

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ МАКРОМОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИ ОЦЕНКЕ НАДЕЖНОСТИ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

Жаднов В.В. Лазарев Д.В., Пименов А.А.

Трудоемкость расчета надежности радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) напрямую зависит от числа ее составных частей (СЧ), и, в конечном счете, определяется общим числом электрорадиоизделий (ЭРИ). Если принять во внимание, что число ЭРИ в оригинальных СЧ может достигать десятков и сотен тысяч штук, то становится очевидным актуальность проблемы снижения трудоемкости расчетов надежности. Кроме того, значения внешних воздействующих факторов (ВВФ), действующих на СЧ, могут существенно отличаться, а, следовательно, будут отличаться и режимы работы ЭРИ. Очевидно, что расчеты характеристик надежности необходимо проводить для каждой СЧ в отдельности. В то же время, современная РЭА характеризуется высоким уровнем унификации составных частей, количественной характеристикой которой является коэффициент повторяемости. В этом случае расчет характеристик надежности проводится только для одной СЧ данного типоразмера, критерием выбора которой являются наиболее жесткие условия применения (т.е. рассчитывается максимальное значение эксплуатационной интенсивности отказов).

Для СЧ, схема расчета надежности (СРН) которой представляет собой последовательное соединение ЭРИ, интенсивность отказов рассчитывается по известной формуле

$$\lambda_j = \sum_{i=1}^{I_j} \lambda_{i*}, \quad (1)$$

где: I_j – количество ЭРИ в СЧ j -того типоразмера;

λ_{i*} – эксплуатационная интенсивность отказов i -го ЭРИ.

Это значение в дальнейшем используется при расчетах надежности изделия для всех СЧ j -того типоразмера. Таким образом (1) можно рассматривать как макромодель СЧ. Отметим, что для стандартных и унифицированных СЧ значения λ_j приводятся в нормативно-технической документации (НТД). Однако эти значения также представляют собой либо верхнюю оценку интенсивности отказов, либо получены для конкретных условий применения СЧ (режимов работы ЭРИ и уровней ВВФ). Другими словами, применяемые в настоящее время макромодели надежности СЧ не позволяют оценить значения характеристик надежности при изменении условий применения СЧ, т.е.:

$$\lambda_j = const. \quad (2)$$

Очевидно, что применение модели (2) может привести к существенной погрешности расчетов надежности РЭА, величина которой будет тем больше, чем сильнее отличаются условия применения данной СЧ от условий, которые были приняты при расчете характеристик надежности ЭРИ в полной модели (1).

Существенное снижение объема вычислительных затрат может быть достигнуто за счет применения макромоделей надежности СЧ, которые, в отличие от (2), должны позволять учитывать зависимости характеристик надежности от ВВФ, температуры окружающей среды и коэффициента нагрузки. Для разработки макромоделей был использован метод упрощения структуры полной математической модели надежности СЧ (1). Применение этого метода позволяет упростить структуру СРН СЧ до минимума (структуре СРН содержит всего один элемент, параметром которого является эксплуатационная интенсивность отказов λ_s).

Аргументами функции λ_3 являются ВВФ, электрическая нагрузка и температура окружающей среды. Для того, чтобы обеспечить возможность использования известных методов (и уменьшить общее число методов анализа характеристик надежности макромоделей) при разработке макромоделей была решена задача унификации математических моделей расчета λ_3 с математическими моделями эксплуатационной интенсивности отказов, приведенными в официальном документе МО РФ – справочнике «Надёжность ЭРИ» [1].

Исходя из этих требований, функция для расчета λ_3 (модель интенсивности отказов) может быть получена методом упрощения структуры полной математической модели (1) и представлена в следующем виде [2]:

$$\lambda_3 = \lambda_{j6} \cdot f_j(K_p, K_n), \quad (3)$$

где: λ_{j6} – базовая интенсивность отказов СЧ j -го типоразмера (при нормальных условиях (НУ) и номинальной нагрузке);

f_j – некоторая аналитическая зависимость;

K_p – вектор значений коэффициента эксплуатации СЧ j -го типоразмера (учитывающий жесткость условий эксплуатации);

K_n – матрица значений коэффициента режима применения СЧ j -го типоразмера.

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

Поэтому, вместо (3) удобней использовать систему (4):

$$\begin{cases} \lambda_{j,1} = \lambda_{j6} \cdot k_{j,1} \cdot f_{j1}(K_p) \\ \lambda_{j,2} = \lambda_{j6} \cdot k_{j,2} \cdot f_{j2}(K_p) \\ \dots \\ \lambda_{j,I} = \lambda_{j6} \cdot k_{j,I} \cdot f_{jI}(K_p) \end{cases}, \quad (4)$$

где: I – количество сочетаний ВВФ, характеризующих жесткость условий эксплуатации, приведенных в [1];

f_{ji} – некоторая аналитическая зависимость;

$i = 1, 2, \dots, I$.

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

$$f_{ji}(K_p) = f_{ji}(T_j, K_n), \quad (5)$$

где: 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:

$$K_n = \frac{H_p}{H_{\max \text{ доп}}}, \quad (6)$$

где: H_p – рабочая нагрузка СЧ;

$H_{\max \text{ доп}}$ – максимально-допустимая нагрузка СЧ по НТД;

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, надежностная макромодель СЧ (модель эксплуатационной интенсивности отказов) представляет собой дискретную трехмерную функцию, заданную ее значениями. Такой способ задания функций широко используется в [1] и, соответственно, созданы все необходимые структуры для

хранения численных значений в справочной части базы данных (СЧБД) подсистемы АСОНИКА-К.

Однако, если использовать в качестве значения аргументов функции $f_{j,i}(K_p)$ значения коэффициента нагрузки и температуры, приведенные в [1], то в этом случае необходимо провести N повторных расчетов полной модели СЧ, число которых можно определить на основе следующего соотношения:

$$N = (I - 1) \cdot J \cdot K, \quad (7)$$

где: I – количество групп аппаратуры по ГОСТ Р В 20.39.301-98;

$$J = \frac{1}{0,1} \text{ – количество значений вектора электрической нагрузки СЧ } (J = 10);$$

$$K = \text{int}\left(\frac{T_{\max} - 25}{5}\right) + 1 \text{ – количество значений вектора температуры окружающей среды.}$$

Значения функции $f_{j,i}(K_p)$ для фиксированного i можно определить на основе следующего соотношения:

$$k_{p,j,k} = \frac{\lambda_{i,j,k}}{\lambda_b \cdot k_{n,i}}, \quad (8)$$

где: $\lambda_{i,j,k}$ – интенсивность отказов СЧ, рассчитанная для i -той группы аппаратуры при j -том значении коэффициента электрической нагрузки и k -том значении температуры окружающей среды.

В принципе, на этом построение макромодели СЧ можно считать завершенным, так как определен вид математической модели и получены численные значения ее коэффициентов. Однако в этом случае в базе данных придется хранить относительно большое число параметров макромодели (порядка двух тысяч).

Однако в СЧБД можно хранить не только численные значения, но и аналитические модели. Поэтому, вместо численных значений функции $f_{j,i}$ можно использовать ее аппроксимацию [4]:

$$f_i(K_p) = f_i\{a_{i,1}, a_{i,2}, \dots, a_{i,M}, K_n, T\}, \quad (9)$$

где: f_i – аппроксимирующая функция, вид которой определен для i -той координаты вектора K_3 ;

$a_{i,m}$ – m -тый коэффициент, определенный для i -той координаты вектора K_3 ;

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:

$$f_i(K_p) = r_j \cdot f_j\{b_{j,1}, b_{j,2}, \dots, b_{j,M}, T\}, \quad (10)$$

где: r_j – значение коэффициента, определенное для j -той координаты вектора K_n ;

$K_n = \{0, 1, 0, 2, \dots, 1, 0\}$ – 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.

Значения координат вектора $R = \{r_1, r_2, \dots, r_J\}$ можно определить на основе следующего соотношения:

$$r_j = k_{p,j,1}. \quad (11)$$

где: $k_{p,j,1}$ – значение функции $f_j(K_p)$ при температуре окружающей среды, равной 25 °C.

Таким образом, r_j – это значение функции $f_j(K_p)$, определенное для j -той координаты вектора K_h при температуре окружающей среды, равной 25°C , и при значении номера группы аппаратуры по ГОСТ Р В 20.39.301-98 равной i . По аналогии в [1] этой величине соответствует коэффициент режима (K_p).

В этом случае значения функции $f_i\{b_{j,1}, b_{j,2}, \dots, b_{j,M}, T\}$ можно определить на основе следующего соотношения:

$$f_{j,k} = \frac{k_{p,j,k}}{r_j}. \quad (12)$$

Для поиска вида функции f_j были использованы пять способов аппроксимации:

1. экспоненциальная регрессия;
2. нелинейная аппроксимация экспоненциальной регрессией
3. полиномиальная аппроксимация;
4. экспоненциальная аппроксимация;
5. сплайн-интерполяция.

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

На рис. 1, в качестве примера, приведена нелинейная аппроксимация экспоненциальной регрессией функции f_j для электронного модуля (группа аппаратуры 1.1) от температуры.

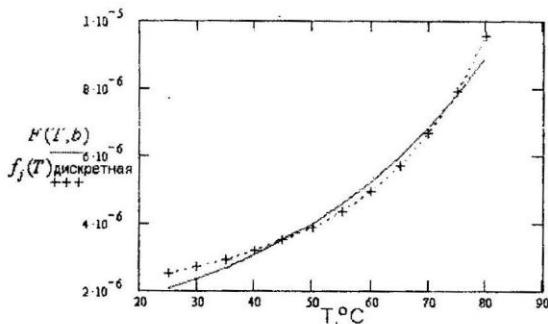


Рис. 1. Нелинейная аппроксимация экспоненциальной регрессией функции f_j

При решении задачи аппроксимации двумерной функции $f_{j,i}(K_p)$ (9) для фиксированных групп аппаратуры были использованы методы численного решения. Для каждой группы были получены дискретные значения функции $f_j\{b_{j,1}, b_{j,2}, \dots, b_{j,M}, T\}$, представляющей собой экспоненциальную регрессию, для различных коэффициентов нагрузки. После аппроксимации зависимостей коэффициентов регрессионной модели от коэффициента нагрузки была получена функция, имеющая следующий вид:

$$f(K_p) = (a_1 + a_2 \cdot k_H) \cdot e^{(a_3 + a_4 \cdot k_H) \cdot T} \quad (13)$$

На рис. 2 в качестве примера приведен график функции (13).

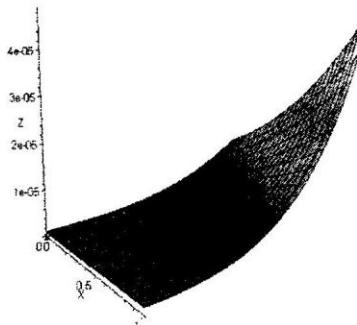


Рис. 2. Зависимость функции $f_{j,i}(K_n, T)$

Погрешность аппроксимации составила не более 15%, что удовлетворяет точности инженерных расчетов.

Таким образом, применение 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 расчётах 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 $\lambda_s \approx const$ (не зависит ни от условий применения, ни от нагрузки).

Опытная эксплуатация подсистемы АСОНИКА-К подтвердила возможность ее применения для определения параметров макромоделей надежности СЧ РЭА.

Литература

- 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.
- Жаднов, В. В. Автоматизация проектных исследований надежности радиоэлектронной аппаратуры: Научное издание / Жаднов В. В., Кофанов Ю. Н., Малютин Н. В. и др. – М.: Изд-во «Радио и связь», 2003. – 156 с.
- Жаднов, В. В. Надежностные макромодели компонентов РЭА подсистемы АСОНИКА-К / Жаднов В. В., Жаднов И. В., Замараев С. П. // Системные проблемы качества, математического моделирования, информационных, электронных и лазерных технологий: Материалы международной конференции и Российской научной школы. Часть I - М.: Изд-во «Радио и связь», 2002. - с. 84-88.
- Лазарев, Д. В. Использование макромоделей составных частей при расчетах надежности РЭА. / Лазарев Д. В., Жаднов В. В., Пименов А. А. // Современные проблемы радиоэлектроники: Сб. научн. тр. - Красноярск: ИПЦ КГГУ, 2004. - с. 528-530.
- Жаднов, В. В. Макромодели надежности компонентов РЭА / Жаднов В. В., Лазарев Д. В. // Электромагнитная совместимость и проектирование электронных средств: Сб. научных трудов / Под ред. Л.Н. Кечиева. – М.: МИЭМ, 2004. - с. 81-92.