**УДК 629.7.017.1**

**Методика оценки характеристик надежности КА с длительным сроком активного существования на этапе летных испытаний**

***Бабук В.А., Дарсания Т.Д.***

*Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова*

Разработка любого космического аппарата (КА) всегда связана с большими временными и материальными затратами. КА – сложная техническая система, предназначенная для решения своих целевых задач. Такая система требует создания совокупности методов обеспечения надежности на всех этапах жизненного цикла КА. Чрезвычайно важна оценка характеристик надежности КА на этапе летных испытаний и эксплуатации, которые определяют качество созданного изделия.

Существующие вероятностно-статистические методы не позволяют с высокой точностью определять характеристики надежности КА на этапе летных испытаний, что связано с весьма малым объемом имеющейся экспериментальной информации.

В рамках настоящей работы решается задача разработки методики определения характеристик надежности с достаточно высокой точностью при ограниченном количестве экспериментальных данных на этапе летных испытаний (эксплуатации).

В рамках решения этой задачи осуществлен анализ методов, базирующихся на моделях *«нагрузка-прочность»* и *«отказ-успех»*.

Особенностью предложенных подходов является использование большего объема статистической информации. Помимо информации об аппаратах, завершивших свою работу, используется также информация об аппаратах, которые продолжают функционирование.

Введем следующие обозначения:

1. t1, t2, …, tr – времена работы отказавших изделий;
2. τ1, τ2, τ3, …, τl – времена работы не отказавших изделий

где *r, l* – количество отказавших и не отказавших аппаратов соответственно.

Разработанные методы были рассмотрены применительно к КА *«Глонасс-М»*, для которого характерно наличие сравнительно большого объема экспериментальных данных [1].

**1. Метод, базирующийся на модели *«нагрузка-прочность»***

На этапе орбитального полета важнейшими показателями надежности являются вероятность безотказной работы (ВБР) и среднее время активного существования (САС).

Вероятность безотказной работы (ВБР) определяется с помощью следующего соотношения [2]:



где *τр* – заданное время работы КА, Т – время безотказной работы КА.

Среднее время активного существования определяется по формуле [2]:



Время безотказной работы является случайной величиной (СВ), закон распределения которой должен быть определен. Вид закона распределения выбирается из тех или иных соображений.

В работе рассматривается использование данной модели применительно к экспоненциальному закону распределения времени безотказной работы. В силу высокой степени универсальности процесса Пуассона, предположение об экспоненциальном законе распределения времени безотказной работы является общепринятым.

Точечная оценка ВБР для экспоненциального закона распределения определяется по следующей формуле [2]:

 (1.1)

где  – точечная оценка интенсивности отказов, которая определяется в рамках *метода максимального правдоподобия*.

Сущность *метода максимального правдоподобия* заключается в использовании принципа максимального правдоподобия, в соответствии с которым точечные оценки принимают значения, при которых вероятность получения имеющегося экспериментального материала максимальна.

Функция плотности распределения времени безотказной работы имеет следующий вид:



где *θi* – некие параметры, описывающие закон распределения.

Функция правдоподобия *L* связана с вероятностью получения имеющегося экспериментального материала – *РΣ* , которая определяется следующим соотношением:



где *А* – событие, заключающееся в том, что время безотказной работы примет значения *t1, t2,… tr*, а *В* – событие, заключающееся в том, что время безотказной работы превысит значения *τ*1, *τ*1,…, *τ*l.

Вероятности реализации событий *А* и *В* можно определить следующим способом:





где  – функция распределения времени безотказной работы.

Применительно к решаемой задаче функция правдоподобия имеет вид:



После того, как определена функция правдоподобия, находятся точечные оценки параметров *θi*.

Точечные оценки параметров *θi* находятся посредством решения системы алгебраических уравнений:

 (1.2)

Корреляционная матрица системы случайных величин (точечных оценок параметров *θ i*) выглядит следующим образом:

К=А-1;



Производные, входящие в данную матрицу, берутся при истинных значениях параметров *θi*, значения которых неизвестны, поэтому они заменяются их точечными оценками.

Функция правдоподобия применительно к экспоненциальному закону распределения примет вид:



Затем решается система уравнений 1.2 и определяется основной параметр для экспоненциального закона распределения – точечная оценка *λ*:



Полученная случайная величина обладает свойствами состоятельности, асимптотической несмещенности и эффективности.

В рамках метода максимального правдоподобия считается, что точечные оценки распределены в соответствии с нормальным законом распределения. В рассматриваемой ситуации необходимо учитывать, что случайная величина распределена в соответствии с усеченным нормальным законом.

Функция распределения данной случайной величины имеет вид:



где  – функция ошибок, *h* и *h0* – аргументы функции ошибок, а *А* – коэффициент усечения.

Границы доверительного интервала находятся из следующих соображений:









где γ – доверительная вероятность,  – квантиль нормального распределения, отвечающий доверительной вероятности (1+γ)/2,  – среднеквадратическое отклонение точечной оценки интенсивности отказов.

Основные параметры функции распределения находятся, исходя из следующих допущений:









где *λ* – истинное значение параметра *λ* ,  – дисперсия точечной оценки интенсивности отказов.

Верхняя и нижняя граница интенсивности отказов определяется из следующих соотношений соответственно:





Для одностороннего интервала используются следующие соотношения:





где  – квантиль нормального распределения, отвечающий доверительной вероятности *γ*.

Выходными результатами являются следующие параметры:

1. Точечная оценка ВБР, которая определяется по формуле 1.1.
2. Нижняя граница ВБР определяется следующим соотношением [2]:



1. Точечная оценка среднего времени активного существования (CAC):



1. Нижняя граница САС:



1. Верхняя граница САС:

,

где tmax – максимально возможное время работы КА.

Параметры 3-5 получены с учетом того, что время безотказной работы КА не может превышать некоторое значение – tmax. Данное обстоятельство связано с наличием расходных материалов.

В этой ситуации математическое ожидание этого времени определятся с помощью следующего соотношения:



**2. Метод, базирующийся на модели «отказ-успех»**

Применяемый подход отличается от классического использованием информации об аппаратах, которые продолжают свое функционирование. Для определения времени безотказной работы этих аппаратов осуществляется моделирование оставшегося времени работы, которое базируется на задании закона распределения данного времени. Многократная имитация времени безотказной работы позволяет в рамках использования *метода статистических испытаний* найти оценки искомых характеристик надежности.

Используемые законы распределения:

- закон равномерной плотности;

- экспоненциальный закон.

***2.1. Закон равномерной плотности***

Время работы генерируется следующим образом:



где *k* – номер выборки (*k*=1,2,…*N)*; *ξ* – СВ, распределенная равномерно в интервале от нуля до единицы.

***2.2. Экспоненциальный закон распределения***

Время работы генерируется следующим образом:



При этом необходимо отбросить все времена, полученные меньше времени работы аппаратов, функционирующих по настоящее время. Также необходимо учитывать, что время безотказной работы аппарата не может быть больше максимально возможного времени.

Величина  определяется формулой:



где – СВ, распределенная в соответствии с нормированным нормальным законом распределения.

Точечные оценки ВБР и САС находятся по следующим формулам на каждом этапе имитации работы аппаратов [3]:





где  – количество отказов, зафиксированных на каждом этапе имитации, *n* – общее число аппаратов.

Интервальные оценки определяются также на каждом этапе имитации. При этом полагается, что точечная оценка ВБР распределена в соответствии с биномиальным законом распределения, а САС – в соответствии с законом распределения Стьюдента:







где  – число сочетаний из *n* по *i*, *εγ* – границы доверительного интервала.

Для нахождения границ доверительного интервала используется формула [2]:





где  – квантиль распределения Стьюдента,  – дисперсия времени безотказной работы.

Для определения оценок характеристик надёжности строятся вариационные ряды из полученных значений. Они позволяют получить математические значения данных случайных величин, которые принимаются в качестве искомых оценок характеристик надежности:











Необходимые математические ожидания можно определить следующим соотношением (на примере ):



Точность определения приведенных математических ожиданий отыскивается по формуле [3]:



где - квантиль нормального распределения.

Вводятся параметры, характеризующие точность определения ВБР и САС соответственно [3]:





**3. Анализ используемых методов**

Для анализа результатов предложенных методов проводится проверка достоверности используемых подходов.

В основе проверки лежит использование вероятностно-статистического метода, в рамках которого используется абсолютно достоверная информация об аппаратах, которые завершили функционирование.

Определяются точечные и интервальные оценки вероятности безотказной работы и среднего времени активного существования:













,

где *r0* – количество отказавших аппаратов,  – число сочетаний из *r* по *i*,  – квантиль распределения Стьюдента,  – среднеквадратическое отклонение времени безотказной работы.

Если доверительные интервалы характеристик надежности оказываются вне полученных в результате анализа интервалов (при одинаковом значении доверительной вероятности), то данный подход должен быть забракован. В противном случае выбирается тот подход, который обеспечивает более высокую точность.

В таблице представлены расчеты основных показателей надежности при использовании предложенных методик, а также при анализе.

Таблица 1 – Результаты расчетов

|  | **Модель**  **«нагрузка-прочность»** | **Модель**  **«отказ-успех»** | | **Проверка достоверности используемых подходов** |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| З-н | Экспоненциальный закон | З-н равномерной плотности | Экспоненциальный закон |
| γ=0.97 | | | | |
|  | 0.861 | 0.7690 | 0.8271 | 0.625 |
|  | 131.668 | 101.0011 | 115.4688 | 75.525 |
|  | 0.768 | 0.5639 | 0.6191 | 0.3306 |
|  |  |  |  | 0.8639 |
|  | 147.092 | 121.1390 | 139.7446 | 124.53 |
|  | 118.369 | 80.8632 | 91.1930 | 26.52 |
|  | 0.108 | 0.2667 | 0.1949 | 0,4266 |
|  | 0.109 | 0.1994 | 0.2102 | 0,6492 |
| δ | | 3.0550e-04 | 5.5347e-04 |  |

1. По результатам видно, что доверительные интервалы полученных характеристик надежности пересекаются с интервалами, полученными в результате анализа. Что дает основание полагать, что эти результаты находятся в соответствии с экспериментальными данными.

2. Среди предложенных методов наибольшей точностью отличается метод, базирующийся на модели *«нагрузка-прочность»*.

3. Пересечение границ при использовании разных законов распределения дает основание для принятия гипотезы, в соответствие с которой время безотказной работы распределено в соответствие с трансформированным экспоненциальным законом, т.е. в условиях ограничения максимального времени работы.

Таким образом, результаты выполненной работы позволяют сделать вывод, методика оценки характеристик надежности должна базироваться на модели «нагрузка-прочность» и принятии гипотезы о трансформированном экспоненциальном законе распределения времени безотказной работы КА.

**Библиографический список**

1. Информационно-аналитический центр координатно-временного и навигационного обеспечения. Прикладной потребительский центр Глонасс [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.glonass-iac.ru/GLONASS/

2. Оценка характеристик надежности изделия на этапе экспериментальной отработки: Методические указания к выполнению домашнего задания/ Сост. В.А. Бабук; Балт. гос. тех. Ун-т. СПб, 2001. 15 с.

3. Надежность космического аппарата: Методические указания к выполнению домашнего задания/ Сост. В.А. Бабук; Балт. гос. тех. ун-т. СПб, 2001, 12 с.