



Ишков А.С., Зув В.Д.

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ГАММА-ПРОЦЕНТНОЙ НАРАБОТКИ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ КОМПОНЕНТОВ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ КРАТКОВРЕМЕННЫХ ИСПЫТАНИЙ

При проектировании информационно-измерительных систем выполняется поэлементная оценка показателей надежности. На работоспособность резисторов существенно влияют климатические условия. Предлагается методика оценки показателей надежности резисторов, которая используется при изменении их условий эксплуатации. На основе результатов испытаний на кратковременную безотказность в заданных условиях вычисляются показатели надежности резисторов путем прогнозирования значений электрических параметров резисторов в течение их наработки.

Ключевые слова: кратковременные испытания, температура, прогнозирование, резистор, вероятность.

Проектирование и производство радиоэлектронных компонентов, обладающих высокими показателями надежности, является одной из важнейших задач при разработке информационно-измерительных систем, работающих в различных условиях эксплуатации. Такие системы являются сложным техническим объектом, состоящим из блоков, узлов, содержащих множество радиоэлектронных компонентов. На этапе проектирования информационно-измерительной системы в определенных случаях может выполняться поэлементный расчет показателей надежности ее составных элементов, с целью расчета надежности всей системы.

Резисторы широко используются в качестве элементной базы различных информационно-измерительных систем, которые могут применяться в условиях умеренного, холодного и тропического климата. Климатические условия могут существенно повлиять на параметры резисторов. Например, повышенная температура приводит к деградации материалов, из которых изготовлен резистор. Отклонения в свойствах материалов вызывают изменение параметров резисторов и приводят к увеличению вероятности появления дефектов и отказов.

Рабочий диапазон температур эксплуатации резисторов их разработчик устанавливает в соответствующих технических условиях. Для рабочего диапазона температур устанавливается ряд показателей надежности. На практике надежность радиоэлектронных компонентов принято оценивать по следующим показателям: гамма-процентная наработка до отказа (T_γ), интенсивность отказов (λ) и гамма-процентный срок сохраняемости (T_{cy}). Для одного типа резистора может быть установлено несколько значений показателей надежности в зависимости от рабочей температуры и режима работы, например, номинальный режим – при номинальной мощности рассеяния $P_{ном}$, облегченный режим – при мощности рассеяния равной $0,5P_{ном}$.

При выборе типа резистора разработчики информационно-измерительных систем в большей степени ориентируются на значения характеристик резисторов, установлен-

ных в технических условиях. В определенных случаях также учитываются ограничительные перечни с установленной номенклатурой разрешенных к применению изделий электронной техники. Различные особенности и требования к характеристикам разрабатываемой информационно-измерительной системы зачастую приводят к необходимости рассмотрения вопроса о возможности применения изделий электронной техники в условиях эксплуатации, отличающихся от установленных в технической документации [1]. В соответствии с [2] при необходимости применения изделий в режимах и условиях, расширяющих область их применения, не связанных с ухудшением их основных технических параметров, возможно только по протоколу разрешения предприятия-изготовителя изделия или организации, на которую возложена обязанность по выдаче протокола разрешения применения.

Функции по согласованию протоколов разрешения на применение изделий электронной техники в режимах и условиях, не оговоренных в технических условиях, возложены на ряд предприятий по закреплению за ними номенклатуре изделий.

Если по результатам исследований установлена возможность применения резисторов в условиях эксплуатации, требуемых разработчиком информационно-измерительной системы, но не оговоренных в технических условиях, то для оценки показателей надежности резисторов требуется провести их испытания на безотказность или сохраняемость в требуемых режимах или условиях, либо использовать результаты испытаний изделий-аналогов. В соответствии с требованиями нормативной документации, испытания на безотказность включают испытания на кратковременную и длительную безотказность. Воспользоваться информацией о показателях надежности изделий-аналогов не всегда представляется возможным, например, из-за внесенных изменений в конструкцию или перечень материалов изделия. Материальные и временные затраты, большой объем испытаний на длительную безотказность приводят к необходимости применения вероятностно-физического метода оценки показателей надежности на основе результатов кратковременных испытаний. Метод основывается на статистическом прогнозировании показателей надежности по временной зависимости [3]. Согласно этому методу сначала проводятся испытания на кратковременную безотказность в требуемых заказчиком режимах и условиях. Затем вычисляются показатели надежности резисторов на основе статистических данных об изменении электрических параметров изделий, количестве отказов, полученных в ходе испытаний.

Для оценки соответствия резисторов требованиям надежности разработана методика оценки гамма-процентной наработки до отказа, интенсивности отказов и гамма-процентного срока сохраняемости. Методика расчета показателей надежности основана на определении точечных и интервальных оценок прогнозируемых множеств значений электрических параметров резисто-

ров и дальнейшее вычисление значений T_γ , λ и T_{cy} по результатам кратковременных испытаний резисторов.

Оценке подвергается выборка резисторов в количестве n , прошедшая кратковременные испытания на безотказность в течение времени t . В процессе испытаний у каждого резистора измеряется значение его параметров-критериев годности (X_{ij}). Параметром-критерием годности резистора выбрано значение абсолютной величины сопротивления R или значение величины относительно-го отклонения его сопротивления:

$$\delta = \frac{R(t) - R_0}{R_0},$$

где R_0 и $R(t)$ – соответственно значения сопротивления резисторов в начальный момент времени и в момент времени t .

По полученным в результате испытаний данным выполняется расчет значений статистических показателей, от которых зависит граница прогнозируемых множеств и значения показателей надежности. В качестве таких показателей используются следующие случайные величины, используемые в теории надежности [4]:

1) математическое ожидание:

$$m_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_{ij},$$

где $i = 1..n$ – номера испытываемых резисторов,

$j = 1..l$ – моменты контроля значений параметров-критериев годности.

2) среднеквадратическое отклонение случайной величины:

$$\sigma_j = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_{ij} - m_j)^2}.$$

3) коэффициент корреляции:

$$r_{j,j+s} = \frac{\sum_{i=1}^n (X_{ij} - m_j)(X_{ij+s} - m_{j+s})}{n \sigma_j \sigma_{j+s}},$$

где $s = 0..l-j$.

Нахождение интервальных оценок математического ожидания, среднеквадратического отклонения проводится в рамках гауссовской модели, когда плотность распределения случайной величины X_{ij} может быть описана в виде нормального закона распределения [5]. Границы отклонения величины X_{ij} , и, следовательно, вероятность безотказной работы резисторов зависят от коэффициента регрессии и условного среднеквадратического отклонения. Для коэффициента регрессии определяется гамма-процентная доверительная оценка. Далее рассчитывается вероятность безотказной работы резисторов на основе вычисленных интервальных оценок математического ожидания и среднеквадратического отклонения случайной величины X_{ij} .

Таким образом, методика оценки гамма-процентной наработки резисторов заключается в выполнении следующих действий:

1. Проведение кратковременных испытаний резисторов в заданных условиях и режимах.

2. Расчет значений математического ожидания, среднеквадратического отклонения случайной величины и коэффициента корреляции на основе измеренных значений параметров-критериев годности резисторов для каждого временного сечения.

3. Вычисление коэффициента регрессии [6]:

$$b_{j,j+s_i} = r_{j,j+s_i} \cdot \frac{\sigma_{j+s_i}}{\sigma_j},$$

где $j = 1..l-1$, $s_i = 1..l-j$.

4. Гамма-процентная доверительная оценка коэффициента регрессии.

4.1. Определение временных сечений t_j , t_{j+s_i} (далее T_1 и T_2), удовлетворяющих условию:

$$\begin{cases} b_{j,j+s_i} \leq 1 \\ T_1 = \min_{j+s_i} (T - t_{j+s_i}), \\ T_2 = \max_{s_i} (t_{j+s_i} - t_j) \end{cases} \quad (1)$$

где T принимается равным значению T_γ ;

4.2. Нахождение верхней ($\bar{b}$) и нижней ($\underline{b}$) границы среднеквадратического отклонения σ двумерного распределения параметра критерия годности для временных сечений t_j , t_{j+s_1} (далее t_1 и t_2) [7]:

$$\bar{b} = b_0 + U_{n-2(\gamma)} \frac{\sqrt{1-r_{12}^2}}{\sqrt{n-2}} \frac{\sigma_2}{\sigma_1},$$

$$\underline{b} = b_0 - U_{n-2(\gamma)} \frac{\sqrt{1-r_{12}^2}}{\sqrt{n-2}} \frac{\sigma_2}{\sigma_1},$$

$$b_0 = r_{12} \frac{\sigma_2}{\sigma_1},$$

где σ_1 , σ_2 – значения среднеквадратического отклонения контролируемого параметра-критерия годности резистора во временных сечениях t_1 и t_2 ;

r_{12} – коэффициент парной корреляции между значениями контролируемого параметра в 1 и 2 временных сечениях.

$U_{n-2(\gamma)}$ – гамма-процентный квантиль распределения Стьюдента с $n-2$ степенями свободы;

4.3. Определение верхней ($\bar{a}$) и нижней ($\underline{a}$) границы математического ожидания m двумерного распределения параметра критерия годности для найденных временных сечений t_1 и t_2 [7]:

$$\bar{a} = m_2 - \underline{b}m_1 + U_\gamma \frac{\sigma_0}{\sqrt{n}},$$

$$\underline{a} = m_2 - \bar{b}m_1 - U_\gamma \frac{\sigma_0}{\sqrt{n}},$$

$$\sigma_0 = \frac{\sqrt{n(1-r_{12}^2)}}{\sqrt{Z_{n-2(\gamma)}}} \sigma_2,$$

где m_1 , m_2 – значения математического ожидания отклонения контролируемого параметра-критерия годности резистора во временных сечениях t_1 и t_2 ;

U_γ – гамма-процентный квантиль нормального распределения;

$Z_{n-2(\gamma)}$ – гамма-процентный квантиль распределения χ^2 с $n-2$ степенями свободы;

4.4. Вычисление верхней и нижней границы оценки математического ожидания m_T , $\underline{m}_T$ для временного сечения соответствующего T_γ [7]:

$$\bar{m}_T = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \bar{\mu}_T^i;$$

$$\underline{m}_T = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \underline{\mu}_T^i.$$

Значения верхней $\bar{\mu}_T^i$ и нижней $\underline{\mu}_T^i$ границы доверительного интервала соответственно вычисляются по следующим формулам [7]:

$$\bar{\mu}_T^i = \bar{a} \cdot \left(1 + \bar{b} + \dots + \bar{b}^{k-1} \right) + \bar{b}^k X_{i2};$$

$$\underline{\mu}_T^i = \underline{a} \cdot \left(1 + \bar{b} + \dots + \bar{b}^{k-1} \right) + \bar{b}^k X_{i2};$$

где коэффициент $k = \left\lceil \frac{T}{t_2 - t_1} \right\rceil + 1$ – является целым числом.

5. Оценка соответствия резисторов требованиям по надежности.

5.1. Вычисление величины вероятности безотказности работы на время, равное T_γ , по формуле [8]:

$$P(t) = P_{II}(T) \cdot P_B(T),$$

где $P_{II}(T)$ – вероятность безотказной работы резисторов в отношении постепенных отказов;

$P_B(T)$ – вероятность того, что в выборке не возникнет внезапного отказа, при условии, что во время испытаний их не было;

5.2. Определение вероятности безотказной работы по постепенным и внезапным отказам [8]:

$$P_{II}(T) = \Theta \left(\frac{\bar{b} - \bar{m}_T}{\Sigma_T} \right) - \Theta \left(\frac{\underline{b} - \underline{m}_T}{\Sigma_T} \right),$$

$$P_B(T) = e^{-\bar{\lambda}_B \cdot n(T-t_n)},$$

$$\Sigma_T = \sqrt{\sigma_0^2 \cdot \left(1 + \bar{b}^2 + \dots + \bar{b}^{2(k-1)} \right)},$$

где $\bar{\lambda}_B$ – верхняя доверительная граница интенсивности отказов по внезапным отказам,

Θ – функция Хевисайда.

Если априорная информация по внезапным отказам изделий-аналогов при их эксплуатации отсутствует,

	250	500	1000
1	0,00136	0,00142	0,0007
2	0,00098	0,0012	0,00016
3	0,00089	0,00076	0,00003
4	0,00135	0,00149	0,00064
5	0,00059	0,00083	0,00079
6	0,00115	0,00116	0,00031
7	0,00048	0,00067	0,00078
8	0,00106	0,00163	0,00051
9	0,00275	0,00231	0,00256
10	0,00047	0,001	0,00084
11	0,00112	0,00153	
12	0,00034	0,00068	
13	0,00066	0,0011	
14	0,00106		
15	0,00144		
16	0,00094		

Рис. 1. Визуальное отображение программы «Trend» для оценки величины вероятности безотказности работы P резисторов с результатами расчетов

величина $\bar{\lambda}_B$ принимается равной среднегрупповой из справочника по надежности.

5.3. Проверка условия $P(t) \geq P(T_3)$, где $P(T_3) \leq 0,975$. Если условие выполняется, то резисторы соответствуют требованиям по гамма-процентной наработке до отказа.

Используя предложенную методику вычисления показателей надежности, был проведен расчет гамма-процентной наработки до отказа (T_γ) резисторов типа P2-67 при их использовании в условиях повышенной температуры.

В соответствии с требованиями технических условий ОЖО.467.563ТУ гамма-процентная наработка до отказа резисторов P2-67 при электрической нагрузке $P = 0,5P_{\text{ном}}$ (облегченный режим) и температуре от минус 60 до 40 °C равна 40000 часов. В рамках данной работы требовалось оценить возможность применения резисторов в составе информационно-измерительной системы с электрической нагрузкой, соответствующей облегченному режиму. Однако температура окружающей среды в процессе эксплуатации могла изменяться в диапазоне от минус 55 до 55°C, при этом минимальная наработка должна была быть не менее 40000 часов.

Для решения поставленной задачи проведены испытания на кратковременную безотказность в течение 2000 часов при температуре окружающей среды минус 55 °C и напряжении постоянного тока, соответствующее $0,5P_{\text{ном}}$.

Для обработки результатов испытаний с помощью вышеописанного метода, при использовании объектно-ориентированного языка C++ разработана программа «Trend», которая реализует предложенную методику.

Программа «Trend» обеспечивает ввод и обработку данных в виде настраиваемой электронной таблицы и панелей параметров расчета. Введенные данные могут быть сохранены в файл, а впоследствии считаны из

него. Программа реализует вывод информации на печать, осуществляет функцию приема-передачи из буфера обмена данных. Визуальное отображение программы с данными испытаний резисторов P2-67 и результатами расчетов представлено на рис. 1.

Таким образом, по результатам проведенных испытаний резисторов P2-67 на кратковременную безотказность в течение 2000 часов, отказов не зафиксировано, электрические параметры находятся в пределах установленного допуска. С помощью данной методики

вычислено значение вероятности безотказной работы резисторов $P(t) = 0,9924$. Условие $P = P(t) \geq P(T_3)$, где $P(T_3) \leq 0,975$ выполнено, следовательно, резисторы P2-67 могут быть применены заказчиком в аппаратуре с электрической нагрузкой, соответствующей облегченному режиму при изменении температуры окружающей среды в процессе эксплуатации в диапазоне от минус 55 до 55°C, при этом минимальная наработка составляет не менее 40000 часов.

Разработанная методика позволяет проводить оценку гамма-процентной наработки резисторов на этапе их разработки с целью подтверждения требований по надежности.

Литература

1. Ишков А.С. Методы повышения временных показателей надежности ИЭТ // Петербургский журнал электроники. – 2009. – №1. – с. 76 – 78.
2. ГОСТ 2.124–85 Единая система конструкторской документации. Порядок применения покупных изделий.
3. ОСТ 11 070.050-84 Конденсаторы и резисторы. Методы ускоренной оценки сохраняемости.
4. Острейковский В.А. Теория надежности. Учебник для вузов – М.: Высш. шк., 2003. – 463 с.
5. Тюрин Ю.Н., Макаров А.А. Анализ данных на компьютере. Изд. 3-е, перераб. и доп./Под ред. В. Э. Фигурнова – М.: ИНФРА-М, 2002. – 528 с., ил.
6. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика: Учеб. пособие для вузов – 9-е изд., стер. – М.: Высш. шк., 2003. – 479 с., ил.
7. Крамер Г. Математические методы статистики – М.: Мир, 1975. – 648 с.
8. Гнеденко Б.В. Математические методы в теории надежности. – М.: Наука, 1965. – 524 с.