

## НАДЕЖНОСТЬ СИСТЕМ

УДК 004.3

Л.И. Кульбак, В.Б. Алюшкевич, С.А. Золотой

## ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ БОРТОВОЙ АППАРАТУРЫ МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ В ПРОЦЕССЕ ИХ ПОЛЕТА

*Рассматривается методика оценки текущего состояния безотказности бортовой аппаратуры малых космических аппаратов в процессе их полета. Приводятся математическое представление показателя безотказности бортовой аппаратуры и модель структуры малого космического аппарата, а также формулы расчетов показателей безотказной работы блоков структурной схемы надежности бортовой аппаратуры.*

**Введение**

Бортовая аппаратура (БА) космического аппарата (КА) как невосстанавливаемый объект характеризуется одним из свойств надежности – безотказностью в полете КА. Под безотказностью принято понимать способность объекта выполнять требуемые функции в заданных условиях [1, 2], в рассматриваемом случае – в условиях полета КА. Основным показателем безотказности невосстанавливаемых объектов – вероятность безотказной работы  $P(t)$  за наработку времени  $t$ . В качестве дополнительных показателей используются средняя наработка до отказа  $T_{0,с}$  и интенсивность отказов  $\Lambda$  [3].

Следует заметить, что для БА КА вводится показатель, аналогичный показателям долговечности, с названием «срок активного существования КА (САС)» –  $T_{САС}$ . Его отличительной чертой является то, что в качестве предельного состояния кроме отказа выступают и другие факторы, например ограничения по расходуемым ресурсам. Мерой оценки безотказности БА КА служит единственный показатель – вероятность безотказной работы в течение САС КА  $P_{БА}(T_{САС})$ .

Малые космические аппараты (МКА) имеют массу не более 500 кг [4]. К ним относятся белорусский (БКА) и российский (Канопус-В) космические аппараты дистанционного зондирования Земли. Несмотря на небольшие размеры МКА, в БА МКА широко применяется избыточность в виде резервирования малой кратности, как правило дублирование. Например, в БА БКА зарезервированы 23 объекта. При этом используются невосстанавливаемые нагруженный и ненагруженный резервы. Текущее значение безотказности МКА зависит от состояния резервных элементов БА. Очевидно, что чем больше резервных элементов БА сохранили работоспособность к текущему моменту времени, тем выше безотказность БА.

**1. Математическое представление показателя безотказности БА МКА**

Рассмотрим математические определения показателя безотказности БА МКА, используя данные из [3].

Примем следующие допущения:

- отказы элементов БА являются независимыми событиями;
- наработка до отказа элементов комплектующих БА имеет экспоненциальное распределение;
- интенсивность отказов переключающего устройства ненагруженного резерва имеет пренебрежимо малое значение.

Вероятность безотказной работы БА в интервале времени от 0 до  $T_{САС}$  определяется по формуле

$$P_{БА}(T_{САС}) = P_{БА}(0; T_{САС}) = \exp\left(-\int_0^{T_{САС}} \lambda(x) dx\right), \quad (1)$$

где  $\lambda(x)$  – интенсивность отказов БА;

$P(T_{\text{САС}})$  – вероятность того, что БА проработает безотказно в течение времени  $T_{\text{САС}}$ , начав работать в момент времени  $t = 0$ , или вероятность того, что случайное время работы БА до отказа окажется больше  $T_{\text{САС}}$ .

Вероятность безотказной работы БА в интервале времени от  $t$  до  $T_{\text{САС}}$  выполняется по формуле

$$P_{\text{БА}}(t; T_{\text{САС}}) = P_{\text{БА}}(0; T_{\text{САС}} - t) = \frac{P_{\text{БА}}(0; T_{\text{САС}})}{P_{\text{БА}}(0; t)} = \frac{P_{\text{БА}}(T_{\text{САС}})}{P_{\text{БА}}(t)}, \quad (2)$$

где  $P_{\text{БА}}(t; T_{\text{САС}})$  – вероятность того, что БА проработает безотказно в течение требуемого интервала времени  $(T_{\text{САС}} - t)$ , начав работать в момент времени  $t$ , или условная вероятность того, что случайное время работы БА до отказа окажется больше величины  $(T_{\text{САС}} - t)$  при условии, что БА уже проработала безотказно в течение интервала времени  $t$ .

Если до момента времени  $t$  БА не отказала, то

$$P_{\text{БА}}(t; T_{\text{САС}}) = \exp\left(-\int_t^{T_{\text{САС}}} \lambda(x) dx\right). \quad (3)$$

Для структурной схемы надежности (СН) последовательного вида при произвольном законе наработки до отказа ее блоков вероятность безотказной работы БА определяется следующим образом:

$$P_{\text{БА}}(t; T_{\text{САС}}) = P_{\text{БА}}(0; T_{\text{САС}} - t) = \prod_{i=1}^n P_{\text{Б},i}(t; T_{\text{САС}}) = \frac{P_{\text{БА}}(t; T_{\text{САС}})}{P_{\text{БА}}(t)}, \quad (4)$$

где  $P_{\text{Б},i}(t; T_{\text{САС}})$  – вероятность того, что  $i$ -й блок СН БА проработает безотказно в течение требуемого интервала времени  $(T_{\text{САС}} - t)$ , начав работать в момент времени  $t$ ;  $n$  – количество блоков в составе СН БА.

Для СН последовательного вида при экспоненциальном законе наработки до отказа ее блоков

$$P_{\text{БА}}(t; T_{\text{САС}}) = \exp[-\Lambda_{\text{БА}}(T_{\text{САС}} - t)]. \quad (5)$$

Здесь  $\Lambda_{\text{БА}}$  – интенсивность отказов совокупности из  $n$  блоков СН БА:

$$\Lambda_{\text{БА}} = \sum_{i=1}^n \Lambda_{\text{Б},i}, \quad (6)$$

где  $\Lambda_{\text{Б},i}$  – интенсивность отказов  $i$ -го блока СН БА.

## 2. Модель структуры МКА

Наиболее распространенным и наглядным методом расчета надежности технических систем следует считать метод СН, регламентированный ГОСТ Р 51891–2008 [5], который определяет методы построения модели надежности системы и использование этой модели для вычисления показателей ее надежности.

БА МКА представляет собой невосстанавливаемую в полете систему. Следовательно, для оценки ее надежности можно использовать метод СН – т. е. графического изображения работоспособного состояния системы, которое показывает логическую связь функционирующих компонентов, необходимых для успешной работы системы. СН может быть выполнена на различных уровнях разукрупнения системы (системы в целом, подсистемы, модуля или сборочных единиц) и формируется из блоков (элементов).

По структуре блоки СН БА можно разделить на простые, сложные и сверхсложные (рис. 1). К простым отнесем блоки, которые не имеют в своем составе резервируемых элементов, к сложным – блоки, которые их имеют. Сверхсложные блоки СН представляют собой резервируемые сложные блоки СН.



Рис. 1. Изображения блоков в ССН БА

### 3. Формулы расчетов показателей безотказности блоков ССН БА

Показателями безотказности блоков ССН БА являются вероятность безотказной работы блока  $T_{\text{САС}}$   $P_{\text{Б}}(t_{\text{н.САС}})$  и интенсивность отказов блока  $\Lambda_{\text{Б}}$  за наработку:

$$t_{\text{н.САС}} = T_{\text{САС}} K_{\text{иЭ}}, \quad (7)$$

где  $t_{\text{н.САС}}$  – наработка блока ССН в интервале  $T_{\text{САС}}$ ;  $K_{\text{иЭ}}$  – коэффициент интенсивности эксплуатации блока ССН БА в интервале  $T_{\text{САС}}$  (доля времени работы блока в полете).

#### 3.1. Простой блок ССН БА

Простой блок ССН БА (см. рис. 1, а) представляет собой один элемент или цепочку элементов, не имеющих резерва. Для такого блока ССН расчет производится по формулам

$$P_{\text{Б}}(t_{\text{н.САС}}) = \exp(-\Lambda_{\text{Б}} t_{\text{н.САС}}); \quad (8)$$

$$\Lambda_{\text{Б}} = \sum_{i=1}^m \lambda_i, \quad (9)$$

где  $P_{\text{Б}}(t_{\text{н.САС}})$  – вероятность безотказной работы блока ССН БА за наработку в интервале  $T_{\text{САС}}$ ;  $\Lambda_{\text{Б}}$  – интенсивность отказов блока ССН БА;  $m$  – количество элементов в блоке ССН;  $\lambda_i$  – интенсивность отказов  $i$ -го элемента в блоке ССН БА.

#### 3.2. Сложный блок ССН БА с постоянно включенным нагруженным резервом

Сложный блок ССН БА с постоянно включенным нагруженным резервом (см. рис. 1, б) состоит из двух компонентов: основного и резервного. В качестве компонента может использоваться как отдельный элемент, так и цепочка элементов БА. Критерием отказа такого блока является отказ обоих компонентов блока. Поскольку отказ одного компонента блока не сказыва-

ется на работоспособности второго компонента блока, вероятность отказа обоих компонентов блока равна произведению вероятностей отказов компонентов:

$$Q_{Б.Н}(t_{Н.САС}) = Q_{Э.1}(t_{Н.САС})Q_{Э.2}(t_{Н.САС}), \quad (10)$$

где  $Q_{Б.Н}(t_{Н.САС})$  – вероятность отказа сложного блока ССН БА с нагруженным резервом за наработку  $t_{Н.САС}$ ;  $Q_{Э.1}(t_{Н.САС})$  – вероятность отказа первого компонента блока ССН БА за наработку  $t_{Н.САС}$ ;  $Q_{Э.2}(t_{Н.САС})$  – вероятность отказа второго компонента блока ССН БА за наработку  $t_{Н.САС}$ .

Вероятность безотказной работы блока ССН БА с нагруженным резервом следует вычислять по формуле

$$\begin{aligned} P_{Б.Н}(t_{Н.САС}) &= 1 - Q_{Б.Н}(t_{Н.САС}) = 1 - [(1 - P_{Э.1}(t_{Н.САС}))(1 - P_{Э.2}(t_{Н.САС}))] = \\ &= P_{Э.1}(t_{Н.САС}) + P_{Э.2}(t_{Н.САС}) - P_{Э.1}(t_{Н.САС}) P_{Э.2}(t_{Н.САС}), \end{aligned} \quad (11)$$

где  $P_{Б.Н}(t_{Н.САС})$  – вероятность безотказной работы блока ССН БА с нагруженным резервом;  $P_{Э.1}(t_{Н.САС})$  – вероятность безотказной работы компонента первого блока ССН;  $P_{Э.2}(t_{Н.САС})$  – вероятность безотказной работы компонента второго блока ССН за наработку  $t_{Н.САС}$ .

Если основной и резервный компоненты равноценны по надежности, формула (11) примет вид

$$P_{Б.Н}(t_{Н.САС}) = 2 P_{Э}(t_{Н.САС}) - P_{Э}^2(t_{Н.САС}), \quad (12)$$

где  $P_{Э}(t_{Н.САС})$  – вероятность безотказной работы компонента блока ССН за наработку  $t_{Н.САС}$ .

В случае экспоненциального распределения наработки до отказа компонентов блока ССН БА формула (12) примет вид

$$P_{Б.Н}(t_{Н.САС}) = 2 \exp(-\lambda_{Э} t_{Н.САС}) - \exp(-2\lambda_{Э} t_{Н.САС}) \approx 1 - (\lambda_{Э} t_{Н.САС})^2. \quad (13)$$

Интенсивность отказов в этом случае вычисляется по формуле [6]

$$\Lambda_{Б.Н}(t_{Н.САС}) = \frac{2\lambda_{Э} \exp(-\lambda_{Э} t_{Н.САС}) [1 - \exp(-\lambda_{Э} t_{Н.САС})]}{1 - [1 - \exp(-\lambda_{Э} t_{Н.САС})]^2} \approx \frac{2\lambda_{Э}^2 t_{Н.САС} (1 - \lambda_{Э} t_{Н.САС})}{1 - (\lambda_{Э} t_{Н.САС})^2} = \frac{2\lambda_{Э}^2 t_{Н.САС}}{1 + \lambda_{Э} t_{Н.САС}}. \quad (14)$$

### 3.3. Сложный блок ССН БА с резервированием путем замещения ненагруженным резервом

Сложный блок ССН БА с резервированием путем замещения ненагруженным резервом (см. рис. 1, в) состоит также из двух компонентов: основного и резервного. Критерием отказа такого блока является отказ обоих компонентов блока. Рассмотрим вариант, когда интенсивность отказов обоих компонентов равна постоянной величине. Так как отказ одного компонента блока не сказывается на работоспособности второго компонента, вероятности отказа обоих компонентов равны. Процедура работы резервируемого блока ССН такова, что работает один из компонентов блока, резервный компонент включается в работу только после отказа основного. Отказ резервируемого блока наступает после отказа резервного компонента, т. е. интервал работоспособного состояния блока ССН образуется из суммы интервала работоспособности основного и резервного компонентов. Интервалы работоспособности основного и резервного компонентов имеют экспоненциальное распределение.

В работе [7] потоком Эрланга  $k$ -го порядка называется поток, у которого интервалы между событиями представляют собой сумму  $(k + 1)$  независимых случайных величин, распределенных одинаково по показательному закону с параметром  $\lambda$ , где  $\lambda$  – интенсивность исходного простейшего потока.

Согласно данному определению интервал безотказности блока ССН с ненагруженным резервом относится к категории потока Эрланга первого порядка ( $k = 1$ ), характеристики которого вычисляются по следующим формулам:

– плотность распределения интервалов  $T$  в потоке Эрланга первого порядка

$$f_1(t) = \lambda_{\text{Э}}^2 \times t \times \exp(-\lambda_{\text{Э}} \times t), \quad t \geq 0; \quad (15)$$

– функция распределения случайных величин  $T$

$$F_1(t) = \int_0^t f_1(t) dt = 1 - (1 + \lambda_{\text{Э}} t) \times \exp(-\lambda_{\text{Э}} t); \quad (16)$$

– вероятность безотказной работы блока ССН БА с ненагруженным резервом в соответствии с (1) и (16)

$$P_{\text{НН}}(t_{\text{Н.САС}}) = (1 + \lambda_{\text{Э}} t_{\text{Н.САС}}) \times \exp(-\lambda_{\text{Э}} t_{\text{Н.САС}}) \approx 1 - (\lambda_{\text{Э}} t_{\text{Н.САС}})^2; \quad (17)$$

– средняя наработка до отказа блока ССН согласно (14)

$$T_{\text{О.НН}} = \int_0^{\infty} (1 + \lambda_{\text{Э}} t) \times \exp(-\lambda_{\text{Э}} t) dt = \frac{1}{\lambda_{\text{Э}}} + \frac{\lambda_{\text{Э}}}{\lambda_{\text{Э}}^2} = \frac{2}{\lambda_{\text{Э}}}; \quad (18)$$

– интенсивность отказов блока ССН

$$\lambda_{\text{НН}}(t_{\text{Н.САС}}) = \frac{f(t_{\text{Н.САС}})}{P_{\text{НН}}(t_{\text{Н.САС}})} = \frac{\lambda_{\text{Э}}^2 t_{\text{Н.САС}}}{1 + \lambda_{\text{Э}} t_{\text{Н.САС}}} \approx \lambda_{\text{Э}}^2 t_{\text{Н.САС}}. \quad (19)$$

Формулы (13) – (19) справедливы тогда, когда параметры распределения компонентов блока ССН равны. В полете МКА случаются ситуации, когда при отказе резерва в блоке ССН создается резервируемый блок с компонентами, имеющими различные значения параметров. Такие ситуации возникают в сверхсложных блоках ССН. В этом случае необходим другой подход для вывода формул оценки показателей надежности блока ССН.

Известно, что при наличии двух независимых случайных величин  $x$  и  $y$  с плотностями распределения  $f_1(x)$  и  $f_2(y)$  случайная величина

$$z = x + y \quad (20)$$

имеет плотность распределения  $f(z)$  [8], вычисляемую по формуле

$$f(z) = \int_{-\infty}^{+\infty} f_2(z-x)f_1(x)dx = \int_{-\infty}^{+\infty} f_1(z-y)f_2(y)dy. \quad (21)$$

В связи с тем что значения интервалов работоспособности больше нуля и значения  $x$  и  $y$  не больше  $z$ , формула (21) примет вид

$$f(z) = \int_0^z f_2(z-x)f_1(x)dx = \int_0^z f_1(z-y)f_2(y)dy. \quad (22)$$

Рассмотрим композицию экспоненциальных распределений при различных значениях параметров. Пусть оба компонента блока ССН имеют различные параметры распределения:

$$f(x_1) = \lambda_1 \exp(-\lambda_1 x_1); \quad (23)$$

$$f(x_2) = \lambda_2 \exp(-\lambda_2 x_2). \quad (24)$$

В этом случае согласно (22)

$$\begin{aligned} f(z) &= \int_0^z \lambda_2 \exp[-\lambda_2(z-x_1)] \lambda_1 \exp(-\lambda_1 x_1) dx_1 = \int_0^z \lambda_1 \lambda_2 \exp[-\lambda_2(z-x_1)] \exp(-\lambda_1 x_1) dx_1 = \\ &= \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} [\exp(-\lambda_1 z) - \exp(-\lambda_2 z)] \approx \lambda_1 \lambda_2 z. \end{aligned} \quad (25)$$

Следовательно,

$$F(t) = \int_0^t \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} [\exp(-\lambda_1 z) - \exp(-\lambda_2 z)] dz \approx 1 + \frac{1}{\lambda_2 - \lambda_1} [\lambda_1 \exp(-\lambda_2 t) - \lambda_2 \exp(-\lambda_1 t)]; \quad (26)$$

$$P(t) = 1 - F(t) = \frac{1}{\lambda_1 - \lambda_2} [\lambda_1 \exp(-\lambda_2 t) - \lambda_2 \exp(-\lambda_1 t)] \approx 1 - \frac{\lambda_1 \lambda_2 t^2}{2}; \quad (27)$$

$$T_{0.} = \int_0^{\infty} P(t) dt = \int_0^{\infty} \frac{1}{\lambda_1 - \lambda_2} [\lambda_1 \exp(-\lambda_2 t) - \lambda_2 \exp(-\lambda_1 t)] dt = \frac{\lambda_1 + \lambda_2}{\lambda_1 \lambda_2}; \quad (28)$$

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{P(t)} = \lambda_1 \lambda_2 \frac{[\exp(-\lambda_2 t) - \exp(-\lambda_1 t)]}{[\lambda_1 \exp(-\lambda_2 t) - \lambda_2 \exp(-\lambda_1 t)]} \approx \lambda_1 \lambda_2 t. \quad (29)$$

### 3.4. Сверхсложный блок ССН БА с резервированием путем замещения сложным ненагруженным блоком

Сверхсложный блок ССН БА (см. рис. 1, з) можно рассматривать как сложный блок ССН с резервированием ненагруженным замещением в виде цепочки из простого и сложного блоков с постоянным нагруженным резервом. Критерием отказа такого блока является отказ обеих цепочек блока. В отличие от сложного блока ССН с замещением ненагруженным резервом в этой структуре может создаваться ситуация, когда резервируемые цепочки имеют различные значения интенсивности отказов и вероятности безотказной работы. Такая ситуация создается, когда в резервируемой цепочке откажет один из резервируемых элементов.

В исходном состоянии, когда работоспособны все элементы сверхсложного блока ССН, вероятность безотказной работы сверхсложного блока ССН определяется по формуле

$$P_{\text{НН}}(t_{\text{Н.САС}}) = (1 + \lambda_{\text{СБ}} t_{\text{Н.САС}}) \times \exp(-\lambda_{\text{СБ}} t_{\text{Н.САС}}) \approx 1 - \frac{(\lambda_{\text{СБ}} t_{\text{Н.САС}})^2}{2}, \quad (30)$$

где  $\lambda_{\text{СБ}}$  – интенсивность отказов резервируемой цепочки из структуры сверхсложного блока ССН:

$$\lambda_{\text{СБ}} = \lambda_{\text{П}} + \frac{\lambda_{\text{Э}}^2 t_{\text{Н.САС}}}{1 + \lambda_{\text{Э}} t_{\text{Н.САС}}}. \quad (31)$$

Здесь  $\lambda_{\text{П}}$  – интенсивность отказов простого блока ССН в цепочке элементов;  $\lambda_{\text{Э}}$  – интенсивность отказов резервируемого элемента в цепочке элементов;  $t_{\text{Н.САС}}$  – значение наработки сверхсложного блока ССН.

В случае отказа элемента резервируемой части цепочки сложный блок превращается в простой блок, состоящий из цепочки элементов. Интенсивность отказов такого простого блока больше интенсивности отказов сложного блока. Показатели надежности блока ССН вычисляются по формулам (27) – (29). После подстановки значений получим

$$\lambda_1 = \lambda_{\text{СБ}}; \quad (32)$$

$$\lambda_2 = \lambda_{\text{П}} + \lambda_{\text{Э}}, \quad (33)$$

где  $\lambda_{\text{Э}}$  – интенсивность отказов цепочки элементов сложного блока ССН, превращенного в простой блок.

В случае отказа нерезервируемого элемента в цепочке сложного блока показатели надежности сверхсложного блока будут равны показателям надежности сложного блока, входящего в состав сверхсложного блока.

К примеру, чтобы рассчитать вероятность безотказной работы сверхсложного блока ССН при интенсивности отказов простого блока цепочки  $\lambda_{\text{П}} = 13 \cdot 10^{-8}$  1/ч, необходимо принять следующие значения: интенсивность отказов резервируемого элемента в цепочке элементов  $\lambda_{\text{Э}} = 14 \cdot 10^{-8}$  1/ч и наработка сверхсложного блока ССН  $t_{\text{Н.САС}} = 46 \cdot 000$  ч.

Интенсивность отказов резервируемого блока определяем по формуле (30). После подстановки в формулу (31) значений  $\lambda_{\Pi}$  и  $\lambda_{\Sigma}$  получаем  $\lambda_{СБ} = 18,5 \cdot 10^{-8}$  1/ч.

Значения вероятности безотказной работы сверхсложного блока при условии, что все элементы блока работоспособны, вычисляем по формуле (30). После подстановки в формулу (30) значений  $\lambda_{СБ}$  и  $t_{НС}$  получаем  $P_{Б,Н}(t_{НС}) = 0,999\ 964$ .

Вероятность безотказной работы сверхсложного блока при условии, что отказал элемент резервируемой части цепочки сложного блока, определяем по формуле (27). После подстановки в формулу (27) значений  $\lambda_1 = \lambda_{СБ}$ ,  $\lambda_2 = \lambda_{\Pi} + \lambda_{\Sigma} = 27 \cdot 10^{-8}$  1/ч и  $t_{НС,САС}$  получим  $P_{Б,Н}(t_{НС}) = 0,999\ 911$ .

#### 4. Оценка безотказности БА МКА в полете

В процессе полета МКА на наземный пункт управления (НПУ) КА поступает телеметрическая информация, которая содержит данные об отказах элементов структуры МКА. В связи с этим можно утверждать, что персонал, участвующий в эксплуатации МКА, в любой момент времени полета  $t_{\Pi}$  обладает информацией о текущей структуре МКА и оставшемся промежутке времени до наступления момента  $T_{САС}$ .

Совершенно очевидно, что такого вида расчеты эксплуатационный персонал выполнять не может. Представляется целесообразным разработать методику, характеризующую безотказность БА МКА в полете и полезную для выполнения эксплуатационным персоналом МКА. При разработке методики допустимо использовать данные, которые имеются в конструкторском документе «Расчет надежности МКА», и сведения о структуре БА на текущий момент.

Следует иметь в виду, что изменение значения показателя безотказности производится по мере увеличения времени полета и числа отказов элементов в резервируемых объектах БА. Оценку безотказности БА в процессе полета эксплуатационным персоналом целесообразно проводить на момент отказа одного из элементов в резервируемом объекте БА, когда происходит изменение показателя безотказности БА.

Представляется целесообразным в качестве оценки состояния БА в части надежности ввести оценку потенциальной безотказности БА в процессе полета МКА. Совершенно очевидно, что потенциальные возможности БА МКА в части безотказности зависят от количества оставшихся работоспособными резервных элементов, которых вначале достаточно много. Например, в БА БКА зарезервированы 22 объекта. Очевидно, что по мере отказов резервных элементов будет снижаться и уровень безотказности. Сведения о расходовании резервных элементов на борту поступают в наземный комплекс управления (НКУ) по телеметрии.

В связи с изложенным выше возникает задача оценки оставшегося после определенного времени полета МКА потенциала безотказности БА МКА.

Предлагается проводить оценку вероятности безотказной работы БА МКА за наработку, равную сроку активного существования при сохранившемся наборе резервных элементов, и затем сравнивать ее с первоначальным значением.

Для оценки безотказности БА в процессе полета МКА целесообразно использовать структурную схему надежности БА (рис. 2).

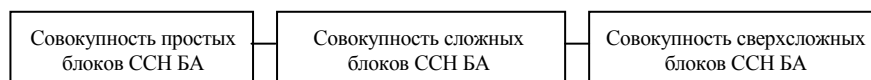


Рис. 2. Структурная схема надежности БА МКА

В соответствии с ССН на рис. 2 исходное значение вероятности безотказной работы БА в интервале САС следует вычислять по формуле

$$P_{БА}(T_{САС}) = P_{С.П}(T_{САС}) P_{С.С}(T_{САС}) P_{С.С.С}(T_{САС}), \quad (34)$$

где  $P_{БА}(T_{САС})$  – вероятность безотказной работы БА в интервале САС;

$P_{C.П}(T_{CAC})$  – вероятность безотказной работы совокупности простых блоков ССН БА в интервале САС;

$P_{C.C}(T_{CAC})$  – вероятность безотказной работы совокупности сложных блоков ССН БА с простым резервом в интервале САС;

$P_{C.CC}(T_{CAC})$  – вероятность безотказной работы совокупности сверхсложных блоков ССН БА со сложным резервом в интервале САС;

$$P_{C.П}(T_{CAC}) = \prod_{i=1}^{m_1} P_{П.i}(T_{CAC}); \quad (35)$$

$$P_{C.C}(T_{CAC}) = \prod_{i=1}^{m_2} P_{C.i}(T_{CAC}); \quad (36)$$

$$P_{C.CC}(T_{CAC}) = \prod_{i=1}^{m_3} P_{CC.i}(T_{CAC}). \quad (37)$$

Здесь  $P_{П.i}(T_{CAC})$ ,  $P_{C.i}(T_{CAC})$ ,  $P_{CC.i}(T_{CAC})$  – вероятности безотказной работы в интервале САС  $i$ -го простого, сложного, сверхсложного блоков ССН БА соответственно;  $m_1$ ,  $m_2$ ,  $m_3$  – количество простых, сложных, сверхсложных блоков в ССН БА соответственно.

При отказе хотя бы одного из совокупности простых блоков ССН БА произойдет отказ БА. При отказе элемента в блоке из совокупности сложных блоков отказ БА не произойдет, произойдет возрастание интенсивности отказов и спад вероятности безотказной работы этого блока, а следовательно, и БА. При отказе в сверхсложном блоке нерезервируемого элемента произойдет то, что происходит при отказе элемента в сложном блоке. При отказе в сверхсложном блоке элемента из резервируемой группы отказ БА не произойдет, более того, сохранится и резерв, но произойдет возрастание интенсивности отказов и спад вероятности безотказности работы блока, а следовательно, и БА.

Новое текущее значение вероятности безотказной работы БА в интервале САС определяется по формуле

$$P_T(T_{CAC}) = \frac{P_{ПР}(T_{CAC}) P_{Э}(T_{CAC})}{P_{О.РГЭ}(T_{CAC})}, \quad (38)$$

где  $P_T(T_{CAC})$  – текущее (новое) значение вероятности безотказной работы БА;

$P_{ПР}(T_{CAC})$  – предыдущее текущее значение вероятности безотказной работы БА (сохраненное ранее);

$P_{О.РГЭ}(T_{CAC})$  – вероятность безотказной работы отказавшей группы резервируемых элементов БА;

$P_{Э}(T_{CAC})$  – вероятность безотказной работы элемента, оставшегося работоспособным, из отказавшей группы резервируемых элементов БА.

Новое текущее значение интенсивности отказов БА в интервале САС определяется по формуле

$$\Lambda_T = \Lambda_{ПР} - \Lambda_{РГЭ} + \Lambda_{Э}, \quad (39)$$

где  $\Lambda_T$  – текущее (новое) значение интенсивности отказов БА;

$\Lambda_{ПР}$  – предыдущее текущее значение интенсивности отказов БА (сохраненное ранее);

$\Lambda_{РГЭ}$  – интенсивность отказов отказавшей группы резервируемых элементов БА;

$\Lambda_{Э}$  – интенсивность отказов элемента, оставшегося работоспособным, из отказавшей группы резервируемых элементов БА.

Значения  $P_{О.РГЭ}(t_{CAC})$ ,  $P_{Э}(t_{CAC})$ ,  $\Lambda_{РГЭ}$ ,  $\Lambda_{Э}$  берутся из заранее подготовленной таблицы, выполненной в процессе расчета надежности БА.

Оценку потенциальной текущей безотказности БА предлагается проводить по формулам



$$K_{C.B.T} = \frac{P_T(T_{C.A.C.})}{P_H(T_{C.A.C.})}; \quad (40)$$

$$K_{П.И.Т} = \frac{\Lambda_T}{\Lambda_{ПР}}, \quad (41)$$

где  $K_{C.B.T}$  – коэффициент снижения вероятности безотказной работы БА по состоянию на текущий момент времени;

$K_{П.И.Т}$  – коэффициент повышения интенсивности отказов БА по состоянию на текущий момент времени;

$P_T(T_{C.A.C.})$  – вероятность безотказной работы БА по состоянию на текущий момент времени;

$P_H(T_{C.A.C.})$  – вероятность безотказной работы БА в исходном состоянии, когда все элементы БА работоспособны.

Например, для МКА с показателями безотказности  $P_H(T_{C.A.C.}) = 0,901132$  и  $\Lambda_H = 2,542 \cdot 10^{-6}$  1/ч, модель надежности которого представлена на рис. 2, необходимо определить коэффициенты снижения вероятности безотказной работы БА МКА за САС в пять лет и повышения интенсивности отказов при отказе элементов в сложных блоках ССН БА (табл. 1).

Ниже приведен фрагмент таблицы показателей безотказности сложных блоков ССН МКА, составленной в процессе расчета надежности МКА (табл. 1).

Таблица 1

Показатели безотказности сложных блоков

Дата	Событие	Текущее значение		$K_{C.B.T}$	$K_{П.И.Т}$
		$P_{BA}(t_{C.A.C.})$	$\Lambda_{BA} \cdot 10^{-8}$ 1/ч		
01.01.14	Исходное состояние	0,901 132	254,20	1,000	1,000
01.06.14	Отказал один компьютер БВС БКУ (2.2.4 ССН)	0,892 201	265,07	0,990	1,043
	Отказала резервируемая цепочка элементов в СОС	0,885 278	273,57	0,982	1,076
	Отказала резервируемая цепочка элементов в АСН	0,879 620	280,57	0,976	1,103
	Отказала резервируемая цепочка элементов в ТКС	0,872 794	289,07	0,968	1,137
	Отказал резервируемый узел управления в аппаратуре съемочной системы	0,864 971	295,59	0,960	1,163

Таблица 2

Значения показателей безотказности текущего состояния БА БКА

Дата	Событие	Текущее значение		$K_{C.B.T}$	$K_{П.И.Т}$
		$P_{BA}(t_{C.A.C.})$	$\Lambda_{BA} \cdot 10^{-8}$ 1/ч		
01.01.14	Исходное состояние	0,901 132	254,20	1,000	1,000
01.06.14	Отказал один компьютер БВС БКУ	0,892 201	265,07	0,990	1,043
	Отказала резервируемая цепочка элементов в СОС	0,885 278	273,57	0,982	1,076
	Отказала резервируемая цепочка элементов в АСН	0,879 620	280,57	0,976	1,103
	Отказала резервируемая цепочка элементов в ТКС	0,872 794	289,07	0,968	1,137
	Отказал резервируемый узел управления в аппаратуре съемочной системы	0,864 971	295,59	0,960	1,163

Табл. 2 представляет собой форму документа, который должна вести эксплуатационная организация МКА для фиксации расчетных значений принятых показателей безотказности БА на текущий момент времени.

### Заключение

Предложенный вариант оценки текущего состояния безотказности БА МКА легко реализуем в эксплуатирующей организации МКА, но требует предварительной подготовки расчетных значений данных, используемых при оценке текущего состояния безотказности БА МКА еще на этапе разработки эксплуатационной документации организацией – разработчиком БА.

### Список литературы

1. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения : ГОСТ 27.002–89. – М. : Изд-во стандартов, 1990. – 37 с.
2. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения : ГОСТ Р 27.002–2009. – М. : Изд-во стандартов, 2009. – 75 с.
3. Надежность технических систем : справ. / под ред. И.А. Ушакова. – М. : Радио и связь, 1985. – 606 с.
4. Зинченко, О.Н. Малые оптические спутники ДЗЗ / О.Н. Зинченко // Ракурс [Электронный ресурс]. – 2015. – Режим доступа : <http://www.racurs.ru>. – Дата доступа : 07.09.2015.
5. Менеджмент риска. Структурная схема надежности и булевы методы : ГОСТ Р 51891–2008 (ИСО 1161:1984). – М. : Стандартинформ, 2008. – 53 с.
6. Половко, А.М. Основы теории надежности / А.М. Половко, С.В. Гуров. – СПб. : БХВ–Петербург, 2006. – 560 с.
7. Овчаров, Л.А. Прикладные задачи теории массового обслуживания / Л.А. Овчаров. – М. : Машиностроение, 1969. – 324 с.
8. Шор, Я.Б. Статистические методы анализа и контроля качества и надежности / Я.Б. Шор. – М. : Сов. радио, 1962. – 553 с.

Поступила 28.07.2015

*Объединенный институт проблем  
информатики НАН Беларуси,  
Минск, Сурганова, 6  
e-mail: aliushkevich@newman.bas-net.by*

**L.I. Kulbak, V.B. Aliushkevich, S.A. Zolotoy**

### **ASSESSMENT OF RELIABILITY OF THE ONBOARD EQUIPMENT OF SMALL SPACECRAFTS DURING THEIR FLIGHT**

The technique of an assessment of current state of reliability of the onboard equipment of small spacecrafts during their flight is given. A mathematical representation of the reliability indicator of onboard equipment and the model of structure of a small spacecraft, as well as formulas for calculating the fail-safe functioning indicators of reliability diagram blocks of onboard equipment are adduced.