

В данной работе предложены одна из возможных математических моделей эксплуатационной интенсивности отказов составных частей (СЧ), которые входят в состав РЗА физических измерений, аппаратурных и приборных комплексов, позволяющая, в отличие от известных, получать характеристики надёжности СЧ с учётом условий применения (класса аппаратуры, температуры окружающей среды и уровня электрической нагрузки) и методика идентификации параметров математических моделей, основанная на применении программного комплекса АСОНИКА-К. Использование модели позволяет заменить существующие модели надёжности СЧ на более точные, что позволяет провести всестороннее исследование надёжности на заданном пространстве условий применения, что, в свою очередь, позволит обеспечить требуемый уровень надёжности изделий, в состав которых они входят.

Практическое отсутствие информации о характеристиках надёжности этих модулей (особенно зарубежного производства) в НТД усложняет расчёт надёжности изделий в целом. В документации на унифицированные и покупные устройства и модули, в лучшем случае указывается только среднее время наработки до отказа для вполне определенного режима применения (уровня ВВФ, температуры окружающей среды, электрической нагрузки). Поэтому оценка возможности использования устройств и модулей в других режимах применения вызывает значительные трудности и сильно затрудняет расчёты надёжности изделий в целом.

Расчет характеристик надёжности (интенсивности отказов) СЧ, схема расчета надёжности (СРН) которой представляет собой последовательное соединение ЭРИ, проводится по известной формуле (1):

$$\lambda_j = \sum_{i=1}^{I_j} \lambda_{ji}, \text{ где: (1)}$$

I_j - количество ЭРИ в СЧ j -того типоразмера; λ_{ji} - эксплуатационная интенсивность отказов i -го ЭРИ.

Для разработки макромоделей был использован метод упрощения структуры полной математической модели надёжности СЧ (1). Применение этого метода позволяет упростить структуру СРН СЧ до минимума (структура СРН содержит всего один элемент, параметром которого является эксплуатационная интенсивность отказов λ_j).

Аргументами функции λ_j являются ВВФ, электрическая нагрузка и температура окружающей среды. Для того чтобы обеспечить возможность использования известных методов (и уменьшить общее число методов анализа характеристик надёжности макромоделей) при разработке макромоделей была решена задача унификации математических моделей расчета λ_j с математическими моделями эксплуатационной интенсивности отказов, приведенными в официальном документе МО РФ - справочнике «Надёжность ЭРИ».

Исходя из этих требований, функция для расчета λ_j (модель интенсивности отказов) может быть получена методом упрощения структуры полной математической модели (1) и представлена в следующем виде:

$$\lambda_j = \lambda_{j0} \cdot f_j(K_0, K_p), \text{ где: (2)}$$

λ_{j0} - базовая интенсивность отказов СЧ j -того типоразмера (при нормальных условиях (НУ) и номинальной нагрузке); f_j - некоторая аналитическая зависимость; K_0 - вектор значений коэффициента эксплуатации СЧ j -того типоразмера (учитывающий жесткость условий эксплуатации); K_p - матрица значений коэффициента режима применения СЧ j -того типоразмера.

Зависимость f_j представляет собой дискретно-непрерывную функцию, получение аналитического выражения которой представляет определенные трудности.

Поэтому, вместо (2) удобнее использовать систему (3):

$$\begin{cases} \lambda_{j,1} = \lambda_{j0} \cdot k_{0,1} \cdot f_{j1}(K_p) \\ \lambda_{j,2} = \lambda_{j0} \cdot k_{0,2} \cdot f_{j2}(K_p) \\ \dots \\ \lambda_{j,I} = \lambda_{j0} \cdot k_{0,I} \cdot f_{jI}(K_p) \end{cases}, \text{ где: (3)}$$

I - количество сочетаний ВВФ, характеризующих жесткость условий эксплуатации, приведенных в справочнике «Надёжность ЭРИ»; f_{ji} - некоторая аналитическая зависимость; $i=1,2,\dots,I$.

Аргументами функции $f_{ji}(K_p)$ являются коэффициент электрической нагрузки и температура окружающей среды:

$$f_{ji}(K_p) = f_{ji}(T_j, K_n), \text{ где: (4)}$$

f_{ji} - некоторая аналитическая зависимость;

T_j - температура среды, окружающей СЧ, при которой получены рабочие температуры ЭРИ, приведенные в картах рабочих режимов (КРР);

K_n - коэффициент нагрузки.

Зависимость f_{ji} представляет собой непрерывную функцию, получение аналитического выражения которой также представляет определенные трудности. Поэтому, для задания f_{ji} можно воспользоваться табличным способом (таблица значений f_{ji} , полученных для фиксированных значений T_j и K_n). Таким образом, надёжностная макромодель СЧ (модель эксплуатационной интенсивности отказов) представляет собой дискретную трехмерную функцию, заданную ее значениями. Такой способ задания функций широко используется в справочнике «Надёжность ЭРИ» и, соответственно, созданы все необходимые структуры для хранения численных значений в справочной части базы данных (СЧБД) подсистемы АСОНИКА-К.

Однако в СЧБД можно хранить не только численные значения, но и аналитические модели. Поэтому, вместо численных значений функции f_{ji} можно использовать ее аппроксимацию:

$$f_i(K_p) = f_i\{a_{i,1}, a_{i,2}, \dots, a_{i,M}, K_n, T\}, \text{ где: (5)}$$

f_i - аппроксимирующая функция, вид которой определен для i -той координаты вектора K_0 ; $a_{i,m}$ - m -тый коэффициент, определенный для i -той координаты вектора K_0 ; K_n - электрическая нагрузка СЧ; T - температура среды, окружающей СЧ.

Так как универсального решения задачи аппроксимации двухмерных функций к настоящему времени не найдено, естественным выходом в этой ситуации является переход к функции одного аргумента вида:

$$f_i(K_p) = r_j \cdot f_j\{b_{j,1}, b_{j,2}, \dots, b_{j,M}, T\}, \text{ где: (6)}$$

Γ_j - значение коэффициента, определенное для j -той координаты вектора K_n ; $K_n = \{0,1;0,2;...;1,0\}$ - вектор значений коэффициентов нагрузки СЧ; f_j - аппроксимирующая функция, вид которой определен для j -той координаты вектора K_n ; $b_{j,m}$ - m -тый коэффициент, определенный для j -той координаты вектора K_n ; T - температура среды, окружающей СЧ.

Для поиска вида функции f_j были использованы пять способов аппроксимации. Наилучшие результаты, с точки зрения точности аппроксимации, были получены в результате сплайн-интерполяции. Однако, с точки зрения числа коэффициентов (M) функции (что в данном случае является критерием выбора вида функции, а точность аппроксимации - лишь ограничением) безусловно, лучшей оказалась нелинейная аппроксимация экспоненциальной регрессией:

$$f_j(b_{j,1}, b_{j,2}, T) = b_{j,1} \cdot e^{b_{j,2} \cdot T} \quad (7)$$

Зависимость коэффициентов регрессионной модели от коэффициента нагрузки СЧ может быть представлена линейными функциями вида:

$$b_{j,1} = a_1 + a_2 \cdot K_n;$$

$$b_{j,2} = a_3 + a_4 \cdot K_n.$$

Тогда зависимость $f(K_p)$ может быть представлена в следующем виде:

$$f(K_p) = (a_1 + a_2 \cdot K_n) \cdot e^{(a_3 + a_4 \cdot K_n) \cdot T} \quad (8)$$

На рис. 1, в качестве примера, приведена поверхность ($f_{1,j,i}$), интерполирующая расчетные (исходные) значения и поверхность ($f_{2,j,i}$), аппроксимирующая поверхность, полученная с помощью (8).

В этом случае погрешность аппроксимации составляет не более 15%, что удовлетворяет принятой точности инженерных расчетов.

Таким образом, окончательная структура модели (2) имеет вид:

$$\lambda_{\Sigma,j} = \lambda_{j0} \cdot K_{\Sigma,i} \cdot (a_1 + a_2 \cdot K_n) \cdot e^{(a_3 + a_4 \cdot K_n) \cdot T}, \text{ где:} \quad (9)$$

$\lambda_{\Sigma,i}$ - эксплуатационная интенсивность отказов СЧ j -того типоразмера;

λ_{j0} - базовая интенсивность отказов СЧ j -того типоразмера (при нормальных условиях (НУ) и номинальной нагрузке); $K_{\Sigma,i}$ - вектор значений коэффициента эксплуатации СЧ j -того типоразмера (учитывающий жесткость условий эксплуатации); K_n - значения коэффициента нагрузки СЧ j -того типоразмера; T - температура среды, окружающей СЧ.

Использование аппроксимации $f_{j,i}(K_n, T)$ позволяет существенно снизить объем численных значений, хранящихся в БД (с 2000 до 42 для всех 38 подгрупп по ГОСТ Р В 20.39.301-98). Точность макромодели определяется шагом дискретизации коэффициента нагрузки, температуры и погрешностью аппроксимирующей функции. Однако очевидно, что применение таких макромоделей в расчетах надёжности РЭА в итоге дает значительно меньшую погрешность (см. рис. 2), чем в случае, когда используется общепринятое допущение о том, что для СЧ одного типоразмера $\lambda_{\Sigma} \approx \text{const}$ (10) (не зависит ни от условий применения, ни от нагрузки).

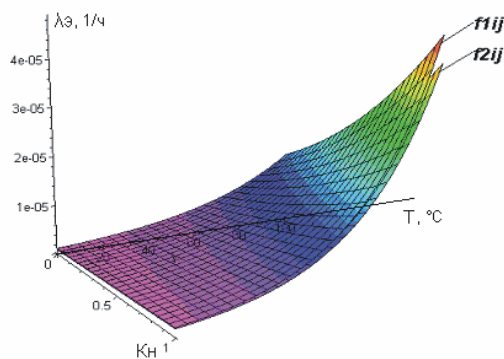


Рис. 1. Зависимость функций $f_{1,j,i}(K_n, T)$ и $f_{2,j,i}(K_n, T)$

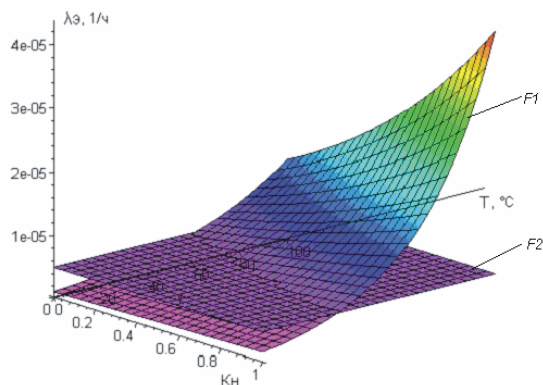


Рис.2. Зависимость эксплуатационной интенсивности отказов электронного модуля от температуры и электрической нагрузки

На рис. 2 введены следующие обозначения:

- F1 - зависимость эксплуатационной интенсивности отказов, полученная по модели (9)
- F2 - зависимость эксплуатационной интенсивности отказов, полученная по модели (10).

ЛИТЕРАТУРА

1. Прытков, С.Ф. Надежность ЭРИ: Справочник. / С.Ф. Прытков, В.М. Горбачева, А.А. Борисов и др. // Науч. рук. С.Ф. Прытков - М.: 22 ЦНИИ МО РФ, 2002. - 574 с.
2. Лазарев, Д.В. Использование макромоделей составных частей при расчетах надёжности РЭА. / Лазарев Д.В., Жаднов В.В., Пименов А.А. // Современные проблемы радиоэлектроники: Сб. научн. тр. / Под ред. Громыко А.И., Сарафанова А.В.; отв. за вып. Ризуненко В.И. - Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2004. - с. 528-530.