

## Метод определения показателя долговечности микросхем

Борис А. Долгополов, ЗАО НТЦ «Модуль», Российская Федерация, Москва

Юрий Г. Зайко, ЗАО НТЦ «Модуль», Российская Федерация, Москва

Виктор А. Михайлов, ЗАО НТЦ «Модуль», Российская Федерация, Москва



Борис А.  
Долгополов



Юрий Г. Зайко



Виктор А.  
Михайлов

**Резюме.** Целью данной статьи является приведение в соответствие требований по долговечности, предъявляемых к системам космической техники с длительными сроками эксплуатации, с тем фактом, что в нормативных документах на микросхемы показатели долговечности отсутствуют. Так, в соответствии с ОСТ В 11 0998-99 в требованиях по надежности присутствуют только показатели безотказности и сохраняемости. С другой стороны, в требованиях по надежности, предъявляемых к системам космической техники, помимо требований к безотказности и сохраняемости одно из первостепенных мест занимают требования по долговечности функционирования, которые составляют обычно величину гамма-процентного ресурса  $T_p = 100\,000$  ч и более при  $\gamma = 99,9\%$ . Следовательно, для такого рода систем с длительными сроками эксплуатации требуется определить показатели долговечности, которые отсутствуют в технических условиях или других документах, по которым производится поставка. Определение таких показателей с помощью проведения испытаний на долговечность требует больших денежных и временных затрат. Поэтому был предложен аналитический метод, согласно которому нижнюю границу оценки для гамма-процентного ресурса  $T_p$  микросхем можно получить, приравняв вероятность безотказной работы микросхемы за время  $T_p$  к вероятности ненаступления ресурсных отказов, которые переводят микросхему в предельное состояние, после чего ее эксплуатация должна быть прекращена. В этом случае для получения величины  $T_p = 99,9\% = 100\,000$  ч нерезервированная микросхема или другое изделие должны иметь интенсивность отказов  $10^{-8}$  1/ч. Для более сложных микросхем получить требуемое значение  $T_p = 99,9\% = 100\,000$  ч не представляется возможным. В данной статье предлагается расширить использование предложенного метода определения показателя долговечности с учетом того факта, что в рассматриваемых системах не допускается отказ одного любого изделия и с этой точки зрения используются различные способы резервирования аппаратуры. Под нагруженным резервом понимается резерв, который содержит один или несколько резервных модулей, находящихся в режиме основного модуля. Под облегченным резервом понимается резерв, который содержит один или несколько модулей, находящихся в менее нагруженном режиме, чем основной модуль, до начала выполнения ими функций основного модуля. Рассмотрены различные варианты резервирования сложной микросхемы, при которых удается получить заданные высокие показатели долговечности. Получена формула для расчета показателя долговечности в более общем случае, когда микросхема входит в состав модуля, который резервируется другим идентичным модулем. В этом случае, если второй модуль находится в облегченном резерве, то можно обеспечить высокий показатель долговечности микросхемы. Если же второй модуль находится в нагруженном резерве, то заданный показатель долговечности микросхемы не обеспечивается. Рассмотренный метод определения показателя долговечности может быть использован и при других способах резервирования модулей в системе.

**Ключевые слова:** долговечность, гамма-процентный ресурс, резервирование, нагруженный резерв, облегченный резерв.

**Формат цитирования:** Долгополов Б.А., Зайко Ю.Г., Михайлов В.А. Метод определения показателя долговечности микросхем // Надежность. 2019. № 3. С. 3-6. DOI: 10.21683/1729-2646-2019-19-3-3-6

## Введение

В соответствии с ГОСТ 27.006-2015 [1] долговечностью называется свойство объекта, заключающееся в его способности выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях использования, технического обслуживания и ремонта до достижения предельного состояния, в котором его дальнейшая эксплуатация недопустима или нецелесообразна, либо восстановление его работоспособного состояния невозможно или нецелесообразно.

Одним из показателей долговечности электрорадиоизделий (ЭРИ) является ресурс, определяемый как суммарная наработка ЭРИ от начала его эксплуатации или ее возобновления после ремонта до момента достижения предельного состояния. Ресурс, в течение которого ЭРИ не достигнет предельного состояния с вероятностью  $\gamma$ , выраженной в процентах, называется гамма-процентным ресурсом  $T_{p,\gamma}$ .

Показатель долговечности ЭРИ задается в ТУ в виде минимальной наработки  $T_{н,мин}$ , которая согласно ОСТ 4.012.013-84 [2] приравнивается соответствующему гамма-процентному показателю  $T_{p,\gamma}$  при  $\gamma = 99,9\%$

$$T_{н,мин} = T_{p,\gamma} \text{ при } \gamma = 99,9\%.$$

Однако в соответствии с ОСТ В 11 0998-99 [3] требования по надежности микросхем не содержат показателей долговечности. Поэтому в ТУ на вновь разрабатываемые микросхемы, как правило, нет данных по долговечности. Следует отметить, что в технической документации на ЭРИ иностранного производства характеристики долговечности также отсутствуют [4]. Для ЭРИ, для которых в соответствующих ТУ или сертификатах не приведены значения  $T_{н,мин}$  или  $T_{p,\gamma}$ , во многих практических случаях необходимо получить оценку  $T_{p,\gamma}$ .

## Оценка величины ресурса $T_{p,\gamma}$

В современной радиоэлектронной аппаратуре, как правило, используются ЭРИ, отказы которых представляют простейший поток отказов. Для таких ЭРИ при условии, что процесс эксплуатации стабилизирован (устранены причины всех конструктивных, производственных и эксплуатационных отказов), характерны в основном не деградиационные отказы, обусловленные естественным процессом старения, износа, коррозии и усталости, а ресурсные отказы, переводящие ЭРИ в предельное состояние.

Под ресурсным отказом ЭРИ будем понимать отказ ЭРИ за время  $T_{p,\gamma}$  от начала эксплуатации, вероятность  $R_{p,o}(t = T_{p,\gamma})$  которого не превышает заданное значение  $(1 - \gamma/100)$ . Тогда время  $T_{p,\gamma}$  определяется из уравнения

$$R_{p,o}(t = T_{p,\gamma}) = 1 - e^{-\lambda_s \cdot T_{p,\gamma}} \leq \frac{\gamma}{100},$$

или, переходя к вероятности безотказной работы (ВБР) ЭРИ, из уравнения

$$R_n(t = T_{p,\gamma}) = 1 - e^{-\lambda_s \cdot T_{p,\gamma}} \geq \frac{\gamma}{100}, \quad (1)$$

где  $R_n(t = T_{p,\gamma})$  – ВБР нерезервированного ЭРИ за время  $t$ ;

$\lambda_s$  – эксплуатационная интенсивность отказов (ИО) для ЭРИ, определяемая по справочнику [5] или предоставляемая фирмой-поставщиком/изготовителем;

$\gamma$  – вероятность ненаступления ресурсного отказа.

Для нерезервированного ЭРИ из выражения (1) получаем

$$T_{p,\gamma} \geq \frac{-\ln \frac{\gamma}{100}}{\lambda_s}. \quad (2)$$

Как показывает практика, ИО современных сложных цифровых микросхем даже при использовании всех возможных способов улучшения их безотказности нередко превышает значение  $\lambda_s > 0,03 \cdot 10^{-6}$  1/ч, что в соответствии с равенством (2) дает значение показателя долговечности  $T_{p,\gamma} < 33333$  ч при  $\gamma = 99,9\%$ .

Однако для современных космических систем часто требуются значения  $T_{p,\gamma} \geq 100000$  ч. Для получения таких высоких показателей долговечности при использовании в системах современных сложных микросхем приходится рассматривать использование различных способов резервирования.

## Учет вариантов резервирования микросхемы

Под нагруженным резервом понимается резерв, который содержит один или несколько резервных элементов, находящихся в режиме основного элемента. Под облегченным резервом понимается резерв, который содержит один или несколько элементов, находящихся в менее нагруженном режиме, чем основной элемент до начала выполнения ими функций основного элемента. Тогда, при резервировании микросхем с помощью облегченного резерва ВБР определяется формулой [6]

$$R_{рез(o)}(t) = e^{-\lambda_s \cdot t} \left[ 1 + \frac{1}{\alpha} (1 - e^{-\alpha \lambda_s \cdot t}) \right], \quad (3)$$

где  $\lambda_s$  – ИО микросхемы в рабочем эксплуатационном режиме;

$\alpha = \lambda_x / \lambda_s$  – коэффициент хранения микросхемы, находящейся в режиме облегченного резерва, где  $\lambda_x$  – ИО микросхемы в режиме облегченного резерва.

Тогда для достижения заданного значения  $T_{p,\gamma}$  необходимо, чтобы выполнялось следующее соотношение

$$R_{рез}(t = T_{p,\gamma}) \geq \frac{\gamma}{100}. \quad (4)$$

Рассмотрим следующий пример:

$\lambda_s = 0,3 \cdot 10^{-6}$  1/ч;

$\alpha = 0,012$ ;

$T_{p,\gamma(тр)} = 100000$  ч;

$\gamma = 99,9\%$ .

Таблица 1. Расчетные значения ВБР резервированной микросхемы.

$T_{p,\gamma}$ , ч	100000	110000	120000	130000	140000	150000	160000
$R_{рез(о)}(T_{p,\gamma})$	0,9996	0,9995	0,9994	0,9993	0,9991	0,9990	0,9989
$R_{рез(н)}(T_{p,\gamma})$	0,9991	0,99895	0,9988	0,9985	0,9983	0,9981	0,9978

Тогда из соотношения (3) при  $t = T_{p,\gamma(тр)} = 100000$  ч получим

$$R_{рез(о)}(t = 100000 \text{ ч}) = 0,9996 \geq 0,999,$$

что соответствует неравенству (4).

При использовании резервирования с помощью нагруженного резерва ВБР микросхемы будет определяться формулой

$$R_{рез(н)}(t) = 1 - (1 - e^{-\lambda_{\Sigma} \cdot t})^2. \quad (5)$$

Из этой формулы для рассматриваемого примера получим

$$R_{рез(н)}(t = 100000 \text{ ч}) = 0,9991 \geq 0,999,$$

что также соответствует неравенству (4).

Таким образом, в этом примере резервированная микросхема обеспечит получение требуемого значения  $T_{p,\gamma(тр)} = 100000$  ч при  $\gamma = 99,9\%$ .

Получить явное значение  $T_{p,\gamma}$  можно, подставляя в формулы (3) и (5) увеличивающиеся значения  $t$  с шагом  $+0,1 T_{p,\gamma(тр)}$  до тех пор, пока будет выполняться неравенство (4). В таблице 1 представлены полученные значения ВБР микросхемы при заданных значениях  $T_{p,\gamma}$ .

Таким образом, в рассматриваемом случае микросхема позволяет обеспечить показатель долговечности:

- при использовании облегченного резерва  $T_{p,\gamma} = 150000$  ч при  $\gamma = 99,9\%$ ,
- при использовании нагруженного резерва  $T_{p,\gamma} = 100000$  ч при  $\gamma = 99,9\%$ .

## Учет вариантов резервирования модулей

На практике отдельные микросхемы входят обычно в состав модулей, которые резервируются в составе системы. Предположим, что микросхема совместно с другими ЭРИ входит в состав модуля  $M_A$ , который резервируется модулем  $M_B$ , находящимся в облегченном резерве. Найдем ВБР такой микросхемы.

Микросхема проработает безотказно в течение времени  $t$  в двух случаях:

- 1) Модуль  $M_A$  проработал безотказно в течение времени  $t$ , т. е. микросхема в его составе не отказала

$$R_1(t) = e^{-\lambda_{\Sigma(M_A)} \cdot t}, \quad (6)$$

где  $\lambda_{\Sigma(M_A)}$  – ИО модуля  $M_A$  в режиме эксплуатации.

- 2) Произошла совокупность следующих событий:

- модуль  $M_A$  отказал в момент времени  $\tau$  ( $0 < \tau \leq t$ ) (отказала микросхема или другое ЭРИ);
- модуль  $M_B$  до момента времени  $\tau$  не отказал;

– в момент времени  $\tau$  произошло отключение модуля  $M_A$  и включение в основную работу модуля  $M_B$ ;

– в оставшийся промежуток времени  $(t - \tau)$  микросхема не отказала.

ВБР для этого случая равняется следующему выражению [7]

$$R_2(t) = \int_0^t a_{M_A}(\tau) \cdot R_{M_B}(\tau) \cdot R_{MC}(t - \tau) dt, \quad (7)$$

где  $a_{M_A}(\tau)$  – функция распределения вероятности времени отказа модуля  $M_A$ , или, что то же самое, частота отказов модуля  $M_A$  за время  $\tau$ , которая равна выражению  $a_{M_A}(\tau) = \lambda_{\Sigma(M_A)} \cdot e^{-\lambda_{\Sigma(M_A)} \cdot \tau}$ ;

$R_{M_B}(\tau)$  – ВБР модуля  $M_B$  за время  $\tau$ ;

$R_{MC}(t - \tau)$  – ВБР микросхемы за время  $(t - \tau)$ .

Объединяя формулы (6) и (7) и подставляя в формулу (7) значения входящих в нее переменных, получим

$$\begin{aligned} R_{рез(о)}(t) &= e^{-\lambda_{\Sigma(M_A)} \cdot t} + \\ &+ \int_0^t \lambda_{\Sigma(M_A)} \cdot e^{-\lambda_{\Sigma(M_A)} \cdot \tau} \cdot e^{-\lambda_{\Sigma(M_B)} \cdot \tau} \cdot e^{-\lambda_{\Sigma(MC)} \cdot (t - \tau)} dt = \\ &= e^{-\lambda_{\Sigma(M_A)} \cdot t} + \frac{\lambda_{\Sigma(M_A)}}{\lambda_{\Sigma(M_A)} + \lambda_{\Sigma(M_B)} - \lambda_{\Sigma(MC)}} \cdot \\ &\cdot e^{-\lambda_{\Sigma(MC)} \cdot t} \cdot \left( 1 - e^{-(\lambda_{\Sigma(M_A)} + \lambda_{\Sigma(M_B)} - \lambda_{\Sigma(MC)}) \cdot t} \right). \end{aligned} \quad (8)$$

Здесь  $\lambda_{\Sigma(M_A)}$  – ИО модуля  $M_A$  в режиме эксплуатации;  $\lambda_{\Sigma(M_B)}$  – ИО модуля  $M_B$  в режиме облегченного резерва в выключенном состоянии;

$\lambda_{\Sigma(MC)}$  – ИО микросхемы в режиме эксплуатации.

Подставляя полученное значение  $R_{рез(о)}(t)$  из формулы (8) при  $t = T_{p,\gamma}$  в неравенство (4), получим условие достижения микросхемой показателя долговечности, равного  $T_{p,\gamma}$ .

Проиллюстрируем рассмотренный случай примером из практики [8], в котором были использованы следующие данные:

$$\lambda_{\Sigma(M_A)} = 0,4522 \cdot 10^{-6} \text{ 1/ч};$$

$$\lambda_{\Sigma(M_B)} = 0,016 \cdot 10^{-6} \text{ 1/ч};$$

$$\lambda_{\Sigma(MC)} = 30,340 \cdot 10^{-9} \text{ 1/ч};$$

$$T_{p,\gamma} = 100000 \text{ ч};$$

$$\gamma = 99,9 \text{ \%}.$$

Подставляя эти данные в формулу (8), получим

$$\begin{aligned} R_{рез(о)}(T_{p,\gamma}) &= e^{-0,4522 \cdot 10^{-6} \cdot 10^5} + \\ &+ \frac{0,4522 \cdot 10^{-6}}{0,4522 \cdot 10^{-6} + 0,016 \cdot 10^{-6} - 30,340 \cdot 10^{-9}} \cdot e^{-30,340 \cdot 10^{-9} \cdot 10^5} \times \\ &\times \left( 1 - e^{-(0,4522 \cdot 10^{-6} + 0,016 \cdot 10^{-6} - 30,340 \cdot 10^{-9}) \cdot 10^5} \right) = 0,999897. \end{aligned}$$

В данном случае

$$R_{MC(рез)}(T_{p,\gamma}) = 0,999897 \geq 0,999,$$

т.е. микросхема удовлетворяет заданному показателю долговечности  $T_{p,\gamma} = 100\,000$  ч при  $\gamma = 99,9\%$ .

При условии нагруженного резервирования модулей  $M_A$  и  $M_B$  соответствующая формула для ВБР микросхемы принимает вид

$$R_{рез(н)}(t) = e^{-\lambda_{\lambda(M_A)} \cdot t} + \frac{\lambda_{\lambda(M_A)}}{2 \cdot \lambda_{\lambda(M_A)} - \lambda_{\lambda(MC)}} \cdot e^{-\lambda_{\lambda(MC)} \cdot t} \cdot \left(1 - e^{-(2 \cdot \lambda_{\lambda(M_A)} - \lambda_{\lambda(MC)}) \cdot t}\right). \quad (9)$$

Тогда, подставляя в формулу (9) данные из рассмотренного выше примера, получим

$$R_{рез(н)}(T_{p,\gamma}) = e^{-0,4522 \cdot 10^{-6} \cdot 10^5} + \frac{0,4522 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot 0,4522 \cdot 10^{-6} - 30,340 \cdot 10^{-9}} \cdot e^{-30,340 \cdot 10^{-9} \cdot 10^5} \times \left(1 - e^{-(2 \cdot 0,4522 \cdot 10^{-6} - 30,340 \cdot 10^{-9}) \cdot 10^5}\right) = 0,998956.$$

В этом случае неравенство (4) не выполняется, т.е. микросхема не удовлетворяет заданному показателю долговечности  $T_{p,\gamma} = 100\,000$  ч.

Рассмотренный метод может быть использован и при других способах резервирования модулей в системе [9].

## Заключение

В тех случаях, когда в ТУ или других документах на поставку микросхемы или другого ЭРИ не приведены показатели долговечности (например, гамма-процентный ресурс  $T_{p,\gamma}$ ), вероятность того, что микросхема за время  $T_{p,\gamma}$  не перейдет в предельное состояние, после достижения которого дальнейшая эксплуатация микросхемы недопустима, можно приравнять ВБР микросхемы за время  $t = T_{p,\gamma}$ .

Нерезервированная микросхема будет иметь заданный гамма-процентный ресурс  $T_{p,\gamma}$ , определяемый соотношением (2). Если ИО микросхемы не удовлетворяет соотношению (2), то для достижения заданного показателя долговечности можно использовать различные варианты резервирования микросхемы.

Резервированная микросхема будет удовлетворять заданному показателю  $T_{p,\gamma}$ , если ВБР микросхемы будет удовлетворять соотношению (4).

Получены формулы для оценки ВБР микросхемы, являющейся составной частью резервированного модуля.

Предложенный метод позволяет оценить заданный показатель долговечности микросхемы или другого ЭРИ при отсутствии исходных данных по долговечности.

## Библиографический список

1. ГОСТ 27.002-2015. Надежность в технике. Термины и определения [Текст]. – Введ. 2017–03–01. – М.: Стандартинформ, 2016. – IV, 23 с.
2. ОСТ 4.012.013-84. Аппаратура радиоэлектронная. Определение показателей долговечности [Текст].
3. ОСТ В 11 0998-99. Микросхемы интегральные. Общие технические условия [Текст].
4. Нетес В.А. Новый международный терминологический стандарт по надежности [Текст] / В.А. Нетес // Надежность. – 2016. – №3. – С. 54-58.
5. Справочник «Надежность электрорадиоизделий», – М.: 22 ЦНИИ МО РФ, 2006.
6. Зайко Ю.Г. Оценка надежности систем со смешанным резервированием [Текст] / Ю.Г. Зайко, М.Б. Смирнов // Надежность. – 2004. – №4(11). – С. 40-45.
7. Половко А.М. Основы теории надежности [Текст] / А.М. Половко. – М.: Изд-во «Наука», 1964.
8. Борисов Ю.И. О выборе архитектуры отказоустойчивых вычислительных комплексов для космических аппаратов [Текст] / Ю.И. Борисов // Надежность. – 2004. – №2(9). – С. 46-51.
9. Зайко Ю.Г. Имитационная модель для расчета показателей надежности резервированных радиоэлектронных систем [Текст] / Ю.Г. Зайко, Л.Н. Искандарова, А.В. Трахтомиров // Надежность. – 2016. – № 3. – С. 8-17.

## Сведения об авторах

**Борис А. Долгополов** – ведущий инженер ЗАО НТЦ «Модуль», Российская Федерация, Москва, e-mail: dolgoplov@module.ru

**Юрий Г. Зайко** – кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник, начальник отдела ЗАО НТЦ «Модуль», Российская Федерация, Москва, e-mail: y.zayko@module.ru

**Виктор А. Михайлов** – доктор технических наук, заместитель Генерального директора по бортовым работам ЗАО НТЦ «Модуль», Российская Федерация, Москва, e-mail: vmikh@module.ru

Поступила: 16.05.2019