

УДК 004.3

В.В. Анищенко, С.А. Золотой, Л.И. Кульбак, О.А. Семенов

ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ БЕЛОРУССКОЙ КОСМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ В ПРОЦЕССЕ ЛЕТНЫХ ИСПЫТАНИЙ

Приводится расчет надежности Белорусской космической системы дистанционного зондирования Земли (БКСДЗ). Предлагается в процессе летных испытаний БКСДЗ осуществить контроль ее надежности экспериментальным и расчетно-экспериментальными методами. Выбираются планы контроля показателей надежности, которые обеспечивают приемлемое, с позиций летных испытаний, время испытаний.

Введение

В работе [1] описываются назначение наземного сегмента (НС) БКСДЗ, его структура и состав, в качестве примера приводится расчет надежности. В настоящей статье исследуется БКСДЗ в целом, включая Белорусский космический аппарат (БКА).

Надежность объекта является одной из важнейших характеристик его качества, поэтому контроль надежности включают в состав приемочных испытаний объекта. Методы контроля надежности объекта согласно ГОСТ 27.410–87 [2] разделяются на расчетные, экспериментальные и расчетно-экспериментальные. Расчетные методы используются на разных этапах разработки, а для контроля надежности лишь в тех случаях, когда нельзя применять экспериментальный или расчетно-экспериментальный методы. Для контроля надежности БКСДЗ практически нет препятствий для использования экспериментальных или расчетно-экспериментальных методов.

Оценку надежности объекта проводят с целью определения значений показателей надежности [3] или контроля этих значений. Для определения значений показателей надежности проводят определительные испытания, а для контроля значений показателя надежности – контрольные испытания. На разработку БКСДЗ установлены требуемые значения показателей надежности, поэтому показатели надежности БКСДЗ следует оценивать контрольными испытаниями. В результате контрольных испытаний на надежность выясняется, соответствуют или не соответствуют показатели надежности испытуемого объекта требованиям, установленным на них в нормативной документации.

В настоящей работе приведен расчет показателей надежности в соответствии с критерием отказа БКСДЗ, установленным в ТЗ на ее разработку, и выбраны методы контроля показателей надежности, обеспечивающие их совместимость с летными испытаниями БКСДЗ и приемлемую продолжительность испытаний.

1. Летные испытания БКСДЗ

Летные испытания БКСДЗ проводят с целью оценки и подтверждения технических и эксплуатационных характеристик БКА и Белорусского наземного комплекса управления (БНКУ) на соответствие требованиям, заданным в тактико-техническом задании на ОКР по созданию БКСДЗ, а также в ТЗ на БКА и БНКУ в составе БКСДЗ в реальных условиях функционирования.

В задачи летных испытаний БКСДЗ вошла проверка показателей надежности БКА и БНКУ на соответствие заданным требованиям. Предлагается использовать летные испытания с момента вывода на орбиту БКА для контроля показателей надежности БКСДЗ в целом.

2. Оценка показателей надежности БКСДЗ расчетным методом

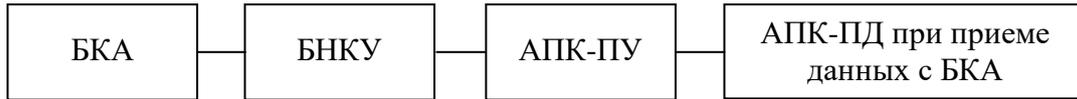
В ТЗ на разработку БКСДЗ установлено, что БКСДЗ при критерии отказа «неуспешное выполнение сеанса задания по управлению БКА или приема данных с БКА» должна иметь следующие показатели надежности:

– вероятность безотказной работы в течение суточного цикла на этапе штатной эксплуатации БКА не менее 0,975;

– коэффициент оперативной готовности за время сеанса связи с БКА не менее 0,975.

Одной из особенностей эксплуатации БКСДЗ является периодическое появление БКА в зонах приема станций БКСДЗ, что приводит к циклическому использованию этих станций. Цикличность использования изделий принято оценивать коэффициентом интенсивности эксплуатации $K_{ИЭ}$ [4], который является долей рабочего времени использования изделия. Экспертная оценка использования станций БКСДЗ составляет $K_{ИЭ} = 0,25$.

Рассмотрим структурную схему надежности (ССН) БКСДЗ [5] при установленном критерии отказа (рисунок).



Структурная схема надежности БКСДЗ

На рисунке приняты следующие обозначения:

АПК-ПУ – аппаратно-программный комплекс планирования и управления БКСДЗ;

АПК-ПД – аппаратно-программный комплекс приема данных с БКА.

В соответствии с ССН БКСДЗ формулы для расчета показателей надежности БКСДЗ примут следующий вид [4]:

$$P_{БКС}(24) = \exp\left(-\frac{24}{T_{О.БКС}}\right); \quad (1)$$

$$K_{ОГ.БКС}(t_c) = K_{Г.БКС} \exp(-t_c/T_{О.БКС}); \quad (2)$$

$$T_{О.БКС} = 1/\Lambda_{БКС}; \quad (3)$$

$$\Lambda_{БКС} = \Lambda_{БКА} + K_{ИЭ} \Lambda_{БНКУ} + \Lambda_{АПК-ПУ} + K_{ИЭ.ПД} \Lambda_{АПК-ПД}; \quad (4)$$

$$T_{О.БКА} = 1/\Lambda_{БКА}; \quad (5)$$

$$\Lambda_{БНКУ} = 1/T_{О.БНКУ}; \quad (6)$$

$$\Lambda_{АПК-ПУ} = 1/T_{О.АПК-ПУ}; \quad (7)$$

$$\Lambda_{АПК-ПД} = 1/T_{О.АПК-ПД}; \quad (8)$$

$$K_{Г.БКС} = \frac{T_{О.БКС}}{T_{О.БКС} + T_{В.БКС}}; \quad (9)$$

$$T_{В.БКС} = T_{О.БКС} (T_{В.БКА} \Lambda_{БКА} + K_{ИЭ} \Lambda_{БНКУ} T_{В.БНКУ} + \Lambda_{АПК-ПУ} T_{В.АПК-ПУ} + K_{ИЭ.ПД} \Lambda_{АПК-ПД} T_{В.АПК-ПД}), \quad (10)$$

где $P_{БКС}(24)$ – вероятность безотказной работы БКСДЗ в суточном цикле;

$T_{О.БКС}$ – средняя наработка на отказ БКСДЗ;

$K_{ОГ.БКС}(t_c)$ – коэффициент оперативной готовности БКСДЗ за сеанс связи (t_c) с БКА;

$K_{Г.БКС}$ – коэффициент готовности БКСДЗ;

$\Lambda_{БКС}$ – интенсивность отказов БКСДЗ;

$\Lambda_{БКА}$ – интенсивность отказов БКА;

$K_{ИЭ}$ – коэффициент интенсивности эксплуатации БНКУ;

$\Lambda_{БНКУ}$ – интенсивность отказов БНКУ;

$\Lambda_{\text{АПК-ПУ}}$ – интенсивность отказов АПК-ПУ;
 $K_{\text{ИЭ.ПД}}$ – коэффициент интенсивности эксплуатации АПК-ПД, пересчитанный с 0,33 до 0,25;
 $\Lambda_{\text{АПК-ПД}}$ – интенсивность отказов АПК-ПД при приеме данных дистанционного зондирования с БКА;

$T_{\text{О.БКА}}$ – средняя наработка на отказ БКА;
 $T_{\text{О.БНКУ}}$ – средняя наработка на отказ БНКУ;
 $T_{\text{О.АПК-ПУ}}$ – средняя наработка на отказ АПК-ПУ;
 $T_{\text{О.АПК-ПД}}$ – средняя наработка на отказ АПК-ПД;
 $T_{\text{В.БКС}}$ – среднее время восстановления БКСДЗ;
 $T_{\text{В.БКА}}$ – среднее время восстановления БКА (под восстановлением БКА понимается подключение резервного элемента вместо отказавшего);
 $T_{\text{В.БНКУ}}$ – среднее время восстановления БНКУ;
 $T_{\text{В.АПК-ПУ}}$ – среднее время восстановления АПК-ПУ;
 $T_{\text{В.АПК-ПД}}$ – среднее время восстановления АПК-ПД.

В формулах (1)–(10) фигурируют показатели надежности БКА, которые непосредственно не приведены в ТЗ на разработку БКА. В ТЗ на разработку БКА установлено, что БКА должен иметь вероятность выполнения задачи орбитального полета в течение активного существования (пять лет) не менее 0,90. Это требование можно записать в виде неравенства

$$P_{\text{БКА}}(t_{\text{А.С}}) = \exp\left(-\frac{t_{\text{А.С}}}{T_{\text{О.БКИ}}}\right) \geq 0,9, \quad (11)$$

где $P_{\text{БКА}}(t_{\text{А.С}})$ – вероятность выполнения задачи орбитального полета БКА в течение активного существования БКА;

$t_{\text{А.С}}$ – время активного существования БКА;

$T_{\text{БКИ}}$ – средняя наработка на отказ БКА.

После подстановки в неравенство (11) значения $t_{\text{А.С}} = 5 \text{ лет} = 43\,800 \text{ ч}$ получим $T_{\text{О.БКА}} \geq 417\,142 \text{ ч}$.

Перечень исходных данных для расчета надежности БКСДЗ, их численные значения и источники приведены в табл. 1.

Таблица 1

Исходные данные для расчета показателей надежности БКСДЗ

Наименование	Обозначение	Значение	Источник данных
Средняя наработка на отказ АПК-ПУ	$T_{\text{О.АПК-ПУ}}$	8063 ч	[1]
Средняя наработка на отказ БКА	$T_{\text{О.БКА}}$	417 142 ч	Вычислено из (11)
Средняя наработка на отказ БНКУ	$T_{\text{О.БНКУ}}$	2286 ч	[1]
Средняя наработка на отказ АПК-ПД при $K_{\text{ИЭ}} = 0,33$	$T_{\text{О.АПК-ПД}}$	1420 ч	[1]
Среднее время восстановления АПК-ПУ	$T_{\text{В.АПК-ПУ}}$	1,00 ч	[1]
Среднее время восстановления БКА	$T_{\text{В.БКА}}$	0,05 ч	Экспертная оценка
Среднее время восстановления БНКУ	$T_{\text{В.БНКУ}}$	30,00 ч	[1]
Среднее время восстановления АПК-ПД	$T_{\text{В.АПК-ПД}}$	34,00 ч	[1]
Коэффициент интенсивности эксплуатации БНКУ	$K_{\text{ИЭ}}$	0,25	Экспертная оценка
Коэффициент интенсивности эксплуатации АПК-ПД, пересчитанный с 0,33 до 0,25	$K_{\text{ИЭ.ПД}}$	0,75	Перерасчет $K_{\text{ИЭ.ПД}}$
Время сеанса связи с БКА	$t_{\text{С}}$	0,10 ч	Экспертная оценка

Расчет показателей надежности БКСДЗ проводится на ПЭВМ по формулам (1)–(10) при исходных данных табл. 1. В табл. 2 представлена распечатка ПЭВМ расчета надежности БКСДЗ.

Таблица 2

Расчет показателей надежности БКСДЗ

Наименование элемента ССН	Средняя наработка на отказ, ч	Среднее время восстановления, ч	Коэффициент использования	Условная вероятность отказов
БКА	417 142	0,05	1,00	0,2710
БНКУ	2 286	30,00	0,25	0,13971
АКП-ПУ	8 063	1,00	1,00	0,15844
АКП-ПД	1 420	34,00	0,75	0,67475
БКСДЗ имеет по расчету: - среднюю наработку на отказ $T_o = 1261$ ч; - среднее время восстановления $T_B = 25,66$ ч; - коэффициент готовности $K_T = 0,980059$; - вероятность безотказной работы в суточном цикле $P_{БКС}(24) = 0,9809$; - коэффициент оперативной готовности БКСДЗ за сеанс связи с НКА $K_{ог.БКС}(t_c) = 0,9796$.				

В результате расчета показателей надежности получены следующие значения:

- вероятность безотказной работы в суточном цикле $P_{БКСДЗ}(24) = 0,9809 > 0,975$;
- коэффициент оперативной готовности БКСДЗ за сеанс связи с БКА $K_{ог.БКС}(t_c) = 0,9796 > 0,975$.

Требования ТЗ к показателям надежности БКСДЗ выполняются.

3. Выбор методов и планов контроля надежности БКСДЗ

3.1. Общие положения

Методы и планы контроля надежности регламентируются ГОСТ 27.410–87 [2]. Из методов контроля надежности в [2] предлагается использовать экспериментальный или расчетно-экспериментальный методы. В работе будут исследованы оба метода. Методы контроля надежности обусловлены способами реализации контроля. Различают два способа реализации контроля: одноступенчатый контроль и контроль с помощью доверительных границ. Одноступенчатый контроль рекомендуется применять при наличии ограничений на время испытаний, контроль с помощью доверительных интервалов – при использовании данных эксплуатационных наблюдений. Выберем для использования одноступенчатый контроль. Выбор плана контроля зависит от закона распределения наработки до отказа объекта. БКСДЗ состоит из большого количества составных частей и относится к сложным объектам, для которых согласно [6] характерны внезапные отказы, имеющие экспоненциальный закон распределения наработки до отказа.

К числу способов сокращения времени испытаний на надежность следует отнести совмещение контроля различных показателей надежности объекта по времени.

3.2. Контроль показателей надежности БКСДЗ

Одноступенчатый контроль показателей надежности БКСДЗ может осуществляться с помощью экспериментального и расчетно-экспериментального методов. Исходными данными для одноступенчатого контроля показателей надежности *экспериментальным методом* являются:

- риск поставщика (изготовителя) α ;
- риск потребителя (заказчика) β ;
- браковочный уровень надежности R_β ;
- приемочный уровень надежности R_α .

Заметим, что вероятность приемки изделия с приемочным уровнем R_α равна $(1 - \alpha)$, а вероятность приемки изделия с приемочным уровнем R_β равна β . Интервал надежности $[R_\beta, R_\alpha]$.

В ТЗ на разработку БКСДЗ не указаны риски α и β , приемочный и браковочный уровни вероятности, а указаны лишь требуемые значения показателей надежности. Примем наиболее распространенные значения рисков $\alpha = \beta = 0,10$. В качестве браковочного уровня примем $R_\beta = 0,970$. ГОСТ [2] допускает размещать требуемые значения внутри интервала $[R_\beta, R_\alpha]$.

Процедура испытаний состоит в том, что БКСДЗ выполняет установленные для нее функции в процессе летных испытаний, при этом подлежат фиксации наличие или отсутствие неуспешных сеансов связи с БКА и наличие или отсутствие отказов элементов структурной схемы надежности БКСДЗ. Для контроля коэффициента оперативной готовности учетной единицы является сеанс связи, а для контроля вероятности безотказной работы – суточный цикл.

Если установленных по плану контроля N учетных единиц было не больше приемочного числа C_α с неуспешными учетными единицами, принимается решение о соответствии показателя надежности требованиям.

Если установленных по плану контроля N учетных единиц было больше приемочного числа C_α с неуспешными учетными единицами, принимается решение о несоответствии показателя надежности требованиям.

Учетной единицей при контроле вероятности безотказной работы за суточный цикл является суточный цикл, а неуспешной учетной единицей – суточный цикл, в течение которого были отказы в элементах структурной схемы надежности БКСДЗ (см. рисунок).

Учетной единицей при контроле коэффициента оперативной готовности является сеанс связи с БКА, а неуспешной учетной единицей – неудачный сеанс связи БНКУ или АПК-ПД с БКА.

Исходными данными для выбора плана контроля вероятности безотказной работы за суточный цикл являются:

- риски $\alpha = \beta = 0,10$;
- браковочный уровень $R_\beta = 0,970$;
- приемочный уровень $R_\alpha = 0,995$.

При принятых исходных данных из табл. 34 [2] получаем $N = 128$, $C_\alpha = 1$. Таким образом, продолжительность испытаний при контроле вероятности безотказной работы за суточный цикл составит $t_{II} = 3072$ ч (более четырех месяцев), а продолжительность испытаний при контроле коэффициента оперативной готовности вычисляется по формуле

$$t_{II} = 24 N / n_C, \text{ ч}, \quad (12)$$

где n_C – число сеансов связи с БКА за суточный цикл.

Число витков БКА, видимых на территории Беларуси, от четырех до шести. Примем $n_C = 5$, тогда продолжительность испытаний по контролю коэффициента оперативной готовности БКСДЗ составит $t_{II} = 615$ ч (менее одного месяца).

Длительность испытаний по контролю коэффициента оперативной готовности можно признать приемлемой, а длительность испытаний по контролю вероятности безотказной работы за суточный цикл нельзя признать приемлемой. Необходимо сократить длительность испытаний по контролю вероятности безотказной работы до значений, близких к длительности испытаний по контролю коэффициента оперативной готовности, и совместить эти испытания.

Длительность испытаний по контролю вероятности безотказной работы за суточный цикл можно сократить, если использовать *расчетно-экспериментальный метод* с размещением требуемого значения показателя надежности внутри интервала $[R_\beta, R_\alpha]$.

Сущность расчетно-экспериментального метода, предлагаемого для контроля вероятности безотказной работы за суточный цикл, состоит в том, что осуществляется переход от контроля показателей вероятностного типа к контролю показателей типа средних значений.

Из равенства

$$P_{БКС}(24) = \exp(-24/T_O) \geq 0,975, \quad (13)$$

вытекающего из ТЗ на разработку БКСДЗ, следует, что требуемое значение средней наработки на отказ составляет $T_O \geq 960$ ч.

Перейдем к контролю средней наработки на отказ. Если требования к средней наработке на отказ будут выполнены, то будут выполнены и требования к вероятности безотказной работы за суточный цикл.

В связи с ограниченным временем проведения испытаний целесообразно для контроля средней наработки на отказ выбрать такие метод испытаний и план их проведения, которые обеспечат минимальное время проведения испытаний.

Контрольные испытания одноступенчатым методом с ограниченным временем испытаний по ГОСТ 27.410–87 [2] при допущении экспоненциального распределения наработки до отказа обеспечивают минимальное время проведения испытаний. Примем этот метод.

Параметры плана контроля одноступенчатым методом выбирают из табл. 4 обязательно приложения 7 [2]. Табл. 4 включает графу значений α , три графы $A = \frac{T_\alpha}{T_\beta}$ при различных значениях β , графу предельного числа отказов r_{np} и графу $V = \frac{t_{max}}{T_\alpha}$, где t_{max} – максимальная наработка изделия при испытаниях.

Испытания одноступенчатым методом прекращаются, как только будет достигнута одна из величин r_{np} или t_{max} . Если первым достигается r_{np} (при наработке, меньшей t_{max}), результаты испытаний отрицательные. Если первым достигается t_{max} (при числе отказов, меньшем r_{np}), результаты испытаний положительные [$T_{O,\beta}, T_O, T_{O\alpha}$].

Определим полезные соотношения параметров таблицы выбора плана испытаний одноступенчатым методом при помещении заданного для контроля значения T_O в середину интервала. В этом случае справедливо выражение

$$T_O = T_\beta + (T_\alpha - T_\beta)/2 = T_\beta \left(\frac{1+A}{2} \right), \quad (14)$$

из которого следуют

$$T_\beta = \frac{2T_O}{1+A} \quad (15)$$

и

$$t_{max} = V A T_\beta = \frac{2AVT_O}{1+A}. \quad (16)$$

Для выбора планов испытаний устанавливаем одинаковые риски поставщика и заказчика, $\alpha = \beta = 0,10$. Из табл. 4 [2] следует, что при $\alpha = \beta = 0,10$ и допустимом одном отказе, как при контроле коэффициента оперативной готовности $r_{np} = 2$, план контроля будет иметь параметры $A = 7,299$, $V = 0,532$. По формуле (16) вычисляем продолжительность испытаний, которая при $T_O = 960$ ч составит $t_{max} = 899$ ч.

Правила принятия решения при контроле средней наработки на отказ БКСДЗ следующие:

– если при наработке БКСДЗ 899 ч будет зафиксировано менее двух отказов, результаты испытаний считаются положительными;

– если при наработке БКСДЗ менее 899 ч будет зафиксировано два отказа БКСДЗ, испытания прекращаются и результаты испытаний считаются отрицательными.

Заключение

В работе расчетным методом подтверждены показатели надежности, которые установлены в ТЗ на разработку БКСДЗ.

Предложено осуществить контроль показателей надежности БКСДЗ в процессе летных испытаний. Показано, что для контроля показателей надежности БКСДЗ следует выбрать одноступенчатый контроль с ограниченным временем испытаний. При этом использование экспериментального метода дает приемлемую длительность испытаний при контроле коэффициента оперативной готовности и неприемлемую длительность испытаний при контроле вероятности безотказной работы в суточном цикле. Для сокращения длительности испытаний предложено использовать расчетно-экспериментальный метод с переходом контроля вероятностного типа к контролю типа среднего. При этом время испытаний сокращается с 3072 до 899 ч.

Список литературы

1. Оценка надежности наземного сегмента Белорусской космической системы дистанционного зондирования Земли / С.В. Абламейко [и др.] // Информатика. – 2009. – № 1 (21). – С. 109–116.
2. Надежность в технике. Методы контроля показателей надежности и планы контрольных испытаний на надежность : ГОСТ 27.410–87. – Минск : Белорус. гос. ин-т стандартизации и сертификации, 2004. – 21 с.
3. Billinton, R. Reliability Evaluation of Engineering Systems. Concepts and Techniques / R. Billinton, R.N. Allan. – 2nd ed. – N.Y. : Plenum Press, 1992.
4. Reinschke, K. Zuverlässigkeit von Systemen. Bd. 1. Systeme mit endlich vielen Zuständen / K. Reinschke. – Berlin : VEB Verlag Technik, 1973.
5. Reinschke, K. Zuverlässigkeitsstrukturen. Modellbildung, Modellauswertung / K. Reinschke, I.A. Usakov. – Berlin : VEB Verlag Technik, 1987.
6. Надежность в технике. Модели отказов. Основные положения : ГОСТ 27.005–97. – Минск : Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 1997. – 44 с.

Поступила 19.10.10

*Объединенный институт проблем
информатики НАН Беларуси,
Минск, Сурганова, 6
e-mail: lkulbak@yandex.ru*

U.V. Anishchanka, S.A. Zolotoy, L.I. Kulbak, O.A. Semenov

EVALUATING RELIABILITY OF BELARUSIAN REMOTE SENSING SPACE SYSTEM DURING THE FLIGHT TRIALS

The reliability estimation of the Belarusian Earth Remote Sensing Space System (BERSSS) is provided. It is suggested to carry out the tests of BERSSS reliability in the course of flight trials. It is also proposed to implement the one-stage examination of the reliability indicators by experimental and settlement-experimental methods. Plans for the control of reliability indicators are suggested which provide acceptable testing time under limitation of during the flight trials.