

Моделирование реализаций наработок до отказа электронных компонентов с учетом их модели эксплуатации

Жаднов В.В., Национальный исследовательский университет
«Высшая школа экономики»
vzhadnov@hse.ru

Аннотация

В работе рассматривается математическая модель, позволяющая получить реализацию наработки до отказа электронного компонента для заданной модели его эксплуатации. Модель получена в рамках тех ограничений и допущений, которые приняты в нормативных документах по надежности электронных компонентов.

1 Введение

Вопросы повышения точности расчетов надежности радиоэлектронной аппаратуры являются актуальными и в настоящее время.

При этом значительное число исследований в этой области посвящено развитию аналитических методов для оценки надежности структурно-сложных технических систем [1]. В тоже время можно констатировать, что все большее распространение получают методы имитационного моделирования, основанные на методе Монте-Карло [2]. Как правило, метод Монте-Карло применяется для расчетов показателей надежности структурно-сложных технических систем типа «наработка» [3]. Однако при этом получение реализаций наработок электронных компонентов проводится для одного, как правило, наиболее «жесткого», режима применения для получения «нижних» оценок показателей надежности аппаратуры [4].

В этом случае может возникнуть необходимость в повышении надежности, что будет излишним, если модель эксплуатации аппаратуры содержит «облегченные» режимы, а также режимы ожидания, хранения и транспортирования.

Таким образом, для повышения точности расчетов надежности радиоэлектронной аппаратуры методом Монте-Карло, необходимо при получении реализации наработки электронного компонента учитывать его модель эксплуатации и соответствующие ей режимы и условия.

2 Постановка задачи

Исходными данными в задаче получения реализации наработки электронного компонента являются его характеристики надежности и модель эксплуатации.

Характеристики надежности электронных компонентов приводятся в нормативно-технической документации (ТУ), где содержатся данные о показателях безотказности, долговечности и сохраняемости, которые систематизированы в справочниках по надежности [5]. В стандартах по расчетам надежности [6-8] приведены методики расчета характеристик надежности электронных компонентов, учитывающие уровни внешних воздействующих факторов и нагрузок и временные графики их работы [8, 9].

Модель эксплуатации электронного компонента может быть получена на основе модели эксплуатации радиоэлектронной аппаратуры, в которой он применяется.

В соответствии с [10] типовая модель эксплуатации объектов должна содержать:

- заданные режимы (этапы, виды) использования (эксплуатации) объектов;
- уровни внешних воздействующих факторов и нагрузок для каждого режима (этапа, вида) эксплуатации;
- характеристику принятой системы технического обслуживания и ремонта, включающую схему обеспечения запасными частями, инструментом и расходными материалами, укомплектованность ремонтной оснасткой и оборудованием, обслуживающим и проводящим ремонт персоналом требуемой квалификации.

Исходя из этого, математическая задача получения реализации наработки электронного компонента ($\hat{t}_{\text{нэж}}$) может быть представлена в следующем виде:

$$\hat{t}_{\text{нэж}} = f(\hat{t}_1, \hat{t}_2, \dots, \hat{t}_i, \dots, \hat{t}_I) \quad (1)$$

где $\hat{t}_i$ - реализации наработки электронного компонента в i -м режиме и условиях приме-

нения. Таким образом, для решения (1) необходимо определить вид функции f и значения $\hat{t}_i$.

3 Решение задачи

Для определения вида функции f воспользуемся моделью, приведенной в [11-14] для расчета γ -процентного срока службы электронного компонента до списания ($T_{сл\text{усп}}$) с учетом модели его эксплуатации:

$$T_{сл\text{усп}} = \sum_{i=1}^I [K_{и.э}(\text{раб})_i \cdot T_{г\text{р}\text{сп}}(\text{раб})_i] + \sum_{i=1}^J [K_{и.э}(\text{ож})_i \cdot T_{г\text{р}\text{сп}}(\text{ож})_i] + \sum_{j=1}^J [K_{и.э}(\text{хр})_j \cdot T_{г\text{р}\text{сп}}(\text{хр})_j] + \sum_{k=1}^K [K_{и.э}(\text{тр})_k \cdot T_{г\text{р}\text{сп}}(\text{тр})_k] \quad (2)$$

где $K_{и.э}(\text{раб})_i$, $K_{и.э}(\text{ож})_i$ – коэффициенты интенсивности эксплуатации компонента в режиме применения (работы и ожидания) в i -х условиях; $T_{г\text{р}\text{сп}}(\text{раб})_i$, $T_{г\text{р}\text{сп}}(\text{ож})_i$ – гамма-процентные ресурсы компонента в режиме применения (работы и ожидания) в i -х условиях; $K_{и.э}(\text{хр})_j$ – коэффициент интенсивности эксплуатации компонента в режиме хранения в j -х условиях; $T_{г\text{р}\text{сп}}(\text{хр})_j$ – гамма-процентные ресурсы компонента в режиме хранения в j -х условиях; $K_{и.э}(\text{тр})_k$ – коэффициент интенсивности эксплуатации компонента в режиме транспортирования в k -х условиях; $T_{г\text{р}\text{сп}}(\text{тр})_k$ – гамма-процентные ресурсы компонента в режиме транспортирования в k -х условиях; I – общее число условий применения; J – общее число условий хранения; K – общее число условий транспортирования.

На рис 1, в качестве примера, приведено формирование $T_{сл\text{усп}}$ электронного компонента.

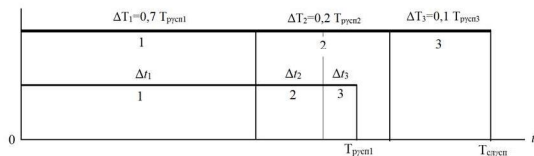


Рис. 1. Формирование срока службы по модели (2)

Как видно из рис. 1, модель эксплуатации изделия содержит 3 режима применения с $K_{и.э1}=0,7$, $K_{и.э2}=0,2$, $K_{и.э3}=0,1$ и $T_{г\text{р}\text{сп}2}=2 \cdot T_{г\text{р}\text{сп}1}$, $T_{г\text{р}\text{сп}3}=3 \cdot T_{г\text{р}\text{сп}1}$. В результате применения модели (1) значения Δt для 2 и 3

режима увеличиваются, что приводит к увеличению $T_{сл\text{усп}}$.

Таким образом, в качестве функции f следует использовать (2). Тогда можно записать, что:

$$\hat{t}_{и.э} = \sum_{i=1}^I \hat{t}_i \quad (3)$$

где $\hat{t}_i$ – реализация наработки в i -ом режиме и условиях; I – общее число режимов и условий в модели эксплуатации.

Для расчета реализации наработки с учетом ресурсных отказов для режима работы ($\hat{t}(\text{раб})_i$) воспользуемся моделью, приведенной в [15-17]:

$$\hat{t}(\text{раб})_i = \begin{cases} T_{н.м.и} & \text{при } \hat{x} = 1 \\ f_E(\lambda_{эi}, T_{н.м.и}, \hat{x}) & \text{при } x_{1i} \leq \hat{x} < 1 \\ f_N[C_i, m(t_p)_i, \sigma(t_p)_i, \hat{x}] & \text{при } x_{2i} \leq \hat{x} < x_{1i} \\ T_{с.с.и} & \text{при } 0 \leq \hat{x} < x_{2i} \end{cases} \quad (4)$$

где: $T_{н.м.и}$ – минимальная наработка; f_E – функция экспоненциального распределения; $\lambda_{эi}$ – интенсивность отказов; f_N – функция усеченного нормального распределения; C_i – нормирующий коэффициент; $m(t_p)_i$ – математическое ожидание ресурса; $\sigma(t_p)_i$ – стандартное отклонение ресурса; $T_{с.с.и}$ – максимальный срок службы; $\hat{x}$ – реализация базовой случайной величины; x_{1i} , x_{2i} – параметры, определяющие область применения моделей f_E и f_N ; i – номер режима работы.

Рис. 2 поясняет расчет $\hat{t}(\text{раб})_i$ по модели (4).

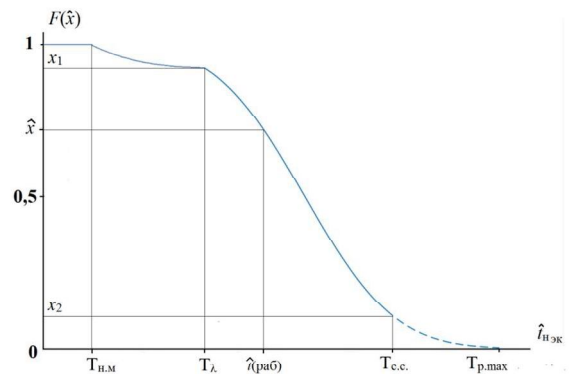


Рис. 2. Определение реализации наработки электронного компонента по модели (4)

Поскольку в модели эксплуатации кроме режима работы могут быть также заданы режимы ожидания и хранения (и/или транспортирования), то для этих режимов можно использовать модель $\hat{t}_i$, аналогичную (4).

Например, для режима хранения (транспортирования) (4) будет иметь вид:

$$\hat{t}(xp)_i = \begin{cases} T_{xp_i} & \text{при } \hat{x}=1 \\ f_E(\lambda_{xp_i}, T_{xp_i}, \hat{x}) & \text{при } x_1 \leq \hat{x} < 1 \\ f_N[C_i, m(t_{xp}_i), \sigma(t_{xp}_i), \hat{x}] & \text{при } x_2 \leq \hat{x} < x_1 \\ T_{c.c_i} & \text{при } 0 \leq \hat{x} < x_2 \end{cases}, \quad (5)$$

где: T_{xp_i} – минимальный срок сохраняемости; f_E – функция экспоненциального распределения; λ_{xp_i} – интенсивность отказов в режиме хранения; f_N – функция усеченного нормального распределения; C_i – нормирующий коэффициент; $m(t_{xp}_i)$ – математическое ожидание срока сохраняемости; $\sigma(t_{xp}_i)$ – стандартное отклонение срока сохраняемости; $T_{c.c_i}$ – максимальный срок службы; $\hat{x}$ – реализация базовой случайной величины; x_{1i} , x_{2i} – параметры, определяющие область применения моделей f_E и f_N ; i – номер режима хранения.

Таким образом, мы определили вид функции (1) и ее параметры:

$$\begin{aligned} \hat{t}_{\text{нэж}} = & \sum_{i=1}^I [K_{\text{и.э}}(\text{раб})_i \cdot \hat{t}(\text{раб})_i] + \\ & + \sum_{i=1}^I [K_{\text{и.э}}(\text{ож})_i \cdot \hat{t}(\text{ож})_i] + \\ & + \sum_{j=1}^J [K_{\text{и.э}}(\text{хр/тр})_j \cdot \hat{t}(\text{хр/тр})_j] \end{aligned}, \quad (6)$$

где $\hat{t}(\text{раб})_i$ – реализация наработки в i -х условиях режима работы; $K_{\text{и.э}}(\text{раб})_i$ – коэффициент интенсивности эксплуатации компонента в режиме работы в i -х условиях; $\hat{t}(\text{ож})_i$ – реализация наработки в i -х условиях режима ожидания; $K_{\text{и.э}}(\text{ож})_i$ – коэффициент интенсивности эксплуатации компонента в режиме ожидания в i -х условиях; $\hat{t}(\text{хр/тр})_j$ – реализация наработки в j -х условиях режима хранения/транспортирования; $K_{\text{и.э}}(\text{хр/тр})_j$ – коэффициент интенсивности эксплуатации компонента в режиме хранения/транспортирования в j -х условиях; I – общее количество условий режима работы и режима ожидания; J – общее количество условий режима хранения/транспортирования.

Рис. 3 поясняет расчет $\hat{t}_{\text{нэж}}$ по модели (6).

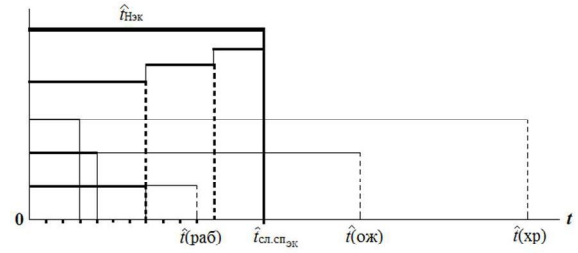


Рис. 3. Формирование реализации наработки электронного компонента по модели (6)

4 Пример применения модели

Поскольку $\hat{t}_{\text{нэж}}$ (см. рис 3) представляет собой реализацию срока службы компонента до списания ($\hat{t}_{\text{сл.сп.эж}}$), то ее использование в статистическом моделировании позволяет определить следующие показатели долговечности по [10]:

- гамма-процентный срок службы до списания – $T_{\text{сл.γ.сп}}$;
- средний срок службы до списания – $T_{\text{сл.ср.сп}}$, а так же позволяет определить вероятность безотказной работы за заданный срок службы – $P(t_{c.c})$, минимальный срок службы – $T_{\text{сл.м}}$ и назначенный срок службы – $T_{\text{сл.н}}$.

Для определения показателей безотказности в режиме работы на основе (6) можно получить реализацию наработки ($\hat{t}_{\text{рэк}}$):

$$\hat{t}_{\text{рэк}} = \left[\frac{\sum_{i=1}^I K_{\text{и.э}}(\text{раб})_i}{1 - \sum_{i=1}^I K_{\text{и.э}}(\text{раб})_i} \right] \cdot \sum_{i=1}^I [K_{\text{и.э}}(\text{раб})_i \cdot \hat{t}(\text{раб})_i], \quad (7)$$

где $\hat{t}(\text{раб})_i$ – реализация наработки в i -х условиях режима работы; $K_{\text{и.э}}(\text{раб})_i$ – коэффициент интенсивности эксплуатации компонента в режиме работы в i -х условиях; I – общее количество условий режимов работы.

Поскольку предельным состоянием компонента является его отказ в режиме работы, то значение $\hat{t}_{\text{рэк}}$ будет численно равно реализации ресурса до списания, что позволяет при статистическом моделировании определить следующие показатели безотказности и долговечности по [10]:

- вероятность безотказной работы за заданную наработку – $P(t_{б.р})$;
- гамма-процентную наработку до отказа – T_{γ} ;
- гамма-процентный ресурс до списания – $T_{\text{р.γ.сп}}$;

- среднюю наработку до отказа – $T_{ср}$;
 - средний ресурс до списания – $T_{р.ср.сп}$,
- а так же позволяет определить минимальную наработку ($T_{н.м}$) и назначенный ресурс ($T_{р.н}$).

Для определения показателей безотказности в режиме ожидания на основе (6) можно получить реализацию наработки ($\hat{t}_{ожэк}$):

$$\hat{t}_{ожэк} = \left[\frac{\sum_{i=1}^I K_{и.э}(ож)_i}{1 - \sum_{i=1}^I K_{и.э}(ож)_i} \right] \cdot \sum_{i=1}^I [K_{и.э}(ож)_i \cdot \hat{t}(ож)_i], \quad (8)$$

где $\hat{t}(ож)_i$ - реализация наработки в i -х условиях режима ожидания; $K_{и.э}(ож)_i$ – коэффициент интенсивности эксплуатации компонента в режиме ожидания в i -х условиях; I – общее количество условий режима ожидания.

Используя $\hat{t}_{ожэк}$ при статистическом моделировании можно определить следующие показатели безотказности по [10]:

- вероятность безотказного ожидания применения по назначению за заданное время ожидания применения по назначению – $P(t_{ож})$,
- а также гамма-процентный срок ожидания применения по назначению ($T_{ож.γ}$), средний срок ожидания применения по назначению ($T_{ож.ср}$), минимальный срок ожидания применения по назначению ($T_{ож.м}$) и назначенный срок ожидания применения по назначению ($T_{ож.н}$).

Для определения показателей сохраняемости в режиме хранения на основе (6) можно получить реализацию наработки ($\hat{t}_{хрэк}$):

$$\hat{t}_{хрэк} = \left[\frac{\sum_{j=1}^{J_{хр}} K_{и.э}(хр)_j}{1 - \sum_{j=1}^{J_{хр}} K_{и.э}(хр)_j} \right] \cdot \sum_{j=1}^{J_{хр}} [K_{и.э}(хр)_j \cdot \hat{t}(хр)_j], \quad (9)$$

где $\hat{t}(хр)_j$ - реализация наработки в j -х условиях режима хранения; $K_{и.э}(хр)_j$ – коэффициент интенсивности эксплуатации компонента в режиме хранения в j -х условиях; $J_{хр}$ – общее количество условий режима хранения.

Используя $\hat{t}_{хрэк}$ при статистическом моделировании можно определить следующие показатели сохраняемости по [10]:

- вероятность безотказного хранения за заданный срок хранения – $P(t_{хр})$;

- гамма-процентный срок сохраняемости – $T_{с.γ}$;
 - средний срок сохраняемости – $T_{с.ср}$,
- а также минимальный срок сохраняемости ($T_{с.м}$) и назначенный срок сохраняемости ($T_{с.н}$).

Для определения показателей транспортирования на основе (6) можно получить реализацию дальности транспортирования ($\hat{l}_{трэк}$):

$$\hat{l}_{трэк} = \left[\frac{\sum_{j=1}^{J_{тр}} K_{и.э}(тр)_j}{1 - \sum_{j=1}^{J_{тр}} K_{и.э}(тр)_j} \right] \cdot \sum_{j=1}^{J_{тр}} [K_{и.э}(тр)_j \cdot \hat{l}_j], \quad (10)$$

где $\hat{l}_j$ - реализация дальности транспортирования в j -х условиях режима транспортирования; $K_{и.э}(тр)_j$ – коэффициент интенсивности эксплуатации компонента в режиме транспортирования в j -х условиях; $J_{тр}$ – общее количество условий режима транспортирования.

Поскольку по модели (5) получается реализация времени до отказа компонента, а не дальности транспортирования до отказа, то для ее получения необходимо изменить параметры в (5), имеющие размерность [ч.] и [ч⁻¹], на аналогичные, но имеющие размерность [км] и [км⁻¹].

Пересчет значений параметров модели (5) осуществляют с использованием значения средней скорости транспортирования ($V_{срi}$), приведенного в модели эксплуатации для i -х условий транспортирования.

Так, например, параметр « $T_{хрi}$ » в (5) должен быть заменен на параметр «минимальная дальность транспортирования» ($L_{тр.мi}$), которая определяется как:

$$L_{тр.мi} = T_{хр.мi} \cdot V_{срi}. \quad (11)$$

Аналогично пересчитывают и значения других параметров модели (5).

Тогда, используя $\hat{l}_{трэк}$ при статистическом моделировании можно определить следующие показатели транспортирования по [10]:

- вероятность безотказного транспортирования за заданную дальность транспортирования – $P(l_{тр})$,
- а также гамма-процентную дальность транспортирования ($L_{тр.γ}$), среднюю дальность транспортирования ($L_{тр.ср}$), минимальную

дальность транспортирования ($L_{тр.м}$) и назначенную дальность транспортирования ($L_{тр.н}$).

5 Заключение

Таким образом, предложенная модель позволяет получить реализации наработок электронных компонентов не только для заданной модели их эксплуатации, но и для каждого из режимов и условий применения.

Это позволяет за одно статистическое моделирование определить реализации наработок компонента, необходимых не только для расчетов показателей безотказности типа «наработка», но и показателей долговечности и сохраняемости.

Вместе с тем следует иметь в виду, что и предлагаемая модель не гарантирует 100% точности расчета надежности изделий, поэтому полученные оценки показателей надежности должны корректироваться по результатам испытаний и/или подконтрольной эксплуатации.

Список литературы

- [1] Жаднов В.В., Жаднов И.В., Полесский С.Н. *Современные проблемы автоматизации расчётов надёжности*. / Надёжность. - 2007. - № 2. - с. 3-12.
- [2] Половко А.М., Гуров С.В. *Основы теории надежности*. - СПб: БХВ-Петербург, 2006. - 702 с.
- [3] ГОСТ 27.301-95. *Надежность в технике. Расчет надежности. Основные положения*.
- [4] Жаднов В.В., Кулыгин В.Н. *Применение метода статистического моделирования для автоматизации прогнозирования долговечности при проектировании электронных средств*. / Вестник компьютерных и информационных технологий. - 2018. - № 11. - с. 28-36.
- [5] *Надёжность ЭРИ: Справочник*. - М.: МО РФ, 2006. - 641 с.
- [6] ОСТ 4Г 0.012.242-84. *Аппаратура радиоэлектронная. Методика расчёта показателей надёжности*.
- [7] ОСТ 4.012.013-84. *Аппаратура радиоэлектронная. Определение показателей долговечности*.
- [8] ОСТ В 4Г 0.012.241-84. *Аппаратура радиоэлектронная. Методы расчёта показателей надёжности в режимах хранения и ожидания и определения продолжительности испытаний, имитирующих длительное хранение*.
- [9] РДВ 319.01.19-98. *Радиоэлектронные системы военного назначения. Методика оценки и расчёта запасов в комплексах ЗИП*.
- [10] ГОСТ 27.003-2016. *Надежность в технике. Состав и общие правила задания требований по надёжности*.
- [11] Жаднов В.В. *Учет влияния внешних воздействующих факторов при прогнозировании характеристик безотказности и долговечности электронной компонентной базы*. / Труды Международного симпозиума «НАДЕЖНОСТЬ И КАЧЕСТВО»: в 2 т. // Под ред. Н.К. Юркова. - Пенза: ПГУ, 2016. - с. 13-18. - т. 1.
- [12] I.A. Ivanov, P.S. Korolev, S.N. Poleskiy, V.V. Zhadnov. *The Design Procedure of Specified Operating Life of Fiber-optic Cables*. / Radio Electronics, Computer Science, Control. - 2016. - No. 2. - p. 7-14.
- [13] Жаднов В.В. *Расчёт надёжности электронных модулей: научное издание*. - М.: Солон-Пресс, 2016. - 232 с. (Серия «Библиотека студента»).
- [14] В.В. Жаднов, И.А. Иванов, П.С. Королев, С.Н. Полесский. *Оценка уточненного ресурса оптических кабелей с учетом условий эксплуатации*. / Известия вузов. Электроника. - 2016. - т. 21. - № 6. - с. 589-592.
- [15] Жаднов В.В. *Статистическое моделирование наработок электронных компонентов с учетом ресурсных отказов*. / Новые информационные технологии в автоматизированных системах: материалы двадцать первого научно-практического семинара. - М.: Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, 2018. - с. 245-248.
- [16] Жаднов В.В. *Метод формирования наработки до отказа электронных компонентов по справочным данным*. / Труды Международного симпозиума НАДЕЖНОСТЬ И КАЧЕСТВО. Т. 1. // Под общ. ред.: Н.К. Юркова. - Пенза: ПГУ, 2018. - с. 35-37.
- [17] В.В. Жаднов. *Модель отказов электронных компонентов для расчёта надежности*. / Известия вузов. Электроника. - 2018. - т. 23. - № 4.