

МОДЕЛИ ХАРАКТЕРИСТИК НАДЕЖНОСТИ СОСТАВНЫХ ЧАСТЕЙ РЭА

Наметившаяся в последнее время тенденция перехода к численным методам расчета показателей надежности радиоэлектронной аппаратуры, обусловленная появлением нового поколения компьютеров на базе процессора Intel Pentium-IV, вновь выдвинула задачу снижения времени моделирования. Одним из возможных путей решения этой задачи является применение математических моделей эксплуатационной интенсивности отказов составных частей (макромоделей), которые позволяют существенно снизить время моделирования на ЭВМ, практически не ухудшая точности оценки показателей надежности. В статье рассматриваются методы построения макромоделей и идентификации их параметров, а также приводятся практические рекомендации, касающиеся вида математических моделей.

Для современной радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) характерны высокие уровни показателей стандартизации и унификации, так как стандартизация и унификация позволяют сократить количество типоразмеров составных частей (СЧ) в проектируемой и модифицируемой РЭА. Так, например, для бортовых гидроакустических комплексов значения коэффициентов повторяемости и применяемости могут достигать 30...70%. Очевидно, что при расчетах надежности необходимо учитывать характеристики надежности всех СЧ. Для оригинальных СЧ, схема расчета надежности (СРН) которых представляет собой последовательное соединения ЭРИ, расчеты характеристик надежности проводятся на основе известной модели:

$$\lambda_{СЧ} = \sum_{n=1}^N \lambda_{\vartheta_n}, \quad (1)$$

где N — количество ЭРИ в СЧ; λ_{ϑ_n} — эксплуатационная интенсивность отказов n -го ЭРИ.

Для стандартных и унифицированных СЧ используют характеристики надежности, приведенные в нормативно-технической документации (НТД). Как правило, в НТД приводится значение интенсивности отказов СЧ (постоянная величина), которая представляет собой либо верхнюю оценку интенсивности отказов, либо получена для конкретных условий применения СЧ [режимов работы ЭРИ и уровней внешних воздействующих факторов (ВВФ)], т.е.:

$$\lambda_{НТД} = \lambda_{СЧ} = const \quad (2)$$

Заметим, что (2) можно рассматривать как макромодель интенсивности отказов СЧ по отношению к полной модели (1).

НАДЕЖНОСТЬ

Кроме того (2), широко применяется и для оригинальных СЧ, что позволяет существенно снизить трудоемкость расчетов надежности не только численными, но и аналитическими методами. В этом случае число повторных расчетов по полной модели (1) определяется уже не общим количеством оригинальных СЧ, а лишь количеством их типоразмеров.

Однако (2) не позволяет оценить значения характеристик надежности СЧ при изменении условий ее применения. Это может привести к существенной погрешности при проведении расчетов надежности РЭА, величина которой будет тем больше, чем сильнее отличаются условия применения данной СЧ от условий, которые были приняты при расчетах характеристик надежности ЭРИ по полной модели (1). На рис. 1 в качестве примера приведено семейство характеристик надежности электронного модуля для различных групп аппаратуры по классификации ГОСТ Р В 20.39.301-98, а на рис. 2 приведена зависимость интенсивности отказов электронного модуля от температуры окружающей среды и от коэффициента нагрузки.

Рисунок 1

Зависимости интенсивности отказов электронного модуля от температуры окружающей среды

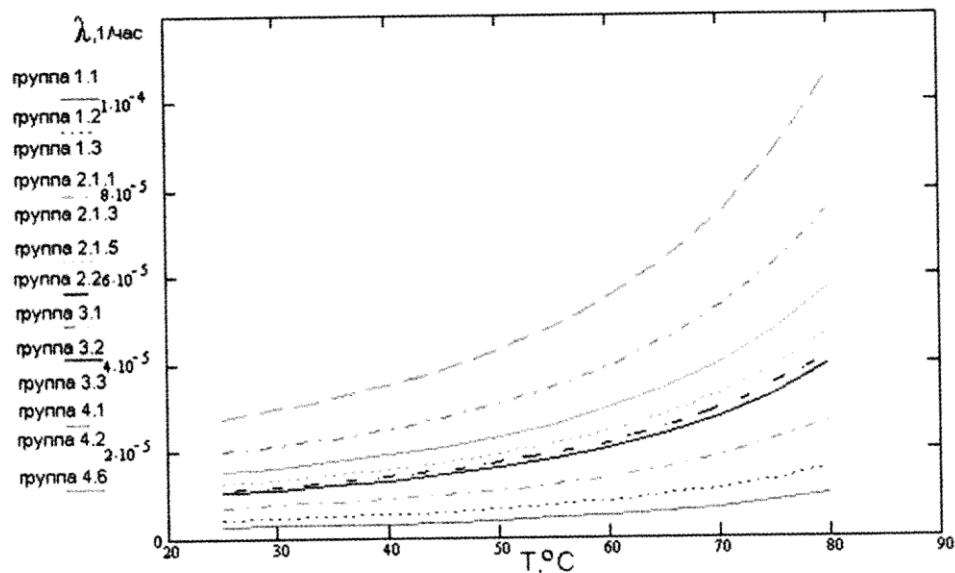
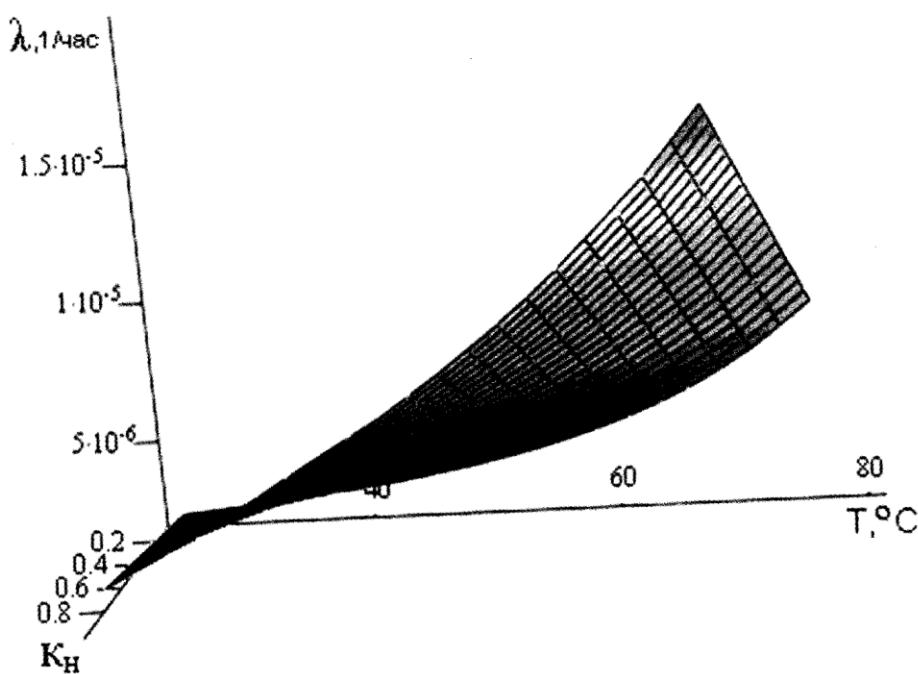


Рисунок 2

Зависимость интенсивности отказов электронного модуля от температуры окружающей среды и от коэффициента нагрузки



Как видно из рисунков, относительное изменение эксплуатационной интенсивности отказов, в зависимости от условий применения СЧ, составляет почти 80%! Если принять во внимание, что значение ИНТД является одним из важных критериев оценки возможности применения СЧ сторонних производителей для вновь создаваемой или модифицируемой РЭА, то становится очевидным тот факт, что использование (2) в качестве характеристики надежности СЧ недопустимо не только в НТД, но и для оригинальных СЧ. Кроме того, вызывает большое сомнение и целесообразность проведения «приближенного расчета надежности» на основе данных, приведенных в [1], и реализованного в «Автоматизированной системе расчета надежности» (АСРН), официально распространяемой 22 ЦНИИ МО РФ.

Повсеместное внедрение ИПИ-технологий и электронного документооборота позволяет уже сегодня в качестве моделей надежности СЧ использовать данные, формируемые в ПС расчета надежности (полная модель). К сожалению, на практике это осложняется тем, что в широко распространенной АСРН электронный обмен данными невозможен даже между ее копиями, не говоря уже о реализации такого обмена с использованием PDM-систем. Система архивации проектов программного комплекса АСОНИКА-К [2] хотя и формирует такие данные, но их использование сдерживается недостаточно широким распространением как самого программного комплекса (ПК), так и PDM-систем. Поэтому одним из возможных направлений повышения точности расчетов РЭА является использование макромоделей характеристик надежности СЧ, которые, в отличие от (2), позволяли бы рассчитывать эксплуатационную интенсивность отказов СЧ для заданных условий применения (ВВФ, температуры окружающей среды и коэффициента нагрузки).

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

В отличие от (2) λ_o представляет собой функцию, аргументами которой являются ВВФ, электрическая нагрузка и температура среды, окружающей СЧ. 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_o СЧ с математическими моделями эксплуатационной интенсивности отказов ЭРИ, приведенными в [1].

Исходя из этих требований, математическая модель интенсивности отказов СЧ может быть представлена в следующем виде:

$$\lambda_o = \lambda_b \cdot K_o(i) \cdot K_p(i, T, K_H), \text{ где:} \quad (3)$$

λ_b — базовая интенсивность отказов (интенсивность отказов СЧ при нормальных условиях (НУ) и номинальной нагрузке);

K_o — функция эксплуатации (функция, учитывающая жесткость условий эксплуатации);

i — номер группы аппаратуры по классификации [1] ($i = 1, 2, \dots, I$, где I — количество групп);

K_p — функция режима (функция, учитывающая режим эксплуатации);

T — температура среды, окружающей СЧ;

K_H — коэффициент нагрузки ($K_H = R_{раб}/R_{ном}$, где $R_{раб}$, $R_{ном}$ — рабочая и номинальная (по НТД) электрическая нагрузка СЧ).

Значение λ_o можно определить, проводя расчет полной модели (1) при следующих условиях:

- величины электрических нагрузок ЭРИ должны соответствовать номинальной электрической нагрузке СЧ;
- температуры ЭРИ должны соответствовать температуре среды, окружающей СЧ, равной 25 °C;
- группа аппаратуры по ГОСТ Р В 20.39.301-98 - 1.1.

Очевидно, что функция $K_{\vartheta}(i)$ представляет собой дискретную функцию, поэтому, по аналогии с [1], ее можно представить в виде вектора коэффициентов эксплуатации $K_{\vartheta} = \{K_{\vartheta_1}, K_{\vartheta_2}, \dots, K_{\vartheta_I}\}$, координаты которого определяются на основе следующего соотношения:

$$K_{\vartheta_I} = \lambda_{\vartheta_i} / \lambda_{\sigma}, \text{ где:} \quad (4)$$

λ_{ϑ_i} — интенсивность отказов СЧ, рассчитанная для i -й группы аппаратуры.

Примечание: значение λ_{ϑ_i} можно определить аналогично λ_{σ} , при условии, что номер группы аппаратуры по ГОСТ Р В 20.39.301-98 равен i .

Так как (3) представляет собой дискретно-непрерывную функцию, то ее удобнее представить в виде системы непрерывных функций, тогда:

$$\left\{ \begin{array}{l} \lambda_{\vartheta_1} = \lambda_{\sigma} \cdot K_{\vartheta_1} \cdot K_{P_1}(T, K_H) \\ \lambda_{\vartheta_2} = \lambda_{\sigma} \cdot K_{\vartheta_2} \cdot K_{P_2}(T, K_H) \\ \vdots \\ \lambda_{\vartheta_I} = \lambda_{\sigma} \cdot K_{\vartheta_I} \cdot K_{P_I}(T, K_H) \end{array} \right. , \text{ где:} \quad (5)$$

где K_{P_i} — функция режима, вид которой (аналитическое выражение), в общем случае, зависит от номера группы i .

Так как ни вид, ни численные значения коэффициентов функции K_{P_i} априорно неизвестны, то она может быть задана табличным способом (таблица значений функции, полученных для фиксированных значений ее аргументов). Кстати, этот способ широко используется в [1] для задания значений коэффициента режима (K_p). В качестве значений аргументов можно использовать значения, приведенные в [1]:

$$\begin{aligned} K_H &= 0,1; 0,2; \dots; 1,0 \text{ [отн. эд.];} \\ T &= 25, 30, \dots, T_{max} [^{\circ}\text{C}], \text{ где:} \end{aligned}$$

T_{max} — максимально допустимая температура среды, окружающей СЧ (по НТД).

В этом случае значения функции K_{P_i} могут быть получены на основе следующего соотношения:

$$K_{\vartheta}(i, j, k) = \frac{\lambda_{\vartheta}(i, T_j, K_{Hk})}{\lambda_{\sigma} \cdot K_{\vartheta_i}}, \quad (6)$$

где j — номер значения температуры среды, окружающей СЧ ($j = 1, 2, \dots, J$); k — номер значения коэффициента нагрузки СЧ ($k = 1, 2, \dots, K$).

Примечание: значение $\lambda_{\vartheta}(i, T_j, K_{Hk})$ можно определить аналогично λ_{ϑ_i} , при условии, что номер значения температуры среды, окружающей СЧ, равен j , а номер значения коэффициента нагрузки СЧ равен k .

В принципе на этом построение макромодели СЧ можно считать завершенным, так как определен вид математической модели (3) и получены численные значения ее коэффициентов. Очевидно, что для этого необходимо провести L повторных расчетов полной модели СЧ, число которых можно определить на основе следующего соотношения:

$$L = I \cdot J \cdot K, \quad (7)$$

где I — количество групп аппаратуры по ГОСТ Р В 20.39.301-98;
 $J = \text{int}[(T_{\max} - 25)/5] + 1$ — количество значений вектора температуры окружающей среды;
 $K = 1,0/0,1$ — количество значений вектора электрической нагрузки СЧ (очевидно, что $K = 10$).

Проведение такого числа расчетов при использовании ПК АСОНИКА-К не представляет особой сложности, так как он позволяет пользователю, задав диапазон и шаг изменения аргумента, получить значения эксплуатационной интенсивности отказов СЧ. Однако в этом случае в базе данных (БД) придется хранить относительно большое число численных значений коэффициентов макромодели (порядка двух тысяч).

Для снижения числа коэффициентов можно использовать методы аппроксимации, тем более что в БД ПК АСОНИКА-К можно хранить не только численные значения, но и аналитические модели. Однако так как универсального решения задачи аппроксимации двухмерных функций к настоящему времени не найдено, естественным выходом в этой ситуации является переход к функции одного аргумента. Если в качестве аргумента принять температуру окружающей среды, то функция K_{P_i} превращается в дискретно-непрерывную функцию, которую, по аналогии с (5), можно представить в следующем виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} K_{P_{i,1}} = K_{i,1} \cdot f_{T_{i,1}}(a_{11,i}, a_{21,i}, \Lambda, a_{M_{1,i}}, T) \\ K_{P_{i,2}} = K_{i,2} \cdot f_{T_{i,2}}(a_{12,i}, a_{22,i}, \Lambda, a_{M_{2,i}}, T) \\ \quad \Lambda \\ K_{P_{i,10}} = K_{i,10} \cdot f_{T_{i,10}}(a_{110,i}, a_{210,i}, \Lambda, a_{M_{10,i}}, T) \end{array} \right., \quad (8)$$

где $K_{i,k}$ — коэффициент, зависящий от коэффициента электрической нагрузки СЧ;
 $f_{T_{i,k}}$ — аппроксимирующая функция;
 $a_{1k,i}, a_{2k,i}, \dots, a_{Lk,i}$ — постоянные коэффициенты;
 $M_{h,i}$ — количество коэффициентов

При известных значениях функции K_{P_i} значения коэффициентов $K_{i,k}$ могут быть получены на основе следующего соотношения:

$$K_{i,k} = \frac{K_p(i, j=1, k)}{K_p(i, j=1, k=K)}. \quad (9)$$

Аналогично могут быть получены значения функции $f_{T_{i,k}}$, необходимые для решения задачи аппроксимации:

$$f_{T_{i,k}}(i, j, k) = \frac{K_p(i, j, k)}{K_{i,k}}. \quad (10)$$

Анализ графиков функций эксплуатационной интенсивности отказов СЧ, полученных в результате исследований [3] и математических моделей, приведенных в [1], а также общих рекомендаций по решению задач аппроксимации [4], позволил сделать вывод о том, что наиболее подходящими функциями являются следующие:

1. Экспоненциальная регрессия:

$$f_j(a_j, b_j, T) = a_j \cdot e^{b_j \cdot T} \quad (11)$$

2. Полиномиальная аппроксимация:

$$f_j(b_{j,n}, T) = \sum_{n=0}^{\infty} b_{j,n} \cdot T^n \quad (12)$$

3. Экспоненциальная аппроксимация:

$$f_j(b_{j,n}, T) = \sum_{n=0}^{\infty} b_{j,n} \cdot e^{n \cdot T}, \quad (13)$$

где k — известная величина.

4. Кубическая сплайн-интерполяция:

$$\begin{aligned} f_j(a_{j,k+1}, b_{j,k+1}, c_{j,k+1}, T_{k+1}) = & f_j(a_{j,k}, b_{j,k}, c_{j,k}, T_k) + a_{j,k+1} \cdot (T_{k+1} - T_k) + \\ & + b_{j,k+1} \cdot (T_{k+1} - T_k)^2 + c_{j,k+1} \cdot (T_{k+1} - T_k)^3 \end{aligned} \quad (14)$$

Для решения задачи аппроксимации функции $f_{T_{i,k}}(T)$ использовался универсальный математический пакет — *MatCad* [3]. Полученные результаты приведены ниже.

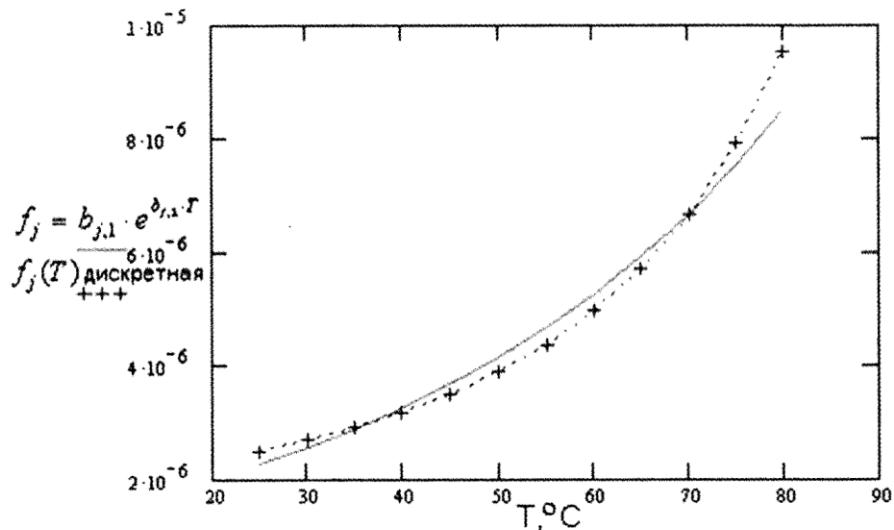
В результате аппроксимации экспоненциальной регрессией было получено следующее выражение:

$$f_j(a_j, b_j, T) = a_j \cdot e^{b_j \cdot T} \quad (15)$$

График функции приведен на рис. 3. Относительная погрешность аппроксимации не превышает 5.5%

Рисунок 3

Экспоненциальная регрессия



Кроме того, в рамках данного способа аппроксимации была проведена и нелинейная аппроксимация, которая предполагает, что аппроксимирующая функция $f_j\{b_{j,1}, b_{j,2}, \dots, b_{j,M}, T\}$ нелинейно зависит от неизвестных параметров $b_{j,1}, b_{j,2}, \dots, b_{j,M}$. Для проведения аппроксимации нужно сначала определить вектор-функцию $F(T, b)$, которая помимо самой аппроксимирующей функции $f_j\{b_{j,1}, b_{j,2}, \dots, b_{j,M}, T\}$ содержит ее частные производные относительно параметров:

$$F(T, b) = \begin{bmatrix} f_j(b_{j,1}, b_{j,2}, \dots, b_{j,M}, T) \\ \frac{\partial f_j}{\partial b_{j,1}} \\ \dots \\ \frac{\partial f_j}{\partial b_{j,N}} \end{bmatrix}, \quad (16)$$

где b — вектор параметров.

При проведении аппроксимации в качестве аппроксимирующей функции была взята функция (15), а в качестве начальных значений параметров $b_{j,n}$ были взяты ее коэффициенты.

В результате нелинейной аппроксимации экспоненциальной регрессии было получено следующее выражение:

$$f_j(b_{j,1}, b_{j,2}, T) = b_{j,1} \cdot e^{b_{j,2} \cdot T} \quad (17)$$

График функции приведен на рис. 4. Относительная погрешность в этом случае не превышает 1%.

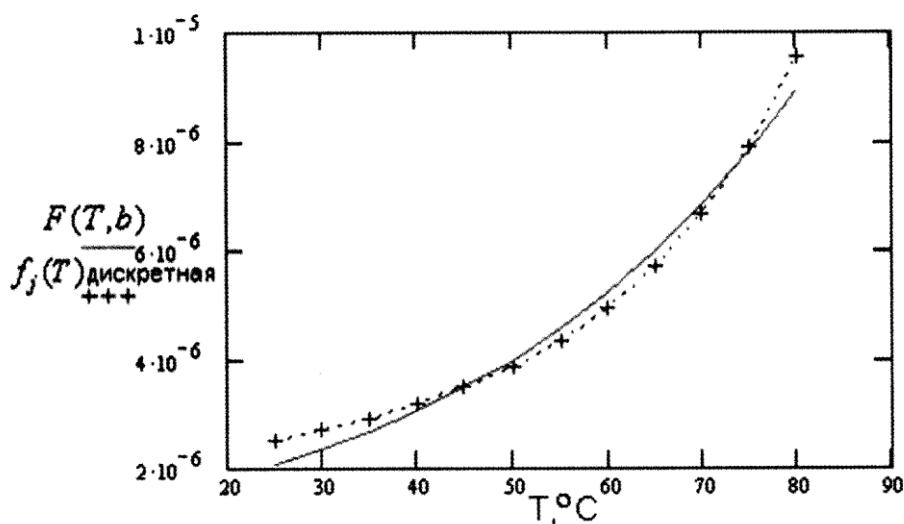


Рисунок 4

Нелинейная аппроксимация экспоненциальной регрессией

В результате полиномиальной аппроксимации было получено следующее выражение:

$$f_j(b_{j,0}, b_{j,1}, b_{j,2}, T) = b_{j,0} + b_{j,1} \cdot T + b_{j,2} \cdot T^2 \quad (18)$$

График функции приведен на рис. 5. Относительная погрешность аппроксимации не превышает 3%.

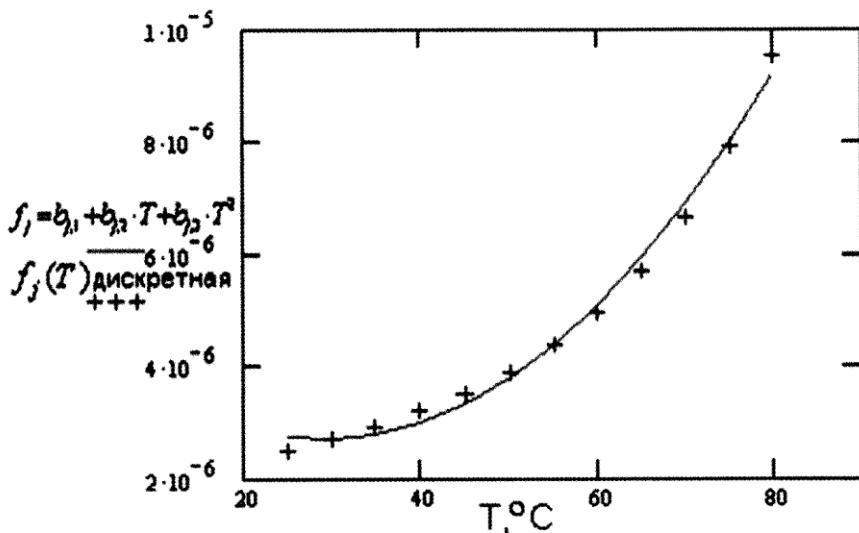


Рисунок 5

Полиномиальная аппроксимация

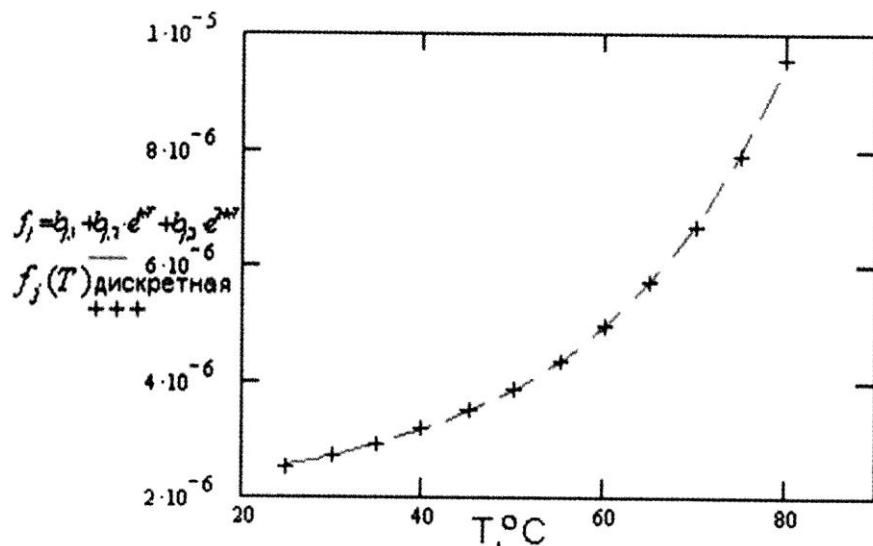
В результате экспоненциальной аппроксимации было получено следующее выражение:

$$f_j(b_{j,0}, b_{j,1}, b_{j,2}, T) = b_{j,0} + b_{j,1} \cdot e^T + b_{j,2} \cdot e^{2 \cdot T}, \quad (19)$$

График функции приведен на рис. 6. Относительная погрешность аппроксимации не превышает 0,4%.

Рисунок 6

Экспоненциальная аппроксимация



Полученная в результате сплайн-интерполяции функция представляет собой кубический сплайн. Формула для кубического сплайна записывается для произвольного отрезка с номером k , левый конец которого имеет абсциссу T_k . На этом отрезке для любого $T \in (T_k, T_{k+1})$ результат интерполяции вычисляется по кубическому сплайну:

$$\begin{aligned} f_j(a_{j,k+1}, b_{j,k+1}, c_{j,k+1}, T_{k+1}) &= f_j(a_{j,k}, b_{j,k}, c_{j,k}, T_k) + a_{j,k+1} \cdot (T_{k+1} - T_k) + \\ &+ b_{j,k+1} \cdot (T_{k+1} - T_k)^2 + c_{j,k+1} \cdot (T_{k+1} - T_k)^3 \end{aligned} \quad (20)$$

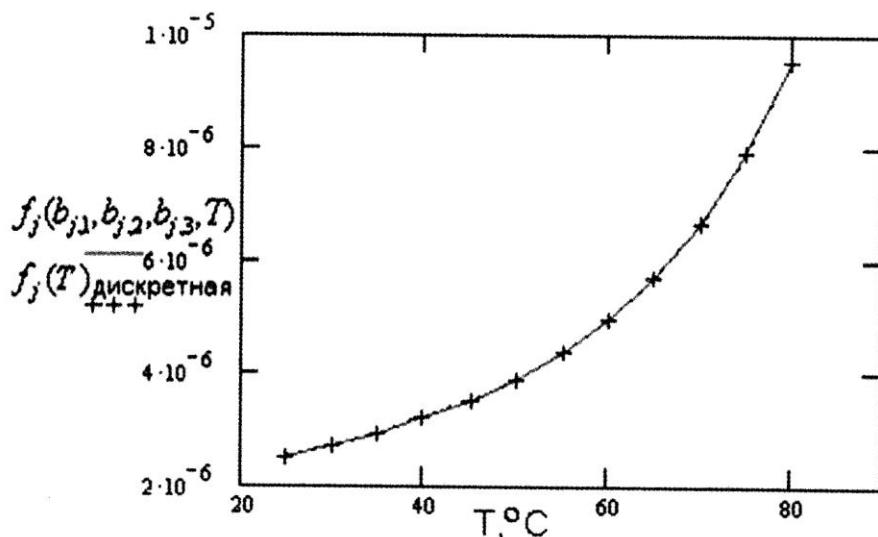
Если T переходит на другой отрезок, то следует изменить номер k текущего отрезка, при этом изменяются и все коэффициенты в формуле. Тогда:

$$a_{j,k} = \frac{\partial f_j(T_k)}{\partial T}; b_{j,k} = \frac{\partial^2 f_j(T_k)}{2 \cdot \partial^2 T}; c_{j,k} = \frac{\partial^3 f_j(T_k)}{6 \cdot \partial^3 T} \quad (21)$$

График функции приведен на рис. 7. Относительная погрешность аппроксимации, по определению, равна нулю.

Рисунок 7

Сплайн-интерполяция



Наилучшие результаты, с точки зрения точности аппроксимации, были получены в результате сплайн-интерполяции. Однако, с точки зрения числа коэффициентов (M) функции $f_{T_{i,k}}(T)$ (что в данном случае является критерием выбора вида функции, а точность аппроксимации — лишь ограничением), безусловно, лучшей оказалась нелинейная аппроксимация экспоненциальной регрессией (15).

Таким образом, применение аппроксимации $f_{T_{i,k}}(T)$ позволяет существенно снизить объем численных значений, хранящихся в БД (например, при использовании (15) количество значений составляет не более 2). Кроме того, как показали проведенные исследования [3], вид функции $f_{T_{i,k}}(T)$ практически не зависит ни от группы аппаратуры, ни от коэффициента нагрузки и может быть принят одинаковым для всех $i = 1, 2, \dots, I$ и $k = 1, 2, \dots, K$, т.е. аппроксимация экспоненциальной регрессией может быть принята для всего семейства температурных зависимостей (8).

Как следует из (3), точность предлагаемой макромодели определяется шагом дискретизации коэффициента нагрузки и погрешностью аппроксимации экспоненциальной регрессией. Очевидно, что применение такой макромодели в расчетах надежности РЭА в итоге даст значительно меньшую погрешность, чем в случае, когда используется общепринятое допущение о том, что для СЧ одного типоразмера $\lambda_3 \approx \text{const}$ (2) (не зависит ни от условий применения, ни от нагрузки, ни от температуры).

Опытная эксплуатация ПК АСОНИКА-К подтвердила возможность его применения как для определения параметров макромоделей надежности СЧ, так и эффективность их использования при расчете показателей надежности РЭА методом статистических испытаний (методом Монте-Карло) [4].

Литература

- Надежность ЭРИ: Справочник. // Прытков С.Ф., Горбачева В.М., Борисов А.А. и др. / Науч. рук. С.Ф. Прытков — М.: 22 ЦНИИ МО РФ, 2002. — 574 с.
- Автоматизация проектных исследований надежности радиоэлектронной аппаратуры: Научное издание // Жаднов В.В., Кофанов Ю.Н., Малютин Н.В. и др. — М.: Радио и связь. 2003. — 156 с.
- Плис А.И., Сливина Н.А. MathCAD 2000. Математический практикум. — М.: Финансы и статистика. 2000. — 300 с.
- Лазарев Д.В. Исследование надежности генераторного устройства с помощью подсистемы АСОНИКА-К // Системные проблемы качества, математического моделирования, информационных и электронных технологий: Материалы международной конференции и Российской научной школы. Часть 1. — М.: Радио и связь, 2003. — с. 14—15.