

Модель отказов электронных компонентов для расчета надежности

В.В. Жаднов

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

vzhadnov@hse.ru

Применяемые в инженерной практике типовые процедуры расчетной оценки характеристик надежности электронных компонентов (аналитические методы) имеют ряд существенных ограничений. Переход к численным методам, позволяющим снять эти ограничения, вызывает необходимость создания модели отказов электронных компонентов для расчета показателей надежности электронных средств методом имитационного моделирования. В работе исследована типовая процедура расчетной оценки характеристик надежности электронных компонентов с помощью методов, моделей и алгоритмов, применяемых для анализа проектного уровня надежности электронных средств методом Монте-Карло. Для повышения качества проектных работ усовершенствован метод расчета надежности электронных средств, учитывающий характеристики безотказности, долговечности и сохраняемости электронных компонентов. Для разработки модели использованы методы теории надежности, теории вероятностей и вычислительной математики. Созданная модель отказов электронных компонентов представляет собой функционал, связывающий реализацию наработки и базовой случайной величины. При этом параметры модели рассчитаны на основе данных о характеристиках надежности их зависимостей от режимов и условий применения электронных компонентов, что показано на конкретном примере. В отличие от стандартизованных моделей отказов электронных компонентов предлагаемая модель позволяет одновременно учитывать ограничения, налагаемые нормированными в технической документации характеристиками безотказности, долговечности и сохраняемости.

Ключевые слова: электронный компонент; надежность; модель отказов; наработка; имитационное моделирование

Для цитирования: Жаднов В.В. Модель отказов электронных компонентов для расчета надежности // Изв. вузов. Электроника. – 2018. – Т. 23. – № 4. – С. 353–361. DOI: 10.24151/1561-5405-2018-23-4-353-361

Failure Model of Electronic Components for Simulation

V.V. Zhadnov

National Research University «Higher school of economics», Moscow, Russia

vzhadnov@hse.ru

Abstract: The standard procedures used in the engineering practice for the dependability prediction of electronic equipment (analytical methods) have a number of significant limitations. Turning to numerical methods, allowing the removal of these limitations, causes the necessity to create the failure model of electronic components for the dependability prediction of electronic components. The aim of the present research is to improve the design work quality by improving the dependability prediction of electronic equipment, taking into account the reliability, durability and storability of electronic components. To develop the failure model, the methods of the dependability theory, the probability theory and computational mathematics have been developed. A failure model of electronic components, representing the functional, linking the implementation of the running time and the base random variable, has been created. In this case, the model parameters have been calculated on the basis of the data on dependability characteristics of their dependencies on the modes and conditions for using the electronic components, as shown on a specific example. Unlike the standardized failure model of electronic components, the proposed model permits simultaneously to take into account the limitations, imposed by the characteristics of reliability, durability and storability, normalized in the Data Sheet.

Keywords: electronic component; dependability; failure model; operating time; simulation

For citation: Zhadnov V.V. Failure model of electronic components for simulation. *Proc. Univ. Electronics*, 2018, vol. 23, no. 4, pp. 353–361. DOI: 10.24151/1561-5405-2018-23-4-353-361

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, 4], для оценки безотказности и сохраняемости используется экспоненциальное распределение наработки до отказа, для оценки долговечности – нормальное распределение ресурса [3], а в качестве «универсальной» модели в [5] рекомендовано применять диффузионное распределение. Однако применение этой модели на ранних этапах проектирования ограничено требованием экспериментального определения ее параметров [6, 7].

Определенный в [5] набор моделей отказов неактуален, так как в настоящее время в инженерной практике для расчетов надежности широко применяются компьютерные программы [7]. Кроме того, в [8] указано, что универсальным методом расчета служит метод статистического моделирования. Однако этот метод применяется в основном для расчета показателей типа «наработка» (метод численного интегрирования).

Развитие методов имитационного моделирования процессов отказов электронных средств обусловило необходимость создания таких моделей отказов электронных компонентов, которые позволят получить адекватные значения реализаций наработок на основе справочных данных о характеристиках надежности.

Характеристики надежности электронных компонентов. Характеристики надежности электронных компонентов приводятся в Технических условиях (ТУ) и систематизированы в справочнике [9]. К ним относятся базовая интенсивность отказов в режиме работы; гамма-процентный ресурс; минимальная наработка; минимальный срок сохраняемости; базовая интенсивность отказов в режиме хранения. Также в справочнике приведены математические модели интенсивностей отказов для режимов работы и хранения (ожидания) и численные значения их коэффициентов. Представленная в нем информация получена по результатам:

- периодических испытаний электронных компонентов на безотказность, долговечность, ресурс и сохраняемость;
- опытного хранения электронных компонентов на базах опытного хранения и климатических станциях;
- специальной подконтрольной эксплуатации электронных компонентов в составе электронных средств разных классов;
- испытаний и эксплуатации электронных средств различного назначения;
- специальных испытаний;
- экспериментальных и теоретических работ по исследованию надежности и анализу причин отказов электронных компонентов.

Разработка модели отказов электронных компонентов. Рассмотрим процесс построения модели отказов электронного компонента для статистического моделирования на основе данных, приведенных в [9] и принятых в нормативных документах [2–4].

При статистическом моделировании с помощью генератора случайных чисел получают реализацию базовой случайной величины (\hat{x}). Поэтому модель отказов, которая должна позволять получать реализацию наработки электронного компонента до отказа ($\hat{t}_{н.э.к}$), можно представить в виде

$$\hat{t} = f(\hat{x}, a_1, a_2, \dots, a_n, \dots, a_N), \quad (1)$$

где a_n – n -й параметр модели отказа электронного компонента; N – число параметров.

Таким образом, при построении модели отказов электронного компонента 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 электронного компонента;
- распределения наработки $t_{н.э.к}$, ресурса $t_{р.э.к}$ и срока сохраняемости $t_{хр}$ электронного компонента должны соответствовать законам распределения, приведенным в [2–4];
- наработка электронного компонента $\hat{t}_{н.э.к}$ должна быть не меньше его минимальной наработки ($T_{н\ min}$) и не больше его максимального ресурса $T_{р\ max}$.

При построении модели отказов электронного компонента для определенности примем, что его модель эксплуатации в течение срока службы $T_{с.с}$ – непрерывная работа в предельно допустимом режиме. Из [2, 4] следует, что наработка в режиме работы и хранения является случайной величиной, распределенной по экспоненциальному закону. Согласно [3] ресурс есть случайная величина, распределенная по нормальному закону.

Поскольку $\hat{t}_{\text{н.э.к}} \geq T_{\text{н min}}$, то $T_{\text{н min}}$ можно рассматривать как параметр сдвига функции распределения наработки до отказа. Тогда реализацию наработки в режиме работы $\hat{t}_{\text{н}}$ можно определить из уравнения

$$\hat{x} = \exp[-\lambda_{\text{э.к}} \cdot (\hat{t}_{\text{н}} - T_{\text{н min}})], \quad (2)$$

где $\lambda_{\text{э.к}}$ – интенсивность отказов электронного компонента в режиме работы.

Значение $\lambda_{\text{э.к}}$ определяют по математическим моделям интенсивности отказов, приведенным в [9]:

$$\lambda_{\text{э.к}} = \lambda_6 \cdot \prod_{n=1}^N K_n, \quad (3)$$

где λ_6 – базовая интенсивность отказов в режиме работы; K_n – n -й коэффициент модели; N – число коэффициентов. Значения λ_6 и K_n определяют по таблицам, приведенным в [9].

Для расчета реализации ресурса $\hat{t}_{\text{р}}$ найдем значения его математического ожидания $m(t_{\text{р}})$ и стандартного отклонения $\sigma(t_{\text{р}})$, используя приведенную в [3] формулу

$$T_{\text{н min}} = \frac{1 + v \cdot \chi_{\gamma_1}}{1 + v \cdot \chi_{\gamma}} \cdot T_{\text{р } \gamma}, \quad (4)$$

где v – коэффициент вариации ресурса; χ_{γ_1} – квантиль функции Лапласа для вероятности γ_1 ; χ_{γ} – квантиль функции Лапласа для вероятности γ ; $T_{\text{р } \gamma}$ – гамма-процентный ресурс.

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

$$v = \frac{T_{\text{р } \gamma} - T_{\text{н min}}}{\chi_{\gamma} \cdot T_{\text{н min}} - (3,09) \cdot T_{\text{р } \gamma}}. \quad (5)$$

Тогда

$$m(t_{\text{р}}) = \frac{1}{1 + v \cdot \chi_{\gamma}} \cdot T_{\text{р } \gamma}, \quad (6)$$

$$\sigma(t_{\text{р}}) = v \cdot m(t_{\text{р}}). \quad (7)$$

Для расчета максимального значения ресурса по аналогии с $T_{\text{н min}}$ примем, что $\gamma = 0,999$. Тогда

$$T_{\text{р max}} = (1 + v \cdot 3,09) \cdot m(t_{\text{р}}). \quad (8)$$

Таким образом, закон распределения ресурса нормальный, усеченный в пределах $\pm 3,09 \cdot \sigma(t_{\text{р}})$ и, следовательно, для него по значению \hat{x} можно определить значение $\hat{t}_{\text{р}}$.

Поскольку для одного \hat{x} получаются значения и $\hat{t}_{\text{н}}$, и $\hat{t}_{\text{р}}$, то для определения «худшего» значения $\hat{t}_{\text{н.э.к}}$ применяется условие

$$\hat{t}_{\text{н.э.к}} = \min(\hat{t}_{\text{н}}, \hat{t}_{\text{р}}). \quad (9)$$

Очевидно, что с уменьшением \hat{x} до некоторого значения x_1 параметр \hat{t}_n убывает быстрее, чем \hat{t}_p , а затем, наоборот, медленнее.

Значение \hat{x}_1 можно найти по формуле

$$\hat{x}_1 = \exp[-\lambda_{\text{эк}} \cdot (T_\lambda - T_{n \min})]. \quad (10)$$

Здесь T_λ является решением уравнения

$$1 - \exp[-\lambda_{\text{эк}} \cdot (T_\lambda - T_{n \min})] - \frac{C}{\sqrt{2\pi}} \cdot \int_{T_{n \min}}^{T_\lambda} \exp\left\{-\frac{[t_p - m(t_p)]^2}{2 \cdot \sigma(t_p)^2}\right\} dt_p = 0, \quad (11)$$

где C – нормирующий коэффициент.

Для решения уравнения (11) можно применить, например, метод дихотомии [10].

Найдем значение максимального срока службы $T_{\text{с.с.}}$. Поскольку срок службы не может быть больше срока сохраняемости, то $T_{\text{с.с.}} = T_{\text{хр max}}$. Однако в [4] методики расчета срока сохраняемости электронных компонентов не приведены, но в [11] показано, что расчет срока сохраняемости аналогичен расчету их ресурса. В [3] приведена формула расчета «уточненного» гамма-процентного ресурса $T_{p,y\gamma}$:

$$T_{p,y\gamma} = \frac{T_{p\gamma}}{K_n}, \quad (12)$$

где K_n – коэффициент нагрузки (по критичному параметру).

Из (12) следует, что значение v в методиках [3] принято постоянной величиной, не зависящей от режимов и условий применения электронного компонента. Поскольку при $K_n \rightarrow 0$ значение $T_{p,y\gamma} \rightarrow T_{\text{хр } \gamma}$, то можно принять допущение, что значения v для режимов работы и хранения (ожидания) также будут одинаковыми.

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 равным 99,9 %. Тогда

$$T_{\text{хр max}} = \frac{1 + v \cdot 3,09}{1 + v(-3,09)} \cdot T_{\text{хр min}}, \quad (13)$$

где $T_{\text{хр min}}$ – минимальный срок сохраняемости.

Для пересчета срока сохраняемости к заданным условиям режима хранения (ожидания) воспользуемся формулой из [11]:

$$T_{\text{ож max}} = \frac{T_{\text{хр max}}}{K_{t \text{ хр}} \cdot K_\gamma}, \quad (14)$$

где $K_{t \text{ хр}}$ – коэффициент, учитывающий изменение интенсивности отказов электронного компонента в режиме хранения (ожидания) в зависимости от температуры окружающей среды; K_γ – коэффициент эксплуатации.

Соответствующее значению срока службы в режиме ожидания значение x_2 равно:

$$x_2 = 1 - \chi C, \quad (15)$$

где χ определяется из уравнения

$$T_{\text{ож max}} = (1 + v \cdot \chi) \cdot m(t_p). \quad (16)$$

Тогда при $0 < \hat{x} \leq x_2$ срок службы $T_{c.c} = T_{ож\ max}$, при $\hat{x} = 0$ срок службы $T_{c.c} = T_{р\ max}$ и, соответственно, $\hat{t}_{н.э.к} = T_{c.c}$.

В результате модель (1) можно представить в следующем виде:

$$\hat{t}_{н.э.к} = \begin{cases} T_{н\ min} & \text{при } \hat{x} = 1, \\ f_E(\lambda_3, \hat{x}) & \text{при } x_1 \leq \hat{x} < 1, \\ f_N[C, m(t_p), \sigma(t_p), \hat{x}] & \text{при } x_2 \leq \hat{x} < x_1, \\ T_{c.c} & \text{при } \hat{x} = 0. \end{cases} \quad (17)$$

Таким образом, модель отказов электронного компонента для статистического моделирования (17) представляет собой функционал $F(\hat{x})$. Значение данного функционала при $\hat{x} = 1$ равно $T_{н\ min}$, в интервале $[x_1, 1]$ рассчитывается по экспоненциальной модели f_E , в интервале $[x_2, x_1]$ – по модели нормального распределения f_N ; при $\hat{x} \leq x_2$ его значение равно $T_{c.c}$. Результат моделирования представлен на рисунке.

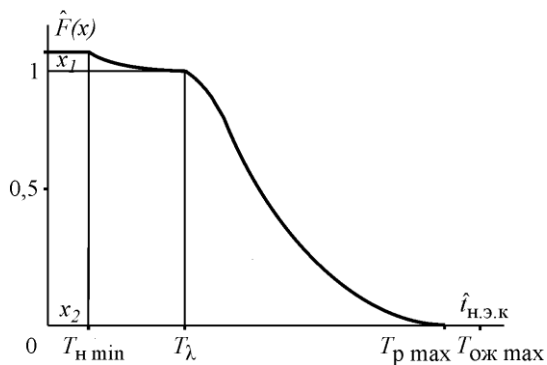


График функции $\hat{t}_{н.э.к} = F(\hat{x})$

The graph of the function $\hat{t}_{н.э.к} = F(\hat{x})$

Пример расчета параметров модели отказов электронных компонентов. Рассмотрим расчет параметров модели (17) на примере кремниевого эпитаксиально-планарного $n-p-n$ -транзистора типа 2Т3130А9 [12]. Это универсальный транзистор, предназначенный для работы во входных каскадах низкочастотных радиотехнических устройств с низким уровнем шумов, в усилителях, генераторах и стабилизаторах напряжения. Выпускается в миниатюрном пластмассовом корпусе типа КТ-46.

Характеристики транзистора типа 2Т3130А9 следующие [9]:

Базовая интенсивность отказов в режиме работы $\lambda_6, \text{ч}^{-1}$	$0,038 \cdot 10^{-6}$
Базовая интенсивность отказов в режиме хранения $\lambda_{хр.6}, \text{ч}^{-1}$	$0,013 \cdot 10^{-8}$
95%-ный ресурс (во всех режимах по ТУ) $T_{р\ 9}, \text{тыс. ч}$	100
Минимальная наработка (во всех режимах по ТУ) $T_{н\ min}, \text{тыс. ч}$	50
Минимальный срок сохраняемости (в отапливаемом помещении) $T_{хр\ min}, \text{лет}$	25
Максимальная температура перехода, $^{\circ}\text{C}$	+125

Примем, что модель эксплуатации транзистора в течение срока службы ($T_{c.c}$) – непрерывная работа в предельно допустимом режиме. Значение интенсивности отказов в режиме работы λ_3 рассчитаем по модели, приведенной в [9]:

$$\lambda_3 = \lambda_6 \cdot K_p \cdot K_\phi \cdot K_s \cdot K_3 \cdot K_{пр},$$

где $K_p, K_\phi, K_s, K_3, K_{пр}$ – коэффициент режима, функционального назначения прибора, отношения рабочего напряжения к максимально допустимому напряжению по ТУ, эксплуатации, приемки соответственно.

Для определения K_ϕ в качестве функционального режима работы примем «аналоговый сигнал»; для K_s полагаем $S = 100\%$ (предельно допустимый режим); для K_3 группа эксплуатации 1.1; для $K_{пр}$ категория качества «приемка 5». Тогда

$$\lambda_3 = 0,038 \cdot 10^{-6} \cdot 1 \cdot 1,5 \cdot 3 \cdot 1 \cdot 1 = 0,171 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}.$$

Коэффициент вариации v равен (5):

$$v = \frac{100\,000 - 50\,000}{(-1,645) \cdot 50\,000 - (3,09) \cdot 100\,000} = 0,22.$$

По формулам (6) и (7) получаем значения $m(t_p)$ и $\sigma(t_p)$

$$m(t_p) = \frac{1}{1 + 0,22(-1,645)} \cdot 100\,000 = 156\,715 \text{ ч},$$

$$\sigma(t_p) = 0,22 \cdot 156\,715 = 34\,477 \text{ ч}.$$

Согласно формуле (8):

$$T_{p \max} = (1 + 0,22 \cdot 3,09) \cdot 156\,715 = 263\,249 \text{ ч (30 лет)}.$$

Коэффициент C рассчитан при условии, что закон распределения ресурса нормальный, усеченный в пределах $\pm 3,09 \cdot \sigma(t_p)$:

$$C = \frac{1}{0,998} = 1,002.$$

Найдем значение T_λ , используя уравнение (11):

$$1 - \exp\left[-0,171 \cdot 10^{-6} \cdot (T_\lambda - 5 \cdot 10^4)\right] - \frac{1,002}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \int_{5 \cdot 10^4}^{T_\lambda} \exp\left\{-\frac{(t_p - 156\,715)^2}{2 \cdot 34\,477^2}\right\} dt_p = 0 \Rightarrow T_\lambda = 91\,079 \text{ ч}.$$

По формуле (10) найдем значение x_1 :

$$\hat{x}_1 = \exp[-0,171 \cdot 10^{-6} \cdot (91\,079 - 50\,000)] = 0,993.$$

Принимая во внимание, что 25 лет – это 219 000 ч, по формуле (13) получим

$$T_{xp \max} = \frac{1 + 0,22 \cdot 3,09}{1 + 0,22 \cdot (-3,09)} \cdot 219\,000 = 1148895 \text{ ч (131 год)}.$$

Для максимальной рабочей температуры, равной $+85^\circ\text{C}$, и группы эксплуатации 1.1 найдем значение $T_{ож \max}$ используя (14):

$$T_{ож \max} = \frac{1148895}{1,95 \cdot 1} = 588009 \text{ ч (67 г.)}.$$

Поскольку в данном примере $T_{ож \max} > T_{p \max}$, то $T_{с.с} = T_{p \max}$ и, следовательно, $x_2 = 0$.

В результате модель отказов транзистора будет иметь следующий вид:

$$\hat{t}_{н.э.к} = \begin{cases} 50\,000 & \text{при } \hat{x} = 1, \\ f_E(0,171 \cdot 10^{-6}, \hat{x}) & \text{при } 0,993 \leq \hat{x} < 1, \\ f_N(1,002, 156\,715, 34\,477, \hat{x}) & \text{при } x_2 \leq \hat{x} < 0,993, \\ 263\,249 & \text{при } \hat{x} = 0. \end{cases}$$

Обсуждение результатов. В рассмотренном примере электронный компонент (транзистор) характеризуется одним потоком отказов. Для «сложных» электронных компонентов, суммарный поток отказов которых складывается из независимых потоков отказов составных частей (например, оптических кабелей), расчет реализации наработки проводится по следующей модели:

$$\hat{t}_{\text{н.э.к}} = \min_{i=1, I} (\hat{t}_{\text{н1э.к}}, \hat{t}_{\text{н2э.к}}, \dots, \hat{t}_{\text{ниэ.к}}, \dots, \hat{t}_{\text{нIэ.к}}),$$

где $\hat{t}_{\text{ниэ.к}}$ – реализация наработки, рассчитанная для i -го потока отказов; I – количество независимых потоков отказов составных частей электронного компонента.

Расчет характеристик долговечности для составных частей электронных компонентов, которые являются исходными данными для расчета $\hat{t}_{\text{ниэ.к}}$, рассмотрен в [13].

Следует отметить, что параметр T_λ имеет важное самостоятельное значение, так как определяет то время, в течение которого применима экспоненциальная модель при расчете вероятности безотказной работы электронных средств методом λ -характеристик [2]. Время $T_{\text{н.э.с}}$, в течение которого применим этот метод, можно определить как

$$T_{\text{н.э.с}} = \min_{n=1, N} (T_{\lambda_{\text{э.к1}}}, T_{\lambda_{\text{э.к2}}}, \dots, T_{\lambda_{\text{э.кN}}}, \dots, T_{\lambda_{\text{э.кN}}}), \quad (18)$$

где $T_{\lambda_{\text{э.к}n}}$ – значение параметра T_λ n -го электронного компонента; N – количество электронных компонентов.

Выражение (18) верно при условии, что $T_\lambda \leq T_{\text{ож max}}$ (см. рисунок). Однако, если это условие не выполняется, вместо $T_{\lambda_{\text{э.к}n}}$ нужно использовать $T_{\text{ож max } n}$.

Заключение. Предложенная модель отказов электронных компонентов позволяет при имитационном моделировании получать реализацию наработки электронного компонента с учетом ресурсных отказов и ограничения на величину его наработки. Адекватность модели подтверждается использованием принятых в [2–4] моделей отказов и данных, приведенных в [9] и ТУ. 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 электронных средств.

Литература

1. ГОСТ 27.002-2015. Межгосударственный стандарт. Надежность в технике. Термины и определения. – М.: Стандартиформ, 2016. – IV, 23 с.
2. ОСТ 4Г 0.012.242-84. Отраслевой стандарт. Аппаратура радиоэлектронная. Методика расчета показателей надежности. – М.: ВНИИ, 1985. – 49 с.
3. ОСТ 4.012.013-84. Отраслевой стандарт. Аппаратура радиоэлектронная. Определение показателей долговечности. – М.: ВНИИ, 1985. – 14 с.
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. – М.: ВНИИ, 1985. – 45 с.
5. ГОСТ 27.005-97. Межгосударственный стандарт. Надежность в технике. Модели отказов. Основные положения. – Минск: БелГИСС, 2005. – III, 44 с.
6. **Буторин В.А., Вовденко К.П.** Детерминированная математическая модель надежности светодиодных светильников // Достижения науки и техники АПК. – 2013. – № 5. – С. 76–78.
7. **Седых К.В., Громов В.С.** Подсистема АСОНИКА-К. Ч. 1 // Проблемы современной науки и образования. – 2016. – № 35 (77). – С. 20–22.
8. ГОСТ 27.301-95. Межгосударственный стандарт. Надежность в технике. Расчет надежности. Основные положения. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 1996. – III, 15 с.
9. Надежность ЭРИ: справочник. – М.: МО РФ, 2006. – 641 с.
10. **Гончаров В.А.** Методы оптимизации: учеб. пособие. – М.: МИЭТ, 2008. – 188 с.
11. **Жаднов В.В.** Расчет надежности электронных модулей. – М.: Солон-Пресс, 2016. – 232 с.

12. ШЧЗ.365.007 ЭТ. Транзисторы типов 2Т203А9, 2Т203В9, 2Т203В9, 2Т203Г9, 2Т203Д9, 2Т203Е9. Этикетка. – Тула: ООО «Радио-Комплект», 2014. – URL: <http://www.radio-komplekt.ru/im/labels/2%F23130%E39%2C2%F23130%E49%2C2%F23130%E59.pdf> (дата обращения: 20.12.2017).

13. Оценка уточненного ресурса оптических кабелей с учетом условий эксплуатации / **В.В. Жаднов, И.А. Иванов, П.С. Королев и др.** // Известия вузов. Электроника. – 2016. – Т. 21. – № 6. – С. 589–592.

Поступила 12.01.2018 г.; принята к публикации 24.04.2018 г.

Жаднов Валерий Владимирович – кандидат технических наук, доцент, профессор департамента электронной инженерии Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики» (Россия, 101000, г. Москва, ул. Мясницкая, д. 20), vzhadnov@hse.ru

References

1. GOST 27.002-2015. *Mezhhgosudarstvenny standart. Nadezhnost' v tekhnike. Terminy i opredeleniya*. Vved. 01.03.2017. Moscow, Standartinform, 2016. IV, 23 p. (in Russian).
2. OST 4G 0.012.242-84. *Otraslevoy standart. Apparatura radioelektronnaya. Metodika rascheta pokazateley nadezhnosti*. Vved. 01.01.86. Moscow, VNII, 1985. 49 p. (in Russian).
3. OST 4.012.013-84. *Otraslevoy standart. Apparatura radioelektronnaya. Opredeleniye pokazateley dolgovechnosti*. Vved. 01.07.85. Moscow, VNII, 1985. 14 p. (in Russian).
4. OST V 4G 012.241-84. *Otraslevoy standart. Apparatura radioelektronnaya. Metody rascheta pokazateley nadezhnosti v rezhimakh khraneniya i ozhidaniya i opredeleniya prodolzhitel'nosti ispytaniy, imitiruyushchikh dlitel'noye khraneniye*. Vved. 01.01.86. Moscow, VNII, 1985. 45 p. (in Russian).
5. GOST 27.005-97. *Mezhhgosudarstvenny standart. Nadezhnost' v tekhnike. Modeli otkazov. Osnovnyye polozheniya*. Vved. 01.10.2005. Minsk, BelGISS, 2005. III, 44 p. (in Russian).
6. Butorin V.A., Vovdenko K.P. The Determined Mathematical Model of Reliability of Led Lamps. *Dostizheniya nauki i tekhniki APK = Achievements of Science and Technology of AIC*, 2013, no. 5, pp. 76–78. (in Russian).
7. Sedykh K.V., Gromov V.S. Subsystem ASONIKA-K. Part 1. *Problemy sovremennoy nauki i obrazovaniya = Problems of Modern Science and Education*, 2016, no. 35 (77), pp. 20–22. (in Russian).
8. GOST 27.301-95. *Mezhhgosudarstvenny standart. Nadezhnost' v tekhnike. Raschet nadezhnosti. Osnovnyye polozheniya*. Vved. 01.01.97. Moscow, IPK Izd-vo standartov, 1996, III. 15 p. (in Russian).
9. *Nadezhnost' ERI: Spravochnik*. Moscow, MO RF Publ., 2006. 641 p. (in Russian).
10. Goncharov V.A. *Metody optimizatsii. Uchebnoye posobiye*. Moscow, MIET, 2008, 188 p. (in Russian).
11. Zhadnov V.V. *Raschet nadezhnosti elektronnykh moduley: nauchnoye izdaniye*. Moscow, Solon-Press, 2016. 232 p. (in Russian).
12. SHCHY3.365.007 ET. *Tranzistory tipov 2T203A9, 2T203B9, 2T203V9, 2T203G9, 2T203D9, 2T203E9*. Etiketka. Tula, ООО Радио-Комплект, 2014. Available at: <http://www.radio-komplekt.ru/im/labels/2%F23130%E39%2C2%F23130%E49%2C2%F23130%E59.pdf> (accessed 20.05.2017). (in Russian).
13. Zhadnov V.V., Ivanov I.A., Korolev P.S. et al. Estimation of Specified Operating Life of Fiber Cables Taking Into Account Operation Conditions. *Izvestiya vuzov. Elektronika = Proceedings of Universities. Electronics*, 2016, vol. 21, no. 6, pp. 589–592. (in Russian).

Submitted 12.01.2018; Accepted 24.04.2018.

Information about the author:

Valery V. Zhadnov – Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Prof. of the Electronic Engineering Department, National Research University «Higher School of Economics» (Russia, 101000, Moscow, Mясnitskaya, 20), vzhadnov@hse.ru