

4. Чистяков С.Ф., Радун Д.В. Теплотехнические измерения и приборы. – М.: Высшая школа, 1972.

5. Техника бурения при разработке месторождений полезных ископаемых. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1987.

6. Станки шарошечного бурения. Ю. А. Нанкин, П. М. Пипко, Л. И. Балагуров. – М.: Изд-во «Недра», 1970, стр. 103.

## ПРИМЕНЕНИЕ МОДЕЛЕЙ ХАРАКТЕРИСТИК НАДЕЖНОСТИ ПРИ ОЦЕНКЕ РЭА

Д. В. Лазарев, В. В. Жаднов (научный руководитель)

Московский государственный институт электроники и математики  
109028, Москва, пер. Б. Трехсвятительский, 3/12, стр.8

E-mail: asonika-k@mail.ru

Application reliability characteristic models by estimation Radio-Electronic Equipment  
D.Lazarev, V.Jadnov

The mathematical model of operational failure rate of components which are part of the radio-electronic equipment of physical measurements, the hardware and instrument complexes is offered. To receive characteristics of reliability of components from the view of application condition (a class of the equipment, an ambient temperature and a level of electric loading) and a identification techniques of the mathematical models, based on application of program complex АСОНИКА-К is presented.

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. В первую очередь это относится к «уточненному расчету надежности», когда необходимо учитывать все коэффициенты моделей эксплуатационной интенсивности отказов ЭРИ [1]. Если принять во внимание, что значение внешних воздействующих факторов (ВВФ), действующих на СЧ, могут существенно отличаться, а следовательно, будут отличаться и режимы работы ЭРИ, то расчеты характеристик надежности необходимо проводить для каждой СЧ в отдельности. В тоже время, современная РЭА характеризуется высоким уровнем унификации составных частей, количественной характеристикой которой является коэффициент повторяемости. Так, например, для бортовых гидроакустических комплексов значение коэффициента повторяемости может достигать 30...70 %. Поэтому на практике расчеты характеристик надежности проводят не для СЧ, а для типоразмеров. 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 (1):

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

где  $I_j$  – количество ЭРИ в СЧ  $j$ -го типоразмера;  $\lambda_{ji}$  – эксплуатационная интенсивность отказов  $i$ -го ЭРИ.

Однако эту формулу можно раскрыть в более детальном виде:

$$\lambda_j = \lambda_{\delta 1} \cdot K_{\delta 1} \cdot K_{p1}(T, K_H) \cdot \prod_{n=1}^{N_1} K_n + \dots + \lambda_{\delta l} \cdot K_{\delta l} \cdot K_{pl}(T, K_H) \cdot \prod_{n=1}^{N_l} K_n, \quad (2)$$

где  $\lambda_{\delta i}$  – базовая эксплуатационная интенсивность отказов  $i$ -го ЭРИ (при нормальных условиях (НУ) ( $T_{\text{окр}}=25^\circ\text{C}$ ) и номинальной электрической нагрузке);  $K_{\delta i}$  – коэффициент эксплуатации  $i$ -го ЭРИ, учитывающий жесткость условий эксплуатации;  $K_{pi}$  – коэффициент режима  $i$ -го ЭРИ, учитывающий изменение интенсивности отказов ЭРИ в зависимости от коэффициента электрической нагрузки и температуры окружающей среды, например для полупроводниковых приборов

$$K_p = A \cdot e^{\left( \frac{N_t}{273+t+(175-t_{\text{МАКС}})+\Delta t \cdot K_H \cdot \left( \frac{t_{\text{МАКС}} - t_{\text{МАКС,окр}}}{150} \right)} \right) + \left( \frac{273+t+(175-t_{\text{МАКС}})+\Delta t \cdot K_H \cdot \left( \frac{t_{\text{МАКС}} - t_{\text{МАКС,окр}}}{150} \right)}{T_M} \right) \cdot L}$$

где  $A$ ,  $N_t$ ,  $T_M$ ,  $L$ ,  $\Delta t$  – постоянные модели;  $t$  – температура окружающей среды (для отдельных приборов в соответствии с ТУ берется температура корпуса);  $K_H$  – отношение рабочей электрической нагрузки к максимально допустимой при температуре, равной  $t_{\text{МАКС,окр}}$ ;  $t_{\text{МАКС,окр}}$  – максимальная температура окружающей среды, для которой при 100% электрической нагрузке температура перехода не превышает максимально допустимую  $t_{\text{МАКС}}$ ;

$\prod_{n=1}^{N_i} K_n$  – произведение коэффициентов, учитывающих изменение эксплуатационной интенсивности отказов в зависимости от различных факторов, характерных для каждого типоминимала ЭРИ.

Эта модель (2) соответствует схеме расчета надежности, в которой все ЭРИ соединены последовательно:

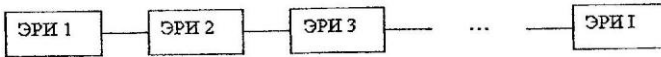


Рис. 1. Схема расчета надежности СЧ для полной модели интенсивности отказов

Это значение эксплуатационной интенсивности отказов в дальнейшем используется при расчетах надежности изделия для всех СЧ  $j$ -го типоразмера. Таким образом (2) можно рассматривать как макро модель СЧ. Отметим, что для стандартных и унифицированных СЧ значения  $\lambda_j$  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 макро модели надежности СЧ не позволяют оценить значения характеристик надежности при изменении условий применения СЧ, т. е.:

$$\lambda_j = \text{const.} \quad (3)$$

Очевидно, что применение модели (3) 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 (2).

Для повышения точности расчеты характеристик надежности необходимо повторить для каждой СЧ в отдельности. Причем, если для оригинальных СЧ это приводит лишь к

дополнительным временным затратам на проведение повторных расчетов, то для стандартных и унифицированных СЧ эта задача может оказаться практически неразрешимой из-за отсутствия исходной информации, необходимой для проведения расчетов. Кроме того, если число оригинальных СЧ достаточно велико, или если расчет надежности РЭА проводится в едином цикле с расчетами характеристик надежности СЧ, то это приводит к большим объемам вычислительных затрат и проявляется как длительное «зависание» даже компьютеров нового поколения на базе процессоров *Intel Pentium-IV*, не говоря уже об устаревших моделях СВТ.

В этом случае существенное снижение объема вычислительных затрат может быть достигнуто за счет применения макромоделей надежности СЧ, которые, в отличие от (3), 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 (2). Применение этого метода позволяет упростить структуру СРН СЧ до минимума (структура СРН содержит всего один элемент, параметром которого является эксплуатационная интенсивность отказов  $\lambda_3$ ). Таким образом схема расчета надежности СЧ для макромоделей надежности примет вид:

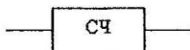


Рис. 2. Схема расчета надежности СЧ для макромоделей интенсивности отказов

Аргументами функции  $\lambda_3$  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  $\lambda_3$  с математическими моделями эксплуатационной интенсивности отказов, приведенными в официальном документе МО РФ – справочнике «Надежность ЭРИ» [1].

Исходя из этих требований, функция для расчета  $\lambda_3$  (модель интенсивности отказов) может быть получена методом упрощения структуры полной математической модели (2) и представлена в следующем виде [2]:

$$\lambda_{j_3} = \lambda_{j_3} \cdot f_j(K_s, K_p), \quad (4)$$

где  $\lambda_{j_3}$  – базовая интенсивность отказов СЧ  $j$ -го типоразмера (при нормальных условиях (НУ) и номинальной нагрузке);  $f_j$  – некоторая аналитическая зависимость;  $K_s$  – вектор значений коэффициента эксплуатации СЧ  $j$ -го типоразмера (учитывающий жесткость условий эксплуатации);  $K_p$  – матрица значений коэффициента режима применения СЧ  $j$ -го типоразмера.

Значение  $\lambda_6$  можно определить, проведя расчет полной модели СЧ при следующих условиях:

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

Для получения выражения для функции  $f_j$  зависимость (4) была заменена на систему:

$$\begin{cases} \lambda_{j,1} = \lambda_{j\delta} \cdot k_{\alpha,1} \cdot f_{j1}(K_p) \\ \lambda_{j,2} = \lambda_{j\delta} \cdot k_{\alpha,2} \cdot f_{j2}(K_p) \\ \dots \\ \lambda_{j,l} = \lambda_{j\delta} \cdot k_{\alpha,l} \cdot f_{jl}(K_p) \end{cases}, \quad (5)$$

где  $l$  – количество сочетаний ВВФ, характеризующих жесткость условий эксплуатации, приведенных в [1];  $f_{ji}$  – некоторая аналитическая зависимость;  $i = 1, 2, \dots, l$ .

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

$$f_{ji}(K_p) = f_{ji}(T_j, K_n), \quad (6)$$

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:

$$K_n = \frac{H_p}{H_{\max \text{ доп}}}, \quad (7)$$

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

Вместо численных значений функции  $f_{ji}$  можно использовать ее аппроксимацию [3]:

$$f_{ij}(K_p) = f_{ij}\{a_{i,1}, a_{i,2}, \dots, a_{i,m}, K_n, T\}, \quad (8)$$

где  $f_{ij}$  – аппроксимирующая функция, вид которой определен для  $i$ -той координаты вектора  $K_s$ ;  $a_{i,m}$  –  $m$ -й коэффициент, определенный для  $i$ -й координаты вектора  $K_s$ ;  $K_n$  – электрическая нагрузка СЧ;  $T$  – температура среды, окружающей СЧ.

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

$$f_{ij}(K_p) = f_{ij}(b_{j,1}, b_{j,2}, \dots, b_{j,m}, T), \quad (9)$$

где  $f_{ij}$  – аппроксимирующая функция, вид которой определен для  $j$ -й координаты вектора  $K_n$ ;  $b_{j,m}$  –  $m$ -й коэффициент, определенный для  $j$ -той координаты вектора  $K_n$ .

Для поиска вида функции  $f_{ij}$  были использованы несколько видов аппроксимации [3].

На рис. 3 в качестве примера приведена нелинейная аппроксимация экспоненциальной регрессией функции  $f_j$  для электронного модуля для группы аппаратуры 1.1 от температуры.

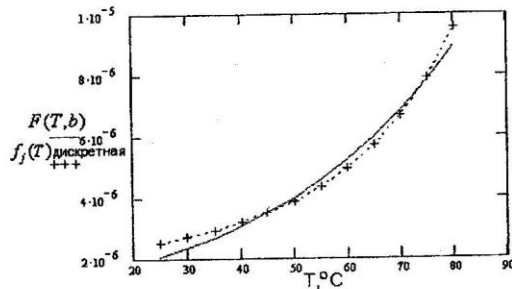


Рис. 3. Нелинейная аппроксимация экспоненциальной регрессией функции  $f_j$  для электронного модуля для группы аппаратуры 1.1 от температуры

Относительная погрешность данной аппроксимирующей функции не превышает 10 %.

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.

Таким образом, применение аппроксимации  $f_j(T)$  позволяет существенно снизить объем численных значений, хранящихся в БД (например, с 12 до 2 – см. рис. 3). Точность аппроксимации зависит от шага дискретизации по координатам вектора температуры.

Таким образом, найден внешний вид функции  $f_{j1} \{b_{j,1}, b_{j,2}, \dots, b_{j,M}, T\}$  и она приняла вид:

$$f_{j1} \{b_{j,1}, b_{j,2}, \dots, b_{j,M}, T\} = b_{j,1} \cdot e^{b_{j,2} T}, \quad (10)$$

где  $b_{j,1}$  – первый коэффициент, определенный для  $j$ -й координаты вектора  $K_H$ ;  $b_{j,2}$  – второй коэффициент, определенный для  $j$ -й координаты вектора  $K_H$ ;  $T$  – температура окружающей среды.

Для получения выражения для зависимости (8) необходимо найти выражения для коэффициентов функции (11) от коэффициента электрической нагрузки:

$$f_{j1} \{b_{j,1}(K_H), b_{j,2}(K_H), \dots, b_{j,M}(K_H), T\} = b_{j,1}(K_H) \cdot e^{b_{j,2}(K_H) T}. \quad (11)$$

Зависимости  $b_{j,1}(K_H)$  и  $b_{j,2}(K_H)$  являются линейными функциями от коэффициента электрической нагрузки. Они имеют следующий вид:

$$b_{j,1}(K_H) = A_1 + A_2 \cdot K_H, \quad (12)$$

$$b_{j,2}(K_H) = B_1 + B_2 \cdot K_H, \quad (13)$$

где  $A_1, A_2, B_1, B_2$  – некоторые коэффициенты.

Погрешность аппроксимации в этом случае не более 5%. Она также определяется шагом дискретизации по координатам вектора  $K_H$ .

Теперь внешний вид функции (11) будет:

$$f_{j1}(K_H) = (A_1 + A_2 \cdot K_H) \cdot e^{(B_1 + B_2 \cdot K_H) T}. \quad (14)$$

Погрешность аппроксимации в этом случае составляет не более 15%.

Таким образом, макромодель составной части  $j$ -го типоразмера для  $i$ -й группы аппаратуры, записанная в общем виде (5) будет иметь следующий вид:

$$\lambda_{3,j} = \lambda_{j0} \cdot K_{3,i} \cdot (A_1 + A_2 \cdot K_H) \cdot e^{(B_1 + B_2 \cdot K_H) T}, \quad (15)$$

где  $\lambda_{3,j}$  – эксплуатационная интенсивность отказов СЧ  $j$ -того типоразмера;  $\lambda_{j0}$  – базовая интенсивность отказов СЧ  $j$ -го типоразмера (при нормальных условиях (НУ) и номинальной нагрузке);  $K_{3,i}$  – вектор значений коэффициента эксплуатации СЧ  $j$ -го типоразмера (учитывающий жесткость условий эксплуатации) для  $i$ -й группы аппаратуры;  $T$  – температура среды, окружающей СЧ, при которой получены рабочие температуры ЭРИ, приведенные в картах рабочих режимов (КРР);  $K_H$  – коэффициент электрической нагрузки;  $A_1, A_2, B_1, B_2$  – некоторые коэффициенты.

Таким образом, удалось решить поставленную задачу и синтезировать структуру полной математической модели (4).

В результате была получена математическая модель эксплуатационной интенсивности отказов составных частей (15), позволяющая, в отличие от известных, получать характеристики надёжности составных частей с учётом условий эксплуатации, температуры окружающей среды и уровня электрической нагрузки и методика идентификации параметров математических моделей, основанная на применении программного комплекса АСОНИКА-К для моделирования составных частей.

Погрешность такой модели составляет не более 15 %, что удовлетворяет принятой точности инженерных расчетов.

На рис. 4 в качестве примера, приведены: поверхность, интерполирующая расчетные значения  $\lambda_{э}(\lambda_{э0}, K_{эл}, K_{м}, T) (f_{1,j,i})$  и поверхность, полученная по модели (15) ( $f_{2,j,i}$ ), приведенные для группы аппаратуры 1.1.

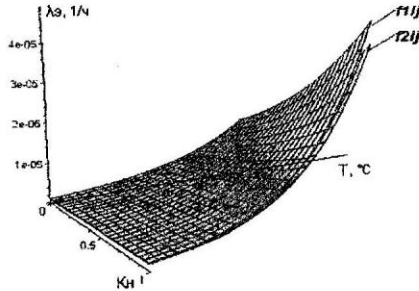


Рис. 4. Зависимость функций  $f_{1,j,i}$  и  $f_{2,j,i}$

Использование макромоделей (32) 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 макромоделей 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. 5), чем в случае, когда используется общепринятое допущение о том, что для СЧ одного типоразмера  $\lambda_{э} \approx const$  (не зависит ни от условий применения, ни от нагрузки), а также позволяет провести всестороннее исследование надёжности составных частей на заданном пространстве параметров, а также исследование надёжности изделий, в состав которых они входят.

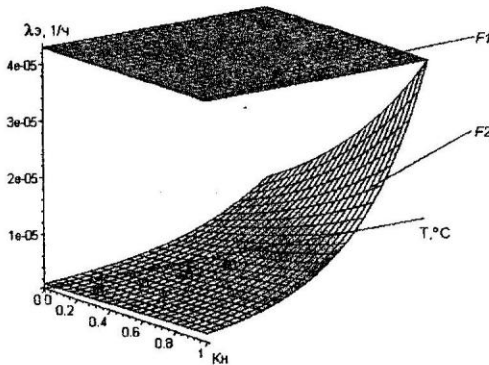


Рис. 5. Зависимость эксплуатационной интенсивности отказов электронного модуля от температуры и электрической нагрузки для определенной группы аппаратуры

На рис. 3 введены следующие обозначения:

- $F1$  – зависимость эксплуатационной интенсивности отказов, полученная по модели (4)
- $F2$  – зависимость эксплуатационной интенсивности отказов, полученная по модели (2).

Макромодель (15) представляет собой систему уравнений для различных групп аппаратуры:

$$\begin{cases} \lambda_{j,1} = \lambda_{j\delta} \cdot k_{s,1} \cdot (A_1 + A_2 \cdot K_H) \cdot e^{(B_{11} + B_{21} \cdot K_H)T} \\ \lambda_{j,2} = \lambda_{j\delta} \cdot k_{s,2} \cdot (A_1 + A_2 \cdot K_H) \cdot e^{(B_{11} + B_{21} \cdot K_H)T} \\ \dots \\ \lambda_{j,l} = \lambda_{j\delta} \cdot k_{s,l} \cdot (A_1 + A_2 \cdot K_H) \cdot e^{(B_{11} + B_{21} \cdot K_H)T} \end{cases}, \quad (16)$$

где  $k_{s,i}$  – значения коэффициента эксплуатации СЧ  $j$ -го типоразмера (учитывающий жесткость условий эксплуатации) для  $i$ -той группы аппаратуры;  $i = 1, 2, \dots, l$ .

Практическое использование методики синтеза макромоделей составных частей было осуществлено в отделе надёжности ФГУП «НИИ АА им. акад. В.С. Семенихина» при расчёте надёжности АСУ специального назначения, а также в отделе надёжности ФГУП «НИИ Импульсной Техники» при расчете аппаратурных и приборных комплексов для измерений кратковременных быстропротекающих процессов при регистрации электромагнитного, оптического, ионизирующего излучений и сейсмических волн.

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

#### Список литературы

1. Прытков С. Ф. Надёжность 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. Автоматизация проектных исследований надёжности радиоэлектронной аппаратуры: Научное издание // Жаднов В.В., Кофанов Ю.Н., Малютин Н.В. и др. – М.: Изд-во «Радио и связь», 2003. – 156 с.
3. 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. - Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2004. - с. 528-530.

## ПРАКТИЧЕСКОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МОДЕЛЕЙ ХАРАКТЕРИСТИК НАДЕЖНОСТИ НА ПРИМЕРЕ УСТРОЙСТВА ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

Д. В. Лазарев, В. В. Жаднов (научный руководитель)

Московский государственный институт электроники и математики  
109028, Москва, пер. Б. Трехсвятительский, 3/12, стр.8

E-mail: asonika-k@mail.ru

Practical using the reliability characteristic models by transformation device examples  
D. Lazarev, V. Jadnov

Practical use the synthesized mathematical models is considered for calculation of reliability device transformations for information, as well as identification their parameter using the programme complex АСОНИКА-К.

Рассмотрим методику применения синтеза макромодели и идентификация ее параметров на примере расчета надёжности устройства преобразования информации.