Доклад на конференцию

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

Слайд 1:

Целью работы является разработка методик, которые позволяли бы с высокой точностью определять характеристики надежности космических аппаратов на этапе летных испытаний.

Существующие вероятностно-статистические методы не позволяют с высокой точностью решать поставленную задачу, т.к. для таких методов имеет важность наличие большого объема статистической информации, что является проблемой для таких сложных и дорогостоящих изделий, как космические аппараты, испытания которых проводятся в малых и даже единичных объемах.

Слайд 2:

В рамках работы было разработано 2 подхода к определению характеристик надежности:

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

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

Особенностью предложенных методик является использование актуальной статистической информации абсолютно всех аппаратов, а именно – использование информации о КА, которые продолжают функционировать. Для этих времен используются следующие обозначения.

Слайд 3:

Разработанные методы были использованы применительно к  
КА *«Глонасс-М»*, для которого характерно наличие сравнительно большого объема экспериментальной информации. Данные о результатах эксплуатации представлены в таблице, где видно: общее число аппаратов – 42, из них продолжают функционировать 26, снято с эксплуатации – 16.

Слайд 4:

На этапе эксплуатации важнейшими показателями надежности являются ВБР и ТСАС.

Вероятность безотказной работы и среднее время активного существования определяются с помощью следующих соотношений. Для того чтобы определить данные показатели, важно знать характер закона распределения времени безотказной работы.

*Рассмотрим модель «нагрузка-прочность».*

Время безотказной работы является случайной величиной, закон распределения которой должен быть определен. В работе рассматривается использование данной модели применительно к *экспоненциальному закону* распределения.

В силу высокой степени универсальности процесса *Пуассона*, предположение об экспоненциальном законе распределения времени безотказной работы является общепринятым.

Точечная оценка ВБР для экспоненциального закона определяется по следующей формуле, где – точечная оценка интенсивности отказов, которая определяется в рамках *метода максимального правдоподобия*.

Слайд 5:

Сущность метода базируется на принципе 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 – некие параметры, описывающие закон распределения.

Затем определяется функция правдоподобия, которая связана с вероятностью получения имеющегося экспериментального материала.

Слайд 6:

После того, как определена функция правдоподобия, находятся точечные оценки параметров , которые определяются из соображений получения максимальной величины вероятности.

Тогда параметры *Θi* находятся посредством решения системы алгебраических уравнений и строится корреляционная матрица системы случайных величин. Производные, входящие в данную матрицу, берутся при истинных значениях параметров *θi*, значения которых неизвестны, поэтому они заменяются их точечными оценками.

В данной работе функция правдоподобия будет выглядеть следующим образом. Затем решается система уравнений и определяется основной параметр экспоненциального распределения – точечная оценка λ.

Полученная оценка обладает следующими свойствами.

Слайд 7:

Для определения интервальных оценок основных показателей надежности необходимо знание законов распределения точечных оценок параметров. Тогда появляется возможность определить функцию распределения, и как следствие – границ доверительного интервала.

В рамках метода максимального правдоподобия при неограниченном числе опытов точечные оценки распределены по нормальному закону. А в рассматриваемой ситуации – это усеченный нормальный закон, и функция распределения выглядит следующим образом. Здесь *А* – коэффициент усечения, *Ф* – функция Лапласа, а *h* – ее аргумент.

Тогда, исходя из следующих соображений, определяются границы доверительного интервала (для одностороннего и двухстороннего).

Слайд 8:

Зная границы доверительного интервала, можно определить интервальную оценку параметра λ, и как следствие – показателей надежности.

Выходными результатами являются следующие показатели:

1. Точечная и интервальная оценка ВБР;

Для вероятности является как правило определяется только нижняя граница, а верхняя условно полагается равной единице.

2. Точечная и интервальная оценка САС

В данной задаче существует ограничение на время работы, оно должно быть меньше либо равно максимально возможного времени работы КА. Это связано с расходными материалами КА. Поэтому данные оценки для САС определяются, исходя из следующих соображений.

Слайд 9:

Рассмотрим следующий предложенный метод, который основан на модели «отказ-успех».

Сущность метода заключается в задании закона распределения времени безотказной работы аппаратов, продолжающих функционирование и в моделировании этих времен от *τ*i до *t*max. Для моделирования времени безотказной работы используется метод статистических испытаний, сущность которого заключается в многократной имитации работы системы и использовании ее результатов для оценки показателей надежности.

Для моделирования используются закон равномерной плотности и экспоненциальный закон.

Для закона равномерной плотности время работы генерируется следующим образом, где k – номер выборки, а ξ – СВ, распределенная равномерно в интервале от нуля до единицы.

Для экспоненциального распределения время генерируется таким образом.

Слайд 10:

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.

Точечная оценка ВБР и САС находятся по следующим формулам на каждом этапе имитации работы аппаратов.

Слайд 11:

Интервальные оценки ВБР и САС определяются следующим образом, 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.

Затем определяются оценки искомых характеристик надёжности. Данные соотношения являются справедливыми в силу действия центральной предельной теоремы теории вероятностей. И определяются параметры точности.

Слайд 12:

Для анализа результатов предложенных методик проводится проверка достоверности используемых подходов к определению характеристик надежности.

В основе проверки лежит использование вероятностно-статистического метода, в рамках которого проводится исследование надежности КА при наличии экспериментальных данных летных испытаний аппаратов, завершивших функционирование.

Точечные оценки показателей надежности находятся следующим образом.

Интервальная оценка ВБР и САС определяется из тех-же соображений, что и в модели «отказ-успех», при условии применения биномиального закона и закона распределения Стьюдента.

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.

Слайд 13, 14, 15:

В таблице представлены расчеты основных показателей надежности при использовании предложенных методик, а также при анализе для разных значений доверительной вероятности. Для наглядности полученные интервальные оценки перенесены на рисунки.

Выполненный анализ позволил установить, что наибольшей точностью отличаются результаты, полученные в рамках модели «нагрузка-прочность». Кроме того, существуют основания полагать, что эти результаты находятся в соответствии с экспериментальными данными. Т. о., создание методики оценки характеристик надежности должно базироваться при использовании модели «нагрузка-прочность» и принятии для времени безотказной работы экспоненциального закона распределения.

Слайд 15:

1. В настоящей работе разработаны методики, позволяющие с достаточно высокой точностью определять характеристики надежности аппаратов на этапе летных испытаний.

2. Были проведены расчеты на базе предложенных методик на примере аппаратов «Глонасс-М». В результате расчетов были получены основные показатели надежности – ВБР, САС.

3. Одновременно проводился анализ полученных результатов при использовании предложенных методов, по результатам которого были также определены показатели надежности.

4. Также сформулирован вывод о целесообразности использования модели «нагрузка-прочность» с использованием экспоненциального закона распределения для времени безотказной работы.

Слайд 16:

Спасибо за внимание!