# РЕФЕРАТ

Отчет содержит 39 стр., 2 рис., 3 табл., 5 ист., 4 прил.

Данная работа посвящена разработке методик, позволяющих с высокой точностью определять характеристики надежности космических аппаратов (КА) на этапе летных испытаний (ЛИ).

Рассматриваются 2 метода по определению характеристик надежности – метод, базирующийся на модели «нагрузка-прочность» и метод, базирующийся на модели «отказ-успех».

СОДЕРЖАНИЕ

[РЕФЕРАТ 2](#_Toc3656399)

[ВВЕДЕНИЕ 4](#_Toc3656400)

[1 Исследование надежности по результатам испытаний 5](#_Toc3656401)

[1.1 Метод, базирующийся на модели «нагрузка-прочность» 6](#_Toc3656402)

[1.2 Метод, базирующийся на модели «отказ-успех» 11](#_Toc3656403)

[2. Анализ используемых методов 15](#_Toc3656404)

[3. Проверка статистических гипотез 17](#_Toc3656405)

[ЗАКЛЮЧЕНИЕ 20](#_Toc3656406)

[СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ 21](#_Toc3656407)

[ПРИЛОЖЕНИЕ А 22](#_Toc3656408)

[ПРИЛОЖЕНИЕ Б 24](#_Toc3656409)

[ПРИЛОЖЕНИЕ В 29](#_Toc3656410)

[ПРИЛОЖЕНИЕ Г 39](#_Toc3656411)

# ВВЕДЕНИЕ

Разработка любого космического аппарата всегда связана с большими затратами времени и финансов. КА – сложная техническая система, предназначенная для решения своих целевых задач. Такая система требует разработки совокупности методов обеспечения надежности на всех этапах жизненного цикла КА. Наиболее интересным с точки зрения оценки характеристик надежности КА является этап летных испытаний и эксплуатации, когда имеет место ограниченный объем информации о состоянии КА.

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

Существующие вероятностно-статистические методики не позволяют с высокой точностью определять показатели надежности КА на этапе летных испытаний, 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.

В рамках выполняемой работы требуется разработка новых методик, позволяющих в условиях ограниченного числа экспериментальных данных проводить оценку и подтверждение характеристик надежности с высокой точностью.

# 1 Исследование надежности по результатам испытаний

В настоящей работе проводится исследование надежности на этапе летных испытаний при ограниченном объеме экспериментальных данных. Для получения достаточно высокой точности определения показателей надежности предложены следующие методики – метод, базирующийся на модели «нагрузка-прочность» и метод, базирующийся на модели «отказ-успех». Особенностью предложенных методик является использование актуальной статистической информации абсолютно всех космических аппаратов, надежность которых исследуется, а именно – использование информации о КА, которые продолжают функционировать.

Далее для этих времен используются следующие обозначения:

1. t1, t2, …, tr – времена работы отказавших изделий;
2. τ1, τ2, τ3, …, τl – времена работы не отказавших изделий (*l=n-r*).

Исходными данными данной задачи являются:

1. Количество испытаний n-аппаратов;
2. Время работы аппаратов, закончивших функционирование;
3. Время работы аппаратов, функционирующих по настоящее время;
4. Гарантийное время активного существования КА;
5. Максимально возможное время работы.

Для исследования надежности КА по результатам летных испытаний используются статистические данные о функционировании КА «Глонасс-М», разработанный ОАО «ИСС» им. Академика М.Ф. Решетнева», который характеризуется наличием сравнительно большого объема экспериментальных данных.

Значения времени работы КА «Глонасс-М» приведены таблице А.1 приложения А.

## 1.1 Метод, базирующийся на модели «нагрузка-прочность»

Вероятность безотказной работы определяется с помощью следующего соотношения:

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

Среднее время активного существования определяется по формуле:

Время безотказной работы является случайной величиной (СВ), закон распределения которой должен быть определен. Вид закона распределения выбирается из тех или иных соображений. Определение параметров этого закона осуществляется при использовании *метода максимального правдоподобия*.

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 [3]:

(1.1)

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

Сущность метода максимального правдоподобия 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.

Возникает задача оценки параметров *Θi* и, как следствие, характеристик надежности.

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, – функция плотности распределения времени безотказной работы.

Применительно к решаемой задаче функция правдоподобия имеет вид:

После того, как определена функция правдоподобия, находятся точечные оценки параметров *Θi*. Данные параметры определяются из соображений получения максимальной величины вероятности получения имеющегося экспериментального материала.

Тогда параметры *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 корреляционную матрицу, берутся при истинных значениях параметров *θi*, значения которых неизвестны.

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:

(1.3)

Полученная случайная величина обладает следующими свойствами:

* Состоятельность;
* Несмещенность (при неограниченном числе испытаний);
* Эффективность.

В рамках метода максимального правдоподобия при неограниченном числе опытов 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 СВ имеет вид:

,

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

Коэффициент усечения находится по формуле:

Параметр h и h0 определяются по формулам:

;

,

где – среднеквадратическое отклонение точечной оценки λ.

Границы доверительного интервала находятся из следующих соображений:

;

;

;

,

где – доверительная вероятность, – параметр, определяющий границы доверительного интервала, – квантиль нормального распределения, отвечающий доверительной вероятности (1+γ)/2.

Основные параметры функции распределения находятся, исходя из следующих допущений:

;

,

(1.4)

где – истинное значение параметра .

А верхняя и нижняя граница интенсивности отказов определяется из следующих соотношений соответственно:

;

Для одностороннего интервала, т.е. в условиях, когда нижняя граница равно нулю, используются следующие соотношения:

;

,

где – квантиль нормального распределения, отвечающий доверительной вероятности γ.

Выходными результатами являются следующие показатели надежности:

1. Точечная оценка ВБР, которая определяется по формуле 1.1.
2. Нижняя граница ВБР определяется следующим соотношением [3]:

Если существует ограничение на время безотказной работы, то необходимые САС находятся из следующих соображений (в данной задаче время работы должно быть меньше либо равно максимально возможного времени работы КА):

;

;

где – максимально возможное время работы КА.

1. Точечная оценка среднего времени активного существования (CAC):
2. Нижняя граница среднего времени активного существования:
3. Верхняя граница среднего времени активного существования:

,

В приложении Б приведены расчеты при использовании модели «нагрузка-прочность».

## 1.2 Метод, базирующийся на модели «отказ-успех»

Сущность метода заключается в задании закона распределения времени безотказной работы аппаратов, продолжающих функционирование и в моделировании этих времен. 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 [4].

Задается закон распределения времени работы не отказавших КА от *τ*i до *t*max (*t*max – максимально возможное время активного существования) и осуществляется моделирование этих СВ, определяются значения *t1, t2,… tl* .

Используемые законы распределения:

* закон равномерной плотности;
* экспоненциальный закон.

1.2.1 Закон равномерной плотности

Время работы генерируется следующим образом:

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

1.2.2 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.

Среднеквадратическое отклонение связано с дисперсией (1.4) зависимостью [5]:

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

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

Точечная оценка САС определяется соотношением:

Интервальные оценки ВБР и САС определяются следующим образом, определенные на каждом этапе имитации [5]:

;

;

;

Для определения интервальной оценки среднего времени активного существования вводится вспомогательная СВ:

Данная СВ распределена в соответствии с законом распределения Стьюдента с n-1 степенями свободы, где n – число опытов.

Для нахождения границ доверительного интервала проводятся рассуждения:

,

где – квантиль распределения Стьюдента.

Затем определяются оценки искомых характеристик надёжности:

Параметры точности отыскиваются следующим образом [4]:

,

где - квантиль нормального распределения.

Также вводятся параметры, характеризующие точность определения ВБР и САС соответственно [4]:

В приложении В приведены расчеты, использующие метод, базирующийся на модели «отказ-успех». Также, в приложении В приведена таблица В.2, где представлены основные результаты работы.

# 2. Анализ используемых методов

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.

Известно общее число аппаратов, завершивших функционирование; количество отказавших аппаратов; фактическое время работы каждого КА; заданное время работы.

Данные сведения приведены в таблице А.1 приложения А.

Исследуемые показатели надежности находятся следующим образом:

;

,

где – количество отказавших аппаратов; – КА, завершившие функционирование; – время работы каждого КА, завершивших функционирование.

Интервальная оценка ВБР определяется из соображений, что данная величина распределена в соответствии с биномиальным законом распределения, т.к. определяется вероятность получения имеющегося экспериментального материала.

Соотношения для нахождения верхней и нижней границы ВБР соответственно:

*;*

,

где – число сочетаний из *r* по *i*.

Нижняя и верхняя граница среднего времени активного существования определяется по формулам соответственно:

;

,

где – квантиль распределения Стьюдента, – среднеквадратическое отклонение.

Для нахождения дисперсии используется формула:

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.

# 3. Проверка статистических гипотез

Знание закона распределения случайной величины крайне важно для определения характеристик надежности. Ранее было сделано допущение об экспоненциальном законе распределения времени безотказной работы.

Для того чтобы определить согласуются ли имеющиеся экспериментальные данные с выдвинутым предположением о том, что время безотказной работы аппаратов распределено в соответствии с экспоненциальным законом распределения, используется критерий согласия Хи-квадрат (критерий Пирсона).

Распределение Хи-квадрат дает возможность оценить степень согласованности теоретического и статистического законов распределения.

Пусть проведено *n* опытов по определению значений случайной  
величины – *u1, u2, u3…un*.

Область полученных значений разбивается на *k* интервалов (разрядностей) и определяется функция распределения случайной величины, полученной на основании экспериментальных данных:

Данная функция дискретна и носит неопределенный или случайный характер.

Точечная оценка вероятности попадания СВ в *i-*й интервал определяется по формуле:

где *ni* – количество попаданий СВ в *i-*й интервал, *n* – количество СВ.

Можно полагать, что точечная оценка распределена в соответствии с биномиальным законом распределения:

где – истинное значение вероятности попадания СВ в интервал.

Вводится вероятность того, что истинное значение находится вне рассматриваемого интервала:

;

,

где , – верхняя и нижняя граница вероятности попадания СВ в интервал соответственно.

Тогда верхняя и нижняя границы вероятности попадания СВ в интервал определяются по формулам:

Критерием для выбора величины разбиения интервала является следующий параметр точности, который характеризует близость и :

Таким образом для того чтобы разбить область полученных значений случайных величин на интервалы, необходимо учитывать параметр точности, который характеризует близость истинного значения вероятности попадания в заданный интервал и точечной оценки.

Методом подбора было определено, что наиболее высокую точность можно достигнуть при разбиении области СВ на 2 интервала (приложение Г). Однако воспользоваться данным критерием с полученной разрядностью невозможно. Таким образом необходимо искать другие пути решения поставленной задачи.

В ходе анализа используемых подходов было получено, что характеристики надежности, полученные при использовании экспоненциального закона, лежат в пределах интервалов, полученных в результате анализа. Исходя из этого можно сделать вывод, что выбранный закон распределения времени безотказной работы не противоречит экспериментальным данным.

# ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе разработаны методики, позволяющие с достаточно высокой точностью определять характеристики надежности аппаратов на этапе летных испытаний. Разработаны следующие методы оценки характеристик надежности – метод, базирующийся на модели «нагрузка-прочность» и метод, базирующийся на модели отказ-успех».

Также были проведены расчеты на базе предложенных методик на примере аппаратов «Глонасс-М», разработанных ОАО «ИСС» им. Академика М.Ф. Решетнева», характеризующихся наличием большого объема экспериментальных данных. В результате расчетов были получены основные показатели надежности – вероятность безотказной работы и среднее время активного существования.

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

По полученным результатам видно, что при определении характеристик надежности по результатам летных испытаний можно воспользоваться каждой из предложенных моделей, однако наибольшей точностью отличается метод, базирующийся на модели «нагрузка-прочность».

Исходя из проведенного исследования, можно сделать вывод о целесообразности использования модели «нагрузка-прочность» в случае, когда имеет место ограниченное число экспериментальных данных.

# СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

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

2. Сравнительный анализ развития орбитальных группировок GPS и ГЛОНАСС [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.tssonline.ru/articles2/sputnik/sravnitelnii-analiz-razvitiya-orbitalnih-gryppirovok-gps-i-glonass>

3. 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.

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

5. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. М: Наука, 1972. 576 с.

# ПРИЛОЖЕНИЕ А

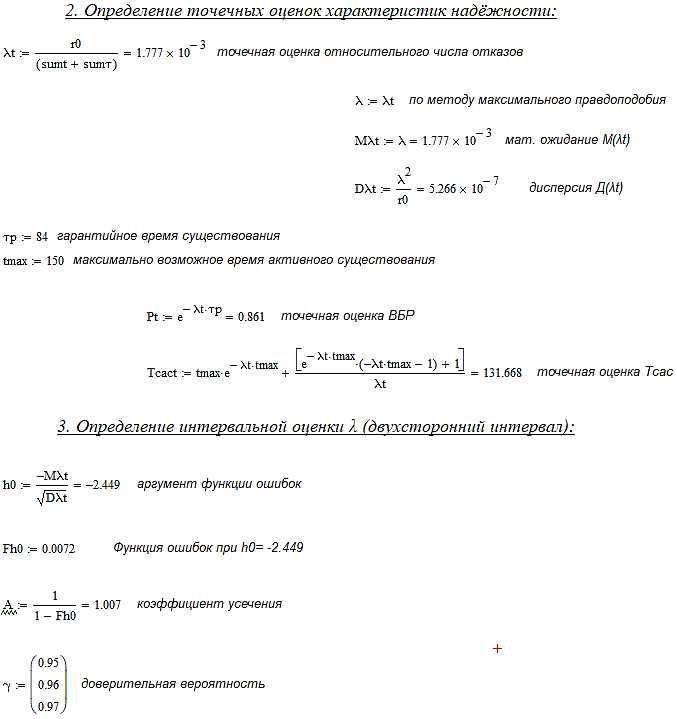
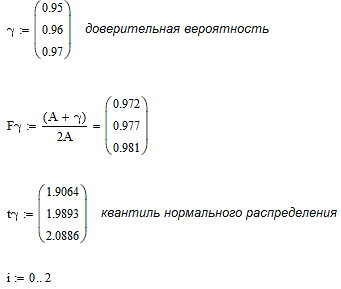
В таблице А.1 приведены времена работы КА «Глонасс-М» по результатам летных испытаний по состоянию на 05.11.2018.

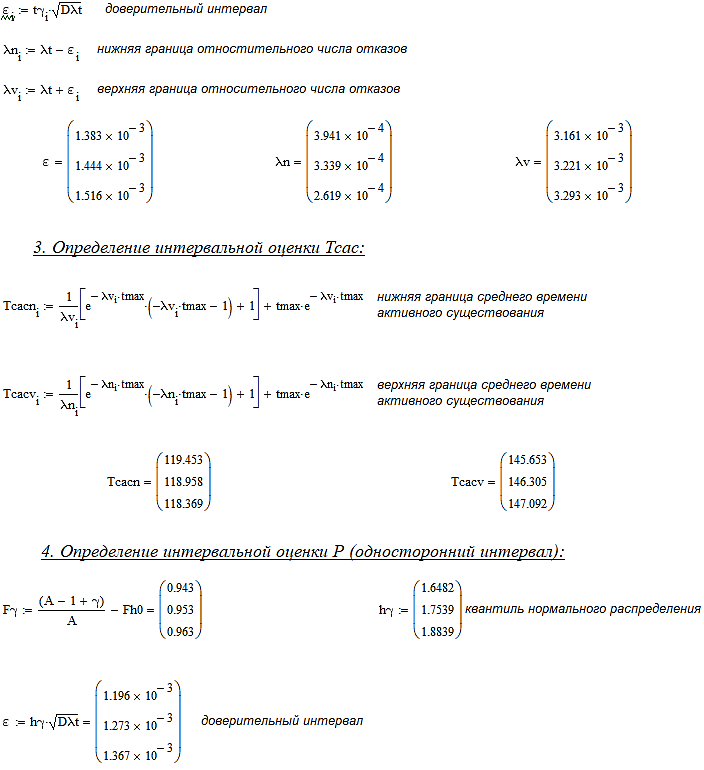
Таблица А.1 – статистические данные летных испытаний КА «Глонасс-М» [1, 2]

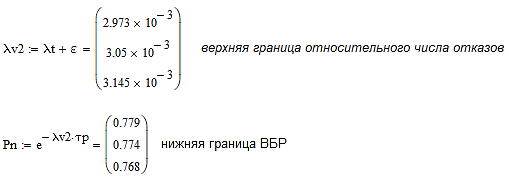
| № п/п | Изделие | Дата запуска | Фактическое существование, месяц | Гарантийное САС |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 1 | 14Ф113№711 | 01.12.01 | 67 (снят с эксплуатации) | 84  месяца |
| 2 | 14Ф113№701 | 25.12.03 | 92,4 (на этапе ЛИ) |
| 3 | 14Ф113№712 | 26.12.04 | 84.1 (снят с эксплуатации) |
| 4 | 14Ф113№713 | 25.12.05 | 46 (снят с эксплуатации) |
| 5 | 14Ф113№715 | 25.12.06 | 101.2 (снят с эксплуатации) |
| 6 | 14Ф113№716 | 25.12.06 | 142,5 |
| 7 | 14Ф113№717 | 25.12.06 | 142,5 |
| 8 | 14Ф113№718 | 26.10.07 | 84.1 (снят с эксплуатации) |
| 9 | 14Ф113№719 | 25.11.07 | 132,4 |
| 10 | 14Ф113№720 | 25.11.07 | 132,4 |
| 11 | 14Ф113№721 | 08.02.08 | 130,5 |
| 12 | 14Ф113№722 | 25.12.07 | 84.1 (снят с эксплуатации) |
| 13 | 14Ф113№723 | 25.12.07 | 130,5 |
| 14 | 14Ф113№724 | 25.09.08 | 84.1 (снят с эксплуатации) |
| 15 | 14Ф113№725 | 25.09.08 | 94 (снят с эксплуатации) |
| 16 | 14Ф113№726 | 25.09.08 | 11 (снят с эксплуатации) |
| 17 | 14Ф113№727 | 25.09.08 | 84.1 (снят с эксплуатации) |
| 18 | 14Ф113№728 | 25.12.08 | 84.1 (снят с эксплуатации) |
| 19 | 14Ф113№729 | 25.12.08 | 84.1 (снят с эксплуатации) |
| 20 | 14Ф113№730 | 30.01.10 | 106,8 |
| 21 | 14Ф113№733 | 24.01.10 | 106,8 |
| 22 | 14Ф113№734 | 14.12.09 | 106,5 (Временно выведен) |
| 23 | 14Ф113№731 | 28.03.10 | 104,2 |
| 24 | 14Ф113№732 | 28.03.10 | 104,2 |
| 25 | 14Ф113№735 | 28.03.10 | 104,2 | 84  месяца |
| 26 | 14Ф113№736 | 04.10.10 | 98.2 |
| 27 | 14Ф113№737 | 02.09.10 | 76 (снят с эксплуатации) |
| 28 | 14Ф113№738 | 02.09.10 | 76 (снят с эксплуатации) |
| 29 | 14Ф113№742 | 02.10.11 | 85.2 |
| 30 | 14Ф113№743 | 04.11.11 | 84.1 |
| 31 | 14Ф113№744 | 04.11.11 | 84.1 |
| 32 | 14Ф113№745 | 04.11.11 | 84.1 |
| 33 | 14Ф113№746 | 28.11.11 | 42 (снят с эксплуатации) |
| 34 | 14Ф113№747 | 26.04.13 | 66,4 |
| 35 | 14Ф113№754 | 24.03.14 | 55,4 |
| 36 | 14Ф113№755 | 14.06.14 | 52,8 |
| 37 | 14Ф113№702 | 01.12.2014 | 47.2 |
| 38 | 14Ф113№751 | 07.02.2016 | 32,9 |
| 39 | 14Ф113№753 | 29.05.2016 | 29,3 |
| 40 | 14Ф113№752 | 22.09.2017 | 13,4 |
| 41 | 14Ф113№756 | 17.06.2018 | 4,6 |
| 42 | 14Ф113№757 | 03.11.2018 | 0.1 (на этапе вывода) |
| Максимально возможное время | | 150 месяцев | | |

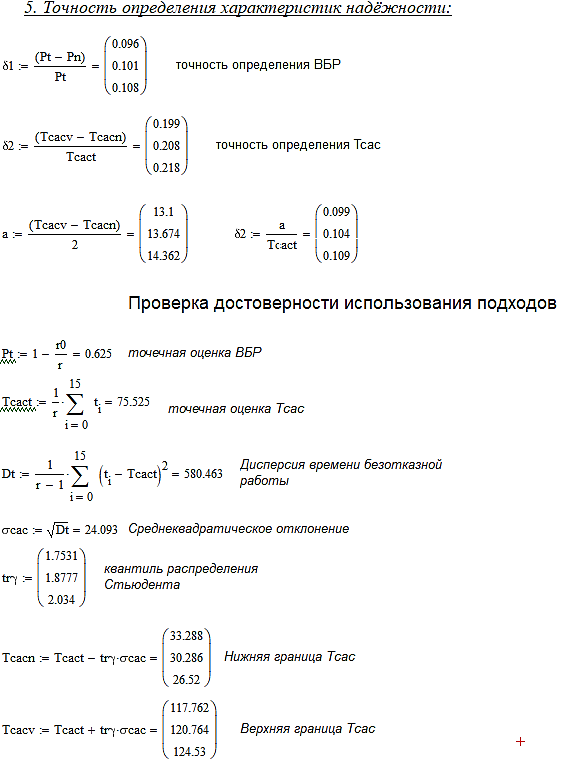
Продолжение таблицы А.1 – статистические данные летных испытаний КА «Глонасс-М»

# ПРИЛОЖЕНИЕ Б









Интервальная оценка ВБР определяется с помощью встроенной функции Matlab – binofit, которая определяет двухсторонний интервал вероятности безотказной работы.

clear

clc

disp('ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ:')

%Модель "ОТКАЗ-УСПЕХ"

Nka=16;

n0=1:1:16;

gamma=0.95;

alpha=1-gamma;

x0=0.5; % начальное приближение

[phat,pci]=binofit(n0,Nka,alpha); % точечная и интервальная оценка ВБР соответственно

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

phat =

Columns 1 through 15

0.0625 0.1250 0.1875 0.2500 0.3125 0.3750 0.4375 0.5000 0.5625 0.6250 0.6875 0.7500 0.8125 0.8750 0.9375

Column 16

1.0000

pci =

0.0016 0.3023

0.0155 0.3835

0.0405 0.4565

0.0727 0.5238

0.1102 0.5866

0.1520 0.6457

0.1975 0.7012

0.2465 0.7535

0.2988 0.8025

0.3543 0.8480

0.4134 0.8898

0.4762 0.9273

0.5435 0.9595

0.6165 0.9845

0.6977 0.9984

0.7941 1.0000

Строка 10 соответствует случаю, когда количество отказов – 6, при котором необходимо найти интервальную оценку ВБР. Значения нижней и верхней границы ВБР при этом равны 0.3543 и 0.848 соответственно.

# ПРИЛОЖЕНИЕ В

clear

clc

disp('ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ:')

%Модель "ОТКАЗ-УСПЕХ"

t1=[67 84.1 46 101.2 84.1 84.1 84.1 94 11 84.1 84.1 84.1 106.5 76 76 42]; %аппараты, закончившие свое функционирование

tau=[92.4 142.5 142.5 132.4 132.4 130.5 130.5 106.8 106.8 104.2 104.2 104.2 98.2 85.2 84.1 84.1 84.1 66.4 55.4 52.8 47.2 32.9 29.3 13.4 4.6 0.1]; % аппараты продолжающие функционирование

t1sum=sum(t1); % сумма времен аппаратов, закончивших свое функционирование

tausum=sum(tau); % сумма времен аппаратов, функционирующих в н.в.

r=16; % количество аппаратов, закончивших функционирование

l=26; % количество аппаратов, продолжающих функционирование

tp=84; % заданное время работы КА

tmax=150; % максимально возможное время работы КА

r0=6; % количество отказавших аппаратов

Nka=r+l; % общее число аппаратов

gamma=0.95; % доверительная вероятность

% \_\_\_\_\_Закон равномерной плотности\_\_\_\_\_

disp('Закон равномерной плотности')

n=100000; % имитации

k=1; % итерации

Ptsum=0; % счетчик точечной оценки ВБР

Tcactsum=0; % счетчик точечной оценки Тсас

Tnsum=0; % счетчик интервальной оценки нижней границы Тсас

Tvsum=0; % то же самое для верхней границы

Pn=0; %счетчик для нижней границы ВБР

Pk1=zeros(1,n); % нулевой массив для определения точности использования метода

while k<=n

ksi=rand(1,l);

t=tau+ksi.\*(tmax-tau);

for i=1:1:l

if t(i)>tmax

t(i)=tmax;

end;

end;

n0=r0;

for i=1:1:l

if t(i)<tp

A=find(t<tp);

x=length(A); % количество отказов при (к)-ой имитации

n0=r0+x;

end;

end;

Pt=1-n0/Nka; % точечная оценка ВБР при (к)-й имитации

tsum1=sum(t); % сумма времен функционирующих аппаратов при (к)-й имитации

Tcact=(tsum1+t1sum)/Nka; % точечная оценка Тсас при (к)-й имитации

Ptsum=Ptsum+Pt;

Tcactsum=Tcactsum+Tcact;

x0=0.2; % начальное приближение

i=0;

for i=0:n0

f=@(x) (sum(factorial(Nka)\*(1-x)^(i)\*x^(Nka-i)/(factorial(i)\*factorial(Nka-i)))-0.003);

Pni=fzero(f,x0); % нижняя граница ВБР при (к)-й имитации

end;

Pn=Pn+Pni;

deltar=(Tcact-t1).^2;

Tsumr=sum(deltar);

deltat=(Tcact-t).^2;

Tsumt=sum(deltat);

Dt=(Tsumr+Tsumt)/(Nka-1);

DNka=Dt/Nka;

nu=Nka-1;

tst=tinv(gamma,nu); % квантиль распределения Стьюдента

e=tst\*sqrt(DNka); % граница доверительного интервала

Tcacn=Tcact-e\*tst; % нижняя граница Тсас при (к)-й имитации

Tcacv=Tcact+e\*tst; % верхняя граница Тсас при (к)-й имитации

Tnsum=Tnsum+Tcacn;

Tvsum=Tvsum+Tcacv;

Pk1(k)=Pt;

k=k+1;

end;

Pt1=Ptsum/n; % точечная оценка ВБР

Tcact1=Tcactsum/n; % точечная оценка Тсас

Pn1=Pn/n; % нижняя граница ВБР

Tcacn1=Tnsum/n; % нижняя граница Тсас

if Tcacn1<0

Tcacn1=0;

end;

Tcacv1=Tvsum/n; % верхняя граница Тсас

if Tcacv1>tmax

Tcacv1=tmax;

end;

delta11=(Pt1-Pn1)/Pt1; % точность определения ВБР

delta12=(Tcacv1-Tcacn1)/Tcact1; % точность определения Тсас

q=1/(n\*(n-1))\*sum((Pk1-Pt1).^2);

tgamma=norminv((1+gamma)/2,0,1);

d1=tgamma/Pt1\*sqrt(q);

% \_\_\_\_\_\_\_\_\_Экспоненциальный закон\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

disp('Экспоненциальный закон распределения')

n=100000; % имитации

k=1; % итерации

Ptsum=0; % счетчик точечной оценки ВБР

Tcactsum=0; % счетчик точечной оценки Тсас

Tnsum=0; % счетчик интервальной оценки нижней границы Тсас

Tvsum=0; % то же самое для верхней границы

wrong=0; % количество отброшенных имитаций

Pn=0;

Pk1=zeros(1,n);

while k<=n

sigmaL=sqrt(r0)/(t1sum+tausum); % среднеквадратичное отклонение интенсивности отказов

Lt=r0/(t1sum+tausum); % точечная оценка интенсивности отказов

Xn=randn(1,l); % СВ распределенная по нормированному нормальному закону

L=Lt+Xn\*sigmaL; % интенсивность отказов, зависящая от СВ Хn

ksi=rand(1,l); % СВ распределенная по закону равномерной плотности

A=1-ksi;

B=log(A);

t=-1./L.\*B; % время работы функционирующих на данное время аппаратов

for i=1:1:l

if t(i)>tmax

t(i)=tmax;

end;

end;

r0=6;

n0=r0;

Y=0;

for i=1:1:l

if t(i)<tp

A1=find(t<tp);

X=length(A1);

if t(i)<tau(i)

t(i)=0;

B1=find(t==0);

Y=length(B1);

end;

n0=r0+X-Y;

end;

end;

Pt=1-n0/(Nka-Y); % точечная оценка ВБР при (к)-й имитации

Pk1(k)=Pt;

tsum1=sum(t); % сумма времен функционирующих аппаратов при (к)-й имитации

Tcact=(tsum1+t1sum)/(Nka-Y); % точечная оценка Тсас при (к)-й имитации

Ptsum=Ptsum+Pt;

Tcactsum=Tcactsum+Tcact;

deltar=(Tcact-t1).^2;

Tsumr=sum(deltar);

for i=1:1:l

if t(i)==0

t(i)=Tcact;

end;

end;

deltat=(Tcact-t).^2;

Tsumt=sum(deltat);

Dt=(Tsumr+Tsumt)/(Nka-1-Y);

DNka=Dt/(Nka-Y);

nu=Nka-Y-1;

tst=tinv(gamma,nu); % квантиль распределения Стьюдента

e=tst\*sqrt(DNka); % граница доверительного интервала

Tcacn=Tcact-e\*tst; % нижняя граница Тсас при (к)-й имитации

Tcacv=Tcact+e\*tst; % верхняя граница Тсас при (к)-й имитации

Tnsum=Tnsum+Tcacn;

Tvsum=Tvsum+Tcacv;

x0=0.5; % начальное приближение

i=0;

for i=0:n0

f=@(x) (sum(factorial(Nka-Y)\*(1-x)^(i)\*x^(Nka-Y-i)/(factorial(i)\*factorial(Nka-Y-i)))-0.003);

Pni=fzero(f,x0); % нижняя граница ВБР при (к)-й имитации

end;

Pn=Pn+Pni;

k=k+1;

end;

Pt2=Ptsum/n; % точечная оценка ВБР

Tcact2=Tcactsum/n; % точечная оценка Тсас

Pn2=Pn/n;

Tcacn2=Tnsum/n; % нижняя граница Тсас

if Tcacn2<0

Tcacn2=0;

end;

Tcacv2=Tvsum/n; % верхняя граница Тсас

if Tcacv2>tmax

Tcacv2=tmax;

end;

delta21=(Pt1-Pn2)/Pt1; % точность определения ВБР

delta22=(Tcacv2-Tcacn2)/Tcact2; % точность определения Тсас

q=1/(n\*(n-1))\*sum((Pk1-Pt1).^2);

d2=tgamma/Pt1\*sqrt(q);

disp(Pt1);

disp(Pt2);

disp(Pn1);

disp(Pn2);

disp(Tcact1);

disp(Tcact2);

disp(Tcacn1);

disp(Tcacn2);

disp(Tcacv1);

disp(Tcacv2);

disp(delta11);

disp(delta12);

disp(delta21);

disp(delta22);

disp(d1);

disp(d2);

Проверка достоверности расчета нижней границы вероятности безотказной работы, распределенной в соответствии с биномиальным законом распределения.

Нижняя граница ВБР, распределенной в соответствии с биномиальным законом распределения определяется из следующего соотношения:

Для решения поставленной задачи в Matlab данное соотношения реализуется следующим образом:

clear

clc

disp('ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ:')

%Модель "ОТКАЗ-УСПЕХ"

Nka=16; % общее число аппаратов

n0=6; % количество отказавших аппаратов

gamma=0.95; % значение доверительной вероятности

x0=0.5; % начальное приближение

for i=0:n0

f=@(x) (sum(factorial(Nka)\*(1-x)^(i)\*x^(Nka-i)/(factorial(i)\*factorial(Nka-i)))-(1-gamma)); % реализация уравнения

Pn=fzero(f,x0); % нижняя граница ВБР

end;

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

>> Pn

Pn =

0.4170

Для того чтобы проверить правильность решения уравнения для нижней границы ВБР, в рамках данной работы фиксируется количество отказов и общее число аппаратов, а значение доверительной вероятности варьируется.

Результаты расчета нижней границы ВБР при различных значениях доверительной вероятности приведены в таблице В.1.

Таблица В.1 – Результаты расчета нижней границы ВБР

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| γ | 0.95 | 0.952 | 0.955 | 0.957 | 0.96 | 0.962 | 0.965 | 0.967 | 0.97 |
|  | 0.4170 | 0.4141 | 0.4095 | 0.4063 | 0.4014 | 0.3980 | 0.3926 | 0.3889 | 0.3830 |

По полученным результатам, приведенными в таблице, видно, что с увеличением величины доверительной вероятности нижняя граница вероятности безотказной работы уменьшается, значит границы доверительного интервала расширяются, что соответствует логике. Это означает, что реализация поиска нижней границы ВБР на программном языке Matlab, приведенная выше, является достоверной и может быть использована в работе.

В таблице В.2 приведены результаты расчета характеристик надежности при использовании модели «нагрузка-прочность» и «отказ-успех» при заданных законах распределения, а также результаты проверки достоверности использованных подходов.

Таблица В.2 – Результаты расчетов характеристик надежности

|  | | Модель «нагрузка-прочность» | Модель «отказ-успех» | | Проверка достоверности используемых подходов |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| З-н | | Эксп. з-н | З-н равном. пл-ти | Эксп. з-н |
| γ=0.95 | | | | | |
|  | | 0.861 | 0.7692 | 0.8271 | 0.625 |
|  | | 131.668 | 101.0135 | 115.481 | 75.525 |
|  | | 0.779 | 0.5641 | 0.6192 | 0.3543 |
|  | |  |  |  | 0.8480 |
|  | | 145.653 | 116.254 | 133.842 | 117.762 |
|  | | 119.453 | 85.773 | 97.12 | 33.288 |
|  | | 0.096 | 0.2666 | 0.1951 |  |
|  | | 0.099 | 0.3018 | 0.318 |  |
| δ | | | 2.7452e-04 | 4.9865e-04 |  |
| γ=0.96 | | | | | |
|  | 0.861 | | 0.7692 | 0.8271 | 0.625 |
|  | 131.668 | | 101.0135 | 115.4810 | 75.525 |
|  | 0.774 | | 0.5641 | 0.6192 | 0.3437 |
|  |  | |  |  | 0.8552 |
|  | 146.305 | | 118.3557 | 136.3824 | 120.764 |
|  | 118.958 | | 83.6713 | 94.5797 | 30.286 |
|  | 0.101 | | 0.2666 | 0.1951 |  |
|  | 0.104 | | 0.3434 | 0.3620 |  |
| δ | | | 2.8765e-04 | 5.2251e-04 |  |
| 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 |  |
|  | 0.109 | | 0.3988 | 0.4205 |  |
| δ | | | 3.0550e-04 | 5.5347e-04 |  |

Продолжение таблицы В.2 – Результаты расчетов характеристик надежности

На рисунке В.1 и В.2 для удобства показаны основные результаты расчетов на числовой оси при использовании каждого метода с различными значениями доверительной вероятности.

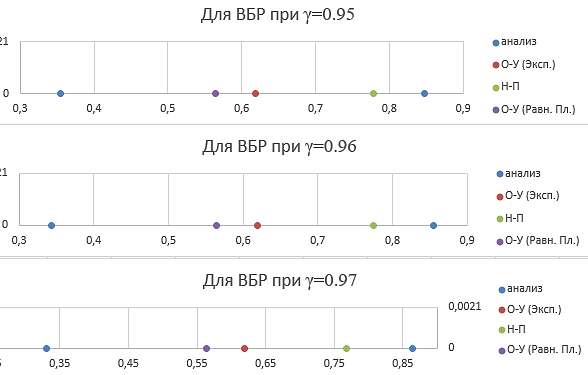
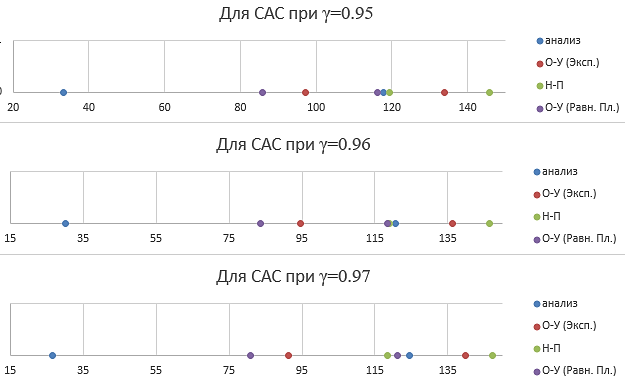


Рисунок В.1. Результаты расчета интервальной оценки ВБР

Рисунок В.1. Результаты расчета интервальной оценки САС

# ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Для определения числа разрядностей проводится расчет с помощью средств Matlab:

Количество разрядностей – 2:

clear

clc

disp('ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ:')

t=[67 84.1 46 101.2 84.1 84.1 84.1 94 11 84.1 84.1 84.1 106.5 76 76 42]; %аппараты, закончившие свое функционирование

t=sort(t);

gamma=0.95; % доверительная вероятность

alpha=1-gamma; % уровень значимости

Nka=16; % Количество аппаратов (СВ)

n0=[6 10]; % количество попаданий в разряд

[phat,pci]=binofit(n0,Nka,alpha); % точечная и интервальная оценка Р соответственно

Pn=pci(1:2,1);

Pv=pci(1:2,2);

e=(Pv-Pn)./(phat'); % параметр точности

\_\_\_\_\_\_\_\_\_

>> e

e =

1.3165

0.7899

>> phat

phat =

0.3750 0.6250

>> pci

pci =

0.1520 0.6457

0.3543 0.8480

Методом подбора было определено, что наибольшую точность можно получить при разбиении области СВ на 2 интервала.