы, а также критериев ее отказов, разработчики подсистемы проектируют ее с учетом поставленных требований к ее надежности. При этом определяют необходимость и объем резервирования, средства встроенного контроля, режима работы элементов и выбирают элементы с требуемой надежностью.

В процессе эксплуатации ЭС вследствие износа и необратимых процессов старения характеристики аппаратуры будут изменяться. Надежность ЭС непосредственно связана со стоимостью изделий. В таблице 1. приведена относительная стоимость ущерба, причиненным одним отказом в различных классах ЭС. Таблица 1. Стоимость одного отказа в различных классах ЭС

Вид аппаратуры	Замена детали	Замена платы	Пере- про- верка и ремонт	Натурные испытания и ремонт
Индивидуального пользования	2	2	5	50
Промышленная	4	25	45	$215 \cdot 10^3$
ЭС специального назначения	7	50	120	$2 \cdot 10^6$
Космическая электронная аппаратура	15	15	300	-

Отсюда следует, что дальнейший технический прогресс невозможен без увеличения показателей надежности технических устройств.

Важным фактором повышения надежности ЭС на этапе конструирования является равномерное распределение нагрузок на составляющие ее компоненты, поскольку интенсивность отказов последних во многом зависит от условий их работы.

Нагрузки, действующие на ЭС можно условно разделить на две группы: первые приводят к постепенным отказам, вторые к внезапными. Нагрузки, вызывающие постепенные отказы, обусловлены в основном влиянием внешней среды - климатическими факторами, естественной и искусственной радиацией и т.п. при длительном их воздействии независимо от того, работает устройство или находится в нерабочем состоянии, в его элементах и узлах происходят необратимые изменения..

Так, например, сопротивления резисторов могут отклоняться от своих номиналов на 60%, емкости конденсаторов -- на 80%, коэффициент передачи тока базы и обратный ток коллектора транзистора -- на 100%. Исключить влияние таких воздействий конструктивно практически невозможно.

Нагрузки вызывающие внезапные отказы, проявляются при работе ЭС. К нагрузкам относятся электрические, механические, тепловые, магнитные и пр. Они уменьшают прочность компонентов ЭС и усиливают их износ. Уменьшение вредного влияния второй группы зависит от разработчика. Например, снижение тепловых нагрузок всего на 20% увеличивает надежность ЭС в среднем в 2...2,5 раза.

Простота конструкторских решений -- залог надежности. Поэтому всякий раз, когда можно, следует отдавать предпочтение схемам, содержащим меньшее число элементов, а сами схемы проектировать таким образом, чтобы чувствительность их выходных параметров к изменению параметров комплектующих элементов была наименьшей. Это способствует снижению постепенных отказов

К основным факторам влияющим на надежность относятся: выбор схем, обеспечивающих расширение поля до пучков на параметры ЭС схемно-техническими методами для практического исключения «постепенных» отказов; выбор элементов с необходимой надежностью, их энергетическую разгрузку в рациональных пределах и защиту от дестабилизирующих факторов конструктивными методами; разработка методов и аппаратуры контроля.

Затем составляется схема надежности каждой из подсистемы в целом для последующего проведения аналитического расчета надежности.

Как было сказано ранее, надежность ЭС напрямую зависит от надежности электрорадиоэлементов, а как мы знаем одни и те же элементы имеют разброс по надежности, а соответственно и по стоимости. Так например электролитические конденсаторы имеют разброс по надежности от $100 \cdot 10^{-6}$ 1/ч до $10 \cdot 10^{-6}$ 1/ч, а по стоимости они отличается в десятки раз. Кроме того, для того, чтобы уровень разрабатываемой ЭС соответствовал уровням мировых стандартов, необходимо, чтобы соотношение цена качество было не хуже чем у других фирм. С этих соображений выбор элементной базы только по показателям надежности, как это делают некоторые разработчики аппаратуры, может привести к такому удорожанию ЭС, что исчезает необходимость в выпуске подобных ЭС.

Наиболее правильно использовать показатели надежности, которые даны в ТУ на данный элемент, однако предприятия, выпускающие электрорадиоэлементы, стараются эти данные не показывать. Чтобы не снизить покупательский интерес к их продукции. Это во-первых, а во-вторых использование некоторых справочных данных (по интенсивности отказов) дает абсурдные результаты по наработке ЭС на отказ (до 100 и более лет). Примерные значения интенсивностей отказов распространенных и относительно дешевых электрорадиоэлементов представлены в таблице 2.

Таблица 2. Интенсивности отказов

№ п/п	Наименование элемента	$\lambda_0 \cdot 10^{-6}, 1/ч$
1.	Резистор, С2-23	5...10
2.	Конденсаторы, КТ, КД, КЛС	5...10
3.	Конденсаторы электролитич.	50...100
4.	Индуктивности, трансформаторы	50...100
5.	Транзисторы, диоды, ИС	0,5...1,0
6.	Разъемы, штекера, вилки	0,5...2,0
7.	Пайка	0,1...0,01

Интенсивности отказов, приведенные в таблице 2. взяты при нормальных условиях. Поэтому при расчете надежности необходимо определить какие внешние воздействия будет испытывать наше устройство, а затем эти значения увеличить для каждого типа элементов на соответствующие коэффициенты, величина которых находится в пределах от 1 ...4, а то и выше.

Поэтому разработчик ЭС должен вести проектирование по следующим ступеням. Сначала используя самые распространенные и дешевые элементы, но с относительно низкой надежностью, а затем выбирать компромиссное решение, хотя бы из двух позиций, что более важно в конкретном случае стоимость или надежность. И конечно помнить, что практически любое увеличение надежности связано со значительным увеличением стоимости, что должно быть отмечено в конце расчетов.

Для расчета показателей надежности ЭС необходимо иметь принципиальную схему ЭС, спецификацию к ней. Затем установить условия эксплуатации, с тем, чтобы ввести поправки в расчеты интенсивности отказов.

Предположим, мы рассчитываем надежность усилительного устройства, используемого для проигрывания компакт-дисков в домашних условиях.

Выбранное устройство предназначено для эксплуатации в следующих бытовых условиях:

1. Диапазон рабочих температур: 10... 40 °С;
2. Относительная влажность: в пределах 60...95% при 20° С;
3. Атмосферное давление: 101300 Па.
4. Время гарантийной работы: 12 месяцев

При экспоненциальном распределении отказов в ЭС (а наше изделие именно и имеет такой закон распределения отказов) надежность характеризуется: вероятностью безотказной работы в течение заданного промежутка времени, средним временем наработки на отказ, интенсивностью отказа устройства.

Для расчета надежности рассматриваемого ЭС примем схему надежности, состоящую из последовательно соединенных невосстанавливаемых элементов и математическую модель надежности по случайным отказам, имеющую экспоненциальное распределение. Данная модель полагает, что отказы элементов независимы, а элементы и все устройство в целом могут находиться в одном из двух состояний: работоспособном или неработоспособном.

При этих допущениях параметры надежности вычисляются по следующим формулам:

-интенсивность отказов устройства:

$$\lambda = \sum \lambda_i p_i \alpha_n, \alpha_v, \alpha_t, \alpha_d, \quad [1/ч]$$

где p_i - количество функционально аналогичных элементов в схеме, имеющих одинаковую интенсивность отказов λ_i ; $\alpha_n, \alpha_v, \alpha_t, \alpha_d$ - поправочные коэффициенты, учитывающие внешние воздействия (механические, влажность, температуру, давление).

- вероятность безотказной работы:

$$P(t) = e^{-\lambda \cdot t};$$

- время наработки на отказ:

$$T_n = 1/\lambda, \quad [ч]$$

Интенсивности отказов отдельных элементов приведены в таблице 2.

Интенсивность отказа ЭС равна:

$$\Lambda = \sum_{i=1}^m \lambda_{0i} \cdot \alpha_i \cdot n_i = 1749,9 \cdot 10^{-6}, [1/\text{ч}]$$

Рассчитаем вероятность безотказной работы данного устройства, при условии, что изделие будет работать 60 мин в день в течение 12-месячного гарантийного срока, т. е. 365 часов:

$$P(t) = e^{-\Lambda \cdot t} = \exp(-1749,9 \cdot 10^{-6} \cdot 365) = 0,36$$

Среднее время наработки на отказ составит:

$$T_H = \frac{1}{\Lambda} = 571 [\text{ч}].$$

Таблица 3. Интенсивности отказов и поправочные коэффициенты

Тип элемента	n_i	$\lambda_i, 1/\text{ч}$	$\alpha_{\text{гт}}$	$\alpha_{\text{вб}}$	$n_i \lambda_i \alpha_{\text{гт}} \alpha_{\text{вб}} \cdot 10^{-6}, 1/\text{ч}$
Громкоговоритель	1	100	1,2	1,2	144
Конденсаторы керамические	17	10	1,1	1,1	244,8
Конденсаторы электролитические	5	100	1,1	1,1	605
Конденсаторы переменной емкости	2	10	1,1	1,2	26,4
Резисторы С2-23	21	10	1,1	1,1	254,1
Рлер	1	25	1,2	1,2	36
Диоды	5	1	1,4	1,0	7
Транзисторы	14	1	1,4	1,0	19,6
Катушка индуктивности	3	100	1,4	1,3	546
Разъемы	6	1	1,0	1,0	6
Пайка	39	0,1	1,2	1,0	4,68

Для бытовой аппаратуры вероятность безотказной работы должна составлять не менее 0,91. Рассчитанная вероятность безотказной работы выбранного устройства составляет 0,36, что не удовлетворяет техническому заданию и не

соответствует международным стандартам. Повысить надёжность можно за счет стоимости всего изделия, используя более надежные элементы.

Вместо резисторов гораздо логичнее использовать микросборку, а указанные в перечне электролитические конденсаторы можно заменить более надёжными конденсаторами типа ЭТО-1, интенсивность отказов которых 10^{-5} 1/ч, а также за счет увеличения стоимости взять и другие более надежные элементы (данные приведены в таблице 4).

Таблица 4. Интенсивности отказов и поправочные коэффициенты

Тип элемента	n_i	λ_i , 1/ч	α_{it}	α_{in}	$n_i \cdot \lambda_i \cdot \alpha_{it} \cdot \alpha_{in} \cdot 10^{-6}$, 1/ч
Громкоговоритель	1	10	1,2	1,2	14,4
Конденсаторы керамические	17	5	1,1	1,1	103,3
Конденсаторы электролитические	5	5	1,1	1,1	30,5
Конденсаторы переменной емкости	2	10	1,1	1,2	24
Резисторы С2-23 (микросборка)	21	1,0	1,2	1,2	1,44
Рпер	1	10	1,2	1,2	14,4
Диоды	5	1	1,4	1,0	7
Транзисторы	14	1	1,4	1,0	16,8
Катушка индуктивности	3	10	1,4	1,3	54,6
Разъемы	6	1	1,0	1,0	6
Пайка	39	0,1	1,1	1,0	4,68

Тогда интенсивность отказов составит:

$$P(t) = e^{-\Lambda \cdot t} = \exp(-277,12 \cdot 10^{-6} \cdot 365) = 0,91,$$

а среднее время наработки на отказ:

$$T_H = \frac{1}{\Lambda} = 3600 \text{ ч.}$$

Приложение
Интенсивности отказов и поправочные коэффициенты

ИС первой - третьей степени интеграции

Цифровые ИС

Серия ИС	$\lambda \cdot 10^{-6}, 1/\text{ч}$	Серия ИС	$\lambda \cdot 10^{-6}, 1/\text{ч}$
K121	0,20	K556	0,20
K131	0,35	K566	0,10
K 144	0,10	K592	0,70
K194	0,40	K599	0,70

Аналоговые ИС

Серия ИС	$\lambda \cdot 10^{-6}, 1/\text{ч}$	Серия ИС	$\lambda \cdot 10^{-6}, 1/\text{ч}$
K122	0,20	K 224	1,50
K153	0,03	K237	2,70
K157	3,70	K276	2,20
K174	2,30	K416	2,70

ИС четвертой и пятой степеней интеграции

Микросхемы для калькуляторов	$\lambda \cdot 10^{-6}, 1/\text{ч}$	Микропроцессорный набор	$\lambda \cdot 10^{-6}, 1/\text{ч}$
K 145(ИА1,886) РЕ1,8Х1,ИП18 ИК6, ИК16	4,0	K 536 ИК-8, K 536 ИК-3, K 536 ИР-1,	3.60 1.20 1.80
Микросхемы ОЗУ			
K 535 РУ2	4.90	K 535 РУ3	2.60
Гибридные микросхемы			
K2ХА 371	1.23	K2ХА 372	1.23
K2ХА 373	1.23	K2ХА 345	1.23
K2ХА 376	1.23	K174 УВ4	1.50

Интенсивности отказов полупроводниковых приборов

Наименование и тип диода	Интенсивность отказов $\lambda \cdot 10^{-6}, 1/\text{ч}$	Наименование и тип диода	Интенсивность отказов $\lambda \cdot 10^{-6}, 1/\text{ч}$
Выпрямительные диоды, столбы, блоки			
ГД 107(а,б)	0.07	ГД 402(а,б)	0.11
Универсальные диоды			
Д 226(А-Д)	0.10	Д 223(А,Б)	0.10
Д 242(А,Б)	0.21	Д 219	0.19
КД 102(А,Б)	0.20	Д 243(А,Б)	0.21
КД 105(Е,В,Г)	0.35	КД 103(А,Б)	0.20
КД 202(Р,С)	0.35	КД 202(А-Н)	0.35
КД 401(А,Б)	0.27	КД 203(А,Д)	0.43
Варикапы			
Д 902	0.27	КВ 103(А,Б)	0.27
КВ 104(А-Д)	0.27		
Стабилитроны и стибисторы			
КС 133А	0.10	КС 156А	0.10
КС 162А	0.10	КС 168А,В	0.10
КС 182А	0.10	КС 213Б	0.10
7ГЕ1А2С-ГЕ3А-С	0.09	Д 815(А-Ж)	0.09
Д 816(А-Д)	0.09	Д 817(А-Г)	0.09

Интенсивности отказов транзисторов

Наименование и тип транзистора	Интенсивность отказов $\lambda \cdot 10^{-6}, 1/\text{ч}$	Наименование и тип транзистора	Интенсивность отказов $\lambda \cdot 10^{-6}, 1/\text{ч}$
Транзисторы малой мощности низкой частоты			
ГТ 108(А-Г)	0.15	КП 103(Е-И)	0.18
МП 21(В-Е)	0.18	МП 20(А,В)	0.18
МП 26(А,Б)	0.18	МП 25(А,Б)	0.15

П 29А	0.23	МП 30	0.23
Транзисторы малой мощности высокой частоты			
ГТ 308(А-В)	0.36	ГТ 309(А-Е)	0.36
ГТ 310(А-Е)	0.36	ГТ 311(Е,Ж,И)	0.36
ГТ 313(А,Б)	0.50	ГТ 320 (А-В)	0.50
ГТ 321(А-Е)	0.50	ГТ 330 (Д,Ж,И)	0.30
ГТ 329(А-В)	0.30	КТ 301(А-Ж)	0.31
КП 350(А-В)	0.10	КТ 307(А-Г)	0.31
Т 312(А-В)	0.31	КТ 315(А-Е)	0.31
КТ 345(А-В)	0.28	КТ 361(А-Г)	0.28
Транзисторы средней мощности низкой частоты			
ГТ 402(А-Г)	0.37	П 201Э	0.25
КТ 626	0.27	КТ 3107	0.18
Транзисторы средней мощности средней частоты			
П 605(А)	0.27	П 601АИ	0.27
Транзисторы средней мощности высокой частоты			
КТ 602(А-Г)	0.27	КТ 603(А-Е)	0.27
КТ 604(А)	0.27	КТ 605(А,Б)	0.27
П 607(А)	0.37	П 608(А)	0.37
Транзисторы большой мощности низкой частоты			
ГТ 701А	0.51	П 213(А-В)	0.35
Транзисторы большой мощности средней частоты			
ГТ 806(А-Д)	0.70	КТ 801(А,Б)	0.46
КТ 805(А,Б)	0.57	КТ 803(А)	0.57
Примечание: коэффициент электрической нагрузки для транзисторов не должен быть более 0.8			

Интенсивности отказов резисторов

Наименование и тип резистора	Интенсивность отказов $\lambda \cdot 10^{-6}, 1/\text{ч}$	Наименование и тип резистора	Интенсивность отказов $\lambda \cdot 10^{-6}, 1/\text{ч}$
Резисторы постоянные непроволочные			
С1-4-0.25	0.03	ОМЛТ-0.125	0.007
МЛТ-0.25	0.01	МГП-0.125	0.007
МЛТ-2; МТ-2; ОМЛТ-2	0.12	МУН-2; МГП-2	0.12
КИМ-0.05	0.05	КИМ-0.125	0.10
КЛМ, КВМ	0.12	УЛИ-0.125	0.08
УЛИ-0.25	0.01	МОН-1	0.08
Резисторы постоянные проволочные			
С5-5(Т); С5-16Т	0.10	ПЭ; ПЭВ; ОПЭВЕ; ПЭВТ	0.06
Терморезисторы			
ММТ; КМТ	0.18	СТ1-17; СТ3-17	0.15
Резисторы переменные непроволочные			
СПЗ-4М(а-г)	0.65	СП-II; СП-0.4	0.15
СПЗ-8	0.57	СП-IV	0.25
СПЗ-12(г-е, и, л)	0.80	СПЗ-1(а, б)	0.45
СПЗ-27	0.30	СПЗ-4Мд	0.70
ТКД(а, б)	0.77	СПЗ-12(а-в, к)	0.45
СНКВД(а, б)	0.89	ТК	0.58
СПО-1; СПО-2	0.40	СНК(а, б)	0.45
Резисторы переменные проволочные			
ППЗ-40; ППЗ-41	0.40	ППЗ-43	0.40
Примечание: коэффициент электрической нагрузки для резисторов не должен быть более 0.7			

Наименование и тип конденсатора	Интенсивность отказов $\lambda \cdot 10^{-6}$, 1/ч	Наименование и тип конденсатора	Интенсивность отказов $\lambda \cdot 10^{-6}$, 1/ч
Конденсаторы постоянной емкости с керамическим диэлектриком			
КЛП; К10-70	0.10	КД	0.018
КЛС-Е; КМ; КП; КПС	0.08	КТ; КТП	0.012
К10-15; К10-17	0.07	К10-26; К10-28	0.07
Конденсаторы постоянной емкости с бумажным диэлектриком			
БМ; К4011	0.10	БМТ	0.12
К40П-1; К40П-2	0.08	СМ; К42У-2	0.05
МБГЧ; К42-4	0.03	К40П-3	0.08
МБМ	0.09	МБГ; МБП	0.04
Конденсаторы постоянной емкости с органическим диэлектриком			
ПМ; МПО; МПГО	0.10	МПГ-П; МПГ-Ц	0.10
К70-7	0.08	К71-3; К71-4; К71-5	0.09
ФЧ; К72-9; ПМГП	0.04	К73-5	0.07
К73-6; К73П-2	0.05	К73П-4	0.05

Интенсивности отказов магнитоуправляемых контактов

Наименование и тип	Интенсивность отказов $\lambda \cdot 10^{-9}$, 1/сраб	Наименование и тип	Интенсивность отказов $\lambda \cdot 10^{-9}$, 1/сраб
КЭМ-3	58.0	КЭМ-2	2.10
МКА-27101	9.50	МКА-10501	3.80
КЭМ-6	5.70	МКС-27103	14.0
МУК1А-1	4.0	МКА-52141	56.0

Интенсивности отказов трансформаторов и дросселей

Наименование и тип прибора	Интенсивность отказов $\lambda \cdot 10^{-6}, 1/\text{ч}$	Наименование и тип прибора	Интенсивность отказов $\lambda \cdot 10^{-6}, 1/\text{ч}$
Трансформаторы:			
Силовые	0.96	Выходные звука	1.0
Выходные кадровые	0.70	Выходные строчные	2.0

Интенсивности отказов пьезоэлектрических изделий

Тип изделий	Интенсивность отказов $\lambda \cdot 10^{-5}, 1/\text{ч}$	Тип изделий	Интенсивность отказов $\lambda \cdot 10^{-5}, 1/\text{ч}$
Резонаторы кварцевые вакуумные			
РК233	3.39	РК200Э	2.41
РК207; РК208	0.48	От 40 до 120 кГц	2.31
От 499 до 1001 кГц	2.31	От 840 до 4000 кГц	0.49

Интенсивности отказов индикаторов знаковинтезирующих

Тип изделий	Интенсивность отказов $\lambda \cdot 10^{-6}, 1/\text{ч}$	Тип изделий	Интенсивность отказов $\lambda \cdot 10^{-6}, 1/\text{ч}$
Газоразрядные			
ИН-21, ИН-24	8.60	ИН-8	4.20
ИН-14	4.40	ИН-15А,Б	2.80
ИН-28	10.00	ИН-35-2	11.00
Жидкокристаллические			
ИЖКЦ1-6/5	7.90	ИЖКЦ2-4/7	5.60
Полупроводниковые без встроенного управления			
АЛС333(А-Г)	0.83	АЛС338(А-В)	0.55
АЛС320(А-Г)	0.56	АЛС340А	1.00

Наименование и тип узла или механизма	Интенсивность отказов $\lambda \cdot 10^{-6}, 1/ч$	Наименование и тип узла или механизма	Интенсивность отказов $\lambda \cdot 10^{-6}, 1/ч$
Магнитные антенны (ферритовый стержень с катушкой индуктивности) Для приемников:			
I группы	0.32	II группы	0.48
Трансформаторы			
Силовые Межкаскадные НЧ		Выходные НЧ	0.19
Дроссели			
Низкочастотные	0.15	Высокочастотные	0.10
Катушки индуктивности (в сборе) Для приемников:			
I группы	0.03	II группы	0.10
III группы	0.16		

Коэффициенты влияния вибраций . ударов (α_n)

	Самолеты	Ракеты
Резисторы непроволочные	1	2
Резисторы проволочные	2	4
Резисторы переменные	4	5
Конденсаторы	2	3
Полупроводниковые приборы:		
- точечные	3	5
- плоскостные	2	3
Реле и контакторы	3	5
Трансформаторы и дроссели	3	4
Электрические машины	3	5
Электровакуумные приборы	2	3
Пайки	2	3
Остальные элементы	1	1
Примечание: в таблице приведены значения K_v для приборного отсека второй ступени. Для аппаратуры хвостового отсека первой ступени K_v необходимо увеличить в 18 раз, приборного отсека первой ступени и хвостового отсека второй ступени - в 6 раз		

	Вибрации	Удары	Результат возд
Лабораторная	1	1	1
Полевые стационарн	1.0	1.0	1.07
Автофургонные	1	1.0	1.46
Железнодорожны	1.4	1.1	1.54

Коэффициент влияния влажности

Относительная влажность, Z, %	t, град С	α_n
60 · 70	20 · 40	1.0
80 · 98	20 · 25	1.5
90 · 98	20 · 25	2.0
90 · 98	30	2.5

1.Кофанов Ю.Н. Теоретические основы конструирования, технологии надежности радиоэлектронных средств: учебник для вузов -М.: Радио и связь, 1983-360с.

2.Яншин А.А. Теоретические основы конструирования, технологии надежности ЭВА: Учеб. Пособие для вузов – М.: Радио и связь, 1983-312с.

3.Половко А.М и др. Сборник задач по теории надежности. – М: С Радио, 1972-235с.

4.Краткий справочник конструктора радиоэлектронной аппаратуры/П ред. Р. Г. Варламова. М.: Сов. радио, 1972.

5.Сапожников Р. А., Бессонов Л. А., Шоломицкий А. К. Надежнос автоматических управляющих систем. М.: Сов. радио, 1974.

Учебное издание

РАСЧЕТ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

Методические указания

Составители: Анатолий Васильевич Зеленский
Александр Александрович Нюхалов

Самарский государственный аэрокосмический
университет имени академика С.П. Королева
443086, Самара, Московское шоссе, 34