

ISSN 1816-0301 (Print)

ISSN 2617-6963 (Online)

УДК 004.3; 519.718.2; 519.873; 629.78

Поступила в редакцию 13.03.2018

Received 13.03.2018

**Л. И. Кульбак, Т. С. Мартинович***Объединенный институт проблем информатики  
Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь***РАСЧЕТ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ ВОССТАНАВЛИВАЕМЫХ  
ОБЪЕКТОВ С УЧЕТОМ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ**

**Аннотация.** Предлагается методика расчета показателей надежности объектов с учетом погрешностей исходных данных. При этом рассматриваются только восстанавливаемые объекты, надежность которых обеспечивается путем структурного резервирования с ограниченной кратностью. К числу восстанавливаемых объектов относится бортовая аппаратура малогабаритных космических аппаратов. Рассматриваются такие свойства надежности, как безотказность, ремонтпригодность, и их комбинации.

Анализируется модель надежности восстанавливаемого объекта с принятыми допущениями и ограничениями, а также простые и сложные восстанавливаемые блоки структурных схем надежности с учетом погрешностей исходных данных, даются формулы расчета показателей надежности блоков структурных схем надежности.

В качестве примера использования методики приводятся результаты оценки надежности типового восстанавливаемого объекта, состоящего из простых и сложных блоков с нагруженными и ненагруженными резервами.

**Ключевые слова:** надежность, показатели надежности, расчет надежности, восстанавливаемый объект, структурное резервирование, бортовая аппаратура, малогабаритные космические аппараты

**Для цитирования.** Кульбак, Л. И. Расчет показателей надежности восстанавливаемых объектов с учетом погрешностей исходных данных / Л. И. Кульбак, Т. С. Мартинович // Информатика. – 2018. – Т. 15, № 4. – С. 16–25.

**L. I. Kulbak, T. S. Martinovich***The United Institute of Informatics Problems of the National Academy  
of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus***RELIABILITY PARAMETERS CALCULATION OF RESTORABLE  
OBJECTS WITH REGARD TO INACCURACIES IN THE INITIAL DATA**

**Abstract.** The method of reliability parameters calculation of objects with regard to inaccuracies of source data is provided. In this case, only restorable objects are considered, the reliability of which is ensured by structural redundancy with limited multiplicity. Such objects include on-board equipment of small spacecraft. Such reliability properties as uninterrupted operation, maintainability and their combinations are considered.

The model of reliability of restorable object with assumptions and restrictions is given. The analysis of simple and complex recoverable blocks of structural schemes of reliability taking into account the inaccuracies of initial data is carried out, and formulas for reliability calculation of blocks of structural schemes of reliability are given.

As an example of using the method, the results of reliability evaluation of a typical restorable object consisting of simple and complex blocks with loaded and unloaded reserves are presented.

**Keywords:** reliability, reliability measure, reliability calculation, restorable object, structural redundancy, on-board equipment, small spacecraft

**For citation.** Kulbak L. I., Martinovich T. S. Reliability parameters calculation of restorable objects with regard to inaccuracies in the initial data. *Informatics*, 2018, vol. 15, no. 4, pp. 16–25 (in Russian).

**Введение.** В работе [1] приведен расчет надежности невосстанавливаемых объектов с учетом погрешностей исходных данных, при этом учитывалось лишь одно из свойств надежности – безотказность. Настоящая статья посвящена аналогичному вопросу для восстанавливаемых объектов с рассмотрением свойств безотказности, ремонтпригодности и их комбинаций.

Принцип расчета показателей надежности (ПН) объекта в равной мере распространяется на восстанавливаемые и невосстанавливаемые объекты. Как и в работе [1], под погрешностью

ПН объекта будем понимать погрешность реального значения ПН объекта от его истинного значения.

Расчет ПН объекта состоит в вычислении функции (ПН объекта) по ее аргументам (ПН комплектующих объект элементов). Как и при любом расчете, его характеристикой является погрешность (точность) вычислений.

В работе [1] показано, что если зависимость ПН объекта от ПН его элементов выражается функцией

$$R = f(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m), \quad (1)$$

то результаты расчета ПН объекта следует вычислять по формулам

$$R = R_{\text{CP}} \pm \Delta R(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m), \quad (2)$$

$$R_{\text{CP}} = f(\lambda_{\text{CP},1}, \lambda_{\text{CP},2}, \dots, \lambda_{\text{CP},m}), \quad (3)$$

$$\Delta R(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m) \leq \sum_{i=1}^m \left| \frac{\partial f}{\partial \lambda_i} \right| \Delta \lambda_i, \quad (4)$$

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

**Модель надежности восстанавливаемого объекта.** В работе приняты следующие допущения и ограничения:

- принимается экспоненциальный с параметром  $\lambda$  закон распределения наработки до отказа элементов объекта;
- принимается экспоненциальный с параметром  $\mu$  закон распределения времени восстановления блоков объекта;
- анализу подлежит резервирование элементов структуры объекта при нагруженном и ненагруженном восстанавливаемом резерве с кратностью не более двух при ограниченном восстановлении резерва;
- обнаружение отказа резервного элемента происходит за пренебрежимо малое время;
- элементы, подключающие резерв при замещении, имеют пренебрежимо малую интенсивность отказов;
- исследованию подлежат лишь два свойства надежности – безотказность и ремонтпригодность;
- отказы элементов объекта являются независимыми событиями;
- элементы объекта и резервные элементы при отсутствии нагрузки не отказывают;
- в качестве показателей безотказности элементов принимаются интенсивность отказов  $\lambda$  и вероятность безотказной работы (ВБР)  $P(t)$ ;
- в качестве показателей ремонтпригодности элементов принимаются интенсивность восстановления  $\mu$  и среднее время восстановления  $t_B$ ;
- в качестве показателей безотказности составных частей объекта и объекта в целом принимаются интенсивность отказов  $\Lambda$ , ВБР  $P(t)$  и средняя наработка на отказ  $T_0$ ;
- в качестве показателей ремонтпригодности составных частей объекта и объекта в целом принимается среднее время восстановления  $T_B$ ;
- в качестве показателя безотказности и ремонтпригодности (комплексного показателя) составных частей объекта и объекта в целом принимается коэффициент готовности  $K_T$ ;
- интенсивности отказов элементов объекта задаются в виде граничных интервальных оценок нижнего  $\lambda_H$  и верхнего  $\lambda_B$  значений;

– интенсивности восстановления блоков объекта задаются в виде граничных интервальных оценок нижнего  $\mu_H$  и верхнего  $\mu_B$  значений.

В качестве модели надежности восстанавливаемого объекта согласно ГОСТ 27.301–95 «Надежность в технике. Расчет надежности. Основные положения» и ГОСТ Р 51901.14–2007 «Менеджмент риска. Структурная схема надежности и булевы методы» используются структурные схемы надежности (ССН).

Установлено, что подавляющее число структур объектов, ПН которых подлежат расчету, можно привести к последовательной ССН. На рис. 1 показана ССН объекта последовательного типа, состоящая из  $m$  блоков. По аналогии с [1] примем, что блоки ССН ( $B_i$ ) могут быть простыми (без резервирования элементов) и сложными, состоящими из резервируемых различными способами элементов.

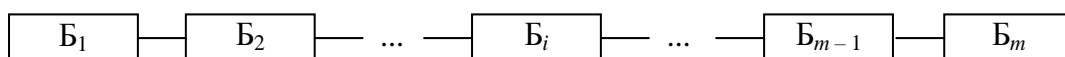


Рис. 1. Обобщенная последовательная структурная схема надежности объекта

На рис. 2 изображены основные блоки ССН, из которых строится ССН объекта в целом.

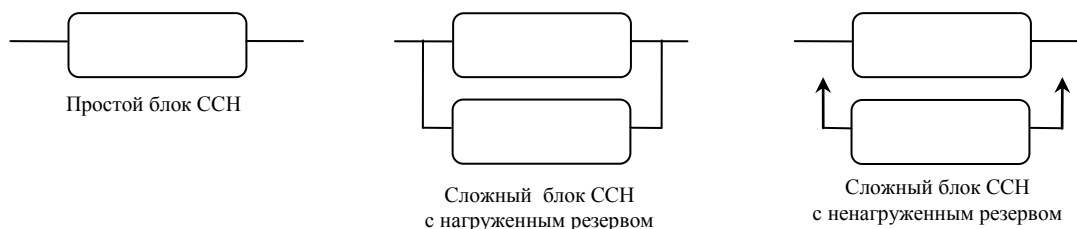


Рис. 2. Графическое представление основных блоков ССН

**Анализ надежности блоков ССН восстанавливаемых объектов с учетом погрешностей исходных данных.** В качестве первичных исходных данных с учетом их погрешности для расчета безотказности блоков ССН используются граничные оценки интенсивностей отказов элементов блока в виде  $(\lambda_{i,H}, \lambda_{i,B})$ , где  $\lambda_{i,H}, \lambda_{i,B}$  – нижнее и верхнее значения интенсивности отказов  $i$ -го элемента блока ССН соответственно.

В качестве первичных исходных данных с учетом их погрешности для расчета ремонтнопригодности блоков ССН используются граничные оценки интенсивности восстановления блока в виде  $(\mu_{i,H}, \mu_{i,B})$ , где  $\mu_{i,H}, \mu_{i,B}$  – нижнее и верхнее значения интенсивности восстановления блока ССН соответственно.

Среднее значение интенсивности отказов  $i$ -го элемента блока рассчитывается по формулам

$$\lambda_{i,CP} = \lambda_{i,H} + \Delta\lambda_i, \quad (5)$$

$$\Delta\lambda_i = \frac{\lambda_{i,B} - \lambda_{i,H}}{2}, \quad (6)$$

а среднее значение интенсивности восстановления блока ССН – по формулам

$$\mu_{CP} = \mu_H + \Delta\mu, \quad (7)$$

$$\Delta\mu = \frac{\mu_B - \mu_H}{2}, \quad (8)$$

где  $\Delta\lambda_i$  – погрешность интенсивности отказов  $i$ -го элемента;  $\Delta\mu$  – погрешность интенсивности восстановления блока ССН.

**Математическая модель простых восстанавливаемых блоков ССН с учетом погрешностей исходных данных.** Простые блоки ССН объединяют элементы с одинаковыми

значениями интенсивности отказов и коэффициентов интенсивности эксплуатации. ПН таких блоков являются:

- интенсивность отказов  $\Lambda_{П}$ ;
- средняя наработка на отказ  $T_{О,П}$ ;
- среднее время восстановления  $T_{В,П}$ ;
- вероятность безотказной работы  $P(t)_{П}$ ;
- коэффициент готовности  $K_{Г,П}$ .

Среднее значение интенсивности отказов  $j$ -го простого блока ССН ( $\Lambda_{П,j,CP}$ ) в соответствии с принятыми допущениями вычисляется по формуле

$$\Lambda_{П,j,CP} = n_j \kappa_{ИЭ,j} \lambda_{j,CP}, \quad j = 1, 2, \dots, m_{П}, \quad (9)$$

где  $n_j$  – количество элементов в  $j$ -м простом блоке ССН;  $\kappa_{ИЭ,j}$  – коэффициент интенсивности эксплуатации  $j$ -го элемента простого блока ССН;  $\lambda_{j,CP}$  – среднее значение интенсивности отказов элементов  $j$ -го простого блока ССН;  $m_{П}$  – количество простых блоков в ССН объекта.

Среднее значение ВБР  $j$ -го простого блока ССН определяется как

$$P(t)_{П,j,CP} = \exp(-\Lambda_{П,j,CP} t), \quad j = 1, 2, \dots, m_{П}. \quad (10)$$

Так как поток отказов простых блоков ССН является стационарным, среднюю наработку на отказ  $j$ -го простого блока ССН следует вычислять по формуле

$$T_{О,П,j,CP} = \frac{1}{\Lambda_{П,j,CP}}, \quad j = 1, 2, \dots, m_{П}. \quad (11)$$

Среднее время восстановления  $j$ -го простого блока ССН согласно определению  $T_{В}$  рассчитывается следующим образом:

$$T_{В,П,j,CP} = \frac{1}{\mu_{П,j,CP}}, \quad j = 1, 2, \dots, m_{П}; \quad (12)$$

где  $\mu_{П,j,CP}$  – средняя интенсивность восстановления  $j$ -го простого блока ССН, вычисляемая по формулам (7) и (8).

Среднее значение коэффициента готовности  $j$ -го простого блока ССН объекта определяется как

$$K_{Г,П,j,CP} = \frac{T_{О,П,j,CP}}{T_{О,П,j,CP} + T_{В,П,j,CP}}, \quad j = 1, 2, \dots, m_{П}. \quad (13)$$

Погрешность интенсивности отказов  $j$ -го простого блока ССН в соответствии с (4) и (9) вычисляется по формуле

$$\Delta \Lambda_{П,j} = n_j \kappa_{ИЭ,j} \Delta \lambda_j, \quad j = 1, 2, \dots, m_{П}. \quad (14)$$

Погрешность средней наработки на отказ  $j$ -го простого блока ССН в соответствии с (4) и (11) рассчитывается как

$$\Delta T_{О,П,j} = \frac{\Delta \lambda}{n_j \kappa_{ИЭ,j} \lambda_{j,CP}^2}, \quad j = 1, 2, \dots, m_{П}. \quad (15)$$

Погрешность среднего времени восстановления  $j$ -го простого блока ССН в соответствии с (4) и (12) можно найти по выражению

$$\Delta T_{В,П,j} = \frac{\Delta \mu_{П,j,CP}}{(\mu_{П,j,CP})^2}, \quad j = 1, 2, \dots, m_{П}, \quad (16)$$

где  $\Delta\mu_{Пj,CP}$  – погрешность интенсивности восстановления  $j$ -го простого блока ССН, вычисляемая по формуле (8).

Погрешность ВБР  $j$ -го простого блока ССН в соответствии с (4) и (10) определяется как

$$\Delta P(t)_{Пj} = P_{Пj,CP}(t) \cdot (n_j \kappa_{иэj} t \Delta\lambda_j), \quad j = 1, 2, \dots, m_{П}. \quad (17)$$

Погрешность коэффициента готовности  $j$ -го простого блока ССН в соответствии с (4) и (13) рассчитывается по формуле

$$\Delta K_{Г,Пj} = \frac{T_{В,Пj,CP} \Delta T_{О,Пj} + T_{О,Пj,CP} \Delta T_{В,Пj}}{(T_{О,Пj,CP} + T_{В,Пj,CP})^2}, \quad j = 1, 2, \dots, m_{П}. \quad (18)$$

**Математическая модель сложных восстанавливаемых блоков ССН с учетом погрешностей исходных данных.** В качестве моделей безотказности и ремонтпригодности восстанавливаемых сложных блоков ССН будем использовать те, которые приведены в литературе по расчету надежности [2, 3].

Основными ПН сложных восстанавливаемых блоков ССН примем:

- среднюю наработку на отказ  $T_0$ ;
- среднее время восстановления  $T_B$ ;
- вероятность безотказной работы  $P(t)$ ;
- коэффициент готовности  $K_G$ .

В качестве дополнительного ПН возьмем интенсивность отказов  $\Lambda(t)$ .

В табл. 1 приведены формулы расчетов основных ПН для сложных блоков ССН из  $k$  рабочих и одного резервного элементов с коэффициентом нагрузки  $0 \leq \nu \leq 1$  при ограниченном восстановлении. При этом следует иметь в виду, что при нагруженном резерве  $\nu = 1$ , при ненагруженном резерве  $\nu = 0$ , при облегченном резерве  $0 < \nu < 1$ .

Таблица 1

Сложный блок ССН из  $k$  рабочих и одного резервного элементов с коэффициентом нагрузки  $0 \leq \nu \leq 1$  при ограниченном восстановлении

Показатель	Точное значение	Приближенное значение	Погрешность формулы
$T_0$	$\frac{1}{k\lambda} \cdot \frac{1+(k+\nu)\gamma}{(k+\nu)\gamma}, \quad \gamma = \frac{\lambda}{\mu}$	$\frac{1}{k\lambda(k+\nu)\gamma}$	$\delta = \frac{1}{k\lambda}$
$T_B$	$1/\mu$	–	–
$P(t)$	$\frac{\chi_1 e^{-\chi_2 t} - \chi_2 e^{-\chi_1 t}}{\chi_1 - \chi_2},$ $\chi_{1,2} = \frac{\lambda}{2\gamma} \{ [1 + (2k + \nu)\gamma] \pm \sqrt{1 + 2(2k + \nu)\gamma + \mu^2 \gamma^2} \}$	$\exp\left[-\frac{k(k+\nu)\lambda^2 t}{\mu + (2k + \nu)\lambda}\right]$	$\delta \approx (k+1)\gamma^2$
$K_G$	$\frac{1}{1 + \gamma_c}, \quad \gamma_c = \frac{k(k+\nu)\gamma^2}{2[1 + (k+\nu)\gamma]}$	$1 - k(k+\nu)\gamma^2$	$\delta \approx k(k+\nu)^2 \gamma^3$

Из табл. 1 следует, что точные формулы ПН достаточно сложны для дифференцирования, а погрешности их определения по формулам приближенного значения достаточно малы, что будет показано на реальных примерах. Поэтому для получения формул расчета ПН сложных блоков ССН с учетом погрешностей исходных данных воспользуемся приближенными формулами из табл. 1.

В качестве ПН сложных восстанавливаемых блоков ССН с учетом погрешностей исходных данных примем:

- среднее ( $T_{О,С,CP}$ ), нижнее ( $T_{О,С,Н}$ ) и верхнее ( $T_{О,С,В}$ ) значения средней наработки на отказ;
- среднее ( $P(t)_{С,CP}$ ), нижнее ( $P(t)_{С,Н}$ ) и верхнее ( $P(t)_{С,В}$ ) значения вероятности безотказной работы;

- среднее ( $K_{Г.С.СР}$ ), нижнее ( $K_{Г.С.Н}$ ) и верхнее ( $K_{Г.С.В}$ ) значения коэффициента готовности;
- среднее ( $\Lambda(t)_{С.СР}$ ), нижнее ( $\Lambda(t)_{С.Н}$ ) и верхнее ( $\Lambda(t)_{С.В}$ ) значения интенсивности отказов.

Для средней наработки на отказ согласно табл. 1 и принятому допущению среднее значение следует определять по формуле

$$T_{О.С.СР} = \frac{\mu_{СР}}{k(k+\nu)\lambda_{СР}^2}, \quad j = 1, 2, \dots, m_C. \quad (19)$$

Погрешность средней наработки на отказ  $j$ -го сложного блока ССН в соответствии с формулами (4) и (19) вычисляется как

$$\Delta T_{О.С.СР} = \frac{2\mu_{СР,j}\Delta\lambda_j}{k(k+\nu)\lambda_{СР,j}^3} + \frac{\Delta\mu_j}{k(k+\nu)\lambda_{СР,j}^2}, \quad j = 1, 2, \dots, m_C. \quad (20)$$

Среднее время восстановления  $j$ -го сложного блока ССН (см. табл. 1) рассчитывается следующим образом:

$$T_{В.С.СР} = \frac{1}{\mu_{С.СР}}, \quad j = 1, 2, \dots, m_C, \quad (21)$$

где  $\mu_{С.СР}$  – среднее значение интенсивности восстановления  $j$ -го сложного блока ССН, вычисляемое по формулам (7) и (8).

Погрешность среднего времени восстановления  $j$ -го сложного блока ССН в соответствии с формулами (4) и (11) определяется как

$$\Delta T_{В.С.СР} = \frac{\Delta\mu_{С.СР}}{(\mu_{С.СР})^2}, \quad j = 1, 2, \dots, m_C, \quad (22)$$

где  $\Delta\mu_{С.СР}$  – погрешность интенсивности восстановления  $j$ -го сложного блока ССН, вычисляемая по формуле (8).

Среднее значение ВБР согласно табл. 1 и принятому допущению можно найти по выражению

$$P(t)_{С.СР,j} = \exp\left[-\frac{k(k+\nu)\lambda_{С.СР,j}^2 t}{\mu_{СР,j} + (2k+\nu)\lambda_{СР,j}}\right], \quad j = 1, 2, \dots, m_C. \quad (23)$$

Погрешность ВБР сложного блока ССН в соответствии с (4) и (23) вычисляется как

$$\Delta P(t)_{С.СР,j} = P(t)_{С.СР,j} \left[ \frac{k(2k+\nu)\lambda_{СР,j} t [2\mu_{СР,j} + (3k+\nu)\lambda_{СР,j}] \Delta\lambda_{СР,j} + k(k+\nu)\lambda_{СР,j}^2 t \Delta\mu_{СР,j}}{[\mu_{СР,j} + (2k+\nu)\lambda_{СР,j}]^2} \right], \quad j = 1, 2, \dots, m_C. \quad (24)$$

Среднее значение коэффициента готовности согласно табл. 1 и принятому допущению определяется согласно выражению

$$K_{Г.С.СР,j} = 1 - \frac{k(k+\nu)\lambda_{СР,j}^2}{\mu_{СР,j}^2}, \quad j = 1, 2, \dots, m_C. \quad (25)$$

Погрешность коэффициента готовности сложного блока ССН в соответствии с (4) и (25) следует рассчитывать как

$$\Delta K_{Г.С.СР,j} = \frac{k(k+\nu)\lambda_{СР,j} [2\mu_{СР,j} \Delta\lambda_{СР,j} + \lambda_{СР,j} \Delta\mu_{СР,j}]}{\mu_{СР,j}^3}, \quad j = 1, 2, \dots, m_C. \quad (26)$$

Интенсивность отказов в общем случае определяется по формулам

$$\Lambda(t) = f(t) / P(t), \quad (27)$$

$$f(t) = -dP(t)/dt, \quad (28)$$

где  $\Lambda(t)$  – интенсивность отказов;  $f(t)$  – плотность распределения наработки до отказа;  $P(t)$  – вероятность безотказной работы.

В соответствии с выражениями (27) и (28) плотность распределения наработки до отказа запишем следующим образом:

$$f(t) = P(t)_{C.CP} \cdot \frac{k(k+\nu)\lambda_{CP,j}\mu_{CP,j}}{\mu_{CP,j} + (2k+\nu)\lambda_{CP,j}}. \quad (29)$$

После подстановки (29) в (27) получим интенсивность отказов:

$$\Lambda(t)_{C.CP,j} = \frac{k(k+\nu)\lambda_{CP,j}^2}{\mu_{CP,j} + (2k+\nu)\lambda_{CP,j}}, \quad j = 1, 2, \dots, m_C. \quad (30)$$

Как следует из материалов [4], поток отказов сложных блоков ССН является стационарным.

Погрешность интенсивности отказов сложного блока ССН в соответствии с (4) и (30) следует вычислять как

$$\Delta\Lambda_{C,j} = \frac{k(k+\nu)\lambda_{CP,j} \{ [2\mu_{CP,j} + (2k+\nu)\lambda_{CP,j}] \Delta\lambda_{CP,j} + \lambda_{CP,j} \Delta\mu_{CP,j} \}}{[\mu_{CP,j} + (2k+\nu)\lambda_{CP,j}]^2}, \quad j = 1, 2, \dots, m_C. \quad (31)$$

**Анализ надежности восстанавливаемого объекта по его ССН с учетом погрешностей исходных данных.** ПН восстанавливаемых объектов являются: интенсивность отказов  $\Lambda_{OB}$ , средняя наработка на отказ  $T_{O,OB}$ , вероятность безотказной работы  $P_{OB}(t)$ , среднее время восстановления  $T_{B,OB}$ , коэффициент готовности  $K_{Г,OB}$ .

В общем случае, как указывалось выше, в ССН объекта могут входить как простые, так и сложные блоки с различными видами резервирования. Простые и сложные блоки ССН образуют стационарные потоки отказов. Следовательно, поток отказов объекта с такими блоками также будет стационарным.

В работе [4] установлено, что если поток отказов образуется группами элементов, то параметр суммарного потока отказов будет равен сумме параметров групп элементов. В этом случае формула расчета среднего значения интенсивности отказов объекта  $\Lambda_{OB,CP}$  с ССН (см. рис. 1) примет вид

$$\Lambda_{OB,CP} = \sum_{i=1}^{m_{П}} \Lambda_{П,i,CP} + \sum_{j=1}^{m_C} \Lambda_{C,H,i,CP}, \quad (32)$$

где  $\Lambda_{П,i,CP}$  – среднее значение интенсивности отказов  $i$ -го простого блока ССН объекта, вычисляемое по формуле (9);  $\Lambda_{C,H,j,CP}$  – среднее значение интенсивности отказов  $j$ -го сложного блока ССН объекта, вычисляемое по формуле (30);  $m_{П}$  – количество простых блоков в ССН объекта,  $m_C$  – количество блоков с нагруженным резервом в ССН объекта,

$$m_{П} + m_C = m. \quad (33)$$

Погрешность интенсивности отказов объекта от своего среднего значения  $\Delta\Lambda_{OB}$  определяется как

$$\Delta\Lambda_{OB} = \sum_{i=1}^{m_{П}} \Delta\Lambda_{П,j} + \sum_{j=1}^{m_C} \Delta\Lambda_{C,j}, \quad (34)$$

где  $\Delta\Lambda_{П,j}$  и  $\Delta\Lambda_{C,j}$  вычисляются по формулам (14) и (31) соответственно.

Граничные значения интервальной оценки интенсивности отказов объекта рассчитываются согласно выражениям

$$\Lambda_{\text{ОБ.Н}} = \Lambda_{\text{СР.ОБ}} - \Delta\Lambda_{\text{ОБ}}, \quad (35)$$

$$\Lambda_{\text{ОБ.В}} = \Lambda_{\text{СР.ОБ}} + \Delta\Lambda_{\text{ОБ}}, \quad (36)$$

где  $\Lambda_{\text{ОБ.Н}}$ ,  $\Lambda_{\text{ОБ.В}}$  – соответственно нижнее и верхнее значения интервала интенсивности отказов объекта.

Средняя наработка на отказ объекта  $T_{\text{О.ОБ.СР}}$ , имеющего стационарный поток отказов, определяется как

$$T_{\text{О.ОБ.СР}} = 1 / \Lambda_{\text{ОБ.СР}}, \quad (37)$$

где  $\Lambda_{\text{ОБ.СР}}$  вычисляется по формуле (32).

Погрешность средней наработки на отказ объекта от своего среднего значения рассчитывается согласно выражению

$$\Delta T_{\text{О.ОБ}} = \Delta\Lambda_{\text{ОБ}} / \Lambda_{\text{ОБ.СР}}^2, \quad (38)$$

где  $\Delta\Lambda_{\text{ОБ.СР}}$  вычисляется по формуле (31).

Среднее значение времени восстановления объекта  $T_{\text{В.ОБ.СР}}$  определяется следующим образом:

$$T_{\text{В.ОБ.СР}} = \frac{1}{\Lambda_{\text{ОБ.СР}}} \cdot \left( \sum_{i=1}^{m_{\text{П}}} \frac{\Lambda_{\text{П.}j\text{.СР}}}{\mu_{\text{П.}i\text{.СР}}} + \sum_{i=1}^{m_{\text{С}}} \frac{\Lambda_{\text{С.}j\text{.СР}}}{\mu_{\text{С.}i\text{.СР}}} \right), \quad (39)$$

где  $\Lambda_{\text{ОБ.СР}}$  рассчитывается согласно формуле (32);  $\mu_{\text{П.}i\text{.СР}}$ ,  $\mu_{\text{С.}i\text{.СР}}$  – средние значения интенсивности восстановления  $i$ -го простого и сложного блоков ССН объекта соответственно, вычисляемые согласно формулам (7) и (8).

Погрешность среднего времени восстановления объекта  $\Delta T_{\text{В.ОБ}}$  определяется как

$$\Delta T_{\text{В.ОБ}} = \frac{1}{\Lambda_{\text{ОБ.СР}}} \left( \sum_{i=1}^{m_{\text{П}}} \frac{\Lambda_{\text{П.}j\text{.СР}} \Delta\mu_{\text{П.}i}}{\mu_{\text{П.}i\text{.СР}}^2} + \sum_{j=1}^{m_{\text{С}}} \frac{\Lambda_{\text{С.}j\text{.СР}} \Delta\mu_{\text{С.}j}}{\mu_{\text{С.}j\text{.СР}}^2} \right). \quad (40)$$

Для объекта со стационарным потоком отказов формула расчета среднего значения ВБР объекта  $P_{\text{ОБ.СР}}(t)$  за наработку  $t$  согласно [4] примет вид

$$P(t)_{\text{ОБ.СР}} = \exp(-\Lambda_{\text{ОБ.СР}}t). \quad (41)$$

Погрешность ВБР объекта  $\Delta P_{\text{ОБ}}(t)$  в соответствии с (4) и (41) рассчитывается как

$$\Delta P_{\text{ОБ}}(t) = \frac{\partial P_{\text{ОБ}}(t)}{\partial \Lambda_{\text{ОБ.СР}}} \Delta\Lambda_{\text{ОБ}} = \exp(-\Lambda_{\text{ОБ.СР}}t) \Delta\Lambda_{\text{ОБ}} t. \quad (42)$$

Нижнее и верхнее значения интервальной оценки ВБР объекта вычисляются по формулам

$$P_{\text{ОБ.Н}}(t) = P_{\text{ОБ.СР}}(t) - \Delta P_{\text{ОБ}}(t), \quad (43)$$

$$P_{\text{ОБ.В}}(t) = P_{\text{ОБ.СР}}(t) + \Delta P_{\text{ОБ}}(t). \quad (44)$$

Среднее значение коэффициента готовности объекта  $K_{\text{Г.ОБ.СР}}$  в соответствии с [3] можно определить следующим образом:



$$K_{Г.ОБ.СР} = \frac{T_{О.ОБ.СР}}{T_{О.ОБ.СР} + T_{В.ОБ.СР}}. \quad (45)$$

Погрешность коэффициента готовности объекта согласно (4) и (45) рассчитывается как

$$\Delta K_{Г.ОБ} = \frac{T_{В.ОБ.СР} \Delta T_{О.ОБ} + T_{О.ОБ.СР} \Delta T_{В.ОБ}}{(T_{О.ОБ.СР} + T_{В.ОБ.СР})^2}. \quad (46)$$

Нижнее и верхнее значения коэффициента готовности объекта вычисляются по формулам

$$K_{Г.ОБ.Н} = K_{Г.ОБ.СР} - \Delta K_{Г.ОБ}, \quad (47)$$

$$K_{Г.ОБ.В} = K_{Г.ОБ.СР} + \Delta K_{Г.ОБ}. \quad (48)$$

**Пример расчета ПН восстанавливаемого объекта с учетом погрешностей ПН элементов.** Произведем расчет ПН восстанавливаемого объекта с ССН, приведенной на рис. 3, с учетом погрешностей ПН элементов объекта. ССН объекта состоит из одного простого и двух сложных блоков ССН с нагруженным ( $V = 1$ ) и ненагруженным ( $V = 0$ ) резервами.

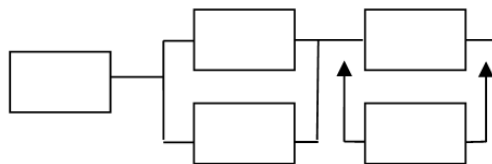


Рис. 3. Структурная схема расчета надежности объекта

Исходные данные для расчета:

*Простой блок.* Количество элементов в блоке  $n_{П} = 3$ ; интенсивности отказов элементов: нижнее значение  $\lambda_{П.Н} = 1,0 \cdot 10^{-6}$  1/ч, верхнее значение  $\lambda_{П.В} = 1,2 \cdot 10^{-6}$  1/ч; коэффициент интенсивности эксплуатации блока  $k_{ИЭ.П} = 0,70$ ; интенсивности восстановления: нижнее значение  $\mu_{П.Н} = 1,0$  1/ч, верхнее значение  $\mu_{П.В} = 2,0$  1/ч.

*Сложный блок 1.* Интенсивности отказов элементов: нижнее значение  $\lambda_{С.1.Н} = 2,0 \cdot 10^{-3}$  1/ч, верхнее значение  $\lambda_{С.1.В} = 2,2 \cdot 10^{-3}$  1/ч; коэффициент интенсивности эксплуатации блока  $k_{ИЭ.С.1} = 1,0$ ; интенсивности восстановления: нижнее значение  $\mu_{С.1.Н} = 0,125$  1/ч; верхнее значение  $\mu_{С.1.В} = 0,2$  1/ч; коэффициент нагрузки резерва  $v_1 = 1$ .

*Сложный блок 2.* Интенсивности отказов элементов: нижнее значение  $\lambda_{С.2.Н} = 2,0 \cdot 10^{-3}$  1/ч, верхнее значение  $\lambda_{С.2.В} = 2,2 \cdot 10^{-3}$  1/ч; коэффициент интенсивности эксплуатации блока  $k_{ИЭ.С.2} = 1,0$ ; интенсивности восстановления: нижнее значение  $\mu_{С.2.Н} = 0,125$  1/ч, верхнее значение  $\mu_{С.2.В} = 0,2$  1/ч; коэффициент нагрузки резерва  $v_2 = 0$ .

*Нарботка объекта:*  $t = 1000$  ч.

Результаты необходимых расчетов по блокам приведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты расчетов			
Блоки ССН	$\Lambda_{СР} \cdot 10^{-6}, 1/ч$	$\Delta \Lambda \cdot 10^{-6}, 1/ч$	$T_{О.СР}, ч$
Простой	2,31	0,210	402 890
Сложный 1	51,49	16,136	18 424
Сложный 2	26,40	8,458	36 848

Результаты вычислений по объекту в целом:  $\Lambda_{\text{ОБ.Н}} = 55,3945 \cdot 10^{-6}$  1/ч;  $\Lambda_{\text{ОБ.СР}} = 80,1986 \times 10^{-6}$  1/ч;  $\Lambda_{\text{ОБ.В}} = 105,0 \cdot 10^{-6}$  1/ч;  $T_{\text{О.ОБ.Н}} = 4386$  ч;  $T_{\text{О.ОБ.СР}} = 12\,469$  ч;  $T_{\text{О.ОБ.В}} = 20\,552$  ч;  $P(1000)_{\text{ОБ.Н}} = 0,896\,985$ ;  $P(1000)_{\text{ОБ.СР}} = 0,919\,801$ ;  $P(1000)_{\text{ОБ.В}} = 0,920\,010$ ;  $K_{\Gamma.\text{ОБ.Н}} = 0,999\,5688$ ,  $K_{\Gamma.\text{ОБ.СР}} = 0,999\,8155$ ,  $K_{\Gamma.\text{ОБ.В}} = 1,0$ .

**Заключение.** В теории надежности по свойствам восстанавливаемости работоспособности технических объектов после их отказов различают две категории – восстанавливаемые и невосстанавливаемые объекты. Исходя из этого, в настоящей работе и работе [1] представлены методики расчета ПН этих категорий объектов. Следует заметить, что действующие справочники по расчету надежности не содержат аналогичных методик.

Предлагаемая в настоящей работе методика расчета ПН восстанавливаемых объектов учитывает погрешности ПН их составных частей, приводящих, в свою очередь, к погрешности ПН объекта. При этом рассматриваются только восстанавливаемые объекты, надежность которых обеспечивается путем применения структурного резервирования с ограниченной кратностью. В качестве примера использования методики приведены результаты оценки надежности типового восстанавливаемого объекта, состоящего из простых и сложных блоков с нагруженными и ненагруженными резервами. Данная методика может применяться для расчета надежности бортовой аппаратуры малогабаритных космических аппаратов. В дальнейшем предполагается ее доработка в части снятия ограничений на кратность резервирования.

### Список использованных источников

1. Кульбак, Л. И. Расчет показателей надежности невосстанавливаемых объектов с учетом погрешностей исходных данных / Л. И. Кульбак // Информатика. – 2017. – № 1(53). – С. 92–104.
2. Козлов, Б. А. Краткий справочник по расчету надежности радиоэлектронной аппаратуры / Б. А. Козлов, И. А. Ушаков. – М. : Сов. радио, 1966. – 472 с.
3. Викторова, В. С. Модели и методы расчета надежности технических систем / В. С. Викторова, А. С. Степанынц. – Изд. 2-е, испр. – М. : Ленанд, 2016. – 256 с.
4. Шор, Я. Б. Статистические методы анализа и контроля качества и надежности / Я. Б. Шор. – М. : Сов. радио, 1962. – 553 с.

### References

1. Kulbak L. I. Raschet pokazatelej nadezhnosti nevosstanavlivaemykh ob"ektov s uchetom pogreshnostej iskhodnyh dannyh [Reliability parameters calculation of non-restorable objects with regard to errors in the initial data]. *Informatika [Informatics]*, 2017, no. 1(53), pp. 92–104 (in Russian).
2. Kozlov B. A., Ushakov I. A. Kratkij spravochnik po raschetu nadezhnosti radioelektronnoj apparatury. *A Short Guide to Calculating the Reliability of Electronic Equipment*. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1966, 472 p. (in Russian).
3. Viktorova V. S., Stepanyanc A. S. Modeli i metody rascheta nadezhnosti tekhnicheskikh sistem. *Models and methods of reliability calculation of technical systems*. Moscow, Lenand Publ., 2016, 256 p. (in Russian).
4. Shor Ya. B. Statisticheskie metody analiza i kontrolya kachestva i nadezhnosti. *Statistical Methods of Analysis and Quality and Reliability Control*. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1962, 553 p. (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, Минск, Республика Беларусь).

E-mail: lkulbak@yandex.ru

Мартинович Татьяна Сергеевна – научный сотрудник, Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси (ул. Сурганова, 6, 220012, Минск, Республика Беларусь).

E-mail: martintan@newman.bas-net.by

### Information about the authors

Leonid I. Kulbak – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, The United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus (6, Sarganova Str., 220012, Minsk, Republic of Belarus).

E-mail: lkulbak@yandex.ru

Tatyana S. Martinovich – Researcher, The United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus (6, Sarganova Str., 220012, Minsk, Republic of Belarus).

E-mail: martintan@newman.bas-net.by