

621.38(07) ФФ
В-55

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ РСФСР

АНДРОПОВСКИЙ АВИАЦИОННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ
ИНСТИТУТ

В. А. ВИШНЯКОВ

**НАДЕЖНОСТЬ
ЭЛЕКТРОННОЙ
АППАРАТУРЫ**

Ярославль
1988

КОНТРОЛЬНЫЙ ЛИСТ
СРОКОВ ВОЗВРАТА
КНИГА ДОЛЖНА БЫТЬ
ВОЗВРАЩЕНА НЕ ПОЗЖЕ
УКАЗАННОГО ЗДЕСЬ СРОКА

Колич. пред. выдач. _____

З ТМО Т. 3600000 З. 2079—87

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ РСФСР
АНДРОПОВСКИЙ АКАДЕМИЧЕСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ
ИНСТИТУТ

В. А. ВИШНЯКОВ

НАДЕЖНОСТЬ ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

Учебное пособие

Ярославль
Ярославский политехнический институт
1988

Вишняков В.А. Надежность электронной аппаратуры: Учебное пособие/ЯПИ. - Ярославль, 1988. - 64 с.

Рассматриваются показатели надежности, резервирование, контроль и средства обеспечения надежности радио и вычислительной аппаратуры. Приводятся методы расчета электронных систем. Учебное пособие предназначено для использования студентами вузов радиотехнического профиля.

Учебное пособие подготовлено на кафедре "Конструирование и производство электронно-вычислительной аппаратуры" Андропова авиационного технологического института.

Табл. 10

Ил. 11

Библиогр. 14 назв.

Рецензенты: кафедра "Радиотехнические системы" Ленинградского электротехнического института им. В.И. Ульянова (Ленина); С.М. Алексеев, канд. техн. наук.

Св. план, 1988, поз. 861

Редактор И.А. Трусова

Технический редактор И.Е. Анисимова

Подписано к печати 9.06.88. АК 00599.

Формат 60x84/16 Бумага типографская № 1

Офсетная печать. Усл. печ. л. 4,00. Уч. изд. л. 3,98.

Тираж 250 экз. Заказ 894. Цена 15 к.

Андроповский авиационный технологический институт,
Андропов, ул. Пушкина, 53

Типография Ярославского политехнического института,
Ярославль, ул. Советская, 14а.

© Андроповский авиационный технологический институт,
1988

ВВЕДЕНИЕ

Надежность — свойство изделия (детали, компонента, элемента, узла, блока, устройства, системы) выполнять заданные функции (являться работоспособным) в течение требуемого промежутка времени.

Надежность современной электронной аппаратуры (ЭА) в значительной мере определяется надежностью составляющих ее компонентов, и границы сложности электронных систем зависят в основном от достижимого уровня надежности составляющих их технических средств. Проблема обеспечения надежности приобретает тем большее значение, чем сложнее ЭА. Разрешение противоречия между сложностью устройств и их надежностью является одной из важнейших инженерных задач.

В основе проектирования надежности ЭА лежит математическая теория надежности [1-4, 9, 10], опирающаяся на статистическую теорию надежности. Обработка статистических материалов в области надежности привела к накоплению большой статистической информации. Разработаны статистические характеристики и закономерности отказов ЭА. Теория надежности изучает природу и процессы возникновения отказов в технических системах, методы борьбы с этими отказами, вопросы прогнозирования состояния работоспособности систем.

I. ПОКАЗАТЕЛИ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ ЭА

I.1. Соотношения между показателями надежности изделия

Вероятность безотказной работы $p(t)$ - вероятность того, что в заданном интервале времени t не произойдет ни одного отказа.

Вероятность отказа $q(t)$ - вероятность того, что в заданном интервале времени t произойдет хотя бы один отказ.

Так как работоспособность и отказ являются несовместимыми событиями, то

$$p(t) + q(t) = 1. \quad (1)$$

При экспериментальных исследованиях опытная вероятность безотказной работы $\hat{p}(t)$ (оценка вероятности) определяется из соотношения

$$\hat{p}(t) = \frac{N - n(t)}{N}, \quad (2)$$

где N - общее количество изделий одинакового типа при испытании на надежность, $n(t)$ - количество отказавших изделий на интервале времени t .

Дифференцирование левой и правой частей соотношения (2) приводит к выражению

$$\frac{d\hat{p}(t)}{dt} = -\frac{1}{N} \frac{dn(t)}{dt}.$$

Поделим левую и правую часть этого выражения на $\hat{p}(t)$, получим

$$\frac{1}{\hat{p}(t)} \frac{d\hat{p}(t)}{dt} = -\hat{\lambda}(t).$$

где

$$\hat{\lambda}(t) = \frac{1}{N - n(t)} \frac{dn(t)}{dt} \quad (3)$$

- оценка интенсивности отказов изделия.

При увеличении количества изделий участвующих в испытании на надежность N до уровня $N \rightarrow \infty$ оценки вероятности $\hat{p}(t)$ и интенсивности отказов $\hat{\lambda}(t)$ стремятся к постоянным истинным

значениям вероятности $p(t)$ и интенсивности отказов $\lambda(t)$. Поэтому получаем уравнение

$$\frac{1}{p(t)} \frac{dp(t)}{dt} = -\lambda(t).$$

Решение этого дифференциального уравнения находится интегрированием левой и правой частей уравнения с учетом того, что $p(0) = 1$, имеем:

$$\ln p(t) = -\int_0^t \lambda(t) dt$$

или

$$p(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt}.$$

На практике выполняется ограничение, когда $\lambda(t)$ не зависит от времени на достаточно большом интервале и равна λ . Тогда

$$p(t) = e^{-\lambda t}. \quad (4)$$

Это соотношение устанавливает связь вероятности безотказной работы изделия $p(t)$ с интенсивностью отказов данного изделия λ .

Используя соотношения (1) и (4), получим

$$q(t) = 1 - e^{-\lambda t}.$$

Определим плотность вероятности отказов изделия

$$f(t) = \frac{dq(t)}{dt} = -\frac{dp(t)}{dt} = \lambda e^{-\lambda t}, \quad (5)$$

которая подчиняется экспоненциальному закону распределения. Для любого закона распределения отказов $f(t)$ справедливы соотношения:

$$p(t) = \int_t^{\infty} f(t) dt, \quad q(t) = \int_0^t f(t) dt.$$

В качестве показателя надежности ЭА используют также среднее время безотказной работы t_{cp} (математическое ожидание случайной величины t):

$$t_{cp} = \int_0^{\infty} t f(t) dt = \int_0^{\infty} p(t) dt.$$

Для экспоненциального закона распределения отказов (5)

$$t_{cp} = \int_0^{\infty} t \lambda e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda}. \quad (6)$$

При экспериментальной оценке среднее время безотказной работы изделия \hat{t}_{cp} определяется следующим образом:

$$\hat{t}_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^N t_i}{N},$$

где t_i - время исправной работы i -го изделия, N - число изделий в партии, над которой проводится испытание.

Используя соотношение (6) для вероятности безотказной работы (4), получим

$$p(t) = e^{-\frac{t}{t_{cp}}}.$$

Положим $t = t_{cp}$. Тогда $p(t = t_{cp}) = e^{-1} = 0,37$, т.е. на интервале времени $t = t_{cp}$ отказали 63% изделий и сохранили безотказность 37%.

Дисперсия времени безотказной работы σ_t^2 определяется из выражения

$$\sigma_t^2 = \int_0^{\infty} t^2 f(t) dt - t_{cp}^2$$

и при экспоненциальном законе распределения отказов равна $\sigma_t^2 = 1/\lambda^2$. Отсюда среднеквадратическое отклонение времени безотказной работы изделия будет $\sigma_t = t_{cp} = 1/\lambda$.

1.2. Интенсивность отказов при длительном функционировании изделия.

Интенсивность отказов любого изделия определяется выражением (3). Для небольших интервалов времени $t = \Delta t$ справедливы приближения $N \gg n(t)$, $\Delta t = dt$, $dn(t) = n(t)$, поэтому из (3) имеем:

$$\hat{\lambda} = \frac{n}{N \Delta t}.$$

Эта оценка интенсивности отказов может быть использована при опытным определении интенсивности отказов. Физически интенсивность отказов изделий определяет относительное число отказавших изделий в единицу времени. Единицей измерения интенсивности отказов обычно является величина ч^{-1} (час^{-1}).

Интенсивность отказов изделия на большом интервале времени описывается качественной кривой $\lambda(t)$ (рис. 1). Она характеризуется тремя явно выраженными периодами: приработки I, нормальной эксплуатации II и износа III.

На участке приработки ($0 - t_1$) наблюдаются внезапные приработочные отказы. Они возникают вследствие того, что часть элементов, входящих в состав изделия, являются либо бракованными, либо имеют низкий уровень надежности. Период приработки составляет обычно доли и единицы процента от времени нормальной эксплуатации изделия.

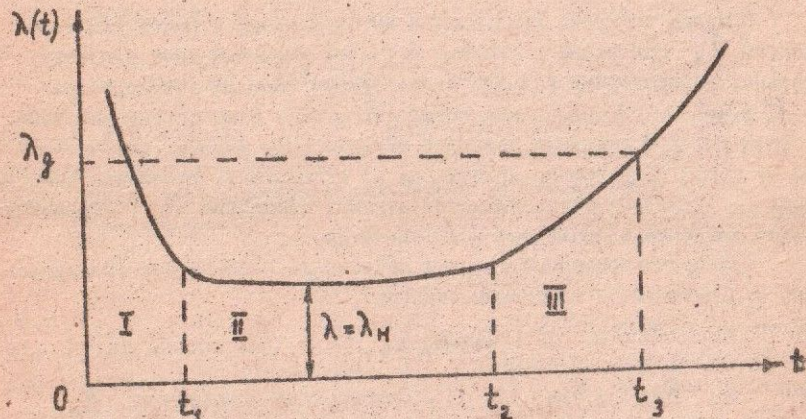


Рис. 1. Зависимость интенсивности отказов изделия λ от времени t

На втором участке ($t_1 - t_2$) интенсивность отказов изделия имеет минимальный, примерно постоянный номинальный уровень $\lambda = \lambda_n$. Для этого периода работы изделия характерны внезапные отказы,

вследствие действия ряда случайных факторов. Предупредить их приближение практически не представляется возможным, тем более, что к этому времени в изделии остаются только полноценные компоненты, срок износа которых еще не наступил.

Третий участок ($t_2 - t_3$) кривой $\lambda(t)$ характеризуется увеличением интенсивности отказов. На этом интервале времени наблюдаются как внезапные, так и постепенные отказы, связанные с износом (старением элементов). При износе происходит частичное разрушение материалов, изменение их физико-химических свойств. Период износа завершается в точке t_3 , когда интенсивность отказов изделия приблизится к максимально допустимой λ_d для данного изделия.

При расчетах изделий на надежность с учетом внезапных отказов обычно принимают интенсивность отказов изделий, равную λ_n , т.е. расчет производят для нормального участка эксплуатации изделий.

1.3. Реальная расчетная интенсивность отказов элементов

Средние значения номинальной интенсивности отказов для элементов λ_n приведены в таблице П.1. Эти значения даны для нормальных лабораторных условий эксплуатации изделий (температура - $t^\circ = 20^\circ \text{C}$, относительная влажность - 60%, атмосферное давление - 1013 гПа). В реальных условиях эксплуатации внешние воздействия на ЭА могут существенно отличаться от нормальных. Изменение действующих реальных интенсивностей отказов элементов λ учитывается путем введения поправочных коэффициентов.

При ориентировочных оценках надежности особенности эксплуатации ЭА учитываются следующим образом:

$$\lambda = K_\lambda \lambda_n,$$

где $K_\lambda = K_{\lambda 1} K_{\lambda 2} K_{\lambda 3}$ - поправочный коэффициент. $K_{\lambda 1}$ всегда больше единицы. Коэффициент $K_{\lambda 1}$ учитывает воздействия на ЭА механических факторов (вибраций, ударных нагрузок), $K_{\lambda 2}$ - климатических (температуры, влажности), $K_{\lambda 3}$ - условия работы при пониженном атмосферном давлении. Значения этих коэффициентов для полупроводниковой ЭА приведены в таблицах приложений П.2-П.4.

При окончательном расчете надежности ЭА расчетные интенсивности отказов элементов уточняются с поправкой на электрические режимы элементов и определяются выражением

$$\lambda = a K_\lambda \lambda_n,$$

где $a = a(K_n, t^\circ)$ - поправочный коэффициент, учитывающий температуру окружающей среды t° и коэффициент электрической нагрузки K_n . Значения $a(K_n, t^\circ)$ для различных типов элементов приведены в таблице П.5. Величина a для $K_n < 1$ и температуре окружающей среды t° близкой к нормальной может быть существенно ниже единицы.

Коэффициент нагрузки элемента K_n равен

$$K_n = \frac{H}{H_d},$$

где H и H_d - соответственно электрическая нагрузка в реальном и допустимом номинальном (по техническим условиям) режимах. Коэффициент нагрузки либо рассчитывается, либо определяется экспериментально, путем замера режимов работы элементов для реальной ЭА.

Коэффициенты нагрузок для различных элементов ЭА находят следующим образом.

1. Резисторы

$$K_n = \frac{P}{P_d},$$

где $P = P_{\text{постоянная}} + P_{\text{эффективная средняя}} + P_{\text{импульсная}}$ - реальная рассеиваемая мощность резистором, P_d - допустимая рассеиваемая мощность резистором по справочнику.

2. Конденсаторы

$$K_n = \frac{U}{U_d},$$

где $U = U_{\text{постоянное}} + U_{\text{переменное}} + U_{\text{импульсное}}$ - реальное напряжение на конденсаторе, U_d - допустимое напряжение на конденсатор по справочнику.

3. Полупроводниковые диоды

$$K_n = \frac{I}{I_d}, \quad K_n = \frac{U_{обр}}{U_{обрд}}$$

где I - средний рабочий выпрямленный ток, I_d - выпрямленный допустимый ток, $U_{обр}$ - обратное рабочее напряжение, $U_{обрд}$ - допустимое обратное напряжение.

При определении коэффициента a по таблице П.5 выбирается

максимальный из коэффициентов нагрузки диода.

4. Транзисторы

$$K_H = \frac{I_K}{I_{Kd}}, \quad K_H = \frac{I_2}{I_{2d}}, \quad K_H = \frac{U_{Kd}}{U_{Kd\delta}},$$

$$K_H = \frac{U_{K2}}{U_{K2\delta}}, \quad K_H = \frac{U_{2\delta}}{U_{2\delta\delta}}, \quad K_H = \frac{P}{P_d},$$

где I_K , I_2 - ток коллектора и эмиттера; I_{Kd} , I_{2d} - допустимый ток коллектора и эмиттера; U_{Kd} , U_{K2} , $U_{2\delta}$ - напряжение коллектор-база, коллектор-эмиттер, эмиттер-база; $U_{Kd\delta}$, $U_{K2\delta}$, $U_{2\delta\delta}$ - допустимые напряжения; P - мощность, рассеиваемая транзистором; P_d - допустимая рассеиваемая транзистором мощность. При вычислении коэффициента α выбирается максимальный из коэффициентов K_H транзистора.

5. Трансформаторы, дроссели, катушки индуктивности

$$K_H = \frac{j}{j_d},$$

где j - плотность тока в первичной или вторичной цепи, j_d - допустимая плотность тока.

6. Электровакуумные приборы

$$K_H = \frac{P_a + P_n + P_c}{P_{ad} + P_{nd} + P_{cd}},$$

где P_a , P_n , P_c - рабочие мощности на аноде, накале, сетках; P_{ad} , P_{nd} , P_{cd} - допустимые мощности на аноде, накале, сетках.

Поправочный коэффициент α в данном случае определяется по формуле

$$\alpha = \alpha_1(K_H, t^*)\alpha_2(U_n/U_{nd}),$$

где α_1 - поправочное значение из таблицы П.5, α_2 - поправочное значение на рабочее напряжение накала U_n при номинальном напряжении накала U_{nd} из таблицы П.6.

1.4. Физическая надежность элементов ЭА

Надежность ЭА в значительной степени определяется безотказ-

ностью работы элементов, на которых она построена. Поэтому, задача обеспечения надежности ЭА сводится главным образом к обеспечению безотказной работы этих элементов.

Интенсивность отказов элементов зависит от многих факторов: от качества исходных материалов, конструкции, технологии изготовления и культуры производства, от условий эксплуатации и режима работы элемента [5].

Использование элементов в перегруженном режиме ($K_H > 1$) резко сокращает срок их службы. Наоборот, использование их в недогруженном режиме ($K_H < 1$) уменьшает среднюю частоту отказов аппаратуры и значительно увеличивает продолжительность ее нормальной работы. Исходя из этого, в большинстве современных образцов ЭА большая часть элементов работает в недогруженном режиме. Практика показывает, что свыше 95% резисторов и конденсаторов работают с $K_H < 0,5$.

Температура является одним из наиболее активных факторов, влияющих на отказы элементов. Под действием тепла и холода изменяются как физические, так и химические свойства материалов, из которых сделаны радиодетали и радиокомпоненты. Чрезмерное изменение свойств материалов может привести к недопустимым изменениям геометрических размеров, электрических и механических параметров элементов, т.е. к их отказу.

1.4.1. Надежность резисторов

Статистические данные показывают, что обрыв токопроводящего слоя и нарушение контакта резистора - наиболее типичный вид отказа (свыше 50%). Значительный процент отказов (35-40%) относят за счет перегорания токопроводящего слоя. Около 5% отказов вызывается резким изменением величины сопротивления (в 10-100 раз и более). Количество отказов резисторов меняется с течением времени и зависит в основном от условий применения, технологии производства, качества материалов.

Нагрев резистивного слоя за счет мощности, рассеиваемой на резисторе в рабочем режиме, и резкие изменения температуры окружающей среды вызывают необратимые накапливающиеся изменения в резисторе, приводящие к внезапному отказу. Снижение электрической нагрузки резистора, создание условий работы, исключающих резкие изменения температуры, повышают его надежность (табл.П.5).

На надежность резисторов отрицательно влияет влага. Она ускоряет коррозию контактных выводов, что нередко приводит к их обрыву, и способствует растрескиванию защитных эмалей. Проникаемая через трещины влага разрушает резистивный слой или проволоку.

При длительных механических воздействиях происходят усталостные изменения в материалах, используемых в конструкции резисторов, что в конечном итоге приводит к скачкообразному изменению свойств резисторов и их отказу. Надежность резисторов существенно зависит от качества проводящего слоя и его геометрических размеров. Чем меньше сечение проводящего слоя и чем больше его длина, тем ниже надежность. Этим объясняется сравнительно низкая надежность поверхностных резисторов со спиральной нарезкой и резисторов с номиналами более 0,5 МОм. Наиболее надежными являются резисторы композиционного типа, так как отказать они могут только при механических повреждениях тела резистора, что в нормальных условиях эксплуатации бывает очень редко.

Мгновенные отказы резисторов возможны из-за нарушения целостности контактного узла. Наиболее частые отказы этого вида наблюдаются у поверхностных резисторов из-за возникающих механических перенапряжений. У объемных резисторов таких отказов нет, так как у них контактный вывод работает на сжатие.

Большинство резисторов имеют в начальный период работы такую же надежность, как и в период нормальной работы. Характерной особенностью резисторов при их работе в схемах является то, что их отказы более чем в 50% случаев вызывают отказы других элементов, например, пробой конденсаторов, короткие замыкания в электропроводниках и полупроводниковых приборах.

1.4.2. Надежность конденсаторов

Наиболее частым видом отказов конденсаторов является пробой диэлектрика и перекрытие изоляции между складками (поверхностный разряд). Эти отказы составляют около 80% всех отказов и возникают из-за наличия слабых мест в диэлектрике и технологических дефектов, допущенных при производстве. Довольно часто конденсаторы выходят из строя из-за обрывов выводов. Около 15% отказов конденсаторов вызваны уменьшением их емкости ниже допустимой. Чаще это наблюдается у электрических конденсаторов. Из-за уменьшения сопротивления изоляции выходят из строя около 5% конденсаторов.

Количество отказов конденсаторов зависит и от их назначения в схеме. Наибольшая опасность отказов наблюдается у разделительных и блокированных конденсаторов, наименьшая - у контурных и накопительных.

На надежность конденсаторов существенное влияние оказывает температура, влажность и частота питающего напряжения. Конденсаторы с большой электрической и тепловой нагрузкой имеют повышенное число отказов (табл. П.5). Увеличение рабочего напряжения на конденсаторе всегда снижает сопротивление изоляции, нередко вызывает появление внутренней короны и пробой диэлектрика. Например, повышение рабочего напряжения электролитических конденсаторов на 30% от номинального обычно приводит к их пробоям.

Нагрев конденсатора снижает электрическую прочность диэлектрика и сопротивление изоляции, увеличивает тангенс угла диэлектрических потерь. Причем местное уменьшение сопротивления изоляции вызывает повышение температуры конденсатора и, как следствие, еще большее возрастание потерь и снижение сопротивления изоляции. Развитие этих процессов приводит к пробоям конденсатора.

Влажность окружающей среды является причиной увеличения тангенса угла диэлектрических потерь, снижение электрической прочности и сопротивление изоляции, что ведет к снижению пробивного напряжения. Это особенно сильно заметно в негерметизированных конденсаторах. Надежное влагозащитное покрытие замедляет протекание нежелательных процессов под действием влаги.

Среди керамических наиболее надежны конденсаторы КТК, КДК и КТН. Наименее тепло и влагостойкими являются конденсаторы КПК.

В противоположность резисторам основное количество отказов у конденсаторов наблюдается в начальный период эксплуатации. Так, около 70% всех пробоев происходит до наступления нормального периода работы (участок II на рис.1).

1.4.3. Надежность полупроводниковых элементов

Параметры полупроводниковых диодов и транзисторов сильно зависят от внешних воздействий и главным образом от влияния температуры. Выходная температура для полупроводникового прибора определяется переходом базы в область собственной проводимости. Для германия эта температура лежит в пределах 80-100 °С, для кремния 150-200 °С, для карбида кремния 300-400 °С. Полупроводниковые приборы очень чувствительны к перегрузкам по току и по напряжению

и выходит из строя даже при кратковременных перегрузках.

Основной причиной внезапных отказов полупроводниковых приборов является перенапряжение между коллектором и базой, возникающее во время переходных процессов. Иногда отказы могут быть обусловлены обратными импульсными выбросами на участке база-эмиттер. Частым видом внезапных отказов является также обрыв электрической цепи, короткие замыкания и недопустимые отклонения параметров элемента от номинала.

Постепенные отказы полупроводниковых приборов возникают большей частью из-за изменения их параметров, причем наиболее интенсивное изменение параметров отмечается в начальный период эксплуатации, оставляющий несколько сотен часов. В дальнейшем скорость изменения параметров уменьшается и с наступлением периода старения снова растет. Изменения параметров полупроводниковых приборов большей частью наблюдаются при повышенных напряжениях на коллекторе или из-за проникновения влаги в прибор при нарушении герметичности. Такое нарушение обычно вызывается различием коэффициентов линейного расширения металлов и проходных изоляторов.

1.4.4. Надежность коммутационных элементов

Коммутационные элементы относятся к группе электромеханических приборов, для которых характерны постепенные отказы. Около 25% отказов реле, контакторов, выключателей и различного рода соединителей возникает в конце заданного срока службы и только 2,5% в период, соответствующий 70% заданного срока службы.

Наиболее часто встречающимися отказами являются: обгорание, загрязнение и замыкание контактов, разрегулировка, поломка и ослабление контактных пружин, пробой изоляции обмотки на корпус. Реже встречаются отказы из-за обрывов, ухода параметров за пределы допусков, плохого центрирования контактов и снижения упругости пружин.

Надежность коммутационных элементов зависит в значительной степени от числа контактов, плотности тока и числа обгорания. С уменьшением этих параметров надежность элементов растет.

Большое влияние на надежность реле и коммутирующих устройств оказывают вибрации. При определенной амплитуде и частоте вибраций возникают временные сбои в работе вследствие неуправляемого размыкания и замыкания контактов.

1.4.5. Надежность motочных элементов

Характерными для этих элементов являются отказы: перегорание и обрыв обмоток, пробой изоляции обмоток на корпус, замыкание между обмотками и между витками.

Основное влияние на надежность трансформаторов, дросселей и катушек индуктивности оказывают электрические режимы (плотность тока в обмотках и напряжение между обмотками), а также влага и температура окружающей среды. К основным причинам отказов этих изделий относят: повышенное напряжение первичной обмотки; повышенный ток вторичных обмоток; флуктуацию частоты входного сигнала. Если напряжение первичной обмотки будет превышать номинальное напряжение на 20%, то произойдет преждевременный пробой. Если же это напряжение будет значительно выше, то произойдет мгновенный пробой изоляции. Повышенный ток вторичных обмоток приводит к перегреву трансформатора, что уменьшает электрическую прочность изоляции. Это в свою очередь приводит к короткому замыканию или обрыву обмотки, деформации или разрушению корпуса в результате расширения заливающего материала. Работа на частотах ниже допустимых снижает реактивное сопротивление и повышает ток, а работа на частотах выше допустимых увеличивает потери в сердечнике. В обоих случаях температура трансформатора (дросселя) превышает номинальную и электрическая прочность изоляции уменьшается, так как между этими величинами существует обратная зависимость.

Причиной значительного числа повреждений трансформаторов, дросселей и катушек индуктивности является влага. С изменением температуры влага проникает внутрь обмотки или, наоборот, испаряется. Помимо непосредственного проникновения через заливающий материал, влага впитывается и через выводы обмоток. Попавшая внутрь обмоток влага снижает сопротивление изоляции между витками обмоток, способствует пробой изоляции и возникновению электролитического процесса за счет растворенных в воде солей — все это снижает надежность. Поэтому очень важная роль в повышении надежности трансформаторов, дросселей и катушек индуктивности принадлежит пропитке обмоток влагостойкими материалами и герметизации.

Повышение температуры окружающей среды приводит к снижению срока службы изоляции элементов и увеличивает интенсивность отказов. Так увеличение температуры от +20 до +85 °C для трансформаторов питания приводит к увеличению интенсивности отказов примерно в 30 раз.

1.4.6. Надежность печатных плат

Основными параметрами, определяющими надежность печатных плат, являются тангенс угла диэлектрических потерь, диэлектрическая проницаемость, удельное объемное и поверхностное сопротивление, сопротивление изоляции между печатными проводниками. К факторам, наиболее влияющим на величину этих параметров относят температуру окружающей среды и влажность. Продолжительное нахождение печатных плат в условиях повышенной температуры или влажности, а особенно при одновременном их сочетании приводит к возникновению в платах необратимых явлений, вызывающих резкое уменьшение сопротивления изоляции. А это зачастую ведет к их отказу. Влага служит причиной образования плесени и коррозии металлов, которые могут вызвать разрыв электрической цепи.

Одной из причин, вызывающих отказы печатных плат является перекрытие по поверхности платы. Это явление возникает в результате увеличения относительной влажности воздуха вблизи поверхности платы по следующим причинам: из-за неоднородности поверхностного сопротивления печатных плат и их покрытий, образования поверхностных трещин на плате и на покрытии, уменьшении давления окружающей атмосферы. При уменьшении атмосферного давления напряжение поверхностного перекрытия твердых диэлектриков уменьшается и становится минимальным при давлении 800-950 Па, а затем снова возрастает. Повышенная температура окружающей среды снижает напряжение поверхностного перекрытия печатных плат. Старение материала изоляционного основания печатной платы приводит к значительному увеличению тангенса угла диэлектрических потерь, в результате чего происходит резкое возрастание уровня потерь и нередко отказ печатной платы.

Надежность печатных плат зависит также от количества соединений (паек), нанесенных на нее. С увеличением количества соединений увеличивается опасность отказов.

1.4.7. Надежность интегральных схем

Возможность создания высоконадежной ЭА за счет применения ИМС заложена в самой природе пленочной и полупроводниковой технологии. Интенсивность отказов ИМС лежит в пределах 10^{-6} - 10^{-9} ч⁻¹, приближаясь к уровню высоконадежных элементов. Сравнение интенсивности отказов отдельных элементов ИМС и ИМС в целом показывает,

что они практически равнозначны. Преимуществом является то, что степень функциональной сложности ИМС с малым и средним уровнем интеграции слабо отражается на их надежности.

Для ИМС прежде всего характерны внезапные отказы, обусловленные качеством изготовления (технологическими дефектами): разрывы соединений между контактной зоной на поверхности подложки (кристалла) и выводами корпуса, обрывы и короткие замыкания внутренних соединений. Внезапные отказы полупроводниковых ИМС составляют 80% от общего числа отказов. Свыше 50% отказов гибридных линейных ИМС связано с дефектами встроенных транзисторов и паяных соединений. Отказы контактов золотых проволоочных выводов чаще всего происходят из-за обрыва проволоочки около шарика ковара.

Наиболее слабым звеном полупроводниковых ИМС транзисторно-транзисторной логики в пластмассовых корпусах являются внутренние проволоочные соединения, дающие обрывы и короткие замыкания (более 90% отказов вызвано обрывами соединительных проводов). Основная причина таких отказов определяется различием температурных коэффициентов линейного расширения металла и обволакивающего материала, что приводит к возникновению гермомеханических напряжений. Сколо 10% отказов полупроводниковых ИМС в пластмассовых корпусах происходит по причине электрической коррозии алюминиевой металлизации из-за недостаточной влагостойкости пластмасс и загрязнения поверхности окисла при герметизации. Типичные для таких ИМС и отказы из-за образования шунтирующих утечек и коротких замыканий, так как влага вызывает перенос ионов металла и загрязнений, а также образование проводящих мостиков между разнотенциальными точками схемы.

Более надежными являются ИМС с керамическими корпусами.

1.4.8. Повышение надежности элементов ЭА при конструировании

Надежность компонентов ЭА при конструировании ЭА может обеспечиваться различными способами, основными из которых являются:

- 1) выбор оптимальной формы изделия;
- 2) правильный подбор материалов для изготовления конструкции;
- 3) использование эффективных защитных покрытий и технологичность конструкции изделия;
- 4) использование элементов в условиях эксплуатации, с учетом которых они изготовлены;

5) создание электрических схем, мало критичных к уходу параметров элементов; создание облегченных электрических и тепловых режимов, в которых работают элементы;

6) защита элементов от неблагоприятного воздействия высоких и низких температур, влажности, ударов, вибраций и других эксплуатационных факторов.

2. СТРУКТУРНАЯ НАДЕЖНОСТЬ СИСТЕМ

2.1. Связь характеристик надежности системы с характеристиками надежности элементов

При определении надежности простой системы обычно вводятся следующие ограничения.

1. Отказы, происходящие в системе, являются независимыми.
2. Отказы системы вызваны отказами элементов. При отказе любого из элементов происходит отказ системы.

Данные ограничения надежности систем без резервирования при расчетах устанавливают математическую модель, состоящую из последовательно включенных элементов (рис.2), независимо от действительных связей элементов в реальной системе.

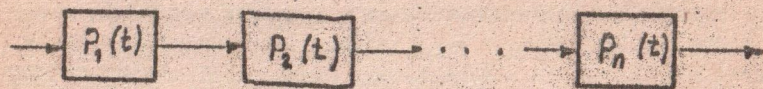


Рис.2. Последовательная модель системы при расчетах на надежность

Если известны вероятности безотказной работы элементов $P_i(t)$, то вероятность безотказной работы всей системы равна

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

Полагая в соответствии с выражением (4), что $P_i(t) = e^{-\lambda_i t}$ и λ_i - интенсивность отказа элемента, имеем

$$P(t) = \prod_{i=1}^n e^{-\lambda_i t} = e^{-\sum_{i=1}^n \lambda_i t} = e^{-\Lambda t}, \quad (7)$$

где

$$\Lambda = \sum_{i=1}^n \lambda_i \quad (8)$$

суммарная интенсивность отказов, есть интенсивность отказов системы. Аналогично выражению (6) определим среднее время безотказной работы системы:

$$T_{cp} = \frac{1}{\Lambda} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \lambda_i} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{T_{cpi}}}, \quad (9)$$

здесь T_{cpi} - среднее время безотказной работы элемента.

Из приведенных соотношений (7)-(9) следуют два вывода.

1. Чем меньше интенсивность отказов элементов системы, тем выше характеристики надежности всей системы.
2. Чем меньше общее количество элементов системы, тем лучше характеристики надежности системы.

При конструировании систем необходимо стремиться к более простым системам, состоящим из высоконадежных элементов при заданных ограничениях на технические характеристики и стоимость системы.

2.2. Структурное резервирование

Резервирование - есть избыток компонентов по сравнению с минимально необходимым для функционирования изделия, позволяющее повысить надежность изделия.

Резервирование бывает общее, параллельное и смешанное. При общем использовании резервируется все изделие, т.е. в случае выхода из строя оно заменяется таким же. При параллельном резервировании резервируются отдельные части изделия (параллельно, последовательно и т.п.), и в случае отказов они заменяются идентичными. При смешанном резервировании крупные и наиболее ответственные функциональные части изделия имеют общее резервирование, остальные - параллельное.

По способу введения резерва различают постоянное включение и включение замещением.

Постоянное включение характеризуется тем, что все резервные элементы включены постоянно и находятся в рабочем состоянии в течение всего времени работы основных элементов. Постоянное резервирование эффективно только в том случае, если возникающие в ЭА

отказы являются статистически независимыми, т.е. не влияют друг на друга. Поскольку в этом случае отказы основных элементов сразу устраняются и работоспособность изделия не нарушается, то нет необходимости в поиске отказавших элементов.

Включение замещением характеризуется тем, что при отказах одного (или нескольких) элемента (узла, блока и т.п.) вместо него включается резервный, после чего изделие вновь продолжает функционировать нормально. Поиск неисправности и замещение отказавшего узла может быть осуществлено вручную или автоматически.

По виду нагруженности резерва различают нагруженный и ненагруженный резерв.

Нагруженный ("горячий") резерв характеризуется тем, что условия работы резервных изделий полностью совпадают с условиями работы основных изделий, которые они замещают в случае отказа. Ресурс такого резерва расходуется одновременно и в равной мере с ресурсом основного изделия.

Ненагруженный ("холодный") резерв характеризуется тем, что резервное изделие отключено и включается только после выхода из строя основного изделия. Ресурс резервного изделия не расходуется, поскольку изделие находится в нерабочем состоянии.

Частным случаем резервирования является дублирование ЭА. В этом случае в качестве резерва используется всего одно изделие.

2.2.1. Надежность изделия при нагруженном резерве

Определим характеристики надежности резервированного изделия (элемента, узла, блока, системы) при нагруженном ("горячем") резервировании.

При расчете характеристик надежности математическая модель резервированного изделия в силу логической взаимосвязи основного и резервных изделий является параллельной (рис.3).

Полагается, что выполняются следующие ограничения.

1. Отказы изделий являются независимыми.
2. Переключатель, производящий замену вышедшего из строя изделия на работоспособное (если он имеется), является абсолютно надежным устройством.

3. Время замены отказавшего изделия на работоспособное существенно меньше среднего времени безотказной работы изделия и его можно считать равным нулю.

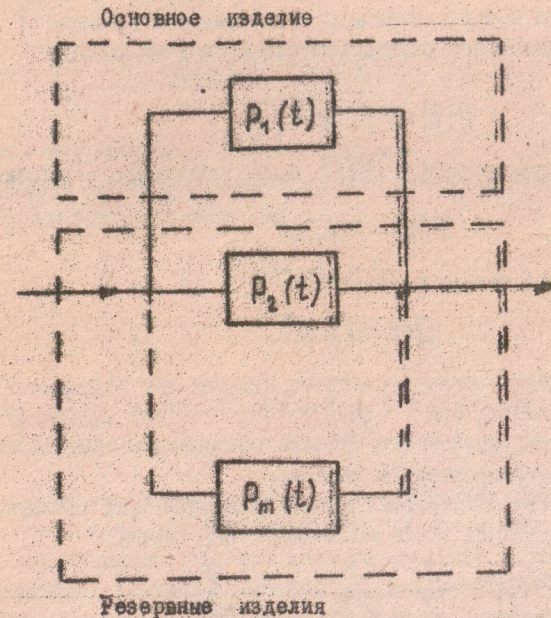


Рис.3. Параллельная модель резервированного изделия при расчетах на надежность

Отказ в системе, состоящей из параллельно включенных изделий, наступает тогда, когда откажут все изделия (рис.3). Отсюда вероятность отказа системы $Q(t)$ равна

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

где $P_i(t)$ - вероятность безотказной работы i -го изделия, $1 - P_i(t)$ - вероятность отказа i -го изделия. Вероятность безотказной работы резервируемой системы находится как

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

При экспоненциальном распределении вероятности безотказной работы (4) последнее выражение принимает вид:

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

отказы являются статистически независимы, т.е. не влияют друг на друга. Поскольку в этом случае отказы основных элементов сразу устраняются и работоспособность изделия не нарушается, то нет необходимости в поиске отказавших элементов.

Включение замещением характеризуется тем, что при отказах одного (или нескольких) элемента (узла, блока и т.п.) вместо него включается резервный, после чего изделие вновь продолжает функционировать нормально. Поиск неисправности и замещение отказавшего узла может быть осуществлено вручную или автоматически.

По виду нагруженности резерва различают нагруженный и ненагруженный резерв.

Нагруженный ("горячий") резерв характеризуется тем, что условия работы резервных изделий полностью совпадают с условиями работы основных изделий, которые они замещают в случае отказа. Ресурс такого резерва расходуется одновременно и в равной мере с ресурсом основного изделия.

Ненагруженный ("холодный") резерв характеризуется тем, что резервное изделие отключено и включается только после выхода из строя основного изделия. Ресурс резервного изделия не расходуется, поскольку изделие находится в нерабочем состоянии.

Частным случаем резервирования является дублирование ЭА. В этом случае в качестве резерва используется всего одно изделие.

2.2.1. Надежность изделия при нагруженном резерве

Определим характеристики надежности резервированного изделия (элемента, узла, блока, системы) при нагруженном ("горячем") резервировании.

При расчете характеристик надежности математическая модель резервированного изделия в силу логической взаимосвязи основного и резервных изделий является параллельной (рис.3).

Полагается, что выполняются следующие ограничения.

1. Отказы изделий являются независимыми.
2. Переключатель, производящий замену вышедшего из строя изделия на работоспособное (если он имеется), является абсолютно надежным устройством.
3. Время замены отказавшего изделия на работоспособное существенно меньше среднего времени безотказной работы изделия и его можно считать равным нулю.

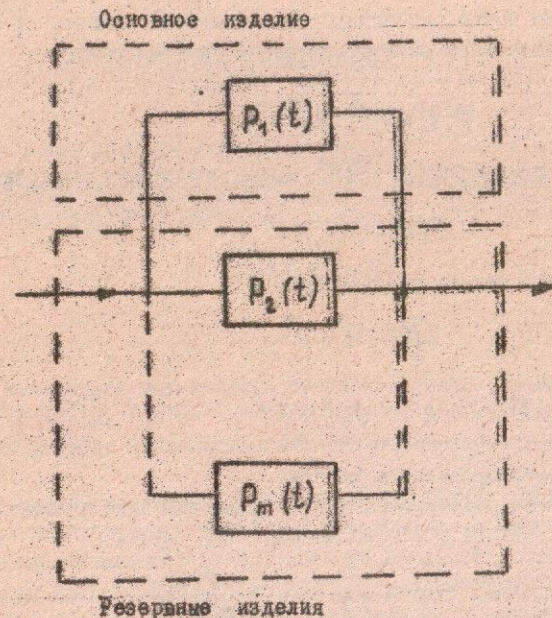


Рис.3. Параллельная модель резервированного изделия при расчетах на надежность

Отказ в системе, состоящей из параллельно включенных изделий, наступает тогда, когда откажут все изделия (рис.3). Отсюда вероятность отказа системы $Q(t)$ равна

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

где $P_i(t)$ - вероятность безотказной работы i -го изделия, $1 - P_i(t)$ - вероятность отказа i -го изделия. Вероятность безотказной работы резервируемой системы находится как

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

При экспоненциальном распределении вероятности безотказной работы (4) последнее выражение принимает вид:

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

Если все изделия имеют одинаковую интенсивность отказов λ , то вероятность безотказной работы резервной системы равна

$$P(t) = 1 - (1 - e^{-\lambda t})^m.$$

При $\lambda t \ll 1$ для расчетов $P(t)$ можно пользоваться выражением

$$P(t) \approx 1 - (\lambda t)^m,$$

а для вероятности отказа соотношением

$$Q(t) \approx (\lambda t)^m.$$

Так как вероятность отказа основного изделия при наложенных ограничениях определяется как $q(t) = \lambda t$, то $Q(t) \ll q(t)$ и надежность резервированного изделия оказывается существенно выше надежности нерезервированного изделия.

Среднее время безотказной работы резервируемой системы, в соответствии с (6) при любых значениях λt равна

$$\begin{aligned} T_{cp} &= \int_0^{\infty} P(t) dt = \frac{1}{\lambda} + \frac{1}{2\lambda} + \dots + \frac{1}{m\lambda} = \\ &= t_{cp} \left(1 + \frac{1}{2} + \dots + \frac{1}{m} \right), \end{aligned}$$

где $t_{cp} = \frac{1}{\lambda}$ — среднее время безотказной работы одного из изделий.

2.2.2. Надежность изделия при ненагруженном резерве

Модель расчета на надежность системы, состоящей из основного и $(m-1)$ резервного изделия приведена на рис. 3. Отличием от случая, рассмотренного в пункте 2.2.1, является то, что резерв ненагружен и изделия из резерва последовательно включаются в работу только после выхода из строя предыдущего изделия. Полагаем, что переключатель резерва идеальный.

Если основное и резервное изделия обладают одинаковой надежностью и имеет место экспоненциальный закон распределения отказов изделий, то вероятность безотказной работы резервируемого изделия

определяется по формуле [1]:

$$P(t) = e^{-\lambda t} \sum_{i=0}^{m-1} \frac{(\lambda t)^i}{i!},$$

где λ — интенсивность отказов изделия.

Среднее время безотказной работы резервируемой системы с ненагруженным резервом равно

$$T_{cp} = \int_0^{\infty} P(t) dt = \frac{m}{\lambda}.$$

3. НАДЕЖНОСТЬ И КОНТРОЛЬ ЦИФРОВЫХ СИСТЕМ

Современные цифровые системы представляют собой сложные функциональные устройства обработки информации. В процессе обработки информации возникает отказ, которые приводят к ошибкам в выдаваемых результатах. При отсутствии системы контроля частота ошибочных решений равна частоте отказов. Если же в системе реализован хотя бы один из методов контроля, то часть ошибок из-за сбоев и неисправностей будет обнаружена с некоторой вероятностью, характеризующей его эффективность. В результате этого на выходе цифровой системы (в частности ЭВМ) будет разреженный поток ошибок (неправильных решений). Если же в системе имеется блок контроля, включающий в себя одновременно несколько методов контроля, то разряжение выходного потока ошибок осуществляется последовательно каждым методом как фильтром.

Из теории массового обслуживания известно [6], что интенсивность отказов системы с контролем Λ_k связана с интенсивностью отказов системы без контроля Λ следующим образом:

$$\Lambda_k = \Lambda(1 - P_0),$$

где P_0 — вероятность обнаружения ошибки устройством контроля. Если устройство контроля состоит из ν различных методов контроля, то частоту сбоев на выходе цифровой системы можно определить по формуле:

$$P_k = \prod_{j=1}^n (1 - P_{oj}),$$

где P_{oj} - вероятность обнаружения ошибки j -ым контролем.

Контроль систем решает следующие основные задачи:

- 1) определение технического состояния системы;
- 2) локализация места неисправностей с заданной точностью;
- 3) определение правильности решения задач цифровой системой.

По назначению можно выделить следующие виды контроля: контроль работоспособности, профилактический контроль, диагностический контроль, контроль правильности решения задачи.

Контроль работоспособности предназначен для проверки аппаратуры на отсутствие неисправностей или отсутствие ошибок в информационных массивах. Профилактический контроль регулярно выполняется в календарные сроки с тем, чтобы исключить отказы, возникающие из-за разрегулировки, старения и износа элементов системы. При профилактике заменяют также элементы, выработавшие свой ресурс. Диагностический контроль включается при наличии неисправности, факт возникновения которой обнаружен, например, при контроле работоспособности, и предназначен для поиска места неисправности с требуемой точностью. Для повышения достоверности получаемой информации используют контроль правильности решения задачи.

В зависимости от используемых методов контроля различают программный, аппаратный и программно-аппаратный контроль.

3.1. Контроль и методы защиты информации

3.1.1. Помехоустойчивое кодирование информации в цифровых системах

Для обеспечения большей информационной надежности при передаче, хранении и обработке информации используют методы контроля, основанные на введении определенной информационной избыточности двоичных кодов. В зависимости от количества избыточных разрядов кода, добавленных к n -разрядному коду системы и их распределения внутри информационных слоев возможен контроль или защита информации в системе. Если используемая разрядность $2n$ равна n , а добавляется K контрольных разрядов, то избыточность кода можно охарактеризовать величиной $K/(n+K)$, где $n+K$ - полная длина кодовой комбинации.

С помощью n -разрядного кода для кодирования информации можно получить 2^n различных кодовых комбинаций. Эти комбинации образуют безизбыточный натуральный двоичный код, в котором искажение при передаче любого символа переводит одну разрешенную кодовую комбинацию в другую разрешенную и потому не может быть обнаружено.

Степень различия двух кодовых комбинаций характеризуется кодовым расстоянием. Кодовое расстояние определяет возможность обнаружения и исправления ошибок. Кодовое расстояние d между двумя любыми кодами A_i и A_j измеряется количеством разрядов, на которые эти комбинации отличаются одна от другой. В натуральном двоичном коде $d=1$. Следовательно, минимальное кодовое расстояние для обеспечения контроля и защиты информации должно быть по величине больше единицы. Если $d=2$, то любые две кодовые комбинации различаются в двух разрядах, поэтому искажение информации в одном разряде переводит данную кодовую комбинацию в число запрещенных и может быть обнаружено. При $d=3$ искажение информации в данном разряде приводит к появлению комбинации, отличающейся от правильной в одном разряде, а от любой запрещенной - в двух разрядах. В этом случае возможно не только обнаружение, но и исправление ошибки. Исправление таких одиночных ошибок достигается заменой запрещенной кодовой комбинации на разрешенную ближайшую по кодовому расстоянию.

Для контроля, хранения и передачи информации широко используют код с проверкой на четность. Этот код имеет небольшую избыточность, поскольку добавляется только один контрольный разряд, с помощью которого общее количество единиц в коде становится четным или нечетным. Контроль на четность обнаруживает одиночные ошибки и нечетное количество ошибок.

Использование кода Хемминга позволяет не только контролировать, но и защищать информацию исправлением одиночных, двойных и прочих ошибок. Для защиты информации, представленной в последовательной форме, и исправления многократных ошибок удобно использовать циклические коды [6].

3.1.2. Контроль с проверкой четности-нечетности

Для контроля на четность-нечетность кода к исходному информационному коду добавляется один разряд. При контроле на четность значение контрольного разряда равно "1", если количество единиц

в контролируемом коде нечетно, и равно "0", если количество единиц в коде четно. При контроле на нечетность информация в контрольном разряде принимает соответственно противоположные значения. Любое двоичное число A может быть представлено в позиционной системе счисления:

$$A = a_n 2^n + a_{n-1} 2^{n-1} + \dots + a_1 2^1 + a_0 2^0,$$

где a_i равно "0" или "1".

Четность числа A определяется равенством

$$S = \sum_{i=0}^n a_i \bmod 2,$$

где $\bmod 2$ — логическое сложение по модулю 2. Сложение по модулю 2 представляет собой логическую операцию "исключающее ИЛИ". Поэтому для двух произвольных разрядов a_i и a_j значение четности S и нечетности \bar{S} можно определить по формулам

$$S = a_i \bar{a}_j + \bar{a}_i a_j; \quad \bar{S} = a_i a_j + \bar{a}_i \bar{a}_j.$$

Очевидно, что $S=1$, когда в рассматриваемых двух разрядах имеется одна и только одна единица, и $S=0$, что соответствует наличию двух единиц в разрядах или их отсутствию. Функциональная схема для выработки сигналов S и \bar{S} двух двоичных разрядов приведена на рис. 4.

При многоразрядных кодах можно использовать последовательную или пирамидальную схему для выработки сигналов четности [12].

При передаче информации контроль на четность можно вводить по байтам или полным словам.

Для увеличения надежности контроля в ленточных магнитных запоминающих устройствах вводят два вида контроля по четности-нечетности: продольный и поперечный. Информация на ленте пишется байтами, используется девятый — контрольный бит. После записи зоны из десяти слов в качестве одиннадцатого 9-го разрядного слова записывается слово продольной четности, каждый разряд которого является конкретным для данной строки зоны. Продольный и поперечный контроль на четность позволяет исправлять одиночные ошибки.

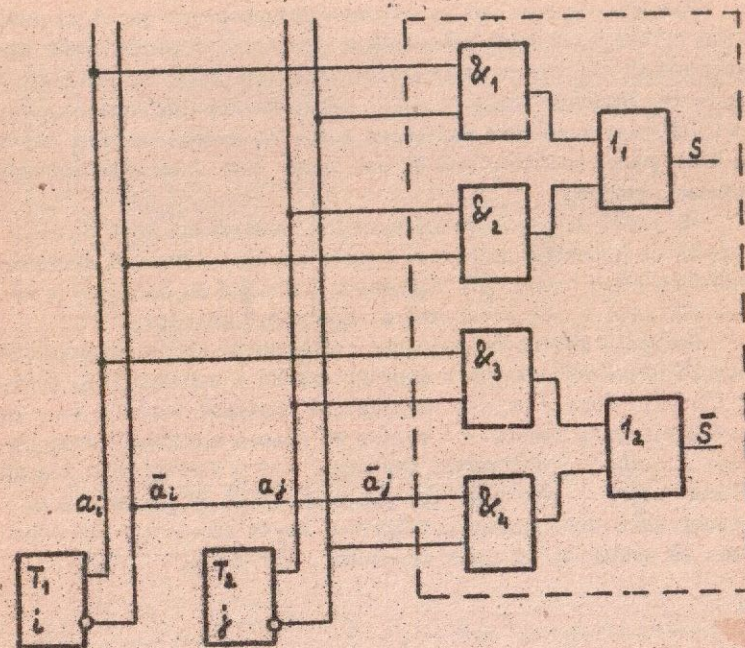


Рис. 4. Функциональная схема формирования сигналов контроля S — четности и \bar{S} — нечетности для двух двоичных разрядов

3.2. Контроль цифровых систем

3.2.1. Аппаратный контроль работы электронных узлов

Для контроля работы узла требуется построить некоторую логическую схему, обрабатывающую m -входных и n -выходных сигналов и генерирующую функцию F правильности работы узла на основе анализа результата обработки [12].

На рис. 5 показана структурная схема контроля с дублированием логической комбинационной схемы КС₁. Поразрядное сравнение выходных функций основной и дублирующей КС₂ при действии на входах одних и тех же сигналов позволяет прямым образом определить функцию ошибки F .

Частным случаем метода полного дублирования рис.5 является схема с генерированием контрольных разрядов. В такой схеме вместо дублирующей KC_2 схемы применяется узел генерации контрольных разрядов как функции входного кода, значения которых сравниваются с контрольными разрядами выходного кода. Во многих частных случаях за счет учета особенностей KC это может дать более экономичное схемное решение.

На рис.6 показана реализация восстановления кода входной функции по значению выходного кода с помощью обратной логической комбинационной схемы ОКС. Сравнение сигналов на входе KC и на выходе ОКС дает также возможность определить функцию F .

Контроль только по выходным сигналам на основе знания специфики KC позволяет получить функцию ошибки с помощью узла контроля УК (рис.7). Узел контроля анализирует выходные сигналы KC и вырабатывает сигнал ошибки F только на основе выходных сигналов

y_1, \dots, y_n . Например, известно, что в дешифраторе выходной сигнал $y_i = 1$ возникает на одном и только на одном выходе. Поэтому единичную ошибку дешифратора можно зафиксировать с помощью УК четности выходных сигналов $F = y_1 + y_2 + \dots + y_n$.

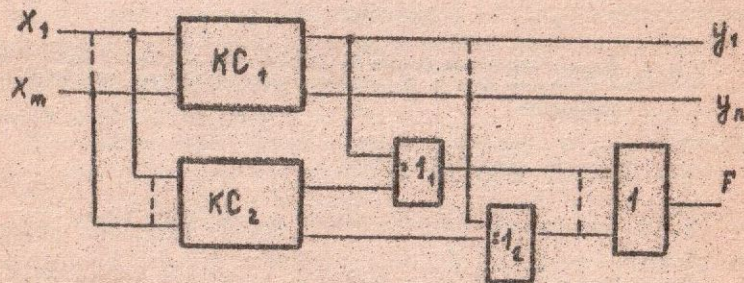


Рис.5. Схема контроля логической комбинационной схемы KC_1 с использованием дублирования KC_2

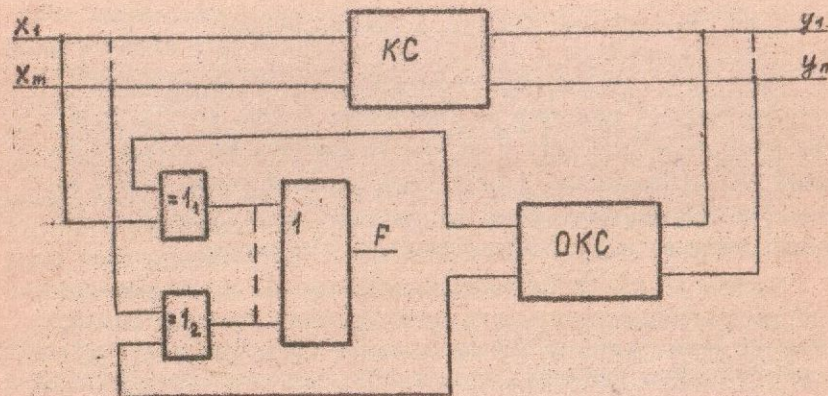


Рис.6. Схема контроля KC с помощью обратной комбинационной схемы ОКС

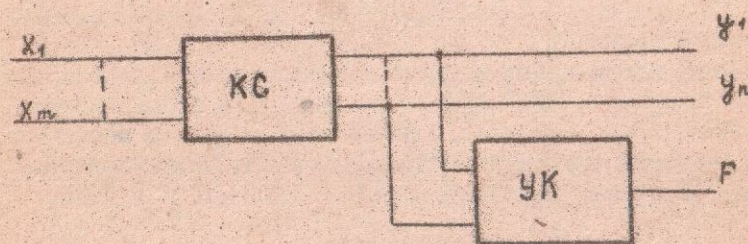


Рис.7. Схема контроля KC по выходным сигналам с помощью узла контроля УК

3.2.2. Мажоритарный контроль и резервирование

Наиболее простым способом контроля является дублирование отдельных узлов и сравнение результатов их работы (рис.5). Если результаты не совпали друг с другом, то делается заключение о неверной работе аппаратуры. Однако такой способ контроля хотя и обладает высокой эффективностью, не позволяет непосредственно определить, какое из двух устройств функционирует неверно.

Поэтому в ряде случаев используют несколько (3, 5) устройств, одновременно выполняющих одни и те же действия. Это позволяет при выходе из строя одного из устройств решить сразу 2 задачи: выработать правильный выходной сигнал и определить место возникновения отказа.

Решение о том, какой сигнал должен быть на выходе принимается методом "голосования" (мажорирования), т.е. по большинству выходных сигналов отдельных устройств. Выработка общего выходного сигнала осуществляется мажоритарным элементом МЭ.

Для определения места отказа необходимо иметь логический элемент ЛЭ, который работал бы параллельно с МЭ и указывал вышедшее из строя устройство.

Схема мажоритарного контроля и резервирования приведена на рис.8. Здесь Y_1, Y_2, Y_3 — три идентичных функциональных устройства (узла, элемента), одиночные выходы которых подключены к МЭ. МЭ осуществляет выработку выходного сигнала Y в соответствии с логическим выражением

$$Y = Y_1 Y_2 \vee Y_1 Y_3 \vee Y_2 Y_3.$$

Таким образом, отсутствие одного из сигналов Y_1, Y_2 или Y_3 не влияет на правильность выработки сигнала Y .

Задача мажоритарного контроля состоит в определении неисправного устройства. Для этого в мажоритарно резервируемое устройство вводится элемент ЛЭ, выходные сигналы которого формируются в соответствии со следующими логическими выражениями:

$$\alpha_1 = \bar{Y}_1 Y_2 Y_3, \quad \alpha_2 = Y_1 \bar{Y}_2 Y_3, \quad \alpha_3 = Y_1 Y_2 \bar{Y}_3.$$

Наличие сигнала $\alpha_i = 1$ ($i = 1, 2, 3$) указывает на ошибку в работе соответствующего устройства Y_i . Контроль позволяет зафиксировать

ровать неисправное устройство и, не выключая системы в целом, произвести необходимый ремонт.

Недостаток структуры на рис.8 состоит в том, что если откажет сам МЭ, то система в целом выходит из строя и это не фиксируется ЛЭ. Поэтому для повышения надежности количество МЭ доводят до количества основных устройств. В этом случае каждая логическая переменная выдается по нескольким выходным линиям, которые можно подключать к следующему мажоритарно резервируемому устройству [6]. Кроме того возникает возможность выявления отказов и ремонта устройства без выключения не только основных устройств, но и МЭ.

Для повышения надежности работы мажоритарных систем можно использовать не 3, а 5, 7 и любое другое нечетное количество одинаково одновременно работающих устройств. Количество их должно быть нечетным, иначе могут возникнуть неопределенные состояния при работе МЭ.

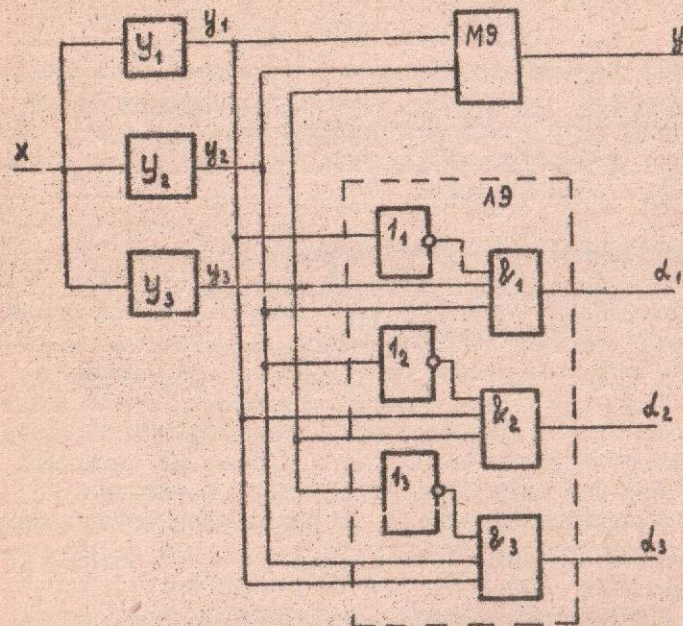


Рис.8. Схема мажоритарного резервирования и контроля

Эффективность мажоритарного контроля является высокой, так как вероятность неверного срабатывания нескольких устройств одновременно убывает по показательному закону с ростом числа этих устройств.

Определим вероятность безотказной работы схемы мажоритарного резервирования (рис.8). Эта вероятность $P(t)$ может быть представлена в виде

$$P(t) = [p_1(t)p_2(t)p_3(t) + p_2(t)p_3(t)q_1(t) + \\ + p_1(t)p_3(t)q_2(t) + p_1(t)p_2(t)q_3(t)] p_{нз}(t),$$

где $p_i(t)$ - вероятность безотказной работы i -го основного устройства, $q_i(t) = 1 - p_i(t)$ - вероятность отказа i -го устройства, $p_{нз}(t)$ - вероятность безотказной работы МЭ. Положим $p_i(t) = p_j(t) = p(t)$, в результате получим

$$P(t) = p_{нз}(t)p^2(t)[3 - 2p(t)].$$

Большим достоинством данного вида контроля является его высокая разрешающая способность и возможность выполнения ремонта как основной, так и контрольной аппаратуры без нарушения процесса нормального функционирования системы. Этим свойством не обладает никакой другой способ контроля.

3.2.3. Аппаратурно-микропрограммный контроль

При аппаратурно-микропрограммном контроле в систему вводится избыточная аппаратура, которая реализует контрольные микропрограммы либо во время простоя, либо прерывая работу системы по основной программе на короткие промежутки времени. Контроль осуществляется периодически в виде единичных контролей, во время которых может проверяться как часть, так и вся система. Для реализации контроля необходимо иметь (рис.9): узел переключения режимов, узел формирования контрольных микропрограмм, узел анализа результатов проверок, а также узлы связи между основной и контрольной аппаратурой.

Узел переключения режимов анализирует состояние контролируемой системы и определяет моменты начала выполнения очередной контрольной микропрограммы. По его сигналам блокируется прием

входных слов от других устройств и выдача выходной информации, т.е. контролируемая система переводится в режим автономной работы и одновременно с этим включается в работу узел формирования контрольных микропрограмм. По мере выполнения контрольных микропрограмм на выходе системы появляется переработанная информация, которая поступает в узел анализа результатов. Здесь делается заключение о наличии ошибок и, если это так, то вырабатывается сигнал "Отказ". В противном случае завершается выполнение единичного контроля, и система переводится в режим нормального функционирования.

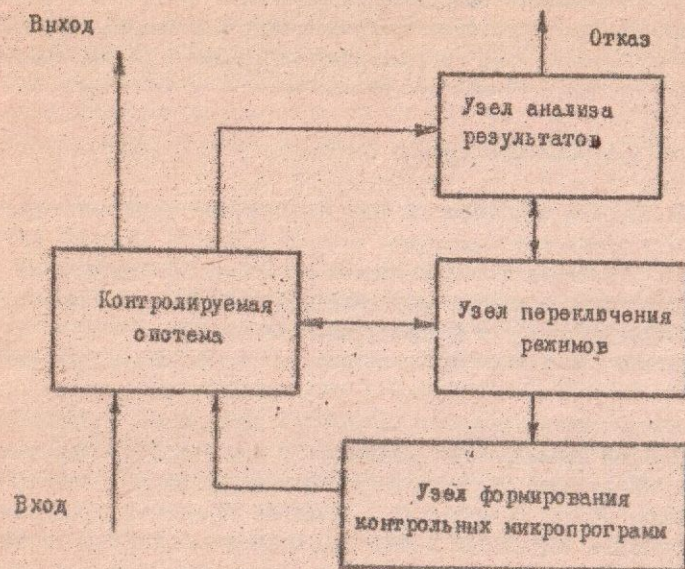


Рис.9. Система с микропрограммным контролем

Существует несколько разновидностей аппаратурно-микропрограммного контроля. По способам формирования микропрограмм различают контроль с использованием имеющихся рабочих микроопераций и с формированием специальных контрольных микроопераций.

По способам включения микропрограмм можно выделить детерминированный и случайный контроль. При первом способе контрольные микрооперации выполняются в определенной, наперед заданной,

последовательности, во втором - очередная микрооперация выбирается случайным образом.

Некоторые особенности имеет контроль систем, содержащее элементы памяти которых не должно изменяться в результате осуществления единичного контроля. Очевидно, в данном случае в качестве исходных слов для проверки целесообразно использовать содержимое элементов памяти на момент проведения контроля.

Аппаратурно-микропрограммный контроль достаточно эффективен, требует очень мало дополнительного времени для своей реализации, количество контрольного оборудования невелико.

К недостаткам этого вида контроля можно отнести то, что он позволяет обнаружить лишь систематические ошибки и не может выявить сбои в процессе выполнения программы.

3.2.4. Программный контроль

Необходимость программного контроля вызвана имеющимися недостатками существующих аппаратных методов контроля цифровых систем (ЭВМ): недостаточными полнотой охвата и глубиной контроля всех устройств, а также большими затратами оборудования для обеспечения высокой эффективности аппаратного контроля.

Различают алгоритмический, логический и тестовый контроль [6].

Алгоритмическим контролем называются специальные программные методы проверки правильности реализации с помощью ЭВМ алгоритмов обработки информации. Он предназначен для обнаружения и исправления случайных сбоев, возникающих в процессе обработки, преобразования и передачи информации в ЭВМ. При этом виде контроля задача решается дважды: один раз - по усеченному алгоритму, а второй раз - по основному. Полученные результаты сравниваются между собой.

Логический контроль основывается на избыточности исходной, промежуточной и результирующей информации, используемой при вычислениях. Наличие избыточности позволяет в ряде случаев находить определенные контрольные соотношения, при помощи которых можно обнаружить грубые ошибки.

Принцип работы тестового контроля состоит в том, что на вход контролируемого устройства подается специально подобранная совокупность входных воздействий. Сравнение полученной реакции с эталонной позволяет сделать вывод о правильности функционирования устройства.

Тестовый контроль в отличие от алгоритмического и логического не может быть использован для проверки состояния устройств в процессе выполнения ими основной задачи, но может применяться периодически в процессе функционирования ЭВМ между решениями основных задач.

Тестовый контроль ЭВМ осуществляется при помощи специально составленных тест-программ. Вначале для каждого устройства разрабатывается тест, затем на основе полученного теста составляется контролирующая тест-программа, которая состоит из мелких блоков. Все блоки построены по единому принципу: вначале осуществляется подача на вход устройства входного слова, затем происходит сравнение выходного слова с эталоном. Если они совпали, программа переходит к выполнению следующего блока, если не совпало - автоматическая проверка прекращается. На устройствах отображения при этом регистрируются входное, выходное и эталонное слова.

3.3. Надежность программного обеспечения

В идентичных условиях одно и то же программное обеспечение (ПО) ведет себя все время одинаково, и если оно корректно, то можно утверждать, что оно совершенно надежно. Однако вопрос корректности ПО остается открытым, пока система ведет себя не так, как это ожидает пользователь, хотя оно, возможно, и удовлетворяет самым широким требованиям специфики.

Программная ошибка имеет место тогда, когда программа работает не так, как предполагает пользователь, т.е. система в целом не выполняет заданные функции. Надежность ПО - это вероятность того, что программа какой-то период времени будет работать без сбоев.

Надежность ПО в значительной степени отличается от надежности оборудования. Если интенсивность отказов оборудования системы изменяется во времени в соответствии с рис.1, то интенсивность отказов программ носит иной характер. Действительно, ПО не подвержено износу, практически отсутствуют ошибки производства, так как встречаются они редко и легко могут быть исправлены (например, ошибки перезаписи при копировании). Надежность ПО целиком определяется ошибками разработки.

Для системы, в которой по мере обнаружения ошибки исправляются и не вносятся в результате исправления новые ошибки, интенсивность отказов ПО изменяется в соответствии с кривой на рис.10.

Сравнение рис. I и IO показывает, что кривые $\lambda(t)$ ведут себя различно. Надежность оборудования определяется в основном случайными отказами, а в основе надежности ПО лежат предопределенные ошибки.

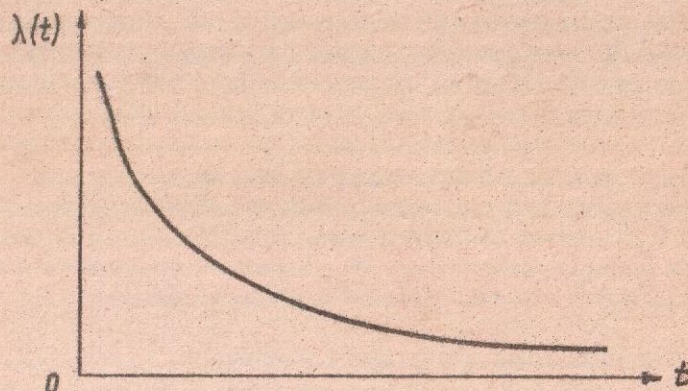


Рис. IO. Зависимость интенсивности отказов программного обеспечения от времени

Отказ оборудования не зависит от обрабатываемой информации. Так, если двоичный сумматор находится на грани отказа, то сам отказ не будет зависеть от конкретных значений обрабатываемых данных. С другой стороны, программные ошибки в большей степени зависят от входной информации. Причина появления ошибки в какой-то конкретный момент времени заключается в том, что в этот момент была обработана уникальная последовательность входных данных, вызывающая проявление ошибки.

Ошибки ПО в действительности являются функцией от текущей входной информации и текущего состояния системы. Кроме того, ошибки ПО носят, как правило, систематический, а само оборудование — случайный характер.

После написания и сборки программы, как и аппаратура, подвергаются испытаниям, проверяющим качество проектирования, чтобы убедиться в выполнении требований спецификации по функциональным возможностям. Здесь по сравнению с аппаратурой имеется то отличие, что исчерпывающая проверка ПО во всех режимах работы на всевозможных комбинациях и последовательностях данных и управлений часто

просто невозможна. В то же время для аппаратуры пишутся исчерпывающие тесты проверок конструктивных дефектов и тесты, связанные с решением задач безотказной работы аппаратуры в течение больших интервалов времени. Поэтому если программное обеспечение создано впервые, то оно наверняка содержит как несовершенности логического характера, так и ошибки при кодировании.

Для большинства вычислительных систем число информационных слов в 3-10 раз превышает число логических элементов процессора системы [8]. Из-за большого объема ПО невозможно добиться выполнения сразу всех требуемых функций, и поэтому следует планировать в будущем выпуск дополнений и изменений.

Данные об интенсивностях отказов нового ПО приведены в таблице III.

Распределение ошибок различных категорий для управляющей части операционной системы [8] приведено в табл. I.

Таблица I

Распределение ошибок для управляющей части операционной системы

Категория ошибок	%
1. Авария системы	26
2. Аварийный отказ прикладного программного обеспечения	3
3. Программные ошибки пользователя	13
4. Уничтожение данных	4
5. Нарушение защиты данных	2
6. Снижение производительности	2
7. Потеря функциональных возможностей	50

Авария системы включает такие признаки, как заикливание, останов системы без какой-либо индикации, печать сообщений о системных ошибках, ошибки, при которых программы должны быть перезагружены.

Аварийный отказ прикладного программного обеспечения останавливает не систему в целом, а только один из ее модулей или пакетов, который должен перезагружаться.

Программные ошибки пользователя вызывают неудачное завершение

работы пользователя, зависание задачи в системе.

Уничтожение (искажение) данных представляет отказы, вызывающие потерю данных и, как следствие, неправильные выходные результаты.

Нарушение защиты данных открывает пользователю несанкционированный доступ к некоторым файлам либо ошибочно закрывает ему доступ к файлам.

Снижение производительности вызывается такими ошибками, как выделение лишних ресурсов или замедление ввода-вывода.

Ошибки, вызывающие потерю функциональных возможностей (50%), представлены в табл.2.

Таблица 2
Распределение ошибок, вызывающих потерю функциональных возможностей

Категория ошибок	%
1. Выполнение команд и процедур в программах пользователя	12
2. Управление заданиями или команды оператора	8
3. Форматы ввода-вывода	7
4. Неправильные или искаженные сообщения	1
5. Выполнение операций	3
6. Другие	5

Распределение различных категорий ошибок программ компиляторов и ассемблеров представлено в табл.3.

Таблица 3
Распределение ошибок для компиляторов и ассемблеров

Категория ошибок	%
1. Авария пакетов программ	8
2. Неправильная обработка выражений	29
3. Неправильное распознавание неисправности	10
4. Неточные результаты	5
5. Неправильные форматы ввода-вывода	16
6. Некорректные или ложные сообщения об ошибке	24
7. Другие	8

Совокупность факторов, определяющих надежность ПО, можно условно разделить на 3 группы: общие факторы; факторы, связанные с разработкой ПО; эксплуатационные факторы [7].

Группа общих факторов, определяющих надежность ПО: процедуры управления разработкой ПО, подготовка и повышение квалификации программистов, архитектура вычислительной системы, языки программирования.

В составе факторов, связанных с разработкой ПО, необходимо выделить конструктивные, технологические и организационные факторы. Группа конструктивных факторов проявляется себя на стадии начального проектирования разработки ПО и включает: размеры и стоимость разрабатываемой системы, степень сложности системы, структурное построение программы (модульный принцип построения программ является одним из путей решения проблемы обеспечения надежности, так как позволяет более глубоко проверить программу), наличие опыта разработки, степень выполнения последовательности работ. Группа технологических факторов проявляется себя при разработке ПО и включает: качество программирования, принятые конструктивные решения, объем программы, логическую сложность, степень выполнения требований на разработку. Организационные факторы определяют надежность ПО как следствие организации группы по разработке ПО.

В группу эксплуатационных факторов, определяющих достижение заданного уровня надежности включаются следующие факторы: полнота и качество документации, степень адаптации документации, простота изучения и использования ПО на основе документации и путем контрольных пропусков на ЭВМ (реализация этого фактора исключает возможные ошибки эксплуатации), качество обучения пользователей, степень выполнения стандартов на эксплуатацию ПО, защищенность информации программ.

Система ПО, как и любые другие технические системы, проходит после завершения проектирования стадию контроля. Контроль системы ПО обладает существенными отличиями от контроля технической системы. Основные отличия состоят в том, что любая система ПО является необслуживаемой и, как правило, логически гораздо более сложной. Процесс контроля системы ПО осуществляется тестированием как ее функциональных возможностей, так и логики работы. Основной целью контроля программы является нахождение неизвестных ошибок и их устранение. Для осуществления надежного контроля важное значение имеет правильная разработка тестовых последовательностей.

Существуют разные методы оценки надежности программного обеспечения [4, 7]. Модели надежности ПО базируются в известной мере на теории надежности аппаратуры, приведенной в разделе I.

4. НАДЕЖНОСТЬ РЕМОНТИРУЕМОЙ АППАРАТУРЫ

Ремонтируемые системы восстанавливают при отказах, после чего продолжают их дальнейшую эксплуатацию. Функционирование восстанавливаемой системы представляет собой, с точки зрения надежности, последовательность чередующихся интервалов работоспособности и восстановления работоспособности.

4.1. Показатели надежности восстанавливаемых систем

Надежность ремонтируемых систем оценивают большей частью по характеристикам потока отказов, которые рассматривают как случайные события. В теории надежности ремонтируемых систем [1, 6, 9, 13] широкое распространение получили простейшие (пуассоновские) потоки.

Простейший поток обладает свойствами стационарности, т.е. имеет постоянное среднее число отказов на постоянном интервале времени. Кроме этого простейший поток отказов системы описывается следующими количественными характеристиками: время между отказами подчиняется экспоненциальному закону (5) $f(t) = \lambda e^{-\lambda t}$; вероятность того, что за время t произойдет l отказов $P_l(t)$ определяется законом Пуассона

$$P_l(t) = \frac{(\lambda t)^l}{l!} e^{-\lambda t}, \quad (10)$$

где λ - интенсивность отказов системы. Из выражения (10) как частный случай при $l=0$ вытекает вероятность того, что на интервале t не произойдет ни одного отказа $P_0(t)$. Эта вероятность есть вероятность безотказной работы системы $P(t) = e^{-\lambda t}$ и совпадает с выражением (4).

При фиксированном времени t число отказов l является случайной величиной. Математическое ожидание числа отказов на интервале t равно:

$$l_{cp} = \sum_{l=0}^{\infty} l P_l(t) = \lambda t. \quad (11)$$

Дисперсия числа отказов $D(l)$ определяется выражением

$$D(l) = \sum_{l=0}^{\infty} l^2 P_l(t) - l_{cp}^2,$$

которое при использовании соотношений (10) и (11) дает результат:

$$D(l) = \lambda t.$$

Если зафиксировать число отказов l , то можно определить среднее время t_{cp} , за которое произойдет l отказов:

$$t_{cp} = \int_0^{\infty} P_l(t) dt = \frac{l+1}{\lambda}. \quad (12)$$

В частном случае при $l=0$ из выражения (12) вытекает среднее время безотказной работы системы $t_{cp} = \frac{1}{\lambda}$ между двумя отказами, совпадающее с (6).

Аналогично потоку отказов для описания процесса восстановления системы используется поток восстановлений, являющийся простейшим. Поток восстановлений характеризуется параметром интенсивности восстановления μ . Интенсивность восстановлений μ связана со средним временем восстановления $t_{вср}$ соотношением

$$\mu = \frac{1}{t_{вср}}.$$

Поток отказов и поток восстановлений описывает процесс функционирования системы независимо друг от друга. В качестве обобщенного показателя используют коэффициент готовности $K_r(t)$ - вероятность того, что система в произвольный момент времени t периода эксплуатации находится в работоспособном состоянии. В установившемся (стационарном) режиме эксплуатации коэффициент готовности рассчитывается по формуле

$$K_r = \frac{t_{cp}}{t_{cp} + t_{вср}}.$$

Для оценки надежности восстанавливаемой системы используется также коэффициент оперативной готовности $K_{op}(t, \tau)$ - вероятность того, что система будет работать безотказно в течение времени τ , начиная с произвольного момента t . В установившемся

режиме эксплуатации коэффициент оперативной готовности определяется по формуле

$$K_{ог}(\tau) = K_r P(\tau) = K_r e^{-\lambda \tau}.$$

4.2. Диагностирование аппаратуры

Для проверки работоспособного состояния электронной аппаратуры и локализации места отказа используются комплексы диагностирования [6, 14]. Комплексы диагностирования способны подавать входные воздействия на диагностируемую систему (ДС), собирать и анализировать ответные реакции системы (рис. II).

В состав комплекса входят ЭВМ с периферией, генератор слов (ГС) и логический анализатор (ЛА). Генератор слов в зависимости от исходных данных, полученных от ЭВМ, выдает входные воздействия на ДС. Логический анализатор собирает данные о поведении системы в режиме реального времени.

ЭВМ подготавливает тестовые наборы, загружает и настраивает на определенный режим работы ГС и ЛА, анализирует результаты тестирования, осуществляет диалог с оператором.

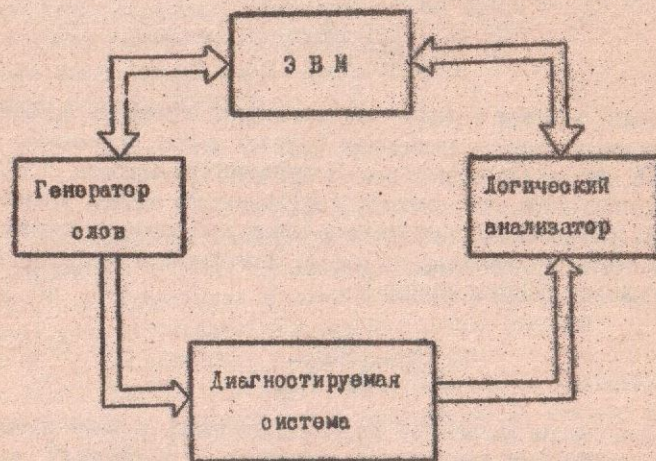


Рис. II. Упрощенная структура комплекса диагностирования аппаратуры

Отыскание места отказа в аппаратуре производится с помощью диагностических тестов. Диагностические тесты используют два основных способа поиска места отказа: комбинационный и последовательный. Комбинационные тесты целесообразно разрабатывать для простых систем с несложной внутренней структурой. Для диагностики сложных систем применяются последовательные тесты.

Суть диагностики заключается в исследовании реакции системы при подаче на ее вход последовательности воздействий. Так как структура системы известна, то для каждой входной последовательности известны элементы, участвующие в образовании выходных реакций. Совпадение выходной последовательности с эталоном свидетельствует о том, что соответствующие элементы работают правильно. Несовпадение с эталоном показывает, что среди соответствующих элементов имеются отказавшие. Подачей на вход новых последовательностей сужают область находящихся под подозрением элементов до пределов требуемой.

5. ОСНОВЫ РАСЧЕТА НАДЕЖНОСТИ ЭА

Расчет надежности ЭА зависит от стадии проектирования ЭА. Различают прикидочный, ориентировочный и окончательный расчеты.

Прикидочный расчет — наиболее простой вид расчета, проводится на стадии составления технического задания на разрабатываемую аппаратуру. Позволяет грубо оценить параметры надежности ЭА.

Ориентировочный расчет надежности применяется на этапе эскизного проектирования после разработки принципиальной схемы, программного обеспечения и конструкции ЭА. Расчет позволяет выявить слабые участки системы и наметить пути повышения надежности.

Окончательный расчет надежности производится на этапе технического проектирования после испытания макета или модели изделия и всех его узлов, когда известны режимы работы всех элементов системы и условия их эксплуатации. Этот расчет является наиболее полным и обладает наибольшей точностью.

Все виды расчета на надежность базируются на теоретическом материале, приведенном в разделах I-4.

5.1. Прикидочный расчет надежности

Расчет производится в следующей последовательности.

I. По структурной или функциональной схеме системы определяется приблизительно общее количество элементов N .

2. Определяются типовые элементы, на которых предполагается проектирование аппаратуры. Из таблицы П.1 оценочно находится средняя номинальная интенсивность отказов на один элемент λ_n .

3. Находится суммарная номинальная интенсивность отказов системы

$$\Lambda_n = n \lambda_n.$$

4. Находится реальная интенсивность отказов системы

$$\Lambda = K_\lambda \Lambda_n,$$

где $K_\lambda = K_{\lambda 1} K_{\lambda 2} K_{\lambda 3}$ — поправочный коэффициент (см. подразд. I.3) на условия эксплуатации аппаратуры, определенный в соответствии с техническим заданием по табл. П.2—П.4.

5. Вычисляется среднее время безотказной работы системы

$$T_{cp} = \frac{1}{\Lambda}.$$

6. Определяется вероятность безотказной работы системы

$$P(t) = e^{-\Lambda t} = e^{-\frac{t}{T_{cp}}}$$

в виде таблицы и графика.

Для сложных систем при более точной оценке показателей надежности целесообразно все элементы разбить на небольшое количество групп K с одним порядком номинальной интенсивности отказов λ_{nj} в каждой группе. В этом случае суммарная номинальная интенсивность отказов системы вычисляется по формуле

$$\Lambda_n = \sum_{j=1}^K n_j \lambda_{nj}.$$

где n_j — оценочное количество элементов в j -ой группе.

Пример I. Предполагается спроектировать самолетный вычислитель. Известно, что основными элементами вычислителя будут проводниковые интегральные микросхемы (приближенное количество

$n_1 = 250$ шт.), дискретные элементы (транзисторы, конденсаторы, резисторы) в количестве $n_2 = 50$ шт., контактные соединения (разъемы, пайки) в количестве $n_3 = 3500$ шт. Условия эксплуатации аппаратуры: высота полета над уровнем моря до 20 км, температура окружающей среды до +40 °C, относительная влажность 65%.

Из таблицы П.1 определяем оценочные средние номинальные интенсивности отказов λ_{nj} для каждой из трех групп элементов, которые равны $\lambda_{n1} = 0,02 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$, $\lambda_{n2} = 3 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$, $\lambda_{n3} = 0,01 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$.

Вычисляем суммарную номинальную интенсивность отказов системы

$$\Lambda_n = \sum_{j=1}^3 n_j \lambda_{nj} = (250 \cdot 0,02 + 50 \cdot 3 + 3500 \cdot 0,01) 10^{-6} \text{ ч}^{-1} = 190 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}.$$

Определяем поправочный коэффициент K_λ . По табл. П.2 находим $K_{\lambda 1} = 1,65$, по табл. П.3 оцениваем $K_{\lambda 2} = 1$, а по табл. П.4 определяем $K_{\lambda 3} = 1,35$. Вычисляем значение K_λ :

$$K_\lambda = K_{\lambda 1} K_{\lambda 2} K_{\lambda 3} = 1,65 \cdot 1 \cdot 1,35 \approx 2,23.$$

Рассчитываем реальную интенсивность отказов самолетного вычислителя:

$$\Lambda = K_\lambda \Lambda_n = 2,23 \cdot 190 \cdot 10^{-6} = 423,7 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}.$$

Находим среднее время безотказной работы

$$T_{cp} = \frac{1}{\Lambda} = \frac{1}{423,7 \cdot 10^{-6}} \approx 2360 \text{ ч}.$$

Рассчитываем вероятность безотказной работы $P(t)$ для интервала $t = (10 - 2 T_{cp})$, заполняем таблицу и строим график.

5.2. Ориентировочный расчет надежности

Расчет надежности для сложных систем целесообразно выполнять по блокам. Тем самым можно оценить показатели надежности каждого блока, выявить наиболее ненадежные блоки и при необходимости повысить надежность путем использования более надежных элементов или применить резервирование. При расчете используется принципиальная схема, перечень элементов и чертеж конструкций системы. Промежуточные результаты расчета рекомендуется оформить в виде таблицы типа 4.

Последовательность расчета следующая.

1. Все элементы системы (блока) распределяются на группы с одинаковой номинальной интенсивностью отказов λ_{nj} согласно

таблицы П.1. Определяется количество элементов n_j в каждой группе. При этом должно выполняться равенство $\sum_{j=1}^K n_j = n$, где n — общее число элементов системы (блока), K — число групп.

Если система содержит программное обеспечение, то в отдельной группе определяется также количество команд и интенсивность отказов согласно таблицы П.1. Значения n_j и λ_{nj} заносятся в табл. 4.

Следует иметь в виду, что при резервировании элементов интенсивность отказов последних необходимо рассчитывать в соответствии с выражениями, приведенными в разделе 2.2. Если резервирование выполняется на уровне узла, то при расчете на надежность необходимо его выделить в виде самостоятельной единицы.

2. В соответствии с заданными условиями эксплуатации из таблиц П.2—П.4 определяется поправочный коэффициент $K_2 = K_{21} K_{22} K_{23}$ (см. подразд. 1.3). Для каждого типа элементов определяется реальная интенсивность отказов $\lambda_j = K_2 \lambda_{nj}$ и заносится в таблицу 4.

3. Определяется суммарная интенсивность отказов для каждой группы элементов $\Lambda_j = n_j \lambda_j$ и заносится в таблицу расчетов 4.

4. Вычисляется суммарная интенсивность отказов системы (блока, узла) по формуле

$$\Lambda = \sum_{j=1}^K \Lambda_j.$$

Если использовано резервирование узла, блока или системы, то суммарная интенсивность отказов определяется в соответствии с расчетными выражениями подраздела 2.2.

5. Находится среднее время безотказной работы

$$T_{cp} = \frac{1}{\Lambda}.$$

6. Рассчитывается вероятность безотказной работы $P(t)$ на интервале $t = (0 - 2T_{cp})$, заносится в отдельную таблицу и строится в виде графика.

Пример 2. Спроектированный самолетный вычислитель содержит два блока: вычислитель и блок питания [I, II]. Типы элементов обоих блоков и количество элементов каждой группы n_j приведены в столбцах I и 2 таблицы 4. Известны условия эксплуатации системы: высота полета над уровнем моря до 20 км, температура окружающей среды до +40 °C, относительная влажность 65%. Требуется произвести

ориентировочный расчет системы.

Для каждого типа элементов по табл. П.1 определим интенсивности отказов в номинальном режиме λ_{nj} и занесем их в столбец 3 табл. 4.

Вычислим поправочный коэффициент $K_2 = K_{21} K_{22} K_{23}$. Коэффициент K_{21} учитывает суммарное воздействие вибраций и других нагрузок на самолетную аппаратуру. По табл. П.2 $K_{21} = 1,65$. Коэффициент K_{22} учитывает воздействие температуры и влажности. По табл. П.3 $K_{22} = 1$. K_{23} учитывает влияние атмосферного давления. По табл. П.4 $K_{23} = 1,35$. Отсюда $K_2 = 1,65 \cdot 1 \cdot 1,35 \approx 2,23$.

Находим реальную интенсивность отказов для каждого типа элементов $\lambda_j = K_2 \lambda_{nj}$ и заносим в столбец 4 табл. 4.

По данным столбцов 2 и 4 заполним столбец 5 табл. 4, значения которого $n_j \lambda_j$.

Найдем суммарную интенсивность отказов вычислителя

$$\Lambda_0 = \sum_{j=1}^5 n_j \lambda_j = (9,0 + 55,75 + 13,38 + 4,46 + 62,1) 10^{-6} = 144,69 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$$

и блока питания

$$\Lambda_n = \sum_{j=1}^2 n_j \lambda_j = (80,24 + 80,25 + 6,69 + 2,23 + 1,11 + 6,69 + 4,46 + 2,23 + 6,9) 10^{-6} = 190,8 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$$

Определим суммарную интенсивность отказов системы

$$\Lambda = \Lambda_0 + \Lambda_n = 335,49 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$$

Вычислим среднее время безотказной работы

$$T_{cp} = 1/\Lambda = 1/335,49 \cdot 10^{-6} = 2981 \text{ ч.}$$

Рассчитываем вероятность безотказной работы $P(t) = e^{-\Lambda t}$ и заносим значения в отдельную таблицу и строим график.

5.3. Окончательный расчет надежности

Последовательность окончательного расчета надежности аналогична ориентировочному расчету (см. подразд. 5.2). Различие заключается в том, что на втором этапе при расчете реальной интенсивности отказов группы элементов, кроме поправочного коэффициента K_2 ,

учитывается поправочный коэффициент $a_j(K_N, t^\circ)$, являющийся функцией коэффициента электрической нагрузки K_N и температур t° окружающей среды элемента (см. подразд. 1.3).

Значения поправочных коэффициентов берутся из таблиц П.5, П.6. Коэффициент нагрузки K_N рассчитывается по формулам, приведенным в подразд. 1.3 или измеряется экспериментально на макете. Температура окружающей среды элемента t° зависит от температуры эксплуатации системы и от рассеиваемой элементом мощности. Эта температура оценивается экспериментально на макете, либо определяется тепловым расчетом.

При окончательном расчете заполняются 5 столбцов табл. 4, аналогично описанному в подразд. 5.2.

В столбец 6 заносятся значения коэффициентов нагрузки элементов группы K_{nj} . Если значения коэффициентов нагрузки внутри группы значительно расходятся, то необходимо образовать в табл. 4 самостоятельные группы однотипных элементов с равными коэффициентами нагрузки.

В столбец 7 записываются значения температуры окружающей среды t_j° для каждой группы элементов. Если значения температуры на элементах группы значительно различаются, то необходимо в табл. 4 выделить самостоятельные группы однотипных элементов, имеющих одинаковую температуру окружающей среды.

Значения столбца 8 - a_j определяются на основе величин K_{nj} и t_j° столбцов 6 и 7 по табл. П.4-П.6.

Суммарная интенсивность отказов группы элементов вычисляется для каждой группы элементов перемножением соответствующих значений столбцов 5 и 8, результат заносится в столбец 9.

В заключение расчета определяется суммарная интенсивность отказов системы Λ , среднее время безотказной работы T_{cp} и вероятность безотказной работы $P(t)$ (см. подразд. 5.2).

Пример 3. Определим основные показатели надежности самолетного вычислителя (пример 2). При расчете заполняем табл. 4. Пять столбцов табл. 4 определены по примеру 2.

В столбец 6 заносим значения K_{nj} , вычисленные на основе выражений подразд. 1.3. В столбец 7 заносим вычисленные значения температуры элементов t_j° , учитывая, что максимальная температура окружающей среды системы составляет $+40^\circ\text{C}$.

Заполняем столбец 8, определяя значения поправочного коэффициента a_j по табл. П.5 на основе значений столбцов 6 и 7.

Таблица 4

Параметры надежности самолетного вычислителя

Наименование, тип элементов	Число элементов	Номинальная интенсивность отказов $\lambda_{nj} \times 10^{-4}$	Реальная интенсивность отказов $\lambda_j = K_{nj} \lambda_{nj} \times 10^{-4}$	Коэффициент нагрузки K_{nj}	Температура $t_j^\circ\text{C}$	Поправочный коэффициент a_j	Интенсивность отказов группы $\Lambda_j = a_j \lambda_{nj} \times 10^{-4}$	
1. Полупроводниковая интегральная микросхема	200	0,02	0,045	1,0	60	1,0	9,0	
2. Транзистор кремниевый	10	2,5	5,575	0,8	60	0,85	47,39	
3. Резистор 50-контактный	2	0,06x50	6,69	1,0	50	1,0	13,38	
4. Предохранитель плавкий	2	1,0	2,23	1,0	40	1,0	4,46	
5. Соединения пайкой	2700	0,01	0,023	-	50	1,0	62,1	
							$\Lambda_{\Sigma} =$	$= 136,33$
							$\Lambda_{\Sigma} =$	$= 144,69$

I	2	3	4	5	6	7	8	9
Блок питания								
1. Диод микромодульный германиевый	8	4,5	10,03	80,24	0,6	60	1,40	112,34
2. Конденсатор электролитический алюминиевый	15	2,4	5,35	80,25	0,5	40	0,64	51,36
3. Резистор МЛТ-0,5	6	0,5	1,115	6,69	0,4	40	0,51	3,41
4. Дроссель	1	1,0	2,23	2,23	0,6	70	2,0	4,46
5. Трансформатор импульсный	1	0,5	1,115	1,11	0,5	70	0,6	0,66
6. Разъем 50-контактный	1	0,06x50	6,69	6,69	1,0	50	1,0	6,69
7. Стабилизатор напряжения	2	1,0	2,23	4,46	0,8	50	1,0	4,46
8. Предохранитель плавкий	1	1,0	2,23	2,23	1,0	40	1,0	2,23
9. Соединения пайкой	300	0,01	0,023	6,9	-	50	1,0	6,9
				$\Lambda_n =$				
				= 190,8				
				$\Lambda =$				
				= 335,49				
				$\Lambda_n =$				
				= 192,51				
				$\Lambda =$				
				= 328,84				

Вычисляем значения суммарной интенсивности отказов группы элементов $\Lambda_j = a_j n_j \lambda_j$ путем перемножения значений столбцов 5 и 8 и заносим в столбец 9 табл. 4.

Суммируем поблочно интенсивности отказов, пользуясь данными столбца 9.

Для блока вычислителя получаем:

$$\Lambda_b = \sum_{j=1}^5 a_j n_j \lambda_j = (19,0 + 47,39 + 13,38 + 4,46 + 62,11) \cdot 10^{-6} = 136,33 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$$

Для блока питания имеем:

$$\Lambda_n = \sum_{j=1}^9 a_j n_j \lambda_j = (112,34 + 51,36 + 3,41 + 4,46 + 0,66 + 6,69 + 4,46 + 2,23 + 6,9) \cdot 10^{-6} = 192,51 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$$

Определяем суммарную интенсивность отказов системы:

$$\Lambda = \Lambda_b + \Lambda_n = 328,84 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$$

Вычислим среднее время безотказной работы системы

$$T_{cp} = \frac{1}{\Lambda} = \frac{1}{328,84 \cdot 10^{-6}} = 3041 \text{ ч.}$$

На интервале времени $t = (0 - 2 T_{cp})$ рассчитываем вероятность безотказной работы $P(t) = e^{-\Lambda t} = e^{-t/T_{cp}}$, заносим значения в отдельную таблицу и строим график.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренные в пособии математические модели расчета надежности являются простыми для практического инженерного пользования и в то же время обладают определенной точностью. Однако на практике в ряде случаев наблюдается существенное расхождение экспериментальных характеристик надежности от расчетных (чаще всего снижение надежности). Объясняется это рядом факторов. Во-первых, методика расчета надежности, рассмотренная в пособии, предполагает в системе только внезапных отказов, когда на практике наблюдаются и постепенные отказы, вызванные с постепенным

уходом параметров системы от номинального значения. Но при правильном проектировании системы интенсивность постепенных отказов может быть существенно меньше интенсивности внезапных отказов. Во-вторых, при изготовлении системы могут применяться технологические процессы, которые ухудшают качество изготовления узлов и блоков системы, что может непосредственно сказаться на показателях надежности системы. И наконец, в-третьих, при эксплуатации системы могут быть нарушены нормы эксплуатации, предусмотренные техническими условиями на систему, что также в сильной мере оказывает влияние на надежность системы. Чтобы не снижать показатели надежности системы, необходимо обеспечить высокую культуру производства и эксплуатации электронной аппаратуры.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица П.1
Номинальные интенсивности отказов элементов ЭА
(1, 2, 4, 8, 11)

Наименование, тип элемента	Интенсивность отказов $\lambda_n \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$
I	2
<u>Интегральные микросхемы</u>	
Гибридные	0,07
Полупроводниковые	0,02
<u>Микромодули</u>	1,8
<u>Транзисторы</u>	
Маломощные НЧ, СЧ, ВЧ германиевые	2
Маломощные НЧ, СЧ, ВЧ кремниевые	2,5
Средней мощности НЧ, СЧ, ВЧ германиевые	2,5
Средней мощности ВЧ кремниевые	3,5
Мощные НЧ германиевые	2,8
Мощные НЧ кремниевые	2,4
Мощные СЧ германиевые	3
Мощные СЧ кремниевые	2,4
Мощные ВЧ германиевые	5
Мощные ВЧ кремниевые	1,7
Кремниевые ключевые	0,7
Кремниевые микроволновые	9,7
<u>Диоды</u>	
Выпрямительные сплавные	1,5
ВЧ точечные германиевые	2
ВЧ точечные кремниевые	3,9
Импульсные сплавные	0,6
Импульсные точечные	3
Стабилитроны	5
Варикапы	5
Туннельные	3
Светодиоды	8
Микромодульные	4,5

Продолжение табл. П. I

I	2
<u>Конденсаторы</u>	
Металлобумажные	2
Слюдяные	1,2
Стекланные	1,6
Керамические	1,4
Электролитические	2,4
Пленочные	2
Переменные с воздушным диэлектриком	18,6
<u>Трансформаторы, моточные изделия</u>	
Питания	3
Импульсные	0,5
Дроссели	1
Катушки индуктивности	0,5
<u>Электровакуумные приборы</u>	
Дiodы	0,6
Триоды	1
Пентоды и тетроды	1,6
Кенотроны	2,5
Стабилитроны	1
Генераторные лампы	15
Тиратроны	5
Электронно-лучевые трубки	18
Клистроны	20
Лампы бегущей волны и магнетроны	200
Индикаторные лампы	0,5
<u>Электрические машины</u>	
Двигатели постоянного тока	10
Машины переменного тока	6
Тахогенераторы	8
Шаговые двигатели	0,37
<u>Радиоэлектронные элементы</u>	
Микрофоны динамические	20
Громкоговорители динамические	6,5
Телефоны головные	20
Датчики оптические	4,7
Датчики температуры	3,3

Продолжение табл. П. I

I	2
Антенны	0,36
Волноводы жесткие	1,1
Волноводы гибкие	2,6
<u>Источники питания</u>	
Аккумуляторы	7,2
Батареи одноразрядные	30
<u>Коммутационные элементы</u>	
Реле малогабаритные	0,25 (на одну контактную группу)
Переключатели миниатюрные	0,25 (на одну контактную группу)
Выключатели, микровыключатели, тумблеры	3
Клеммы, гнезда	0,1
Разъемы	0,06 (на один контакт)
Предохранители	1
Переходные колодки	5,2
Ламповые панели	0,75
<u>Монтажные элементы</u>	
Провода соединительные	0,02
Пайка печатного монтажа	0,01
Пайка навесного монтажа	0,03
Основание печатных плат из гетинакса	0,1
Основание печатных плат из текстолита	0,01
Соединительные провода печатных плат, выполненные фотохимическим способом	0,3 (на один проводник)

Продолжение табл. П. I

I	2
<u>ЭВМ и устройства вычислительной техники</u>	
Мини-ЭВМ с числом ИМС 200-1000 (без источников питания и каналов ввода-вывода)	100-600
Микропроцессорные системы с числом ИМС 20-60 (без источников питания и каналов ввода-вывода)	50-200
Контроллер пишущей машинки	10
Пишущая машинка	1000-4000
Контроллер накопителя на магнитных дисках	15-1400
Накопитель на магнитных дисках	250-400
Контроллер накопителя на магнитной ленте	15-1000
Накопитель на магнитной ленте	350-700
Контроллер устройства ввода с перфоленты	10
Устройство ввода с перфоленты	250-1200
Источники питания	15
Алфавитно-цифровые печатающие устройства параллельного типа	2000
<u>Новое программное обеспечение</u>	
<u>ЭВМ</u>	
Элементарная управляющая программа объемом 0,25-1 тыс. команд	400
Базовая управляющая программа объемом 1-4 тыс. команд	1500
Расширенная управляющая программа объемом 4-16 тыс. команд	6000
Базовая операционная система объемом 16-64 тыс. команд	25000
Расширенная операционная система объемом 64-256 тыс. команд	100000

Продолжение табл. П. I

I	2					
	Номинальная мощность					
	0,25	0,5	1,0	2,0	5,0	10
<u>Резисторы непрово- лочные</u>						
МЛТ	0,4	0,5	1,0	1,6	-	-
ТВО	0,4	0,45	0,8	1,4	2,2	3,0
МОУ	0,5	0,55	1,1	1,5	2,3	3,1
МУН	0,6	0,6	1,2	2,0	-	-
УНУ	0,6	0,7	1,2	1,7	2,3	3,0
КЗВ	0,6	0,75	1,3	1,75	2,4	3,1
ВО	0,7	0,8	1,35	1,8	2,5	3,3
УЛИ	0,6	0,65	1,3	-	-	-
БЛП	0,7	0,75	1,4	-	-	-
СЮ	0,6	0,7	1,15	1,8	-	-
СП	0,7	0,8	1,3	2,0	-	-
<u>Резисторы проволочные</u>						
ПТН	-	1,1	1,4	1,8	-	-
ПКЗ	-	1,2	1,5	2,0	2,5	-
ПЗВ	-	1,6	1,5	2,0	2,5	-
ПТП	-	-	2,2	2,6	3,0	-
РП	-	-	-	3,0	-	-
<u>Резисторы Металлопленочные</u>						
	0,4	-	-	-	-	-

Таблица П.2

Поправочные коэффициенты K_{21} в зависимости
от механических воздействий [1]

Условия эксплуатации ЭА	K_{21}		
	при вибрации	при ударных нагрузках	при суммарном воздействии
Лабораторные	1,00	1,00	1,00
Стационарные	1,04	1,03	1,07
Автофургонные	1,35	1,08	1,46
Железнодорожные	1,40	1,10	1,54
Корабельные	1,30	1,05	1,37
Самолетные	1,46	1,13	1,65

Таблица П.3

Поправочные коэффициенты K_{22} в зависимости
от влажности и температуры [1]

Влажность, %	Температура, °C	K_{22}
60-70	20-40	1,0
90-98	20-25	2,0
90-98	30-40	2,5

Таблица П.4

Поправочные коэффициенты K_{25} в зависимости
от атмосферного давления (высоты) [1]

Высота, км	K_{25}	Высота, км	K_{25}
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 П.5

Поправочные коэффициенты α для интенсивностей отказов
элементов ЭА в зависимости от коэффициента нагрузки
 K_n в температуры $t, ^\circ\text{C}$ [1]

Наименование, тип элемента	$t, ^\circ\text{C}$	Коэффициент нагрузки K_n									
		0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	
I	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
Полупровод- никовые ИМС	20										1,0
	60										1,0
	80										2,5
Транзисторы кремниевые	20	0,16	0,18	0,20	0,35	0,43	0,52	0,63			
	40	0,17	0,20	0,23	0,40	0,51	0,59	0,72			
	60	0,19	0,22	0,26	0,50	0,61	0,71	0,85			
	80	0,20	0,23	0,28	0,60	0,74	0,87	1,04			
Транзисторы германиевые	20	0,23	0,26	0,35	0,42	0,50	0,70	0,74			
	40	0,32	0,40	0,55	0,66	0,81	1,04	1,22			
	60	0,52	0,63	0,86	1,10	1,38	1,65	1,90			
	80	0,69	0,91	1,25	1,57	1,92	2,24	2,59			
Диоды	20	0,77	0,78	0,79	0,81	0,83	0,85	0,86			
кремниевые	40	0,92	0,92	0,94	0,97	1,00	1,04	1,08			
	60	1,04	1,08	1,11	1,16	1,22	1,30	1,39			
Диоды	20	0,15	0,22	0,30	0,39	0,50	0,62	0,74			
германиевые	40	0,23	0,32	0,41	0,51	0,63	0,76	0,91			
	60	0,53	0,66	0,86	1,13	1,40	1,75	2,13			
Конденсаторы	20			0,08	0,10	0,18	0,23				
керамические	40			0,09	0,13	0,28	0,35				
слюдяные	60			0,12	0,20	0,45	0,62				
негерметичные	80			0,22	0,43	0,92	1,46				
Конденсаторы	20			0,36	0,49	0,18	0,23				
слюдяные	40			0,42	0,54	0,28	0,35				
герметичные	60			0,61	0,75	0,45	0,62				
	80			0,97	1,40	0,92	1,46				
Конденсаторы	20			0,36	0,49	0,64	0,80				
стеклянные	40			0,42	0,54	0,80	1,10				
пленочные	60			0,61	0,75	1,19	2,00				
металлобу- мажные	80			0,97	1,40	2,10	2,80				

Продолжение табл. П.5

I	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Конденсаторы	20			0,48	0,40	0,48	0,65			
электролитические с алю-	40			0,90	0,64	0,90	1,24			
миниевым	60			2,10	1,80	2,10	2,30			
анодом	80			5,60	4,40	5,60	7,00			
Конденсаторы	20			0,20	0,20	0,20	0,39			
электролитические с	40			0,30	0,30	0,30	0,47			
танталовым	60			0,50	0,50	0,50	0,70			
анодом	80			0,80	0,80	0,80	1,05			
Резисторы	20	0,20	0,26	0,35	0,42	0,50	0,60	0,72	0,84	1,00
непроволочные	40	0,33	0,42	0,51	0,60	0,76	0,94	1,11	1,38	1,71
	60	0,47	0,57	0,67	0,82	1,08	1,43	1,70	2,17	2,81
	80	0,61	0,71	0,84	1,07	1,46	2,05	2,48	3,31	4,40
Резисторы	20	0,02	0,02	0,05	0,10	0,20	0,34	0,51	0,73	1,00
проволочные	40	0,06	0,06	0,11	0,19	0,32	0,53	0,69	0,92	1,29
	60	0,10	0,10	0,17	0,30	0,47	0,73	0,96	1,29	1,95
	80	0,15	0,16	0,23	0,40	0,67	0,99	1,37	2,03	3,28
Моточные из-	20		0,1	0,1	0,1	0,2	0,3	0,6	0,8	1,0
делия,	40		0,1	0,2	0,2	0,5	1,2	1,8	2,4	3,0
трансформато-	60		0,2	0,3	0,4	1,2	2,5	4,1	6,4	8,6
ры	70		0,3	0,4	0,6	2,0	4,2	7,2	10,7	14,0
Электроваку-	20	0,63	0,66	0,70	0,75	0,80	0,85	0,90	0,95	1,00
умные диоды	40	0,63	0,66	0,70	0,76	0,82	0,87	0,93	1,01	1,10
и триоды	60	0,68	0,73	0,76	0,83	0,91	1,00	1,07	1,20	1,35
	80	0,78	0,83	0,88	0,98	1,07	1,18	1,30	1,50	1,71
Электроваку-	20			0,70	0,73	0,78	0,83	0,87	0,92	1,00
умные тетроды	40			0,82	0,87	0,90	0,96	1,02	1,10	1,25
и пентоды	60			0,96	1,02	1,10	1,18	1,27	1,45	1,65
	80			1,09	1,20	1,30	1,41	1,55	1,80	1,97
Электронно-	20									1,00
лучевые	40									1,28
трубки	60									1,50
	80									1,70

Продолжение табл. П.5

I	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Клистроны	20									1,00
	40									1,23
	60									1,52
	80									1,80
Лампы бе-	20									1,00
гущей	40									1,17
волны,	60									1,45
магнетроны	80									1,76
Генератор-	20									1,00
ные лампы	40									1,10
	60									1,35
	80									1,71

Таблица П.6

Поправочный коэффициент $a_2(U_H/U_{нд})$ для
электровакуумных приборов в зависимости от
напряжения накала

$U_H/U_{нд}$	a_2	$U_H/U_{нд}$	a_2
0,90	0,98	1,02	1,11
0,92	0,84	1,04	1,32
0,94	0,78	1,06	1,59
0,96	0,78	1,08	1,92
0,98	0,85	1,10	2,30
1,00	0,98		

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Яшин А.А. Теоретические основы конструирования, технологии и надежности ЭВА. - М.: Радио и связь, 1983. - 312 с., ил.
2. Сотсков Б.С. Основы теории и расчета надежности элементов и устройств автоматики и вычислительной техники. - М.: Высшая школа, 1970. - 272 с., ил.
3. Надежность автоматизированных систем управления/И.О.Атовмян, А.С.Вайрадян, Ю.П.Руднев и др.; Под ред. проф. Я.А.Хетагурова. - М.: Высшая школа, 1979. - 288 с.
4. Голинкевич Т.А. Прикладная теория надежности. - М.: Высшая школа, 1985. - 168 с., ил.
5. Митрейкин Н.А., Озерский А.И. Надежность и испытания радиодеталей и радиокомпонентов. - М.: Радио и связь, 1981. - 272 с. ил.
6. Журавлев Ю.П., Котелюк Л.А., Циклинский Н.И. Надежность и контроль ЭВМ/Под ред. Ю.П.Журавлева. - М.: Советское радио, 1978. - 416 с., ил.
7. Щураков В.В. Надежность программного обеспечения систем обработки данных. - М.: Статистика, 1981. - 216 с., ил.
8. Лонгботтом Р. Надежность вычислительных систем. - М.: Энергоатомиздат, 1985. - 288 с., ил.
9. Левин Б.Р. Теория надежности радиотехнических систем (математические основы). - М.: Советское радио, 1978. - 264 с., ил.
10. Надежность технических систем: Справочник/Ю.К.Беляев, В.А.Богатырев, В.В.Болотин и др.; Под ред. проф. И.А.Ушакова. - М.: Радио и связь, 1985. - 608 с.
11. Дружинин Г.В. Теория надежности радиоэлектронных систем в примерах и задачах. - М.: Энергия, 1976. - 448 с., ил.
12. Преснухин Л.Н., Нестеров П.В. Цифровые вычислительные машины. - М.: Высшая школа, 1981. - 512 с., ил.
13. Микропроцессоры/В.Д.Вернер, Н.В.Воробьев, А.В.Горячев и др.; Под ред. Л.Н.Преснухина. - М.: Высшая школа, 1986. Т.2: Средства сопряжения. Контролирующие и информационно-управляющие системы. - 303 с.
14. Микропроцессоры/Н.В.Воробьев, В.Д.Горбунов, А.В.Горячев и др.; Под ред. Л.Н.Преснухина. - М.: Высшая школа, 1986. Т.3: Средства отладки, лабораторный практикум и задачник. - 287 с.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	3
1. Показатели надежности элементов ЭА.....	4
1.1. Соотношения между показателями надежности изделия.....	4
1.2. Интенсивность отказов при длительном функционировании изделий.....	6
1.3. Реальная расчетная интенсивность отказов элементов.....	8
1.4. Физическая надежность элементов ЭА.....	10
1.4.1. Надежность резисторов.....	11
1.4.2. Надежность конденсаторов.....	12
1.4.3. Надежность полупроводниковых элементов.....	13
1.4.4. Надежность коммутационных элементов.....	14
1.4.5. Надежность точечных элементов.....	15
1.4.6. Надежность печатных плат.....	16
1.4.7. Надежность интегральных схем.....	16
1.4.8. Повышение надежности элементов ЭА при конструировании.....	17
2. Структурная надежность систем.....	18
2.1. Связь характеристик надежности системы с характеристиками надежности элементов.....	18
2.2. Структурное резервирование.....	19
2.2.1. Надежность изделия при нагруженном резерве.....	20
2.2.2. Надежность изделия при ненагруженном резерве.....	22
3. Надежность и контроль цифровых систем.....	23
3.1. Контроль и методы защиты информации.....	24
3.1.1. Помехоустойчивое кодирование информации в цифровых системах.....	24
3.1.2. Контроль с проверкой четности-нечетности.....	25
3.2. Контроль цифровых систем.....	27
3.2.1. Аппаратный контроль работы электронных узлов.....	27
3.2.2. Мажоритарный контроль и резервирование.....	30
3.2.3. Аппаратурно-микропрограммный контроль.....	32
3.2.4. Программный контроль.....	34
3.3. Надежность программного обеспечения.....	35
4. Надежность ремонтируемой аппаратуры.....	40
4.1. Показатели надежности восстанавливаемых систем.....	40
4.2. Диагностирование аппаратуры.....	42

5. Основы расчета надежности.....	43
5.1. Прикидочный расчет надежности.....	43
5.2. Ориентировочный расчет надежности.....	45
5.3. Окончательный расчет надежности.....	47
Заключение.....	51
Приложение.....	53
Список использованной литературы.....	62