



СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И УПРАВЛЕНИЕ SYSTEM ANALYSIS AND PROCESSING OF KNOWLEDGE

УДК 629.7.017.1

DOI 10.52575/2687-0932-2021-48-4-771-783

Оценивание надежности спутников в зависимости от типа орбиты

Брусков А.А.

Государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
Московской области «Технологический университет имени дважды Героя Советского Союза,
летчика-космонавта А.А. Леонова»,
Россия, 141074, Московская область, г. Королев, ул. Гагарина, д. 42
E-mail: bruskov.art@yandex.ru

Аннотация. Надежность уже давно является одним из основных факторов при проектировании космических систем и в последние годы она даже стала важной составляющей при проектировании космических аппаратов для исследования космического пространства. Цель настоящей работы заключается в статистическом получении и сопоставлении результатов надежности спутников в зависимости от типа орбиты, а именно геосинхронных орбит, низких околоземных орбит и средних околоземных орбит. Для каждой орбиты предусмотрены графики надежности спутников как функции высоты орбиты, а также доверительные границы по этим оценкам. Используя аналитические методы, такие как оценка максимального правдоподобия, параметрические подгонки проводятся на предыдущих непараметрических результатах надежности с использованием единичного распределения Вейбулла и комбинации распределений.

Ключевые слова: надежность, распределение Вейбулла, сбои, аномалии, оценщик Каплана – Мейера, спутники.

Для цитирования: Брусков А.А. 2021. Получение и сопоставление результатов надежности спутников в зависимости от типа орбиты. Экономика. Информатика, 48(4): 771–783. DOI: 10.52575/2687-0932-2021-48-4-771-783.

Evaluation of the reliability of satellites depending on the type of orbit

Artem A. Bruskov

State Budgetary Educational Institution of Higher Education of the Moscow region "Technological
University named after twice Hero of the Soviet Union, Cosmonaut A.A. Leonov",
42 Gagarin St, Korolev, Moscow region, 141074, Russia
E-mail: bruskov.art@yandex.ru

Abstract. Reliability has long been a major factor in the design of space systems, and in recent years it has even become an important component in the design of spacecraft for space exploration. The purpose of this work is to statistically obtain and compare the results of satellite reliability depending on the type of orbit, namely geosynchronous orbits, low Earth orbits and medium Earth orbits. For each orbit, satellite reliability graphs are provided as a function of the orbit height, as well as confidence bounds on these estimates. Using analytical methods such as maximum likelihood estimation, parametric fittings are performed on previous nonparametric reliability results using the unit Weibull distribution and a combination of distributions.

Keywords: reliability, Weibull distribution, failures, anomalies, Kaplan – Meyer estimator, satellites.

For citation: Bruskov A.A. 2021. Obtaining and comparing satellite reliability results depending on the type of orbit. Economics. Information technologies, 48(4): 771–783 (in Russian). DOI: 10.52575/2687-0932-2021-48-4-771-783.

Введение

Надежность уже давно признается в качестве важнейшего признака космических систем, и потенциальные причины отказов на орбите тщательно изучаются для выявления и устранения посредством тщательного анализа и выбора деталей, а также испытаний спутников перед запуском. К сожалению, несмотря на признание важности надежности, в технической литературе имеются ограниченные данные об отказах на орбите и в статистическом анализе надежности спутников. Чтобы помочь восполнить этот пробел, автор собрал данные об отказе 1584 спутников на околоземной орбите, успешно запущенных в период с 1990 года по 2020 год. Автор провел непараметрический анализ надежности спутников и предоставил эмпирические кривые надежности спутников с 95 % доверительным интервалом, как показано на рисунке 1. Одним из ограничений является объединение всех спутников на околоземной орбите в одну категорию и статистический анализ их «коллективного» поведения при отказе.

Следствием этого является то, что при отсутствии «массового производства спутников» статистический анализ данных об отказе спутника и надежности сталкивается с дилеммой выбора между вычислением точной «средней» надежности спутника, с одной стороны, или получением, с другой стороны, «специфической» надежности спутника [Брусков, 2020].

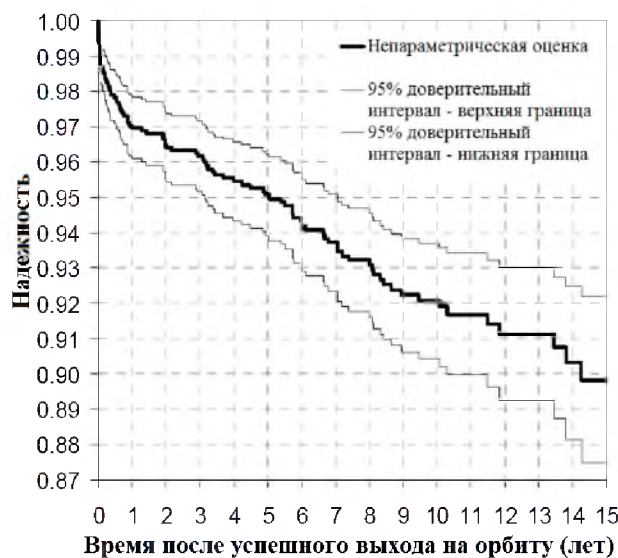


Рис. 1. Надежность спутника с 95 % доверительными интервалами

Fig. 1. Satellite reliability with 95 % confidence intervals

Эта дилемма объясняется следующими двумя возможными подходами. Первый подход заключается в объединении различных спутников и анализе их «коллективного» поведения при отказе на орбите (предполагая, что время отказа спутников независимо и одинаково распределено).

Преимущество этого состоит в том, что можно работать с относительно большой выборкой и таким образом получать некоторую точность и узкий доверительный интервал для анализируемой «коллективной» надежности. Недостаток заключается в том, что предположение может быть нереалистичным, а вычисленная «коллективная» надежность может не отражать специфическую надежность конкретного типа космических аппаратов. Второй подход заключается в специализации данных, например, для конкретной платформы космического аппарата или типа миссии, или для спутников на определенных орбитах. Преимущество этого заключается в том, что анализируемая надежность зависит от типа

рассматриваемого космического аппарата (это больше не «коллективная» надежность на орбите). Недостатком является то, что размер выборки уменьшается, и, как следствие, доверительный интервал расширяется (т. е. результаты становятся все более неопределенными). Учитывая имеющееся количество спутников (несколько тысяч), специализация данных, которая могла бы уменьшить размер выборки до менее чем ста точек данных, привела бы к значительно большему доверительным интервалам и, таким образом, к высокорассредоточенным и неопределенным «специфическим» расчетам надежности спутников. В настоящей статье я придерживаюсь второго подхода [Кринецкий и др., 1980].

Со статистической точки зрения на вероятность отказа спутников могут влиять несколько параметров или характеристик конструкции. Например, сложность космического аппарата, его орбита, количество приборов на борту или размер его полезной нагрузки, которая имеет некоторые последствия для надежности спутника. Одним из факторов, влияющих на надежность спутника, может быть тип орбиты, поскольку выбор орбиты может повлиять на выбор конструкции на борту космического аппарата, а также на рабочую среду системы [Бровкини др., 2010]. За этим наблюдением следует несколько вопросов: например, соотносятся ли разные орбиты космических аппаратов с различным поведением отказов на орбите? Имеют ли спутники на низкой околоземной орбите иной характер отказа, чем спутники на геосинхронной орбите? Показывают ли спутники на разных орбитах различную степень «младенческой смертности»?

В этой статье я провожу статистический анализ надежности спутника с орбитой в качестве ковариаты. Анализ основан на наборе данных из 1584 спутников на околоземной орбите, успешно запущенных в период с января 1990 года по октябрь 2020 года. Я сначала классифицирую эти спутники по орбите: геостационарной орбите, низкой околоземной орбите и средней околоземной орбите. А затем проводится непараметрический анализ надежности спутника для каждой категории орбиты с помощью оценщика Каплана – Мейера. Используя аналитические методы, такие как оценка максимального правдоподобия и регрессия наименьших квадратов, затем проводится параметрический анализ, предполагая распределение комбинаций Вейбулла. Основываясь на этих параметрических подходах, предлагается сравнительный анализ надежности, выявляющий сходства и различия в поведении надежности спутников на этих трех типах орбит. Наконец, помимо статистического анализа, я завершаю эту работу несколькими гипотезами для структурных/причинно-следственных объяснений этих тенденций и различий в поведении отказа на орбите.

Описание базы данных и данных

Для этого исследования мною использована база данных SpaceTrak. Эта база данных представляет собой историю отказов и аномалий спутников на орбите, а также истории запусков с 1957 года и считается одной из самых авторитетных в космической отрасли с данными по более чем 6400 космическим аппаратам. Я проанализировал 1584 спутников, и ограничил настоящее исследование спутниками на околоземной орбите, успешно запущенными в период с 1990 года по 2020 год. Для вычисления надежности я использовал то, что в базе данных называется отказом I класса, то есть выбытием спутника из-за отказа. Для каждого космического аппарата я собирал:

- 1) тип его орбиты;
- 2) дату его запуска;
- 3) дату его отказа, если произошел сбой;
- 4) «время выбора», если не произошло отказа.

Этот последний момент дополнительно объясняется в следующем разделе, где обсуждается цензура данных и оценка Каплана – Мейера. Шаблон сбора данных и образцы данных для анализа приведены в таблице 1.

В таблице 2 представлены основные характеристики трех категорий орбит, а на рисунке 2 показано количество спутников на каждую категорию орбит в период с 1990 по 2020 год (т. е. размер выборки для каждого типа орбиты).



Таблица 1
Table 1

Шаблон сбора данных и выборочные данные для статистического анализа надежности спутников
 Data collection template and sample data for statistical analysis of reliability-satellite news

Номер	Орбита	Дата запуска	Дата отказа (если произошел сбой)	Время выборки(если сбой не произошел)
Спутник № 1	Геосинхронная орбита	06.11.1998	15.11.1998	-
Спутник № 2	Низкая околоземная орбита	01.03.2002	-	02.10.2020
...
Спутник № 1584	Средняя околоземная орбита	26.04.2004	28.03.2006	-

Таблица 2
Table 2

Характеристика орбиты
Orbit characteristics

Орбита	Особенности
Геосинхронная орбита	окружность с апогеем и перигеем на расстоянии около 36 000 км
Низкая околоземная орбита	апогей и перигей до 2000 км
Средняя околоземная орбита	окружность с апогеем и перигеем на расстоянии около 20 000 км



Рис. 2. Распределение спутников по орбитам от 1990 до 2020 г.
 Fig. 2. Distribution of satellites by orbits from 1990 to 2020 г.

Непараметрический анализ надежности спутника. В этом разделе я кратко рассмотрю цензуру в анализе статистических данных и оценку надежности Каплана – Мейера, когда основные данные подвергаются правой цензуре, как это происходит в моей выборке.

Непараметрический означает, что статистический анализ не предполагает какого-либо конкретного параметрического распределения (также иногда называемого анализом без распределения). Затем я предоставляю результаты надежности для спутников на геосинхронной орбите, низкой околоземной орбите и средней околоземной орбите.

Выборка данных и оценщик Каплана-Мейера

Цензура происходит, когда данные для статистического анализа набора элементов являются неполными, что и происходит в данной выборке. Более конкретно, здесь есть

цензура типа IV (также известная как случайная цензура), то есть правая цензура с шахматным вводом. Это означает следующее:

1) Спутники в этой выборке активируются в разные моменты времени (т. е. спутники запускаются в различные календарные даты), но все эти времена активации в моей выборке известны.

2) Ошибки даты и цензура являются стохастическими.

3) Цензура происходит либо потому, что спутник удаляется из выборки до сбоя, либо потому, что спутник все еще работает в конце окна наблюдения.

Цензура требует тщательного внимания: получение функции надежности из цензурированных данных о жизни не является тривиальным, и важно, чтобы это было сделано должным образом, чтобы результаты были значимыми и непредвзятыми. В этой работе я использую оценщик Каплана – Мейера, который лучше всего подходит для работы с тем типом цензуры, который в моей выборке. Оценщик Каплана – Мейера функции надёжности с цензурированными данными задан уравнением (1):

$$\hat{R}(t) = \prod_{\substack{\text{все } i \\ \text{такие, что } t_{(i)} \leq t}} \hat{p}_i = \prod_{\substack{\text{все } i \\ \text{такие, что } t_{(i)} \leq t}} \frac{n_i - 1}{n_i}, \quad (1)$$

где:

$$\left\{ \begin{array}{l} t_{(i)} - \text{время до } i - \text{го отказа (в порядке возрастания)} \\ n_i = \text{количество операционных единиц непосредственно перед } t_{(i)} = \\ n - [\text{количество цензурированных единиц непосредственно перед } t_{(i)}] \\ \quad - [\text{количество отказавших блоков непосредственно перед } t_{(i)}] \\ \hat{p}_i = \frac{n_i - 1}{n_i} \end{array} \right. \quad (2)$$

Если в моменты времени отказа имеются связи, скажем, единицы $m_{(i)}$ отказывают точно при $t_{(i)}$ – эта ситуация называется связью кратности m , тогда уравнение 2 заменяется на:

$$\hat{p}_i = \frac{n_i - m_i}{n_i}. \quad (3)$$

Если время цензуры точно равно времени сбоя, принимается соглашение, предполагающее, что цензура произошла сразу после сбоя (то есть на бесконечно малом временном интервале после сбоя).

Непараметрические результаты надежности спутников на геосинхронной орбите, низкой околоземной орбите и средней околоземной орбите

С помощью этого краткого обзора цензуры и оценщика Каплана – Мейера я теперь могу анализировать надежность спутника на орбите на основе цензурированных наборов данных. Для проанализированных 1584 спутников и рассмотренных здесь 3 орбитальных категорий я получил 22 отказа класса 1 для геосинхронной орбиты, 70 – для низкой околоземной орбиты и 2 – для средней околоземной орбиты. Затем данные обрабатывались с помощью оценщика Каплана – Мейера (Выражение 1), и я получил непараметрические результаты надежности спутников на геосинхронной орбите, низкой околоземной орбите и средней околоземной орбите, показанные на рисунках 3а и 3б.

Рисунки 3а и 3б – графики надежности Каплана. Вертикальные разрезы на рисунке 3 читаются, например, следующим образом:

1) Наиболее вероятная оценка надежности спутников на геосинхронной орбите при $t = 1$ год на орбите составляет $\hat{R} = 98,7 \%$.

2) Наиболее вероятная оценка надежности спутников на геосинхронной орбите при $t = 7$ лет на орбите составляет $\hat{R} = 96,8 \%$.

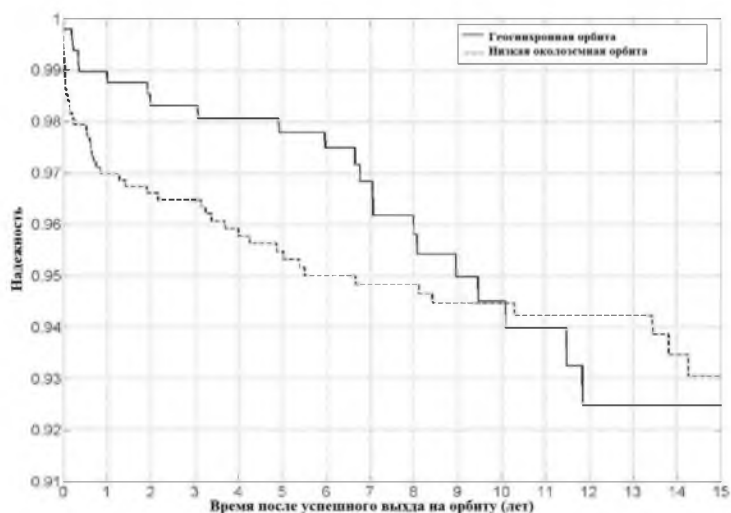


Рис. 3а. Непараметрические результаты надежности спутников на геосинхронной орбите, низкой околоземной орбите

Fig. 3a. Nonparametric results of reliability of satellites in geosynchronous orbit, low Earth orbit

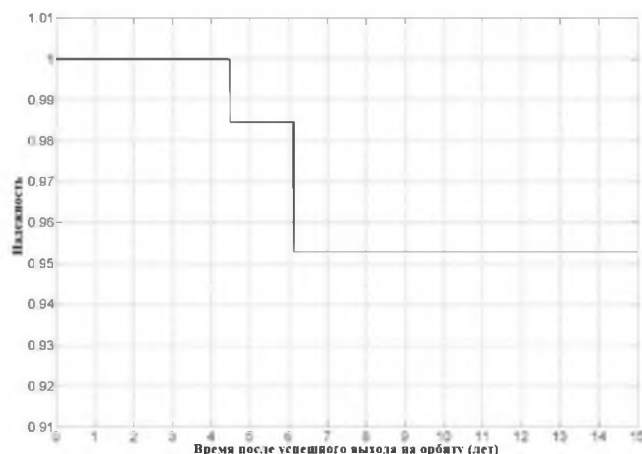


Рис. 3б. Непараметрический результат надежности спутников на средней околоземной орбите

Fig. 3b. Nonparametric result of the reliability of satellites in medium Earth orbit

Графики Каплана для спутников на геосинхронной орбите, низкой околоземной орбите и средней околоземной орбите позволяют визуально выявить некоторые важные тенденции в надежности спутника и поведении отказа на орбите. Например:

1. Спутники на геосинхронной орбите демонстрируют небольшую «младенческую смертность», надежность которой падает примерно до 98,7 % через год. Кроме того, геостационарные спутники демонстрируют явный износ от 6 до 12 лет, при этом надежность падает с 97,5 % до 92,5 % (рис. 3а).

2. Спутники на низкой околоземной орбите демонстрируют значительную «младенческую смертность», надежность падает до 97 % через год. Кроме того, в период с третьего по шестой год можно наблюдать «легкое» поведение при износе с падением надежности примерно с 96,5 % до 95 % (рисунок 3а).

3. Для спутников на средней околоземной орбите (рисунок 3б) можно наблюдать только два отказа на 111 спутниках на средней околоземной орбите. В результате нельзя сделать существенных выводов о непараметрических результатах надежности этих спутников.

Эти тенденции будут более тщательно и аналитически изучены далее.

Параметрический анализ надежности

Непараметрический анализ дает важные результаты, поскольку расчет надежности не ограничен каким-либо заранее определенным распределением срока службы. Однако эта гибкость делает непараметрические результаты не простыми и не удобными для использования в различных целях, часто встречающихся при проектировании. Кроме того, некоторые тенденции и закономерности отказов более четко идентифицируются и распознаются с помощью параметрического анализа [Легостаев и др., 2009; Ветошкин, 2020]. Существует несколько возможных методов подгонки параметрического распределения под непараметрическую функцию надежности (обеспечиваемую оценщиком Каплана – Мейера). Далее я представляю два параметрических метода, основанных на распределении Вейбулла, чтобы соответствовать непараметрической надежности спутников в каждой категории орбиты, обсуждавшихся ранее.

Распределение Вейбулла. Распределение Вейбулла является одним из наиболее часто используемых при анализе надежности. Его функция надежности (или выжившего) может быть записана следующим образом:

$$R(t) = \exp\left[-\left(\frac{t}{\theta}\right)^\beta\right] \text{ для } t \geq 0, \quad (4)$$

где β – параметр формы (безразмерный) и θ – параметр масштаба (единицы времени), оба неотрицательные. Причиной широкого принятия распределения Вейбулла является то, что оно достаточно гибкое, и при соответствующем выборе параметра формы β оно может улавливать различные виды поведения отказов. Например, когда $0 < \beta < 1$, распределение Вейбулла моделирует «младенческую смертность» (что соответствует снижению частоты отказов).

Когда $\beta = 1$, распределение Вейбулла становится эквивалентным экспоненциальному распределению (постоянная частота отказов) и когда $\beta > 1$, модели распределения Вейбулла изнашивают отказы (что соответствует возрастающей частоте отказов).

В этой работе я сначала получаю распределение Вейбулла для трех непараметрических результатов надежности, используя процедуру максимального правдоподобия.

Тем не менее параметрические результаты будут показаны в пределах 0,6–3,2 % от «эталонных» непараметрических результатов, но для моих целей эти результаты недостаточно точны. Поэтому я приступаю к получению комбинации распределений Вейбулла для непараметрических результатов, где демонстрируется значительное улучшение точности параметрических посадок.

Оценка максимального правдоподобия одинарного распределения Вейбулла

При применении к непараметрическим результатам надежности, показанным на рисунках 3а и 3б, процедура максимального правдоподобия дает оценки параметров Вейбулла для каждой категории орбиты спутника. Результаты представлены в таблице 3.

Таблица 3

Table 3

Оценки максимального правдоподобия параметров Вейбулла для надежности спутников по трем категориям орбит

Maximum likelihood estimates of Weibull parameters for the reliability of satellites in three categories of orbits

Орбита	β	θ (лет)
Геосинхронная орбита	0.7190	582.5
Низкая околоземная орбита	0.3473	34048.9
Средняя околоземная орбита	1.6347	79.4

Информация в таблице 3 выглядит следующим образом. Рассмотрим, например, спутники на геосинхронной орбите. Его непараметрическая надежность лучше всего аппроксимируется следующим распределением Вейбулла, полученным из оценки максимального правдоподобия:



$$R_{\text{ico}}(t) = \exp \left[-\left(\frac{t}{582.5}\right)^{0.7190} \right]. \quad (5)$$

Значения параметра формы ($\beta = 0,7190$) и параметра шкалы ($\Theta = 582,5$) являются оценками максимального правдоподобия. На рисунке 4 показана непараметрическая кривая надежности, рассчитанная по Вейбуллу максимальная оценка правдоподобия для трех категорий орбит.

Для спутников на низкой околоземной орбите на рисунке 4 представлена визуальная проверка того, что распределение Вейбулла, полученное из оценки максимального правдоподобия, удовлетворяет непараметрической надежности. Трудно сделать такой же вывод для двух других категорий орбит.

Качество соответствия распределения Вейбулла отражается в этой работе максимальными и средними ошибками за 15 лет между непараметрическими результатами надежности («эталонными» результатами) и посадкой Вейбулла. В таблице 4 приведены максимальные и средние погрешности между непараметрической надежностью и вписыванием Вейбулла для трех категорий орбит. Несмотря на эту разумную точность параметрического соответствия, на рисунке 4 показано, что одно распределение Вейбулла не полностью фиксирует тенденции отказов в данных, особенно для спутников на геосинхронной орбите и средней околоземной орбите.

Чтобы улучшить качество параметрического соответствия, я получаю в следующем подразделе распределения Вейбулла для непараметрических результатов надежности, полученных ранее.

Таблица 4
Table 4

Погрешность между непараметрической надежностью и пригодностью оценки максимального правдоподобия параметров Вейбулла для каждой категории спутников
 The error between nonparametric reliability and the suitability of the maximum likelihood estimation of the Weibull parameters for each category of satellites

Орбита	Максимальная ошибка (%)	Средняя ошибка (%)
Геосинхронная орбита	1.6	0.7
Низкая околоземная орбита	0.6	0.2
Средняя околоземная орбита	3.2	1.0

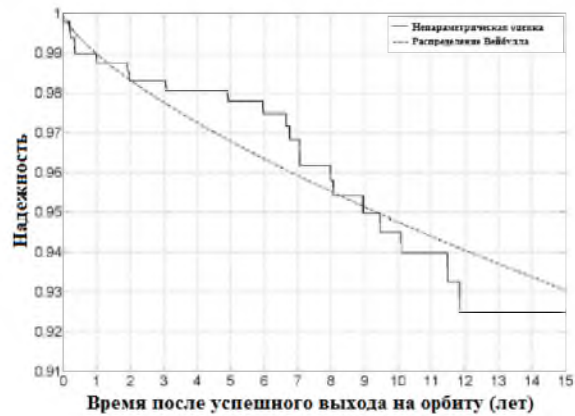
Комбинация распределений

Несколько распределений, таких как экспоненциальное распределение Вейбулла или логнормальное, могут использоваться в качестве основы для линейной комбинации для генерации распределения комбинаций. В этом подразделе сохраняется распределение Вейбулла в качестве основы для моих параметрических вычислений и получается комбинация двух распределений Вейбулла для непараметрической надежности спутника каждой категории орбиты [Волков, Шишкевич, 1975; Кринецкий, Александровская, 1975]. Параметрическая модель надежности с комбинацией двух распределений Вейбулла может быть выражена следующим образом:

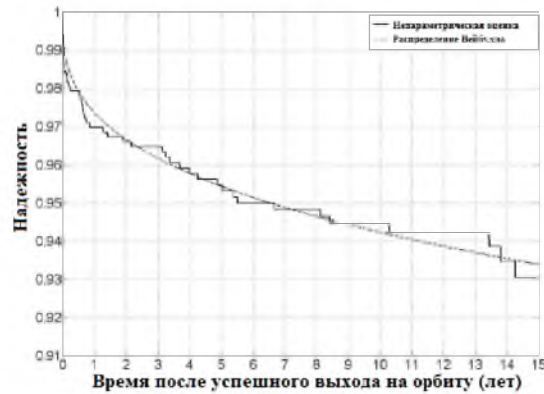
$$R(t) = \alpha \exp \left[-\left(\frac{t}{\theta_1}\right)^{\beta_1} \right] + (1 - \alpha) \exp \left[-\left(\frac{t}{\theta_2}\right)^{\beta_2} \right]. \quad (6)$$

Параметр α используется для изменения относительного веса, заданного для каждого распределения Вейбулла в комбинации. Я ограничиваю расчеты в этой работе $n = 2$, поскольку, как будет показано далее, результаты являются достаточно точными, и комбинация 2-х распределений Вейбулла следуют с заметной точностью различным тенденциям отказа в непараметрических результатах. Ограниченная инкрементная точность обеспечивается

комбинацией 3-х распределений Вейбулла. Увеличение n обеспечивает незначительное улучшение точности.



Геосинхронная орбита



Низкая околоземная орбита



Средняя околоземная орбита

Рис. 4. Непараметрическая надежность и одиночное распределение Вейбулла
Fig. 4. Nonparametric reliability and single Weibull distribution

Нелинейный метод наименьших квадратов обеспечивает наилучшие соответствия для параметров комбинации 2-х распределений Вейбулла для каждой категории орбиты. Результаты представлены в таблице 5.

Для трех категорий орбит новое параметрическое соответствие надежности с использованием распределения комбинации 2-х распределений Вейбулла точно соответствует непараметрической надежности, как показано на рисунке 5.



Таблица 5
 Table 5

Параметры комбинации 2-х распределений Вейбулла
 Parameters of a combination of 2 Weibull distributions

Орбита	α	β_1	β_2	θ_1	θ_2
Геосинхронная орбита	0.0496	4.1070	0.3300	9.8	661600.0
Низкая околоземная орбита	0.9927	0.2997	68.6300	136100.0	14.4
Средняя околоземная орбита	0.9526	1.4790	8.3600	101900.0	6.0

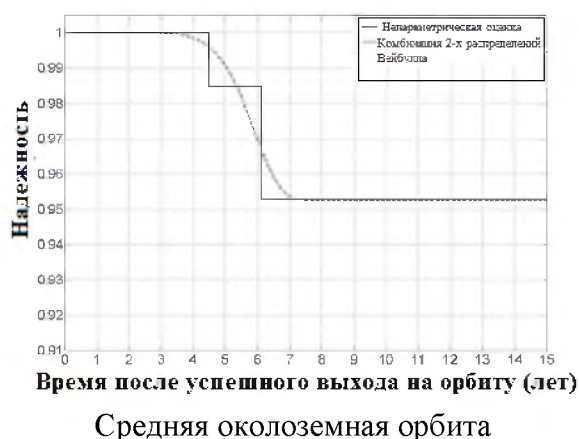
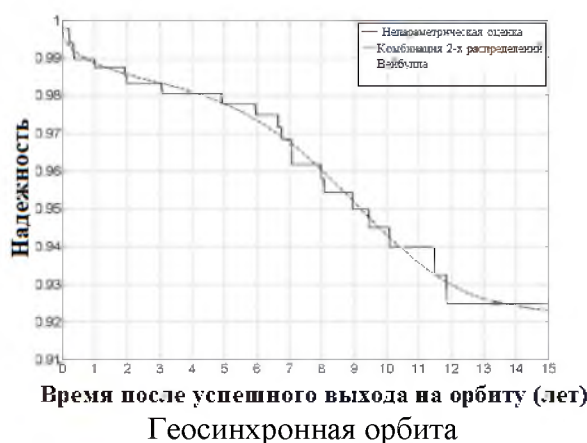


Рис. 5. Непараметрическая надежность и комбинации 2-х распределений Вейбулла для трех категорий спутников

Fig. 5. Nonparametric reliability and combinations of 2 Weibull distributions for three categories of satellites

Следует отметить, что первый элемент Вейбулла с параметром формы $\beta_1 < 1$ фиксирует «младенческую смертность» спутника, в то время как второй элемент Вейбулла с параметром формы $\beta_2 > 1$ фиксирует ошибки износа спутника. Как и ожидалось, подгонки, обеспечиваемые подходом распределения комбинаций для трех категорий орбит, лучше, чем подгонки, обеспечиваемые подходом оценки максимального правдоподобия. В таблице 6 приведены коэффициенты R^2 и сумма квадратов ошибок трех распределений комбинаций, составленных для каждой категории орбиты.

Коэффициенты R^2 посадок выше 97% для трех категорий. Чтобы измерить повышение точности между одним распределением Вейбулла и комбинации 2-х распределений Вейбулла, вычисляю как максимальную, так и среднюю погрешность между непараметрической надежностью и параметрическими моделями.

Результаты представлены в таблице 7.

Таблица 6
Table 6

Пригодность комбинации 2-х распределений Вейбулла для каждой категории спутников
Suitability of a combination of 2 Weibull distributions for each satellite category

Коэффициент	Орбиты		
	Геосинхронная орбита	Низкая околоземная орбита	Средняя околоземная орбита
R^2	0.9908	0.9845	0.9749
Сумма квадратов ошибок	0.03978	0.01698	0.08776

Таблица 7
Table 7

Погрешность между непараметрической надежностью и параметрическими моделями
в течение 15 лет
Error between nonparametric reliability and parametric models for 15 years

Орбита	Ошибка (%)	Параметрическая подгонка	
		Единичное распределение Вейбулла	Комбинация 2-х распределений Вейбулла
Геосинхронная орбита	максимальная ошибка	1.6	0.7
	средняя ошибка	0.7	0.2
Низкая околоземная орбита	максимальная ошибка	0.6	0.4
	средняя ошибка	0.2	0.1
Средняя околоземная орбита	максимальная ошибка	3.2	1.8
	средняя ошибка	1.0	0.2

Как видно из таблицы 7, комбинация 2-х распределений Вейбулла является значительно более точным, чем единичное распределение Вейбулла при эталонной, непараметрической надежности спутника.



Заключение

В этой работе я получил непараметрические и параметрические результаты надежности для спутников, находящихся на околоземной орбите, в зависимости от типа орбиты, а именно от геосинхронных орбит, низких околоземных орбит и средних околоземных орбит. Я использовал обширную базу данных о запусках спутников и сбоях на орбите и аномалиях, чтобы получить, используя оценщик Каплана – Мейера, непараметрические результаты надежности для каждой категории спутников.

Затем, используя метод оценки максимального правдоподобия и регрессию наименьших квадратов, были получены параметрические соответствия результатов с одним и двумя распределениями Вейбулла. Параметрические подгонки с использованием комбинаций распределений оказались в значительной степени точными при регистрации тенденций отказов в непараметрических результатах.

Список литературы

1. Бровкин А.Г., Бурдыгов Б.Г., Гордийко С.В. и др. 2010. Бортовые системы управления космическими аппаратами: учебное пособие. – М.: МАИ-ПРИНТ, 304 с.
2. Брусков А.А. 2020. Анализ надежности различных систем космических аппаратов. Информационно-технологический вестник, 4: 34–46.
3. Брусков А.А. 2020. Определение объема комплексных электрических испытаний наноспутников. Сборник статей по материалам участников X Ежегодной научной конференции аспирантов «МГОТУ», 14 мая 2020 г., наукоград Королев, М.: Издательство «Научный консультант», 554 с.
4. Брусков А.А. 2021. Статистический анализ надежности космических аппаратов в зависимости от орбиты. Тезисы докладов XXII Научно-технической конференции и молодых ученых и специалистов, посвященной 60-летию полета Ю.А. Гагарина, 75-летию ракетно-космической отрасли и основания ПАО «РКК «Энергия», 8–12 ноября 2021 г., наукоград Королев, ПАО «Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С.П. Королёва», 536–537.
5. Вдовин В.М., Суркова Л.Е., Валентинов В.А. 2016. Теория систем и системный анализ. М.: Дашков и К, 640 с.
6. Ветошкин А.Г. 2020. Обеспечение надежности и безопасности в техносфере: учебное пособие, Издательство «Лань». 236 с.
7. Волков Л.И., Шишкевич А.М. 1975. Надежность летательных аппаратов. М.: Высшая школа. 296 с.
8. Корнев Г.Н., Яковлев В.Б. 2016. Системный анализ. М.: ИЦ РИОР, НИЦ ИНФРА-М, 308 с.
9. Кринецкий Е.И., Александровская Л.Н., Мельников В.С., Максимов Н.А. 1980. Основы испытаний летательных аппаратов: Учебник для вузов М.: Машиностроение, 312 с.
10. Кринецкий Е.И., Александровская Л.Н. 1975. Летные испытания систем управления летательными аппаратами. М.: Машиностроение. 193 с.
11. Легостаев В.П., Микрин Е.А., Орловский И.В. и др. 2009. Создание и развитие систем управления движением транспортных космических кораблей «Союз» и «Прогресс»: опыт эксплуатации, планируемая модернизация. Труды МФТИ, 3: 4–13.
12. Свешников А.А. 1968. Прикладные методы теории случайных функций М.: Наука. 464 с.
13. Шубин Р.А. 2012. Надёжность технических систем и техногенный риск. Тамбов: Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 80 с.
14. Kurant M, Thiran P. 2006. Layered Complex Networks. Phys Rev Lett 96(13).15–20.
15. Newman MEJ. 2010. Networks, an Introduction. New York, NY: Oxford University Press. 16–18.

References

1. Brovkin A.G., Burdygov B.G., Gordijko S.V. i dr. 2010. Bortovye sistemy upravleniya kosmicheskimi apparatami: uchebnoe posobie [Onboard spacecraft control systems: textbook]. – М.: МАИ-ПРИНТ, 304 p.
2. Bruskov A.A. 2020. Analiz nadezhnosti razlichnyh sistem kosmicheskikh apparatov [Reliability analysis of various spacecraft systems]. Informacionno-tekhnologicheskij vestnik, 4: 34–46.



3. Bruskov A.A. 2020. Opredelenie obema kompleksnyh elektricheskikh ispytaniy nanospunikov [Determination of the scope of complex electrical tests of nanosatellites]. Sbornik statej po materialam uchastnikov X Ezhegodnoj nauchnoj konferencii aspirantov «MGOTU», 14 maya 2020 g., naukograd Korolev, M.: Izdatel'stvo «Nauchnyj konsultant», 554 p.
4. Bruskov, A.A. 2021. Statisticheskij analiz nadezhnosti kosmicheskikh apparatov v zavisimosti ot orbity [Statistical analysis of the reliability of spacecraft depending on the orbit]. Tezisy dokladov XXII Nauchno-tehnicheskoy konferencii i molodyh uchenyh i specialistov, posvyashchennoj 60-letiyu poleta YU.A. Gagarina, 75-letiyu raketno-kosmicheskoy otrasli i osnovaniya PAO «RKK «Energiya», 8–12 noyabrya 2021 g., naukograd Korolev, PAO «Raketno-kosmicheskaya korporaciya «Energiya» imeni S.P. Korolyova», 536–537 p.
5. Vdovin V. M., Surkova L. E., Valentinov V. A. 2016. Teoriya sistem i sistemnyj analiz [Theory of systems and system analysis]. M.: Dashkov i K, 640 p.
6. Vetoshkin A.G. 2020. Obespechenie nadezhnosti i bezopasnosti v tekhnosfere: uchebnoe posobie [Ensuring reliability and safety in the technosphere: a textbook], Izdatel'stvo «Lanapos;». 236 p.
7. Volkov L.I., SHishkevich A.M. 1975. Nadezhnost' letatel'nyh apparatov [Reliability of aircraft]. M.: Vysshaya shkola. 296 p.
8. Kornev G. N., YAKovlev V. B. 2016. Sistemnyj analiz [System analysis]. M.: IC RIOR, NIC IN-FRA-M, 308 s.
9. Krineckij E.I, Aleksandrovskaya L.N, Melnikov V.S., Maksimov N.A. 1980. Osnovy ispytaniy letatel'nyh apparatov: Uchebnik dlya vtuzov [Fundamentals of aircraft testing: Textbook for higher education institutions] M.: Mashinostroenie, 312 s.
10. Krineckij E.I., Aleksandrovskaya L.N. 1975. Letnie ispytaniya sistem upravleniya letatel'nymi apparatami [Summer tests of aircraft control systems]. M.: Mashinostroenie. 193 p.
11. Legostaev V.P., Mikrin E.A., Orlovskij I.V. i dr. 2009 Sozdanie i razvitie sistem upravleniya dvizheniem transportnyh kosmicheskikh korablej «Soyuz» i «Progress»: opyt ekspluatatsii, planiruemaya modernizatsiya [Creation and development of motion control systems for Soyuz and Progress transport spacecraft: operational experience, planned modernization]. Trudy MFTI, 3: 4–13.
12. Sveshnikov A.A. 1968. Prikladnye metody teorii sluchajnykh funktsij [Applied methods of the theory of random functions] M.: Nauka. 464 s.
13. SHubin, R.A. 2012. Nadyozhnost'; tekhnicheskikh sistem i tekhnogennyj risk [Reliability of technical systems and technogenic risk]. Tambov: Izd-vo FGBOU VPO «TGTU», 80 p.
14. Kurant M, Thiran P. 2006. Layered Complex Networks. Phys Rev Lett 96(13).15–20.
15. Newman MEJ. 2010. Networks, an Introduction. New York, NY: Oxford University Press. 16–18.

Конфликт интересов: о потенциальном конфликте интересов не сообщалось.

Conflict of interest: no potential conflict of interest related to this article was reported.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Брусков Артем Алексеевич, аспирант кафедры информационных технологий и управляющих систем, Государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Московской области «Технологический университет имени дважды Героя Советского Союза, летчика-космонавта А.А. Леонова», г. Королев, Московская область

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Artem A. Bruskov, Postgraduate student of the Department of Information Technologies and Control Systems, State Budgetary Educational Institution of Higher Education of the Moscow Region "Technological University named after twice Hero of the Soviet Union, pilot-cosmonaut A.A. Leonov", Korolev, Moscow region