

ISSN 1561-2430 (Print)  
ISSN 2524-2415 (Online)

## ИНФОРМАТИКА INFORMATICS

УДК 004.3  
<https://doi.org/10.29235/1561-2430-2018-54-2-241-252>

Поступила в редакцию 29.11.2017  
Received 29.11.2017

Л. И. Кульбак<sup>1</sup>, С. А. Золотой<sup>2</sup>, Т. С. Мартинович<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь

<sup>2</sup>Научно-инженерное республиканское унитарное предприятие «Геоинформационные системы», Минск, Беларусь

### ПОВЫШЕНИЕ ИНФОРМАТИВНОСТИ РАСЧЕТНЫХ ОЦЕНОК НАДЕЖНОСТИ БОРТОВОЙ АППАРАТУРЫ МАЛОГАБАРИТНЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

**Аннотация.** Рассматривается вопрос повышения информативности расчетных значений показателей надежности (ПН) объектов (надежность которых обеспечивается путем резервирования структурных элементов) за счет использования их интервальных оценок. При обычном расчете надежности значение ПН объекта является однозначной величиной, а при интервальной оценке получается диапазон значений, что вполне можно считать повышением информативности. Выбор объектом исследований бортовой аппаратуры (БА) малогабаритных космических аппаратов (МКА) обусловлен следующим: в настоящее время подавляющее большинство космических аппаратов относятся к категории МКА; для МКА предъявляются высокие требования к надежности, что приводит к необходимости использования резервирования; Белорусский космический аппарат дистанционного зондирования Земли (БКА) относится к категории МКА. В ходе исследования установлены формулы вычисления результатов интервальной оценки при линейной и нелинейной зависимости ПН объекта от ПН его элементов. В качестве модели надежности объекта (системы) использовались структурные схемы надежности (ССН), в состав которых входят блоки из элементов без резервирования (простые) и с различными видами резервирования (сложные). Показатель надежности объекта устанавливается по его ССН, поэтому для получения его интервальной оценки необходимо определить интервальные оценки ПН его блоков. Получены интервальные оценки ПН простых и сложных блоков ССН. Сложные блоки рассматривались как совокупность параллельных цепей, обеспечивающих постоянное резервирование при всех нагруженных цепях, непостоянное резервирование нагруженных и ненагруженных цепей, резервирование замещением и голосованием. Приведены формулы интервальной оценки ПН объекта, представленного ССН, и пример использования методики на составной части реальной бортовой аппаратуры МКА – бортовой информационной системе, при этом граничные значения интервальных оценок можно принимать как оптимистические и пессимистические.

**Ключевые слова:** информативность, надежность, показатели надежности, интервальная оценка надежности, расчет надежности, бортовая аппаратура, малогабаритные космические аппараты

**Для цитирования.** Кульбак, Л. И. Повышение информативности расчетных оценок надежности бортовой аппаратуры малогабаритных космических аппаратов / Л. И. Кульбак, С. А. Золотой, Т. С. Мартинович // Вест. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-мат. навук. – 2018. – Т. 54, № 2. – С. 241–252. <https://doi.org/10.29235/1561-2430-2018-54-2-241-252>

L. I. Kulbak<sup>1</sup>, S. A. Zolotoy<sup>2</sup>, T. S. Martinovich<sup>1</sup>

<sup>1</sup>United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

<sup>2</sup>Scientific-Engineering Republican Unitary Enterprise “Geoinformation Systems”, Minsk, Belarus

### INCREASE IN THE INFORMATIVE CONTENT OF CALCULATED RELIABILITY ESTIMATES OF THE ON-BOARD EQUIPMENT OF SMALL SPACECRAFTS

**Abstract.** An increase in the informative content of the calculated values of the reliability measure (RM) of objects, whose reliability is ensured by the redundancy of structural elements, is considered in the article. The increase of the informative content is ensured using the interval estimates of the RM. In the normal reliability calculation, the calculated value of the object's RM is unambiguous, and for an interval reliability estimate, the value range is obtained, which can be quite appreciated as the increase in the informative content. The choice of on-board equipment for small spacecrafts as an object of research in this work is determined as follows: at present, the vast majority of spacecrafts can be classified as small spacecrafts; since the reliability of small spacecrafts is high, it is necessary to use redundancy; the Belarusian spacecraft for remote sensing of the Earth belongs to the category of small spacecrafts. As a result of research, the formulas for calculation of interval estimation results are established for the linear and nonlinear dependence of the object's RM on the RM of its elements. Structural reliability schemes (SSR) are used as an object (system) reliability model, which includes blocks of elements without redundancy (simple) and blocks with different-type redundancy (complex). The object's RM is a reliability measure determined by its SSR. Therefore, for an interval estimation of the object's RM to be obtained, the interval estimates of the RM of its blocks must be made. RM interval estimates of simple and complex SSR blocks are obtained in the article. Complex blocks were considered as a set of parallel circuits providing: continuous redundancy for all loaded circuits; non-continuous redundancy of loaded and unloaded circuits; standby redun-

dancy; redundancy by voting. The formulas for interval estimation of the object's RM represented by the SSR and the example of using the methodology on the component part of a real on-board information system are given in the article. The boundary values of the interval estimates of the example can be taken as optimistic and pessimistic estimates.

**Keywords:** informative content, reliability, reliability measure, interval reliability estimation, reliability calculation, on-board equipment, small spacecraft

**For citation.** Kulbak L. I., Zolotoy S. A., Martinovich T. S. Increase in the informative content of calculated reliability estimates of the on-board equipment of small spacecrafts. *Vestsi Natsyional'noi akademii navuk Belarusi. Seriya fizika-matematychnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physics and Mathematics series*, 2018, vol. 54, no. 2, pp. 241–252 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-2430-2018-54-2-241-252>

**Введение.** Вопрос повышения информативности расчетных значений показателей надежности (ПН) объектов рассматривался в работе [1], однако исследовались только те объекты, где не использовалось резервирование для повышения их надежности. Повышение информативности расчетных значений ПН обеспечивалось путем применения интервальных оценок неразукрупняемых элементов объекта, т. е., по сути, осуществлялась интервальная оценка его надежности. Интервальное значение ПН представляет собой промежуток от нижнего значения ПН –  $R_n$  до верхнего значения ПН –  $R_v$ , в который попадает истинное значение ПН с определенной доверительной вероятностью. Среднее значение ПН определяется по формуле  $R_{cp} = \frac{R_n + R_v}{2}$ .

При обычном расчете надежности расчетным значением ПН объекта является  $R_{cp}$ , а при интервальной оценке мы получаем диапазон значений, что вполне можно считать повышением информативности. Выбор в данной работе объектом исследований бортовой аппаратуры (БА) малогабаритных космических аппаратов (МКА) обусловлен следующим: в настоящее время подавляющее большинство космических аппаратов (КА) относятся к категории малогабаритных; к МКА предъявляются высокие требования в отношении ПН, что требует использования резервирования для достижения этих показателей; Белорусский космический аппарат дистанционного зондирования Земли (БКА) относится к категории МКА.

Приняты следующие допущения и ограничения: восстановление работоспособности бортовой аппаратуры МКА в полете осуществляется автоматически путем применения резервных элементов, которые не подлежат восстановлению; элементы, подключающие резерв при замещении, имеют пренебрежимо малую интенсивность отказов; время, расходуемое на подключение резерва, пренебрежимо мало и не учитывается как время потери работоспособности МКА; в связи с малыми размерами МКА кратности резервирования рассматриваются не более двух; исследованию подлежит лишь одно свойство надежности – безотказность; отказы неразукрупняемых элементов БА являются независимыми событиями; в качестве показателей безотказности элементов будут использованы интенсивность отказов  $\lambda$  и вероятность безотказной работы (ВБР)  $P(t)$ ; в качестве показателей безотказности составных частей и БА в целом будут использованы вероятность безотказной работы  $P(t)$ , интенсивность отказов  $\Lambda$  и средняя наработка до отказа  $T_{oc}$ ; закон распределения наработки до отказа элементов БА принимается экспоненциальный с параметром  $\lambda$ ; интенсивности отказов элементов БА задаются в виде интервальных оценок нижнего значения  $\lambda_n$  и верхнего значения  $\lambda_v$  с указанием доверительной вероятности интервала.

В результате исследования в [1] установлено, что при линейной зависимости ПН объекта  $R$  от ПН его элементов  $\lambda$ :  $R = b_1\lambda_1 + b_2\lambda_2 + \dots + b_m\lambda_m$ , результаты интервальной оценки ПН объекта определяются по формулам  $R \in (R_{cp} - \Delta R, R_{cp} + \Delta R)$ ,

$$R_{cp} = \sum_{i=1}^m b_i \lambda_{cp,i}, \quad (1)$$

$$\Delta R = \sum_{i=1}^m b_i \Delta \lambda_i, \quad (2)$$

где  $b_1, b_2, \dots, b_m$  – постоянные коэффициенты при ПН элементов объекта;  $R$  – ПН объекта;  $R_{cp}$  – среднее значение ПН объекта;  $\Delta R$  – погрешность определения ПН объекта (отклонение ПН объекта от своего среднего значения);  $\lambda_{cp,i}$  – среднее значение ПН  $i$ -го элемента объекта;  $\Delta \lambda_i$  – погрешность определения ПН  $i$ -го элемента объекта.

При *нелинейной зависимости* ПН объекта от ПН его элементов  $R_n = f(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m)$ , результаты интервальной оценки ПН объекта, согласно [1], определяются с достаточной точностью для практики расчетов надежности по формулам  $R_n \in (R_{n,cr} - \Delta R, R_{n,cr} + \Delta R)$ ,  $R_{n,cr} = f(\lambda_{cr,1}, \lambda_{cr,2}, \dots, \lambda_{cr,m})$ ,

$$\Delta R_n \approx \sum_{i=1}^m \left| \frac{\partial f}{\partial \lambda_i} \right| \Delta \lambda_i, \quad (3)$$

где  $R_n$  – ПН объекта при нелинейной зависимости этого показателя от ПН его элементов;  $R_{n,cr}$  – среднее значение ПН объекта при нелинейной зависимости этого показателя от ПН его элементов;  $\Delta R_n$  – погрешность определения ПН  $R_n$ ;  $f(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m)$  – функциональная зависимость ПН объекта  $R_n$  от ПН его элементов  $\lambda_i$ ;  $\lambda_{cr,1}, \lambda_{cr,2}, \dots, \lambda_{cr,m}$  – средние значения ПН элементов объекта;  $\frac{\partial f}{\partial \lambda_i}$  – первая производная от функции  $f$  по аргументу  $\lambda_i$ , вычисленная в точке  $\lambda_{cr,1}, \lambda_{cr,2}, \dots, \lambda_{cr,m}$  без учета знака;  $\Delta \lambda_i$  – погрешность определения  $\lambda_i$ .

**Модель надежности бортовой аппаратуры МКА.** В качестве модели надежности объекта (системы) нормативная документация (Надежность в технике. Расчет надежности. Общие положения: ГОСТ 27.301-95; Менеджмент риска. Структурная схема надежности и булевы методы: ГОСТ Р 51901.14-2007) рекомендует использовать структурные схемы надежности (ССН).

Установлено, что подавляющее число структур объектов, показатели надежности которых подлежат расчету, можно привести к последовательной схеме надежности. На рис. 1 приведена ССН объекта последовательного типа из  $m$  блоков. По аналогии с [2] примем, что блоки ССН ( $B_i$ ) могут быть простыми (без резервирования элементов) и сложными (состоящими из резервируемых различными способами цепочек элементов). В качестве первичных исходных данных для интервальной оценки блоков ССН используется интервальная оценка интенсивности отказов составляющих элементов в виде  $(\lambda_{i,n}, \lambda_{i,b})$ , где  $\lambda_{i,n}, \lambda_{i,b}$  – соответственно нижнее и верхнее значения интенсивности отказов  $i$ -го элемента блока ССН. Среднее значение интенсивности отказов  $i$ -го элемента блока рассчитывают по формулам  $\lambda_{i,cr} = \lambda_{i,n} + \Delta \lambda_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ ,  $\Delta \lambda_i = \frac{\lambda_{i,b} - \lambda_{i,n}}{2}$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ , где  $n$  – количество типов неразукрупняемых элементов в блоке ССН.

*Простые блоки ССН* объединяют элементы с одинаковыми значениями интенсивности отказов и коэффициентами интенсивности эксплуатации. Среднее значение интенсивности отказов таких простых блоков ССН вычисляется по формуле

$$\Lambda_{ПБ,j,cr} = k_j k_{иэ,j} \lambda_{j,cr}, \quad j = 1, 2, \dots, m_n, \quad (4)$$

где  $\Lambda_{ПБ,j,cr}$  – среднее значение интенсивности отказов  $j$ -го простого блока ССН;  $k_j$  – количество элементов в  $j$ -м простом блоке ССН;  $k_{иэ,j}$  – коэффициент интенсивности эксплуатации  $j$ -го простого блока ССН;  $\lambda_{j,cr}$  – среднее значение интенсивности отказов элементов  $j$ -го простого блока ССН;  $m_n$  – количество простых блоков в ССН объекта. Среднее значение ВБР простых блоков ССН определяется как

$$P_{ПБ,j,cr}(t) = \exp(-\Lambda_{ПБ,j,cr} t) = \exp(-k_j k_{иэ,j} \lambda_{j,cr} t), \quad j = 1, 2, \dots, m_n, \quad (5)$$

где  $P_{ПБ,j,cr}(t)$  – среднее значение ВБР  $j$ -го блока ССН объекта. Погрешность определения интенсивности отказов простого блока ССН в соответствии с (2) следует вычислять по формуле

$$\Delta \Lambda_{ПБ,j} = k_j k_{иэ,j} \Delta \lambda_j, \quad j = 1, 2, \dots, m_n, \quad (6)$$

где  $\Delta \lambda_j$  – погрешность определения интенсивности отказов  $j$ -го элемента простого блока ССН. Погрешность определения ВБР простого блока ССН в соответствии с (3) вычисляется по формуле

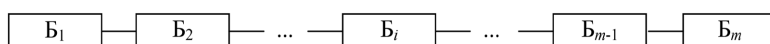


Рис. 1. Обобщенная последовательная структурная схема надежности объекта

Fig. 1. Generalized sequential structural reliability scheme of an object

$$\Delta P(t)_{\text{пб},j} = \frac{\partial P(t)_{\text{пб},j}}{\partial \lambda_j} \Delta \lambda_j = \exp(-k_j k_{\text{иэ},j} \lambda_{j,\text{ср}} t) k_j k_{\text{иэ},j} \lambda_{j,\text{ср}} t \Delta \lambda_j, \quad j = 1, 2, \dots, m_{\text{п}}.$$

Сложные блоки ССН, как правило, состоят из цепочек элементов, соединенных в резервируемую группу определенного вида. Заметим, что цепочка элементов в пределе может вырождаться в один элемент. Показателем надежности цепочки элементов, используемых для организации резервирования, является интенсивность отказов  $\Lambda_{\text{ц}}$ , которая представляет собой линейную функцию интенсивностей отказов входящих в ее состав элементов. В соответствии с (1) и (2)  $\Lambda_{\text{ц,ср}} = \sum_{i=1}^r \lambda_{\text{ср},i}$ ,  $\Delta \Lambda_{\text{ц}} = \sum_{i=1}^r \Delta \lambda_i$ , где  $\Lambda_{\text{ц,ср}}$  – среднее значение интенсивности отказов цепочки элементов блока ССН;  $\lambda_{\text{ср},i}$  – среднее значение интенсивности отказов  $i$ -го элемента цепочки элементов блока;  $\Delta \Lambda_{\text{ц}}$  – погрешность определения интенсивности отказов цепочки элементов блока;  $\Delta \lambda_i$  – погрешность определения интенсивности отказов  $i$ -го элемента цепочки элементов блока. Будем различать несколько видов резервирования, которые, по данным [3], используются в бортовой аппаратуре МКА.

**Параллельное соединение  $N$  цепей, обеспечивающих постоянное резервирование** (все цепи нагружены), приведено на рис. 2. Расчет ВБР блока ССН  $P(t)$  при этом виде резервирования имеет следующий вид:

$$P(t) = 1 - [1 - p_{\text{ц}}(t)]^N, \quad p_{\text{ц}}(t) = \exp\left(-t \sum_{i=1}^k \lambda_i n_i\right) = \exp(-\Lambda_{\text{ц}} t), \quad (7)$$

где  $p_{\text{ц}}(t)$  – ВБР основной или резервной цепочки элементов блока ССН;  $\lambda_i$  – интенсивность отказов  $i$ -го типа элементов цепочки элементов блока ССН;  $n_i$  – количество элементов  $i$ -го типа в цепочке элементов блока ССН;  $k$  – количество типов элементов в цепочке элементов;  $\Lambda_{\text{ц}}$  – интенсивность отказов цепочки элементов блока ССН:  $\Lambda_{\text{ц}} = \sum_{i=1}^k \lambda_i n_i$ .

Погрешность определения интенсивности отказов цепочки элементов блока ССН  $\Delta \Lambda_{\text{ц}}$  вычисляется по формуле [1]  $\Delta \Lambda_{\text{ц}} = \sum_{i=1}^k \frac{\partial \Lambda_{\text{ц}}}{\partial \lambda_i} \Delta \lambda_i = \sum_{i=1}^k n_i \Delta \lambda_i$ , где  $\Delta \lambda_i$  – погрешность определения интенсивности отказов  $i$ -го типа элемента цепочки элементов блока ССН.

В связи с малыми размерами МКА нами принято решение о том, что кратность резервирования блоков ССН должна быть не более двух. Представим ВБР для этих случаев:

$$P_1(t)_{\text{Б}} = 2 \exp(-\Lambda_{\text{ц}} t) - \exp(-2\Lambda_{\text{ц}} t) = \exp(-\Lambda_{\text{ц}} t) [2 - \exp(-\Lambda_{\text{ц}} t)], \quad (8)$$

$$P_2(t)_{\text{Б}} = 3 \exp(-\Lambda_{\text{ц}} t) - 3 \exp(-2\Lambda_{\text{ц}} t) + \exp(-3\Lambda_{\text{ц}} t),$$

где  $P_1(t)_{\text{Б}}$ ,  $P_2(t)_{\text{Б}}$  – ВБР блока ССН при кратности резервирования 1 и 2 соответственно.

Определим остальные показатели надежности блока ССН с кратностью резервирования 1. Интенсивность отказов в общем случае вычисляется как  $\Lambda(t) = \frac{f(t)}{P(t)}$ , где  $f(t)$  – плотность распределения наработки до отказа;  $P(t)$  – вероятность безотказной работы;  $f(t) = -\frac{dP(t)}{dt}$ . Для блока ССН с кратностью резервирования 1:

$$f_1(t)_{\text{Б}} = -\frac{dP_1(t)_{\text{Б}}}{dt} = 2\Lambda_{\text{ц}} \exp(-\Lambda_{\text{ц}} t) [1 - \exp(-\Lambda_{\text{ц}} t)],$$

$$\Lambda_1(t)_{\text{Б}} = \frac{f_1(t)_{\text{Б}}}{P_1(t)_{\text{Б}}} = \frac{2\Lambda_{\text{ц}} \exp(-\Lambda_{\text{ц}} t) [1 - \exp(-\Lambda_{\text{ц}} t)]}{2 \exp(-\Lambda_{\text{ц}} t) - \exp(-2\Lambda_{\text{ц}} t)}, \quad (9)$$

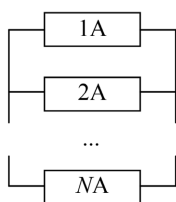


Рис. 2. Графическое представление постоянного резервирования при параллельном соединении

Fig. 2. Graphical representation of continuous redundancy with parallel connection

$$T_{O.1} = \int_0^\infty P_1(t)_B dt = 2 \int_0^\infty \exp(-\Lambda_{Ц} t) dt - \int_0^\infty \exp(-2\Lambda_{Ц} t) dt = \frac{2}{\Lambda_{Ц}} - \frac{1}{2\Lambda_{Ц}} = \frac{1}{2\Lambda_{Ц}},$$

где  $T_{O.1}$  – средняя наработка до отказа блока ССН.

Погрешность определения ВБР блока ССН с однократным нагруженным резервом  $\Delta P_1(t)_B$  и средняя наработка до отказа блока ССН  $T_{O.1}$  вычисляются следующим образом:

$$\Delta P_1(t)_B = \frac{\partial P_1(t)_B}{\partial \Lambda_{Ц}} \Delta \Lambda_{Ц} = 2t \Delta \Lambda_{Ц} [\exp(-\Lambda_{Ц} t) - \exp(-2\Lambda_{Ц} t)],$$

$$T_{O.1} = \int_0^\infty P_1(t)_B dt = 2 \int_0^\infty \exp(-\Lambda_{Ц} t) dt - \int_0^\infty \exp(-2\Lambda_{Ц} t) dt = \frac{2}{\Lambda_{Ц}} - \frac{1}{2\Lambda_{Ц}} = \frac{1}{2\Lambda_{Ц}}.$$

Погрешность определения интенсивности отказа блока ССН при однократном резервировании  $\Delta \Lambda_{1.Б}$  определяется как

$$\Delta \Lambda_{1.Б} = \frac{\partial \Lambda_1(t)_B}{\partial \Lambda_{Ц}} \Delta \Lambda_{Ц}. \quad (10)$$

Погрешность определения средней наработки до отказа блока ССН при однократном резервировании  $\Delta T_{O.1}$  вычисляется по формуле

$$\Delta T_{O.1} = \frac{\partial T_{O.1}(t)}{\partial \Lambda_{Ц}} \Delta \Lambda_{Ц} = \frac{1}{2\Lambda_{Ц}^2} \Delta \Lambda_{Ц}.$$

**Параллельное соединение  $N$  цепей, обеспечивающих непостоянное резервирование** вида  $M$  нагруженных основных цепей, остальные  $(N - M)$  цепей – резервные ненагруженные цепи, показано на рис. 3. Формула расчета ВБР блока ССН  $P(t)$  при этом виде резервирования имеет вид [3]:

$$P(t) = p^M(t) \left[ 1 + \sum_{j=1}^{N-M} \frac{(-M \ln p(t))^j}{j!} \right].$$

Рассмотрим варианты возможной реализации резервирования для БА МКА. Если принять  $M = 1$ , то это будет соответствовать наличию в схеме резервирования одной основной нагруженной цепочки и  $N - 1$  ненагруженных резервных цепочек, вводимых замещением. В этом случае

$$P_{1-N}(t)_B = p(t) \left[ 1 + \sum_{j=1}^{N-1} \frac{(\ln p(t))^j}{j!} \right].$$

После подстановки  $p(t)$  из (7) получим

$$P_{1-N}(t)_B = \exp(-\Lambda_{Ц} t) \left[ 1 + \sum_{j=1}^{N-1} \frac{(\Lambda_{Ц} t)^j}{j!} \right].$$

При принятых ограничениях  $N \leq 3$  возможны варианты  $M = 1, N = 2; M = 1, N = 3$ .

Вариант  $M = 1, N = 2$  отмечается в последующих формулах цифровыми индексами 1–2:

$$P_{1-2}(t) = \exp(-\Lambda_{Ц} t)(1 + \Lambda_{Ц} t),$$

$$f_{1-2}(t)_B = -\frac{dP_{1-2}(t)_B}{dt} = \Lambda_{Ц}^2 t \exp(-\Lambda_{Ц} t),$$

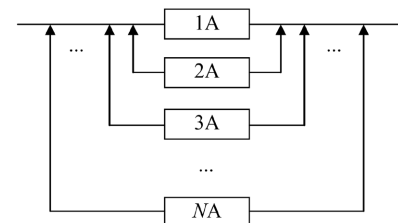


Рис. 3. Графическое представление непостоянного резервирования при параллельном соединении

Fig. 3. Graphical representation of non-continuous redundancy with parallel connection

$$\Lambda(t)_{1-2} = \frac{f_{1-2}(t)_B}{P_{1-2}(t)_B} = \frac{\Lambda_{\Pi}^2 t}{1 + \Lambda_{\Pi} t},$$

$$T_{O.1-2} = \int_0^\infty P_{1-2}(t)_B dt = \int_0^\infty \exp(-\Lambda_{\Pi} t) dt + \int_0^\infty \Lambda_{\Pi} t \exp(-\Lambda_{\Pi} t) dt = \frac{1}{\Lambda_{\Pi}} + \frac{1}{\Lambda_{\Pi}} = \frac{2}{\Lambda_{\Pi}}.$$

Погрешность определения ВБР блока ССН при  $M = 1$ ,  $N = 2$  вычисляется как

$$\Delta P_{1-2}(t)_B = \frac{\partial P_{1-2}(t)_B}{\partial \Lambda_{\Pi}} \Delta \Lambda_{\Pi} = \Lambda_{\Pi} t^2 \exp(-\Lambda_{\Pi} t) \Delta \Lambda_{\Pi}.$$

Погрешность определения интенсивности отказов блока ССН при  $M = 1$ ,  $N = 2$ :

$$\Delta \Lambda_{1-2.B} = \frac{\partial \Lambda_{1-2}(t)_B}{\partial \Lambda_{\Pi}} \Delta \Lambda_{\Pi} = \frac{\Lambda_{\Pi} t (2 + \Lambda_{\Pi} t)}{(1 + \Lambda_{\Pi} t)^2} \Delta \Lambda_{\Pi}.$$

Погрешность определения средней наработки до отказа блока ССН при  $M = 1$ ,  $N = 2$ :

$$\Delta T_{O.1-2} = \frac{\partial T_{O.1-2}(t)}{\partial \Lambda_{\Pi}} \Delta \Lambda_{\Pi} = \frac{2}{\Lambda_{\Pi}^2} \Delta \Lambda_{\Pi}.$$

Вариант  $M = 1$ ,  $N = 3$  отмечается в последующих формулах цифровыми индексами 1–3:

$$P_{1-3}(t) = \exp(-\Lambda_{\Pi} t) \left( 1 + \Lambda_{\Pi} t + \frac{(\Lambda_{\Pi} t)^2}{2} \right), \quad f_{1-3}(t)_B = -\frac{dP_{1-3}(t)_B}{dt} = \exp(-\Lambda_{\Pi} t) \frac{\Lambda_{\Pi}^3 t^2}{2},$$

$$\Lambda(t)_{1-3} = \frac{f_{1-3}(t)_B}{P_{1-3}(t)_B} = \frac{\Lambda_{\Pi}^3 t^2}{2 + 2\Lambda_{\Pi} t + (\Lambda_{\Pi} t)^2},$$

$$T_{O.1-3} = \int_0^\infty P_{1-3}(t)_B dt = \int_0^\infty \exp(-\Lambda_{\Pi} t) dt + \int_0^\infty \Lambda_{\Pi} t \exp(-\Lambda_{\Pi} t) dt + \\ + \int_0^\infty \frac{(\Lambda_{\Pi} t)^2}{2} \exp(-\Lambda_{\Pi} t) dt = \frac{1}{\Lambda_{\Pi}} + \frac{1}{\Lambda_{\Pi}} + \frac{1}{\Lambda_{\Pi}} = \frac{3}{\Lambda_{\Pi}}.$$

Погрешность определения ВБР блока ССН при  $M = 1$ ,  $N = 3$  определяется по формуле

$$\Delta P_{1-3}(t)_B = \frac{\partial P_{1-3}(t)_B}{\partial \Lambda_{\Pi}} \Delta \Lambda_{\Pi} = \frac{\Lambda_{\Pi}^2 t^3}{2} \exp(-\Lambda_{\Pi} t) \Delta \Lambda_{\Pi}.$$

Погрешность определения интенсивности отказов блока ССН при  $M = 1$ ,  $N = 3$ :

$$\Delta \Lambda_{1-3.B} = \frac{\partial \Lambda_{1-3}(t)_B}{\partial \Lambda_{\Pi}} \Delta \Lambda_{\Pi} = \frac{\Lambda_{\Pi}^2 t^2 (6 + 4\Lambda_{\Pi} t + \Lambda_{\Pi}^2 t^2)}{(2 + 2\Lambda_{\Pi} t + \Lambda_{\Pi}^2 t^2)^2} \Delta \Lambda_{\Pi}.$$

Погрешность определения средней наработки до отказа блока ССН при  $M = 1$ ,  $N = 3$ :

$$\Delta T_{O.1-3} = \frac{\partial T_{O.1-3}(t)}{\partial \Lambda_{\Pi}} \Delta \Lambda_{\Pi} = \frac{3}{\Lambda_{\Pi}^2} \Delta \Lambda_{\Pi}.$$

Если принять  $M = 2$ , то это будет соответствовать наличию в схеме резервирования двух постоянно включенных нагруженных цепочек и  $N - 2$  ненагруженных резервных цепочек, включающихся замещением. В этом случае



$$P_{2-N}(t)_B = \exp(-2\Lambda_{Ц}t) \left[ 1 + \sum_{j=1}^{N-2} \frac{(2\Lambda_{Ц}t)^j}{j!} \right].$$

С учетом принятых ограничений на кратность резервирования в МКА получаем вариант  $M=2$ ,  $N=3$ . В этом случае показатели безотказности работы блока ССН следует вычислять по формулам с цифровой индексацией 2–3:

$$P_{2-3}(t) = \exp(-2\Lambda_{Ц}t)[1 + 2\Lambda_{Ц}t], \quad f_{2-3}(t)_B = -\frac{dP_{2-3}(t)_B}{dt} = 4\Lambda_{Ц}^2 t \exp(-2\Lambda_{Ц}t),$$

$$\Lambda(t)_{2-3} = \frac{f_{2-3}(t)_B}{P_{2-3}(t)_B} = \frac{4\Lambda_{Ц}^2 t}{1 + 2\Lambda_{Ц}t},$$

$$T_{O.2-3} = \int_0^\infty P_{2-3}(t)_B dt = \int_0^\infty \exp(-2\Lambda_{Ц}t) dt + \int_0^\infty 2\Lambda_{Ц}t \exp(-\Lambda_{Ц}t) dt = \frac{1}{2\Lambda_{Ц}} + \frac{2\Lambda_{Ц}}{4\Lambda_{Ц}^2} = \frac{1}{\Lambda_{Ц}}.$$

Погрешность определения ВБР блока ССН при  $M=2$  и  $N=3$ :

$$\Delta P(t)_{2-3} = \frac{\partial P(t)_{2-3}}{\partial \Lambda_{Ц}} \Delta \Lambda_{Ц} = 4\Lambda_{Ц} t^2 \exp(-2\Lambda_{Ц}t) \Delta \Lambda_{Ц}.$$

Погрешность определения интенсивности отказов блока ССН с однократным ненагруженным резервом и средней наработки до отказа блока ССН определяются как

$$\Delta \Lambda(t)_{2-3} = \frac{\partial \Lambda(t)_{2-3}}{\partial \Lambda_{Ц}} \Delta \Lambda_{Ц} = \frac{2\Lambda_{Ц}t(1 + \Lambda_{Ц}t) - \Lambda_{Ц}^2 t^2}{1 + \Lambda_{Ц}t} \Delta \Lambda_{Ц} = \frac{2\Lambda_{Ц}t}{1 + \Lambda_{Ц}t} \Delta \Lambda_{Ц},$$

$$\Delta T_{O.2-3} = \frac{\partial T_{O.2-3}(t)}{\partial \Lambda_{Ц}} \Delta \Lambda_{Ц} = \frac{1}{\Lambda_{Ц}^2} \Delta \Lambda_{Ц}.$$

**Параллельное соединение цепей, обеспечивающих резервирование замещением** (одна цепь рабочая (А) и одна ненагруженная цепь (В), отличающаяся по надежности от рабочей), представлено на рис. 4. Формула расчета показателей безотказности блока ССН при этом виде резервирования имеет вид [2]

$$P(t)_B = \frac{1}{\Lambda_{Ц1} - \Lambda_{Ц2}} [\Lambda_{Ц1} \exp(-\Lambda_{Ц2}t) - \Lambda_{Ц2} \exp(-\Lambda_{Ц1}t)],$$

$$T_{O.B} = \int_0^\infty P(t) dt = \int_0^\infty \frac{1}{\Lambda_{Ц1} - \Lambda_{Ц2}} [\Lambda_{Ц1} \exp(-\Lambda_{Ц2}t) - \Lambda_{Ц2} \exp(-\Lambda_{Ц1}t)] dt = \frac{\Lambda_{Ц1} + \Lambda_{Ц2}}{\Lambda_{Ц1} \Lambda_{Ц2}},$$

$$\Lambda(t)_B = \Lambda_{Ц1} \Lambda_{Ц2} \frac{[\exp(-\Lambda_{Ц2}t) - \exp(-\Lambda_{Ц1}t)]}{[\Lambda_{Ц1} \exp(-\Lambda_{Ц2}t) - \Lambda_{Ц2} \exp(-\Lambda_{Ц1}t)]}.$$

Погрешность определения ВБР блока ССН с однократным резервированием замещением при отличии параметра основной цепи от резервной вычисляется по формуле

$$\Delta P(t)_B = \frac{\partial P(t)_B}{\partial \Lambda_{Ц1}} \Delta \Lambda_{Ц1} + \frac{\partial P(t)_B}{\partial \Lambda_{Ц2}} \Delta \Lambda_{Ц2}.$$

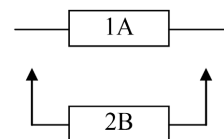


Рис. 4. Графическое представление резервирования замещением

Fig. 4. Graphical representation of standby redundancy

Погрешность определения интенсивности отказов блока ССН с однократным резервированием замещением при отличии структуры основной цепи от резервной рассчитывается как

$$\Delta\Lambda(t)_Б = \frac{\partial\Lambda(t)_Б}{\partial\Lambda_{Ц1}}\Delta\Lambda_{Ц1} + \frac{\partial\Lambda(t)_Б}{\partial\Lambda_{Ц2}}\Delta\Lambda_{Ц2}.$$

Погрешность определения средней наработки до отказа блока ССН с однократным резервированием замещением при отличии структуры основной цепи от резервной вычисляется как

$$\Delta T_{О.Б} = \frac{\partial T_{О.Б}(t)}{\partial\Lambda_{Ц1}}\Delta\Lambda_{Ц1} + \frac{\partial T_{О.Б}(t)}{\partial\Lambda_{Ц2}}\Delta\Lambda_{Ц2}.$$

**Параллельное соединение  $N$  цепей, обеспечивающих резервирование голосованием** по мажоритарной схеме  $M$  из  $N$  (все  $N$  цепей нагруженные), любые  $M$  из  $N$  цепей основные, представлено на рис. 5. Формула расчета ВБР блока ССН  $P_M(t)$  при этом виде резервирования имеет вид [3]:  $P_M(t) = \sum_{j=M}^N C_N^j p^j(t)[1-p(t)]^{N-j}$ , где  $C_b^a = \frac{b!}{a!(b-a)!}$ ,  $a < b$ .

Интерес для БА МКА представляет вариант 2 из 3. В этом случае вероятность безотказной работы  $P_M(t)_{2-3}$  вычисляется по формуле

$$P_M(t)_{2-3} = \sum_{j=2}^3 C_3^j p^j(t)[1-p(t)]^{3-j} = C_3^2 p^2(t)[1-p(t)] + C_3^3 p^3(t) = 3\exp(-2\Lambda t) - 2\exp(-3\Lambda t).$$

Плотность распределения в этом случае определяется по формуле

$$f_M(t) = -\frac{dP_M(t)_{2-3}}{dt} = 6\Lambda_{Ц}[\exp(-3\Lambda_{Ц}t) - \exp(-2\Lambda_{Ц}t)].$$

Тогда интенсивность отказов блока ССН  $\Lambda_Б(t)$  и средняя наработка до отказа блока ССН:

$$\Lambda_Б(t) = \frac{f_M(t)}{P_M(t)_{2-3}} = \frac{6\Lambda_{Ц}[\exp(-2\Lambda_{Ц}t) - \exp(-3\Lambda_{Ц}t)]}{3\exp(-2\Lambda_{Ц}t) - 2\exp(-3\Lambda_{Ц}t)} = \frac{6\Lambda_{Ц}[1 - \exp(-\Lambda_{Ц}t)]}{3 - 2\exp(-\Lambda_{Ц}t)},$$

$$T_{О.2-3} = \int_0^\infty P_M(t)_{2-3} dt = \int_0^\infty 3\exp(-2\Lambda_{Ц}t) dt - \int_0^\infty 2\exp(-3\Lambda_{Ц}t) dt = \frac{5}{6\Lambda_{Ц}}.$$

Погрешность определения ВБР блока ССН с мажоритарным резервированием 2 из 3 вычисляется по формуле  $\Delta P_M(t)_{2-3} = \frac{\partial P_M(t)_{2-3}}{\partial\Lambda_{Ц}}\Delta\Lambda_{Ц} = 6t[\exp(-2\Lambda_{Ц}t) - \exp(-3\Lambda_{Ц}t)]\Delta\Lambda_{Ц}$ .

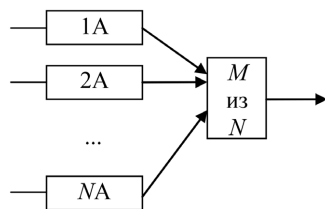


Рис. 5. Графическое представление резервирования голосованием

Fig. 5. Graphical representation of redundancy by voting

Погрешность определения интенсивности отказов блока ССН с мажоритарным резервированием 2 из 3 рассчитывается как

$$\Delta\Lambda_M(t)_{2-3} = \frac{\partial\Lambda_M(t)_{2-3}}{\partial\Lambda_{Ц}}\Delta\Lambda_{Ц}.$$

Погрешность определения средней наработки до отказа блока ССН с мажоритарным резервированием 2 из 3 вычисляется как

$$\Delta T_{О.2-3} = \frac{5}{6\Lambda_{Ц}^2}\Delta\Lambda_{Ц}.$$



**Структурная схема надежности объекта в целом.** Существуют методы, позволяющие последовательно-параллельную схему ССН объекта привести к последовательной. Один из них – метод свертки, который основан на последовательном преобразовании ССН объекта и ее сведении к основному соединению элементов. Покажем, как применяется этот подход в случае оценки вероятности безотказной работы объекта (рис. 6). Пусть каждый блок рассматриваемой ССН объекта характеризуется ВБР  $P_i(t)$ . Надо определить ВБР объекта. Метод свертки состоит из нескольких этапов.

*На первом этапе* рассматриваются все параллельные соединения, которые заменяются эквивалентными блоками с соответствующим показателем надежности. В данном случае такими являются 1-й и 2-й блоки. После чего структурная схема надежности примет вид, приведенный на рис. 7. Вероятность безотказной работы блока 8 ССН определяется формулой  $P_8(t) = 1 - \{1 - P_1(t)[1 - P_2(t)]\}$ .

*На втором этапе* рассматриваются все последовательные соединения, которые заменяются эквивалентными блоками. Здесь последовательными элементами являются 3-й и 4-й; 5-й и 6-й. После этого этапа преобразований ССН примет вид, показанный на рис. 8. Характеристики надежности элементов определяются с помощью следующих выражений ВБР блоков 9 и 10 ССН:  $P_9(t) = P_3(t)P_4(t)$ ,  $P_{10}(t) = P_5(t)P_6(t)$ .

*На третьем этапе* вновь рассматриваются параллельные соединения, которые заменяются эквивалентными блоками. Здесь такими параллельными блоками являются 9-й и 10-й. После третьего этапа преобразований ССН примет вид, приведенный на рис. 9. Вероятность безотказной работы блока 11 ССН определяется формулой  $P_{11}(t) = 1 - \{1 - P_9(t)[1 - P_{10}(t)]\}$ . Структурная схема надежности (см. рис. 9) является сверткой исходной ССН (см. рис. 6), и согласно ей ВБР объекта следует определять как  $P_{\text{об}}(t) = P_8(t)P_{11}(t)P_7(t)$ . Таким образом, для дальнейшего исследования методики интервальной оценки расчетного значения показателей надежности объекта типа МКА можно использовать последовательную ССН, приведенную на рис. 1.

Исходными данными для интервальной оценки расчетных значений ПН объектов являются: количество блоков в последовательной ССН –  $m$ ; среднее значение ПН  $R_{\text{ср}}$  каждого блока ССН объекта; погрешность определения ПН каждого блока ССН  $\Delta R$ , определенное при заданной доверительной вероятности (см. [1]); заданная наработка объекта  $t$ . В соответствии со структурной схемой надежности объекта (см. рис. 1) средние значения ПН объекта вычисляются по формулам

$$P_{\text{об}}(t)_{\text{ср}} = \prod_{i=1}^m P_{\text{Б}i}(t)_{\text{ср}}, \quad (11)$$

$$\Lambda_{\text{об.ср}} = \sum_{i=1}^m \Lambda_{\text{Б}i,\text{ср}}, \quad (12)$$

$$T_{\text{о.об.ср}} = \int_0^{\infty} P_{\text{об}}(t)_{\text{ср}} dt, \quad (13)$$

где  $P_{\text{об}}(t)_{\text{ср}}$ ,  $\Lambda_{\text{об.ср}}$ ,  $T_{\text{о.об.ср}}$  – средние значения вероятности безотказной работы, интенсивности отказов и средней наработки до отказа объекта соответственно;  $m$  – количество блоков в ССН. Значения  $P_{\text{Б}i}(t)_{\text{ср}}$  и  $\Lambda_{\text{Б}i,\text{ср}}$  находятся по формулам, полученным для блока ССН с соответствующими характеристиками. Значение  $T_{\text{о.об.ср}}$  вычисляется по (13) приближенным методом, например по формуле Симпсона.

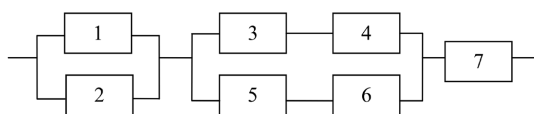


Рис. 6. Последовательно-параллельная структура ССН объекта

Fig. 6. Sequential-parallel structure of structural diagram reliability of object

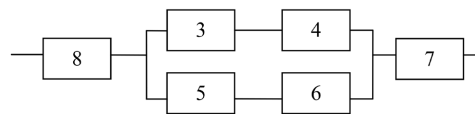


Рис. 7. Структурная схема надежности объекта после первого этапа преобразований

Fig. 7. Structural reliability scheme of an object after the first stage of transformation

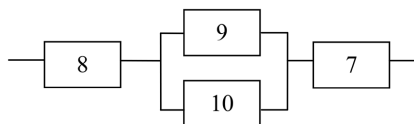


Рис. 8. Структурная схема надежности объекта после второго этапа преобразований

Fig. 8. Structural reliability scheme of an object after the second stage of transformation

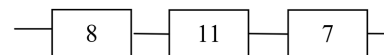


Рис. 9. Структурная схема надежности объекта после третьего этапа преобразований

Fig. 9. Structural reliability scheme of an object after the third stage of transformation

Погрешность определения ВБР объекта определяется в соответствии с (3):

$$\Delta P_{\text{ОБ}}(t_C) = \sum_{i=1}^m \frac{\partial P_{\text{ОБ}}(t_C)_{\text{CP}}}{\partial P_{\text{Би}}(t_C)_{\text{CP}}} \Delta P_{\text{Би}}(t_C), \text{ где } \Delta P_{\text{Би}}(t_C) - \text{погрешность определения ВБР } i\text{-го блока}$$

$$\text{ССН. Заметим, что } \frac{\partial P_{\text{ОБ}}(t_C)_{\text{CP}}}{\partial P_i(t_C)_{\text{CP}}} = \prod_{j=1, j \neq i}^m P_{\text{Бj}}(t_C)_{\text{CP}} = \frac{P_{\text{ОБ}}(t_C)_{\text{CP}}}{P_{\text{Би}}(t_C)_{\text{CP}}}.$$

Следовательно,

$$\Delta P_{\text{ОБ}}(t)_{\text{Б}} = P_{\text{ОБ}}(t_C)_{\text{CP}} \sum_{i=1}^m \frac{\Delta P_{\text{Би}}(t_C)}{P_{\text{Би}}(t_C)_{\text{CP}}} = P_{\text{ОБ.СР}}(t_C) \sum_{i=1}^m W_{\text{РП.и}}, \quad (14)$$

где  $W_{\text{ОП.и}}$  – относительная погрешность ВБР  $i$ -го блока ССН:

$$W_{\text{ОП.и}} = \frac{\Delta P_{\text{Би}}(t_C)}{P_{\text{Би}}(t_C)_{\text{CP}}}, \quad i = 1, 2, \dots, m. \quad (15)$$

Погрешность определения интенсивности отказов объекта вычисляется по формуле

$$\Delta \Lambda_{\text{ОБ}}(t) = \sum_{i=1}^m \Delta \Lambda_{\text{Би}}(t), \quad (16)$$

где  $\Delta \Lambda_{\text{Би}}$  – погрешность определения интенсивности отказов  $i$ -го блока ССН.

Граничные значения интервальной оценки ВБР объекта  $P_{\text{ОБ.Н}}(t_C)$  (нижнее) и  $P_{\text{ОБ.В}}(t_C)$  (верхнее) вычисляются по формулам  $P_{\text{ОБ.Н}}(t_C) = P_{\text{ОБ.СР}}(t_C) - \Delta P_{\text{ОБ.СР}}(t_C)$ ,  $P_{\text{ОБ.В}}(t_C) = P_{\text{ОБ.СР}}(t_C) + \Delta P_{\text{ОБ.СР}}(t_C)$ .

Граничные значения интервальной оценки интенсивности отказов объекта вычисляются по формулам  $\Lambda_{\text{ОБ.Н}} = \Lambda_{\text{СР.ОБ}} - \Delta \Lambda_{\text{ОБ}}$ ,  $\Lambda_{\text{ОБ.В}} = \Lambda_{\text{СР.ОБ}} + \Delta \Lambda_{\text{ОБ}}$ , где  $\Lambda_{\text{ОБ.Н}}$ ,  $\Lambda_{\text{ОБ.В}}$  – соответственно нижнее и верхнее значения интервала интенсивности отказов объекта.

**Пример использования предлагаемой методики.** Проведем интервальную оценку расчетных значений показателей безотказности бортовой информационной системы (БИС) – составной части реальной МКА по данным структурной схемы надежности БИС (рис. 10) и показателей надежности элементов ССН БИС (табл. 1). Численные значения показателей надежности элементов БИС определены экспертным методом. Нарботка БИС в течении пяти лет полета МКА составляет  $t = 1500$  ч. Расчет проводился по двум показателям надежности БИС ВБР  $P(t)_{\text{ОБ}}$  и интенсивности отказов  $\Lambda(t)_{\text{ОБ}}$ . Промежуточные результаты приведены в табл. 2. Расчет по простым блокам ССН (1–5, табл. 2) проводился по следующим формулам: (4) – для  $\Lambda_{\text{СР}}$ , (5) – для  $P_{\text{СР}}(t)_{\text{Б}}$ , (6) – для  $\Delta \Lambda_{\text{Б}}$ , (15) – для  $W$ . Расчет по сложным блокам ССН (6–11, табл. 2) проводился по формуле (9) для  $\Lambda_{\text{СР}}$ , (8) для  $P_{\text{СР}}(t)_{\text{Б}}$ , (10) для  $\Delta \Lambda_{\text{Б}}$ , (15) для  $W$ ; по объекту в целом – по формуле (11) для  $P_{\text{ОБ}}(t)$ , (12) для  $\Lambda_{\text{ОБ}}$ , (14) для  $\Delta P_{\text{ОБ}}(t)$ , (16) для  $\Delta \Lambda_{\text{ОБ}}$ . Результаты интервальной оценки расчетных значений показателей безотказности бортовой информационной системы (БИС) МКА следующие: среднее значение вероятности безотказной работы бортовой информационной системы за наработку 1500 ч в процессе пятилетнего полета МКА составляет  $P(1500)_{\text{БИС.СР}} = 0,99700$ , среднее значение интенсивности отказов БИС –  $\Lambda_{\text{БИС.СР}} = 200 \cdot 10^{-8}$  1/ч, погрешность оценки ВБР БИС –  $\Delta P_{\text{БИС}}(1500) = 34502 \cdot 10^{-8} = 0,000345$ ; погрешность оценки интенсивности отказов БИС –  $\Delta \Lambda_{\text{БИС}} = 23,41 \cdot 10^{-8}$  1/ч.

Таблица 1. Показатели надежности элементов структурной схемы надежности бортовой информационной системы

Table 1. Reliability measure of the elements of the structural reliability scheme of the on-board information system

Наименование блока ССН	Интенсивность отказов элемента, $10^{-8}$ 1/ч			
	средняя	нижняя	верхняя	погрешность
Датчик телеметрии	10	9	11	1
Модуль управления нагревателями	10	9	11	1
Модуль технологического обмена	30	26	34	4
Бортовое запоминающее устройство	100	88	112	12
Вторичный источник питания	50	45	55	5
Контроллер межблочного обмена	100	92	108	8
Контроллер предобработки данных	100	90	110	10
Контроллер памяти	100	95	105	5
Контроллер управления питанием	100	93	107	7
Контроллер бортового обмена	120	105	135	15
Логическое ядро	120	103	137	17

Таблица 2. Бортовая информационная система малогабаритного космического аппарата. Интервальная оценка

Table 2. On-board information system of a small spacecraft. Interval estimation

№	Наименование блока ССН	Количество (к <sub>р</sub> )	к <sub>из</sub>	Средняя интенсивность отказов $10^{-8}$ 1/ч		ВБР $P_{CP}(t)_{Bi}$	Погрешность, $10^{-8}$ 1/ч		
				элемента $\lambda_{CP}$	блока $\Lambda_{CP}$		$\Delta\Lambda_{OB}$	$\Delta P(t)_{Bi}$	$W_{Bi}$
1	Датчик телеметрии	1	1	10,00	10,0000	0,999850	1,00	1499,8	1500
2	Модуль управления нагревателями	1	1	10,00	10,0000	0,999850	1,00	1499,8	1500
3	Модуль технологического обмена	1	1	30,00	30,0000	0,999550	4,00	5997,3	6000
4	Бортовое запоминающее устройство	1	1	100,00	100,0000	0,998500	12,00	17973	18000
5	Вторичный источник питания	1	1	50,00	50,0000	0,999250	5,00	7494	7500
6	Контроллер предобработки данных с нагруженным резервом	1	1	100,00	0,00020	0,999998	0,04790	0,2155	0,2155
7	Контроллер памяти с нагруженным резервом	1	1	100,00	0,00020	0,999998	0,05986	0,2694	0,2694
8	Контроллер управления питанием с нагруженным резервом	1	1	100,00	0,00020	0,999998	0,02993	0,1347	0,1347
9	Контроллер бортового обмена с нагруженным резервом	1	1	100,00	0,00020	0,999998	0,04191	0,1886	0,1886
10	Логическое ядро с нагруженным резервом	1	1	120,00	0,00024	0,999998	0,10771	0,5816	0,5816
11	Контроллер межблочного обмена с нагруженным резервом	1	1	120,00	0,00024	0,999994	0,12207	0,6592	0,6592

Граничные значения интервальной оценки ВБР БИС составляют:  $P_{BIS.H}(1500) = 0,996655$ ,  $P_{BIS.B}(1500) = 0,997345$ , где  $P_{BIS.H}(1500)$ ,  $P_{BIS.B}(1500)$  – соответственно нижнее и верхнее значения ВБР БИС. Граничные значения интервальной оценки интенсивности отказов БИС следующие:  $\Lambda_{BIS.H} = 176,59 \cdot 10^{-8}$  1/ч,  $\Lambda_{BIS.B} = 223,41 \cdot 10^{-8}$  1/ч, где  $\Lambda_{BIS.H}$ ,  $\Lambda_{BIS.B}$  – соответственно нижнее и верхнее значения интервала интенсивности отказов БИС.



Рис. 10. Структурная схема надежности бортовой информационной системы малогабаритного космического аппарата

Fig. 10. Structural reliability scheme of an on-board information system of small spacecrafts

**Заключение.** Настоящая работа является продолжением исследования [1] и представляет собой методику интервальной оценки расчетных значений показателей надежности невосстанавливаемых объектов, надежность которых обеспечивается путем структурного резервирования с ограниченной кратностью. К числу таких объектов относится и бортовая аппаратура малогабаритных космических аппаратов. Приведен пример применения методики на составной части реальной БА МКА – бортовой информационной системе. В дальнейшем исследования будут продолжены для восстанавливаемых объектов с учетом отсутствия требований на ограничение кратности резервирования.

#### Список использованных источников

1. Кульбак, Л. И. Интервальная оценка расчетных показателей надежности объекта / Л. И. Кульбак // Информатика. – 2014. – № 1 (41). – С. 35–44.
2. Кульбак, Л. И. Оценка надежности бортовой аппаратуры малых космических аппаратов в процессе их полета / Л. И. Кульбак, В. Б. Алюшкевич, С. А. Золотой // Информатика. – 2015. – № 4 (48). – С. 109–118.
3. Максимов, Ю. В. Модель надежности космического аппарата / Ю. В. Максимов, В. Е. Патраев, В. А. Тололо // Сиб. журн. науки и технологий. – 2005. – Вып. 3. – С. 144–147.

#### References

1. Kulbak L. I. Interval estimation of calculated indicators of object reliability. *Informatika = Informatics*, 2014, no. 1 (41), pp. 35–44 (in Russian).
2. Kulbak L. I., Alyushkevich V. B., Zolotoy S. A. Evaluation of the reliability of on-board equipment of small spacecraft in the process of their flight. *Informatika = Informatics*, 2015, no. 4 (48), pp. 109–118 (in Russian).
3. Maksimov Y. V., Patraev V. E., Tololo V. A. The model of spacecraft reliability. *Sibirskii zhurnal nauki i tekhnologii = Scientific Journal of Science and Technology*, 2005, no. 3, pp. 144–147 (in Russian).

#### Информация об авторах

**Кульбак Леонид Игоревич** – кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси (ул. Сурганова, 6, 220012, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: lkulbak@yandex.ru

**Золотой Сергей Анатольевич** – кандидат технических наук, директор, УП «Геоинформационные системы» Национальной академии наук Беларуси (ул. Сурганова, 6, 220012, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: gis@gis.by

**Мартинovich Татьяна Сергеевна** – научный сотрудник, Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси (ул. Сурганова, 6, 220012, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: martintan@tut.by

#### Information about the authors

**Leonid I. Kulbak** – Ph. D. (Engineering), Assistant Professor, Leading Researcher, United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus (6, Surganov Str., 220012, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: lkulbak@yandex.ru

**Sergey A. Zolotoy** – Ph. D. (Engineering), Director, UE “Geoinformation Systems” of the National Academy of Sciences of Belarus (6, Surganov Str., 220012, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: gis@gis.by

**Tatyana S. Martinovich** – Researcher, United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus (6, Surganov Str., 220012, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: martintan@tut.by