Статистическое моделирование наработок электронных компонентов с учетом ресурсных отказов

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

Аннотация

В докладе рассматриваются вопросы создания модели отказов электронных компонентов для имитационного моделирования отказов электронного оборудования. Модель предназначена для расчета реализаций наработок электронных компонентов при имитационном моделировании. В отличие от стандартизованных моделей отказов электронных компонентов предлагаемая модель позволяет одновременно учитывать их характеристики безотказности, долговечности и сохраняемости.

1 Введение

Модель надежности – это математическая модель электронного компонента, используемая для прогнозирования или оценки надежности [1]. Анализ нормативных документов [2-4] показал, что для оценки показателей надежности электронных компонентов используются модели, представляющие собой функции распределения времени. В [5] такие функции распределения называют моделью отказов.

Как следует из [2, 3] для оценки безотказности и сохраняемости используется экспоненциальное распределение наработки до отказа, а для оценки долговечности - нормальное распределение ресурса [2-4].

Одной из причин, которые определили набор моделей отказов в [5] является то, что «…расчеты надежности численными методами и методами моделирования не отвечают требованиям инженерной практики». Это может было и верно в 80-х годах прошлого века, но вряд ли является актуальным в настоящее время.

Кроме того, в [6] указано, что «Универсальным методом расчета … служит метод статистического моделирования». Однако этот метод применяют, в основном, для расчета показателей типа «средней наработки» (метод численного интегрирования).

Вместе с тем, развитие методов имитационного моделирования процессов отказов электронного оборудования вызывает необходимость создание таких моделей отказов, которые бы позволяли получать адекватные значения реализаций наработок на основе справочных данных о характеристиках надежности электронных компонентов.

2 Характеристики надежности электронных компонентов

Характеристики надежности электронных компонентов приводятся в Data Sheet и систематизированы в справочнике [7]. К ним относятся:

- базовая интенсивность отказов в режиме работы;
- гамма-процентный ресурс;
- минимальная наработка;
- минимальный срок сохраняемости;
- базовая интенсивность отказов в режиме хранения;

Кроме этого, в справочнике [7] приведены математические модели интенсивностей отказов для режимов работы и хранения и численные значения их коэффициентов.

Например, для резистора типа Р1-11-0,25-4,7кОм±5% АЛЯР.434110.004ТУ, в справочнике [7] приведены следующие данные:

- базовая интенсивность отказов в режиме работы $\lambda_б = 0{,}063 \cdot 10^{-6}$ ч$^{-1}$;
- 95-процентный ресурс $T_{р.\gamma}$ = 60 тыс. ч. (во всех режимах по ТУ);
- минимальная наработка $T_{н.м}$ = 30 тыс. ч. (во всех режимах по ТУ);
- минимальный срок сохраняемости $T_{хр.м}$ = 20 лет;
- базовая интенсивность отказов в режиме хранения $\lambda_{хр.б} = 0{,}0072 \cdot 10^{-8}$ ч$^{-1}$.

Кроме того в ТУ приведено значение максимальной рабочей температуры при номинальной мощности рассеяния, равное 70 ^{0}С.

3 Формирование реализаций наработок электронных компонентов

Используя эти данные и методики, приведенные в [2-4] рассмотрим процесс получения реализации наработки резистора для предельно-допустимого режима работы.

Из [2] и [4] следует, что наработка в режиме работы и хранения является случайной величиной, распределенной по экспоненциальному закону. Из [3] следует, что ресурс является случайной величиной, распределенной по нормальному закону.

Значение интенсивности отказов в режиме работы ($\lambda_э$) рассчитаем по модели справочника [7]:

$$\lambda_э=\lambda_б\cdot К_р\cdot К_R\cdot К_м\cdot К_{стаб}\cdot К_э\cdot К_{пр}=$$
$$=0,063\cdot 10^{-6}\cdot 1,71\cdot 0,7\cdot 0,7\cdot 1\cdot 1\cdot 1=0,0527877\cdot 10^{-6}\ ч^{-1}.$$

В расчете принято, что приемка - «5», а группа эксплуатации - 1.1.

Значение математического ожидания ($m(t_р)$ и стандартного отклонения $\sigma(t_р)$ найдем, используя формулу (1), приведенную в [3]:

$$Т_{н.м}=\frac{1-\nu\cdot\chi_{\gamma_1}}{1-\nu\cdot\chi_{\gamma}}\cdot Т_{р.\gamma}\quad. \tag{1}$$

Принимая во внимание, что в [3] γ_1 = 99,9%, подставим численные значения в формулу (1) и разрешив ее относительно коэффициента вариации (ν), получим:

$$Т_{н.м}=\frac{1-\nu\cdot\chi_{\gamma_1}}{1-\nu\cdot\chi_{\gamma}}\cdot Т_{р.\gamma}\Rightarrow$$
$$30000=\frac{1-\nu\cdot 3,09}{1-\nu\cdot 1,645}\cdot 60000\Rightarrow \nu=0,22.$$

Тогда:

$$m(t_p)=\frac{1}{1-\nu\cdot\chi_{\gamma}}\cdot Т_{р.\gamma}=$$
$$=\frac{1}{1-0,22\cdot 1,645}\cdot 60000=94029\ ч.$$
$$\sigma(t_p)=\nu\cdot m(t_p)=0,22\cdot 94029=20686\ ч.$$

При имитационном моделировании с помощью генератора случайных чисел получают реализацию базовой случайной величины ($\hat{x}$) и для нее рассчитывают реализации наработки ($\hat{t}_н$) и ресурса ($\hat{t}_р$).

На основе значений ($\hat{t}_н$) и ($\hat{t}_р$) находим значение наработки резистора ($\hat{t}_{нэк}$), исходя из следующих соображений.

Поскольку по определению $Т_{н.м}$ - это время, в течении которого отказ электронного компонента не возможен и его следует рассматривать как параметр сдвига функции распределения ресурса. В этом случае если $\hat{t}_н \le Т_{н.м}$ и $\hat{t}_р \le Т_{н.м}$, то $\hat{t}_{нэк}=Т_{н.м}$ (в нашем примере $\hat{t}_{нэк}=30000$ ч.).

В противном случае возможны три варианта:

$$\hat{t}_р>\hat{t}_н; \tag{2}$$
$$\hat{t}_р<\hat{t}_н; \tag{3}$$
$$\hat{t}_р=\hat{t}_н.; \tag{4}$$

Очевидно, что в первых двух вариантах в качестве критерия выбора того или иного значения $\hat{t}_{нэк}$ следует принять:

$$\hat{t}_{нэк}=\min\left(\hat{t}_р,\hat{t}_н\right). \tag{5}$$

Для того, чтобы определить, насколько верно (2), рассчитаем значения $\hat{t}_н$ для $\hat{x}$ = 0,999.

$$\hat{x}=\exp\left(-\lambda_э\cdot\hat{t}_н\right)\Rightarrow$$
$$0,999=\exp\left(-0,0527877\cdot 10^{-6}\cdot\hat{t}_н\right)\Rightarrow\hat{t}_н=18953\ ч.$$

Полученный результат $\hat{t}_н$ < $Т_{н.м}$ свидетельствует о том, что функция экспоненциального распределения убывает быстрее, чем нормального.

Найдем значение $\hat{x}$ для $\hat{t}_н$ = $Т_{н.м}$:

$$\hat{x}=\exp\left(-\lambda_э\cdot\hat{t}_н\right)=$$
$$=\exp\left(-0,0527877\cdot 10^{-6}\cdot 30000\right)=0,998417.$$

Из этого следует, что для обеспечения выполнения условия (5) при $t \ge Т_{н.м}$ только начиная с $\hat{x} \ge 0,998417$ необходимо вычислять $\hat{t}_{нэк}$ как $\hat{t}_{нэк}$ = $\hat{t}_н$.

Очевидно, что с уменьшением значения $\hat{x}$ значение $\hat{t}_н$ будет возрастать, причем быстрее, чем значение $\hat{t}_р$. В подтверждение этого найдем значения $\hat{t}_н$ и $\hat{t}_р$ для $\hat{x}$ = 0,997.

$$0,997=\exp\left(-0,0527877\cdot 10^{-6}\cdot\hat{t}_н\right)\Rightarrow\hat{t}_н=56916\ ч.$$
$$\hat{t}_р=\left(1-\nu\cdot\chi_{\gamma=0,997}\right)\cdot m(t_p)=\left(1-0,22\cdot 2,75\right)\cdot 94029=37141\ ч.$$

Как следует из проведенных расчетов, при значении $\hat{x} \geq \hat{x}_2$ начинает выполняться условие (3) и тогда необходимо вычислять $\hat{t}_{\text{нэк}}$ как $\hat{t}_{\text{нэк}} = \hat{t}_{\text{р}}$.

Значение $\hat{x}_2$ можно проще определить из уравнения:

$$\hat{x}_2 = \exp\left(-\lambda_{\text{э}} \cdot y\right),$$

где y является решением уравнения:

$$e^{-\lambda_{\text{э}} \cdot y} = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \int_{-\infty}^{y} e^{-\frac{\left[t_{\text{р}} - m(t_{\text{р}})\right]^2}{2 \cdot \sigma(t_{\text{р}})^2}} \, dt_{\text{р}} . \qquad (6)$$

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

Поскольку функция $P(t_{\text{р}})$ определена на интервале $[-\infty,+\infty]$, то при $x \to 0$ $\hat{t}_{\text{р}} \to +\infty$, а, следовательно, и $\hat{t}_{\text{нэк}}$. Это противоречит здравому смыслу, т.к. ресурс не может быть больше срока сохраняемости.

Однако в [4] методики расчета срока сохраняемости электронных компонентов не приведено, но в [8] показано, что расчет срока сохраняемости аналогичен расчету их ресурса. Используя общепринятое допущение о том, что режиме работы и хранения (ожидания) ν можно считать постоянной величиной, а значение гамма-процентной вероятности ($\gamma_{\text{хр}}$), для которого будем рассчитывать максимальное значение срока сохраняемости в режиме ожидания ($T_{\text{хр.max}}$), по аналогии с γ_1 положим равной 99,9%. Принимая во внимание, что 20 лет - это 175200 ч. получим:

$$T_{\text{хр.max}} = \frac{1+\nu \cdot \chi_{\gamma_{\text{хр}}}}{1-\nu \cdot \chi_{\gamma_{\text{хр}}}} \cdot T_{\text{хр.м}} = \frac{1+0{,}22 \cdot 3{,}09}{1-0{,}22 \cdot 3{,}09} \cdot 175200 = 919116 \text{ ч. (105 г.).}$$

Используя формулу пересчета срока сохраняемости к заданным условиям режима хранения (ожидания) из [8]:

$$T_{\text{з}} = \frac{T_{\text{хр.max}}}{K_{t.\text{х}} \cdot K_{\text{Э}}} \qquad (7)$$

для максимальной рабочей температуры равной 70 ^{0}C и группы эксплуатации - 1.1 получим:

$$T_{\text{з}} = \frac{919116}{1{,}3 \cdot 1} = 707012 \text{ ч. (80,7 г.).}$$

Найдем соответствующее этому значению срока сохраняемости в режиме хранения (ожидания) значение $\hat{x}$. Для этого положим, что $\hat{t}_{\text{р}_\text{з}} = T_{\text{з}}$:

$$\hat{t}_{\text{р}_\text{з}} = \left(1+\nu \cdot \chi\right) \cdot m(t_{\text{р}}) \Rightarrow$$

$$707012 = \left(1+0{,}22 \cdot \chi\right) \cdot 94029 \Rightarrow \chi = 4{,}476 .$$

При χ = 4,5 вероятность равна 0,999997. Тогда:

$$\hat{x}_3 = 1 - 0{,}999997 = 0{,}000003 .$$

Для сравнения найдем значение $\hat{x}$ для экспоненциальной модели:

$$\hat{x}_3 = \exp\left(-\lambda_{\text{э}} \cdot \hat{t}_{\text{р}_\text{з}}\right) = \exp\left(-0{,}0527877 \cdot 10^{-6} \cdot 707012\right) = 0{,}963 .$$

Как видно из полученных результатов, значения функции нормального распределения убывают быстрее, чем экспоненциального. Тогда при $\hat{x}_3 \geq 4{,}476$ $\hat{t}_{\text{нэк}} = 707012$ ч.

Таким образом, модель отказов электронного компонента представляет собой функцию распределения, аргумент которой в интервале $[1,\ \hat{x}_1]$ равен $T_{\text{н.м}}$, в интервале $[\hat{x}_1,\ \hat{x}_2]$ рассчитывается по экспоненциальной модели, в интервале $[\hat{x}_2,\ \hat{x}_3]$ рассчитывается по модели нормального распределения, а при $\hat{x} > \hat{x}_3$ - равен $T_{\text{з}}$, которое рассчитывается по формуле (7).

4 Заключение

Исходя из вышеизложенного, можно сделать вывод о том, что предложенная модель отказов электронных компонентов позволяет при имитационном моделировании получать реализацию наработки электронного компонента с учетом ресурсных отказов и ограничения на величину его наработки.

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 [7]. Тем не менее, предложенная модель, как и любая другая математическая модель, может (и должна) корректироваться по результатам испытаний электронных компонентов и их подконтрольной эксплуатации в составе электронного оборудования.

Благодарности

Данное научное исследование (№ 15-05-0029) выполнено при поддержке Программы «Научный фонд НИУ ВШЭ» в 2015/16 гг.

Список литературы

[1] ГОСТ 27.002-2015. Межгосударственный стандарт. Надежность в технике. Термины и определения.

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

[3] ОСТ 4.012.013-84. Отраслевой стандарт. Аппаратура радиоэлектронная. Определение показателей долговечности.

[4] 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.

[5] ГОСТ 27.005-97. Межгосударственный стандарт. Надежность в технике. Модели отказов. Основные положения.

[6] ГОСТ 27.301-95. Межгосударственный стандарт. Надежность в технике. Расчет надежности. Основные положения.

[7] Надёжность ЭРИ: Справочник. - М.: МО РФ, 2006. - 641 с.

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