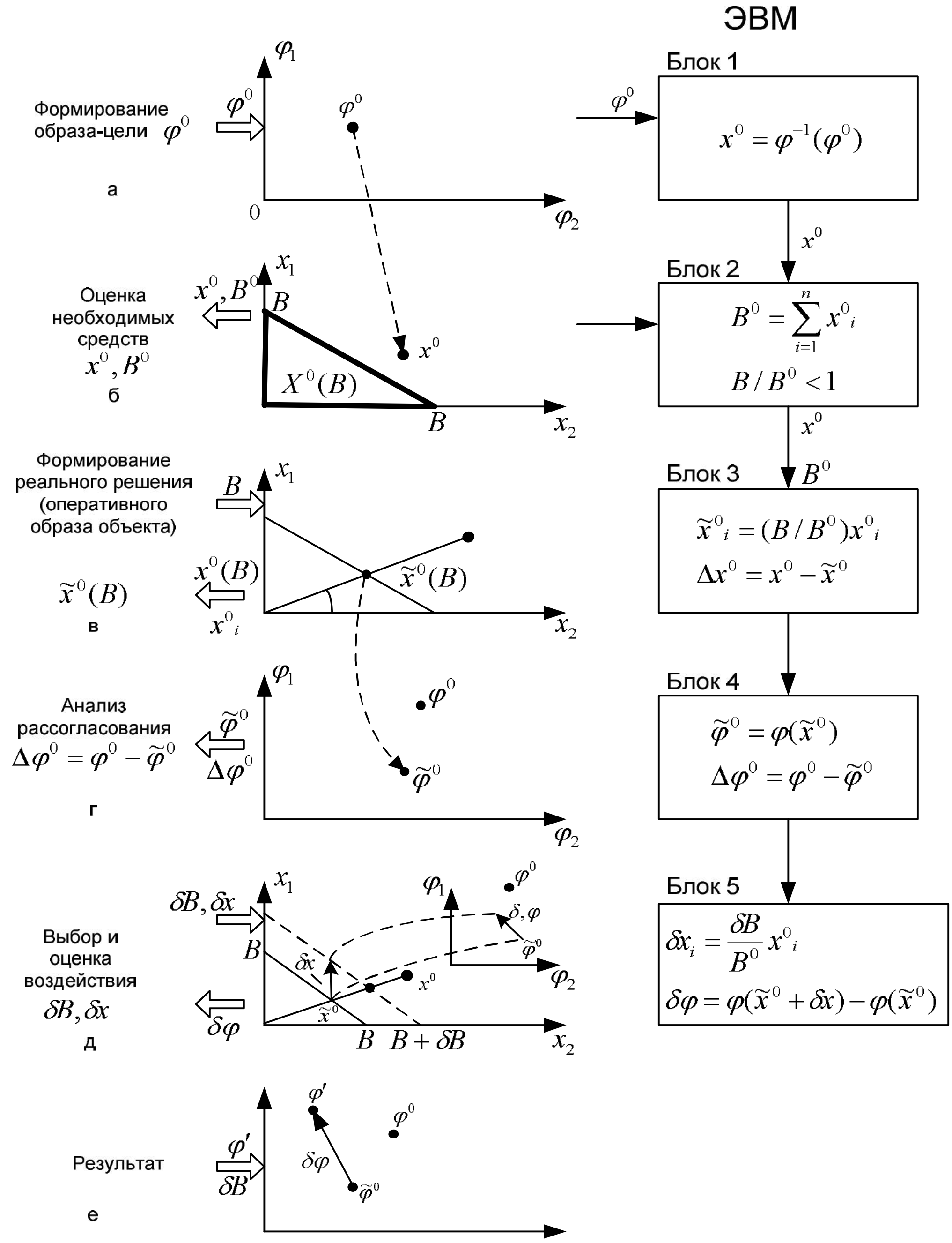

Рисунок 2 - Модель задачи итеративной человеко-машинной процедуры "урезания ресурсов"

ЛИТЕРАТУРА

1 Ириков В.А., Тренев В.Н. Распределенные системы принятия решений. Теория и приложения. - М.: Наука, 1999

2. Полтавский А.В., Жумабаева А.С., Юрков Н.К. Концепция принятия решений при создании технических систем. Труды Международного симпозиума «НАДЁЖНОСТЬ И КАЧЕСТВО» в 2т./ под ред. Н.К. Юркова.- Пенза: ПГУ, 2016. - 1 том, с.8-13.

УДК 615.035.4

Жаднов В.В.

Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва, Россия

МЕТОД ФОРМИРОВАНИЯ НАРАБОТКИ ДО ОТКАЗА ЭЛЕКТРОННЫХ КОМПОНЕНТОВ ПО СПРАВОЧНЫМ ДАННЫМ

Рассмотрены вопросы формирования наработки до отказа электронных компонентов по справочным данным при статистическом моделировании. Предложена модель отказа электронного компонента, которая позволяет получить реализацию наработки электронного компонента с учетом ресурсных отказов и ограничений на величину его наработки. Разработанная модель создана в рамках допущений и ограничений, принятых в действующих нормативных документах. Показана возможность сокращения вычислительных затрат при применении этой модели при статистическом моделировании.

Ключевые слова:

ЭЛЕКТРОННОЕ СРЕДСТВО, ЭЛЕКТРОННЫЙ КОМПОНЕНТ, НАДЕЖНОСТЬ, НАРАБОТКА НА ОТКАЗ, РЕСУРС, СТАТИСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Введение. Универсальным методом расчета показателей надежности электронных средств является метод статистического моделирования» [1]. Этот метод применяют, в основном, для расчета показателей типа «наработка» (метод численного интегрирования). При численном интегрировании с помощью генератора случайных чисел получают реализацию базовой случайной величины ($\hat{x}$) и используя то или иное распределение, рассчитывают реализацию наработки элемента. Анализ нормативных документов [2-4] показал, что для анализа показателей типа «средняя наработка до отказа» и «гамма-процентная наработка до отказа» используется экспоненциальное распределение [2, 3], а при анализе показателей типа «минимальная наработка», «гамма-процентный ресурс» и «средний ресурс» - нормальное распределение ресурса [4].

Применение этих распределений связано с тем, что в период «нормальной эксплуатации» отказы, обусловленные процессами изнашивания и старения, практически не возможны, в то время как на заключительном этапе такие отказы являются преобладающими.

Поэтому при статистическом моделировании для получения адекватных значений наработок элементов необходимо рассматривать и те и другие отказы.

Основная часть

На ранних этапах проектирования для расчетов показателей надежности электронных средств применяются расчетные методы, исходными данными для которых являются справочные данных о характеристиках надежности элементов, которые приводятся в Технических условиях (ТУ) и систематизированы в справочнике [5]. К ним относятся:

- базовая интенсивность отказов в режиме работы ($\lambda_б$);
- гамма-процентный ресурс ($Т_{р.\gamma}$);
- минимальная наработка ($Т_{н.м}$);
- минимальный срок сохраняемости ($Т_{хр.м}$);
- среднегрупповая интенсивность отказов в режиме хранения ($\lambda_{х.с.г.}$).

Кроме этого, в справочнике [5] приведены математические модели интенсивностей отказов для режимов работы и хранения (ожидания) и численные значения их коэффициентов.

Как следует из приведенных выше данных, получение реализации наработки ($\hat{t}_н$) по экспоненциальной модели не вызывает затруднений, то для получения реализации ресурса ($\hat{t}_р$) необходимо определить характеристики его закона распределения.

Значения математического ожидания ($m(t_р)$) и стандартного отклонения ($\sigma(t_р)$), можно определить, используя приведенную в [3] формулу:

$$Т_{н.м}=\frac{1+\nu\cdot\chi_{\gamma_1}}{1+\nu\cdot\chi_{\gamma}}\cdot Т_{р.\gamma}\ . \qquad (1)$$

где: $Т_{н.м}$ - минимальная наработка; ν - коэффициента вариации ресурса; χ_{γ_1} - квантиль функции Лапласа для вероятности γ_1; χ_{γ} - квантиль функции Лапласа для вероятности γ; $Т_{р.\gamma}$ - гамма-процентный ресурс.

В методиках [3] принято, что $\gamma_1 = 0,999$. С учетом этого, разрешив (4) относительно ν получим:

$$\nu=\frac{Т_{р.\gamma}-Т_{н.м}}{\chi_{\gamma}\cdot Т_{н.м}-(-3,09)\cdot Т_{р.\gamma}}\ . \qquad (2)$$

Тогда:

$$m(t_p)=\frac{1}{1+\nu\cdot\chi_{\gamma}}\cdot Т_{р.\gamma}\ , \qquad (3)$$

$$\sigma(t_p)=\nu\cdot m(t_p)\ . \qquad (4)$$

Если принять что закон распределения ресурса усечен в пределах $\pm3,09\bullet\sigma(t_р)$ (т.е. γ также равна 0,999), тогда максимальное значение ресурса будет равно:

$$Т_{р.max}=(1+\nu\cdot3,09)\cdot m(t_р)\ . \qquad (5)$$

Рассмотрим метод формирования реализации наработки до отказа элемента на основе данных, приведенных в справочнике [5] и принятых в нормативных документах [2-4] моделях. Поскольку при статистическом моделировании с помощью генератора случайных чисел получают реализацию базовой случайной величины ($\hat{x}$), то модель отказов, которая должна позволять получать реализацию наработки элемента до отказа ($\hat{t}_{нЭК}$), можно представить в виде:

$$\hat{t}_{нЭК}=f\left(\hat{x},a_1,a_2,...,a_N\right), \qquad (6)$$

где: a_n - n-й параметр модели отказа элемента; N - число параметров.

Таким образом, при построении модели отказов элемента для статистического моделирования необходимо определить вид функции f и численные значения ее параметров с учетом следующих ограничений:

- значения параметров должны определяться на основе справочных данных о характеристиках надежности элемента;
- распределения наработки ($t_н$), ресурса ($t_р$) и срока сохраняемости ($t_{хр}$) элемента должны соответствовать законам распределения, приведенным в [2-4];
- $\hat{t}_{нЭК}$ должна быть не меньше его минимальной наработки ($Т_{н.м}$);
- $\hat{t}_{нЭК}$ должна быть не больше его максимального ресурса ($Т_{р.max}$).

При построении модели отказов элемента для определенности примем, что его модель эксплуатации в течении срока службы ($Т_{с.с}$) - непрерывная работа в предельно-допустимом режиме.

Для выполнения условия $\hat{t}_{нЭК}\geq Т_{н.м}$ в функцию распределения наработки до отказа $F(t_н)$ необходимо ввести параметр сдвига, равный $Т_{н.м}$. В этом случае реализацию наработки для экспоненциальной модели ($\hat{t}_н$) можно определить из уравнения:

$$\hat{x}=\exp\left[-\lambda_э\cdot\left(\hat{t}_н-Т_{н.м}\right)\right], \qquad (7)$$

где: $\lambda_э$ - интенсивность отказов элемента в режиме работы.

Значение $\lambda_э$ определяют по математическим моделям интенсивности отказов, приведенным в справочнике [5]:

$$\lambda_э=\lambda_б\cdot\prod_{n=1}^{N}К_n\ , \qquad (8)$$

где: $\lambda_б$ - базовая интенсивность отказов в режиме работы; $К_n$ - n-й коэффициент модели; N - число коэффициентов.

Значения $\lambda_б$ и $К_n$ определяют по таблицам, приведенным в справочнике [5].

Значение реализации наработки для нормального распределения ($\hat{t}_р$) можно получить используя, например, формулу Бокса-Мюллера.

Поскольку для одного значению $\hat{x}$ получаются значения и $\hat{t}_н$, и $\hat{t}_р$, то для получения «худшего» значения $\hat{t}_{нЭК}$ ее определяют из условия.

$$\hat{t}_{нЭК}=\min\left(\hat{t}_н,\hat{t}_р\right)\ . \qquad (9)$$

Впрочем, очевидно, что с уменьшением $\hat{x}$ до некоторого значения x_1 $\hat{t}_н$ убывает быстрее, чем $\hat{t}_р$, а затем, наоборот, медленнее. Поэтому для снижения объема вычислений при статистическом моделировании можно определить такое значение базовой случайной величины (x_1), при котором выполняется условие $\hat{t}_н>\hat{t}_р$. Это значение можно найти по формуле:

$$x_1=\exp\left[-\lambda_э\cdot\left(Т_{\lambda}-Т_{н.м}\right)\right], \qquad (10)$$

где $Т_{\lambda}$ является решением уравнения:

$$1-e^{-\lambda_э\cdot(Т_{\lambda}-Т_{н.м})}-\frac{C}{\sqrt{2\cdot\pi}}\cdot\int_{Т_{н.м}}^{Т_{\lambda}}e^{-\frac{\left[t_р-m(t_р)\right]^2}{2\cdot\sigma(t_р)^2}}dt_р=0\ , \qquad (11)$$

где: C - нормирующий коэффициент.

Для решения уравнения (11) можно применить, например, метод дихотомии [6].

Поскольку максимальный срок сохраняемости элемента ($T_{хр.max}$) не может быть меньше максимального срока службы ($T_{с.с.max}$), а в рассматриваемой модели эксплуатации максимального ресурса ($T_{р.max}$), то должно выполнятся условие:

$$\hat{t}_{нЭК} \le T_{хр.max} \,. \tag{12}$$

Т.к. в справочнике [5] для элементов приводится только минимальный срок сохраняемости ($T_{хр.м}$), то для проверки этого условия необходимо определить значение $T_{хр.max}$. Однако в [3] методики расчета срока сохраняемости элементов не приведено, но в [7] показано, что расчет срока сохраняемости аналогичен расчету их ресурса. Исходя из этого, для расчета $T_{хр.max}$ необходимо определить вид закона распределения наработки в режиме хранения и его параметры. Для этого рассмотрим формулу, приведенную в [4] для расчета «уточненного» гамма-процентного ресурса ($T_{р.у.\gamma}$):

$$T_{р.у.\gamma} = \frac{T_{р.\gamma}}{K_н} \,, \tag{13}$$

где: $K_н$ - коэффициент нагрузки (по критичному параметру).

Из (13) следует, что значение ν в методиках [3] принято постоянной величиной, не зависящей от режимов и условий применения электронного компонента. Поскольку при $K_н \to 0$ значение $T_{р.у.\gamma} \to T_{хр.\gamma}$, то можно принять допущение о том, что время хранения распределено по нормальному закону и значения ν для режимов работы и хранения (ожидания) также будут одинаковыми.

Значение гамма-процентной вероятности ($\gamma_{хр}$), для которого будем рассчитывать максимальное значение срока сохраняемости в режиме ожидания ($T_{хр.max}$), по аналогии с γ_1 положим равной 99,9%. Тогда:

$$T_{хр.max} = \frac{1+\nu\cdot 3{,}09}{1+\nu\cdot(-3{,}09)}\cdot T_{хр.м} \,, \tag{14}$$

$T_{хр.м}$ - минимальный срок сохраняемости.

Здесь следует иметь в виду, что $T_{хр.max}$ зависит от условий режима хранения (ожидания). Поскольку в данном случае элемент будет находиться в режиме ожидания, то для пересчета срока сохраняемости к заданным условиям режима ожидания элемента можно использовать формулу из [8]:

$$T_{ож.max} = \frac{T_{хр.max}}{K_{t.х}\cdot K_Э} \,. \tag{15}$$

где: $T_{ож.max}$ - максимальный срок ожидания элемента; $K_{t.х}$ - коэффициент, учитывающий изменение интенсивности отказов элемента в режиме хранения (ожидания) в зависимости от температуры окружающей среды; $K_э$ - коэффициент эксплуатации.

Однако в результате может оказаться, что $T_{ож.max} < T_{р.max}$. Тогда, для снижения объема вычислений можно найти такое значение базовой случайной величины (x_2), начиная с которого $\hat{t}_{нЭК}$ будет постоянной величиной, равной $T_{ож.max}$:

$$x_2 = 1 - \chi\cdot C \,, \tag{16}$$

где χ находится из уравнения:

$$T_{ож.max} = (1+\nu\cdot\chi)\cdot m(t_р) \,. \tag{17}$$

Исходя из выше изложенного, модель (1) можно представить в следующем виде:

$$\hat{t}_{нЭК} = \begin{cases} T_{н.м} \text{ при } \hat{x}=1 \\ f_E\left(\lambda_Э, \hat{x}\right) \text{ при } x_1 \le \hat{x} < 1 \\ f_N\left[C, m(t_р), \sigma(t_р), \hat{x}\right] \text{ при } x_2 \le \hat{x} < x_1 \\ T_{ож.max} \text{ при } 0 \le \hat{x} < x_2 \end{cases} \,. \tag{17}$$

Таким образом, модель отказов элемента для статистического моделирования (17) представляет собой функционал $F\left(\hat{x}\right)$, значение которого при $\hat{x}$ = 1 равно $T_{н.м}$, в интервале [x_1, 1] рассчитывается по экспоненциальной модели (f_E), в интервале [x_2, x_1] рассчитывается по модели нормального распределения (f_N), а при $\hat{x} \le x_2$ - равно $T_{ож.max}$ - см. рис. 1.

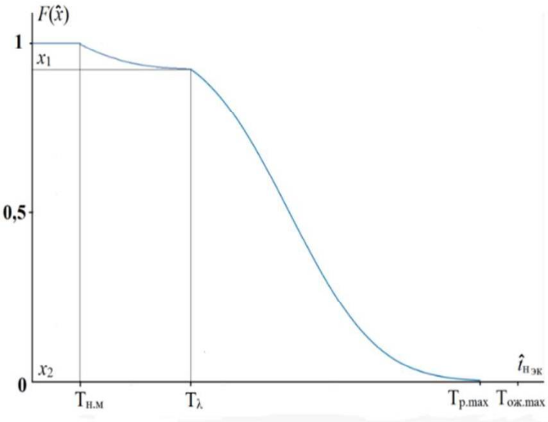

Рисунок 1 - График функции $\hat{t}_{нЭК} = F\left(\hat{x}\right)$

Заключение

Исходя из вышеизложенного, можно сделать вывод о том, что предложенный метод формирования наработки до отказа электронных компонентов по справочным данным позволяет при имитационном моделировании получать реализацию наработки электронного компонента с учетом ресурсных отказов и ограничений на величину его наработки. Этот метод будет использован при создании новой версии системы АСОНИКА-К-Д [9].

Что касается адекватности этой модели, то, с одной стороны, она подтверждается использованием принятых в [2-4] моделей отказов, а с другой стороны - использованием данных, приведенных в [5] и ТУ. Тем не менее, предложенная модель отказов электронных компонентов, как и любая другая математическая модель, может (и должна) корректироваться по результатам испытаний электронных компонентов и их подконтрольной эксплуатации в составе электронных средств.

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 27.301-95. Межгосударственный стандарт. Надежность в технике. Расчет надежности. Основные положения.

2. ОСТ 4Г 0.012.242-84. Отраслевой стандарт. Аппаратура радиоэлектронная. Методика расчета показателей надежности.

3. ОСТ В 4Г 012.241-84. Отраслевой стандарт. Аппаратура радиоэлектронная. Методы расчета показателей надежности в режимах хранения и ожидания и определения продолжительности испытаний, имитирующих длительное хранение.

4. ОСТ 4.012.013-84. Отраслевой стандарт. Аппаратура радиоэлектронная. Определение показателей долговечности.

5. Надёжность ЭРИ: Справочник. - М.: МО РФ, 2006. - 641 с.

6. Гончаров В.А. Методы оптимизации. Учебное пособие. - М.: МИЭТ, 2008. - 188 с.

7. Жаднов В.В. Расчёт надежности электронных модулей: научное издание. - М.: «Солон-Пресс», 2016. - 232 с.

8. Карапузов М.А., Полесский С.Н., Жаднов В.В. Влияние внешних возмущающих факторов на долговечность СВЧ-устройств. / Надежность и качество сложных систем. - 2014. - № 2. - с. 14-21.

9. Жаднов В.В., Кулыгин В.Н. Автоматизированная система расчета показателей долговечности электронных средств // Надежность и качество сложных систем. - 2015. - № 3. - с. 31-38.