

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор)

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-64098 от 18 декабря 2015 г.

Учредитель – Государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Московской области «Технологический университет имени дважды Героя Советского Союза, летчика-космонавта А.А. Леонова» (141074, Московская область, г. Королев, ул. Гагарина, д. 42)
Издается с сентября 2014 г.
Выходит 4 раза в год

ISSN 2409-1650

Журнал «Информационно-технологический вестник» включён в Перечень ведущих периодических изданий ВАК

Группы научных специальностей и научные специальности в рамках групп научных специальностей, по которым издание входит в Перечень:
05.07.00 Авиационная и ракетно-космическая техника [05.07.02 Проектирование конструкции и производство летательных аппаратов, 05.07.10 Инновационные технологии в аэрокосмической деятельности], (входит в Перечень ВАК)
05.13.00 Информатика, вычислительная техника и управление [05.13.01 Системный анализ, управление и обработка информации (по отраслям), 05.13.18 Математическое моделирование численные методы и комплексы программ], (не входит в Перечень ВАК)
05.16.00 Металлургия и материаловедение [05.16.09 Материаловедение (по отраслям)] (входит в Перечень ВАК)

Подписной индекс в каталоге НТИ-Роспечать 62191

Главный редактор
Артошенко Владимир Михайлович,
д.т.н., профессор

Над выпуском работали
Паршина Ю.С.
Пирогова Е.В.
Багдасарян А.А.
Харитонова А.А.
Макаревич Е.В.

Адрес редакции:
141070, Королев,
Ул. Октябрьская, 10а
Тел. (495)543-34-31 (доб.138),
E-mail : rio-kimes@mail.ru,
Site: www.unitech-mo.ru

Редакция не несет ответственности за достоверность информации в материалах, в том числе рекламных, представленных авторами для публикации
Материалы приводятся в авторской редакции.

СОДЕРЖАНИЕ

АВИАЦИОННАЯ И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА

Артошенко В.М., Воловач В.И.
ТОЧНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННОГО ПАРАМЕТРА СИГНАЛА СЛЕДЯЩИМ ИЗМЕРИТЕЛЕМ В АВИАЦИОННОЙ И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКЕ НА ФОНЕ АДДИТИВНЫХ И МУЛЬТИПЛИКАТИВНЫХ ПОМЕХ. СПЕКТРАЛЬНАЯ ПЛОТНОСТЬ ВЫХОДНОГО СИГНАЛА ДИСКРИМИНАТОРА. ЧАСТЬ II.....3

Бабин В.С.
ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ АВИАЦИОННЫХ И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКИХ СИСТЕМ СВЯЗИ.....11

Брусков А.А.
НЕПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ, СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ НАДЕЖНОСТИ СПУТНИКОВ И ПОДСИСТЕМ СПУТНИКОВ.....19

Мороз А.П., Скворцов Р.В.
КРИТЕРИЙ ВЫБОРА ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ БОРТОВЫХ РАДИОТЕЛЕМЕТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ.....33

Мосалов О.П., Завьялова Ю.В.
ФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ШУМА В КАМЕРЕ СГОРАНИЯ ЖИДКОСТНОГО РАКЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ.....42

Овейчук И.А., Скворцов Р.В.
ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ БЛОКА УСИЛЕНИЯ И КОММУТАЦИИ БОРТОВОЙ РАДИОТЕЛЕМЕТРИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ.....51

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Аббасова Т.С.
РЕАЛИЗАЦИЯ МАССОВО-ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ АРХИТЕКТУРЫ В ВЕБ-СЕРВИСЕ.....59

Маслобоев А.В., Путилов В.А.
ФУНКЦИОНАЛЬНО-ЦЕЛЕВЫЕ МОДЕЛИ УПРАВЛЕНИЯ РЕГИОНАЛЬНОЙ БЕЗОПАСНОСТЬЮ (ЧАСТЬ 2. ПОКРЫВАЮЩИЕ И АДЕКВАТНЫЕ СИСТЕМЫ).....67

Мокану Г.С.
ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В РОССИИ.....77

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

1. Барканов Е.Н., Dr.sc.ing.
2. Васильев Н.А., д.т.н., профессор
3. Леоненко Д.В., д.ф.-м.н., профессор
4. Тимофеев А.Н., д.т.н., профессор

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

1. Аббасов Э.М., к.т.н.
2. Аббасова Т.С., к.т.н., доцент
3. Бухаров С.В., д.т.н., профессор
4. Бершадский В.А., д.т.н., профессор кафедры
5. Воловач В.И., д.т.н., профессор
6. Кучеров Б.А., к.т.н.
7. Логачев И.А., к.т.н.
8. Логачева А.И., д.т.н., профессор
9. Макаров М.И., д.т.н., профессор
10. Матвиенко Ю.Г., д.т.н., профессор
11. Мороз А.П., д.т.н., профессор
12. Мосалов О.П., к.ф.-м.н.
13. Разумовский И.М., д.ф.-м.н., профессор
14. Рудаков В.Б., д.т.н., профессор
15. Скрябин М.Л., к.т.н.
16. Соляной В.Н., к.т.н.
17. Стреналок Ю.В., д.т.н., профессор
18. Халиулин В.И., д.т.н., профессор
19. Чесноков А.В., д.т.н.
20. Щурин К.В., д.т.н., профессор

Подписано в печать 17.09.2021
Формат В5

Печать офсетная. Усл.печ.л. 9,4
Тираж 500 экз.
Заказ № 91-03

Отпечатано в типографии
ООО «Научный консультант»
г. Москва

Хорошевское шоссе, 35, корп.2

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Мосалов О.П., Ефимова А.О., Соколова Д.А.
**АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ГРАФА
В ЗАДАЧЕ ПРЕДСКАЗАНИЯ НОВЫХ
ЗАВИСИМОСТЕЙ.....83**

Сотников А.И.
**СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ГЛУБОКОГО
ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ
ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ..... 95**

Шевелев С.В., Семенов А.Б.
**ПРОГРАММНЫЕ ПРИЛОЖЕНИЯ КАК СРЕДСТВО
ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА ОБСЛУЖИВАНИЯ
СЕТЕЙ WI-FI.....106**

МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Васильев А.Н.
**АНАЛИЗ РЫНКА СВИНЦОВО-КИСЛОТНЫХ
АККУМУЛЯТОРОВ В РОССИИ И МИРЕ.....116**

Прокопенко А.К., Попов С.А., Корнеев А.А.
**ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПОВЫШЕНИЯ
РАБОТОСПОСОБНОСТИ ПОДШИПНИКОВ КАЧЕНИЯ
ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТАЛЛОПЛАКИРУЮЩИХ
НАНОТЕХНОЛОГИЙ.....124**

Чесноков А.В., Андреев В.Н., Тимофеев И.А.
КРЕПЕЖ ИЗ АРМИРОВАННЫХ ТЕРМОПЛАСТОВ..... 135

УДК 629.7.017.1

**Непараметрический, статистический анализ надежности спутников
и подсистем спутников**

А.А. Брусков, 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

Надёжность долгое время признавалась главным качеством для систем космического аппарата. К сожалению, в литературе имеются лишь ограниченные данные об отказах на орбите и статистическом анализе надежности спутников. Для восполнения этого пробела был проведен непараметрический анализ надежности спутников для спутников на околоземной орбите. В этой работе я расширяю статистический анализ надежности спутников и исследую надежность подсистем космических аппаратов. Поскольку набор данных подвергнут цензуре, я широко использую оценщик Каплана-Мейера для расчета функций надежности и получаю доверительные интервалы для непараметрических результатов надежности для каждой подсистемы спутника.

Надежность, распределение Вейбулла, сбои, аномалии, оценщик Каплана-Мейера, спутники.

**Nonparametric, statistical analysis of the reliability of satellites
and satellite subsystems**

A.A. Bruskov, post-graduate 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

Reliability has long been recognized as the main quality for spacecraft systems. Unfortunately, there is only limited data in the literature on failures in orbit and statistical analysis of the reliability of satellites. To fill this gap, a nonparametric analysis of the reliability of satellites for satellites in near-Earth orbit was carried out. In this work, I expand the statistical analysis of the reliability of satellites and investigate the reliability of spacecraft subsystems. Since the data set is censored, I make extensive use of the Kaplan-Meyer estimator to calculate reliability functions and obtain confidence intervals for nonparametric reliability results for each spootik subsystem.

Reliability, Weibull distribution, failures, anomalies, Kaplan-Meyer estimator, satel-

lites.

Введение. Надёжность уже давно признается в качестве одного из главных качеств космических систем при проектировании космических аппаратов. Например, высокая надёжность космического аппарата может быть достигнута с помощью более качественных, надежных деталей, резервированием подсистем или с помощью более обширных испытаний. К сожалению, несмотря на признание ее важности, в технической литературе имеются ограниченные данные об отказах на орбите и статистическом анализе надёжности спутников. В результате в литературе сохраняется отсутствие эмпирической основы для решения вопросов, касающихся, например, существования или отсутствия «младенческой смертности» у спутников. С одной стороны, распределения Вейбулла с параметром формы около 1,7 (значение, обычно используемое для спутниковых систем) обычно используются для моделирования надёжности спутника. Напоминаю, что параметр формы Вейбулла больше единицы представляет увеличивающуюся частоту отказов или отказов, вызванных износом конструкций, но без «младенческой смертности».

Хотя диапазон применимости предыдущих исследований, четко не определен, существует очевидное несогласие в отношении важного вопроса поведения частоты отказов спутников. Однако исследователи надёжности космических аппаратов сходятся во мнении, что экспоненциальное распределение времени жизни не может совпадать с данными, полученными из опыта полета, и что прогнозы надёжности спутника с постоянной частотой отказов нереалистичны [1].

Чтобы помочь устранить это противоречие в отношении существования или отсутствия «младенческой смертности» у спутников и тем самым заполнить пробел в технической литературе в отношении надёжности спутников, я собрал данные об отказе 1584 спутников на околоземной орбите, успешно запущенных в период с января 1990 года по октябрь 2020 года. Затем я провел непараметрический анализ надёжности спутников и продемонстрировал, что распределение Вейбулла с «младенческой смертностью» (т.е. параметр формы меньше единицы) надлежащим образом фиксирует поведение спутников при отказах на орбите. Напомним, что функция плотности вероятности Вейбулла может быть выражена как:

$$f(t; \beta, \theta) = \frac{\beta}{\theta} \left(\frac{t}{\theta}\right)^{\beta-1} \exp \left[-\left(\frac{t}{\theta}\right)^\beta \right], \text{ где } t \geq 0 \quad (1)$$

где β – параметр формы и θ -параметр масштаба, оба неотрицательные. Связанной функцией надёжности Вейбулла является:

$$R(t; \beta, \theta) = \exp \left[-\left(\frac{t}{\theta}\right)^\beta \right] \quad (2)$$

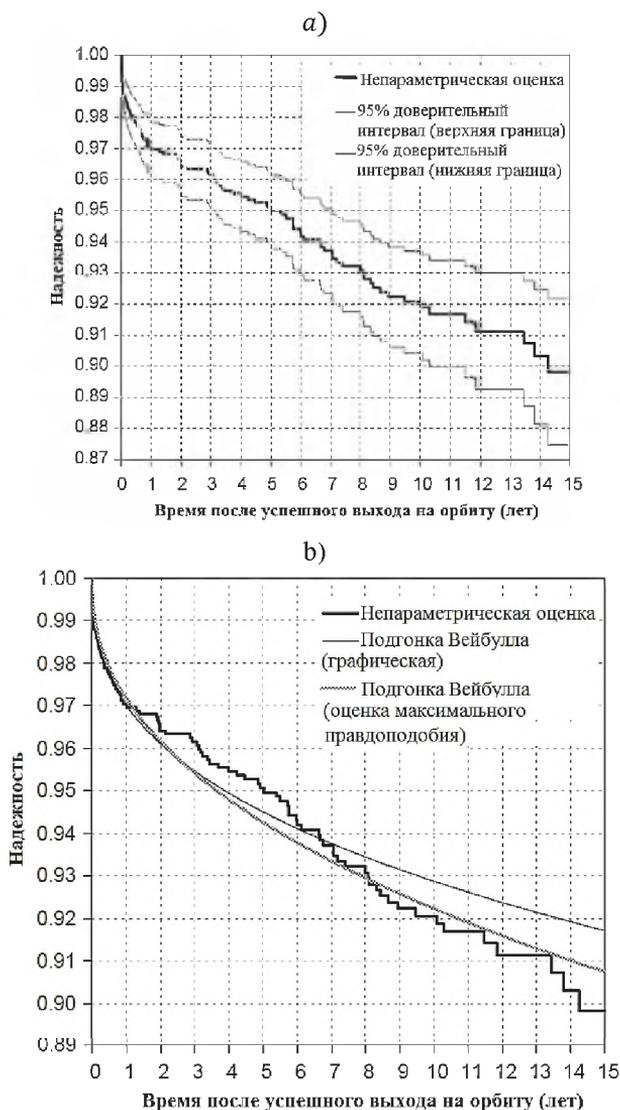


Рисунок 1 – Надежность спутника с 95% доверительными интервалами (a) и непараметрическая надежность спутника и подгонка Вейбулла (b)

На рисунке 1a представлен результат вычислений для непараметрической надежности спутника с 95% доверительными интервалами. На рисунке 1b показано распределение Вейбулла, соответствующее непараметрической надежности, полученное двумя методами:

- графический метод: параметр формы посадки Вейбулла составляет $\beta-0,3875$, а параметр масштаба $\theta-8316$ лет;
- процедура оценки максимального правдоподобия: параметр формы посадки Вейбулла составляет $\beta-0,4521$, а его параметр масштаба $\theta-2607$ лет.

Таблица 1 – Шаблон сбора данных для статистического анализа надежности спутников (спутники не показаны в хронологическом порядке)

Номер образца	Дата запуска	Дата отказа (если произошел отказ)	Подсистема виновника	Дата проведения исследования (если сбой не произошло)
Космический корабль № 1	06/11/1998	15/11/1998	Подсистема телеметрии, слежения и управления	-
Космический корабль № 2	01/03/2002	-	-	02/10/2008
...
Космический корабль № 1584	26/04/2018	28/03/2020	Механизмы	-

В этой работе я расширяю статистический анализ надежности спутников и исследую надежность подсистем спутников, то есть дополнительно уточняю анализ от системного уровня до отказов на уровне подсистем. Цель состоит в том, чтобы внести дополнительный вклад в полное выявление механизмов отказа спутников. Результаты, представленные в этой работе, должны оказаться полезными для космической промышленности, например, в деле пересмотра программ испытаний или обеспечения эмпирической основы для распределения избыточности подсистем и планов повышения надежности.

Описание базы данных и данных. Для этого исследования я использовал базу данных SpaceTrak [2]. Эта база данных считается наиболее авторитетной базой данных в космической отрасли с подробной информацией и данными об отказах для более чем 6400 космических аппаратов.

По каждому космическому аппарату я собираю из базы данных:

- 1) Дата его запуска;
- 2) Дата его отказа, если произошел сбой;
- 3) Подсистема, идентифицированная как вызвавшая отказ космического аппарата, далее именуемая «подсистемой виновника»;

4) «Цензурированное время», если не произошло отказа. Этот последний момент дополнительно объясняется в следующем разделе, где я обсуждаю цензуру данных и оценку Каплана-Мейера. Шаблон сбора данных и образцы данных для анализа приведены в таблице 1.

В базе данных распознается несколько спутниковых подсистем. В этой работе я изучал следующие 11 подсистем:

1. Гироскоп / солнечный датчик.
2. Двигатель / Топливная система двигателя.
3. Функционирования антенны.
4. Центральная вычислительная машина.
5. Механизмы.
6. Полезная нагрузка.
7. Аккумуляторная батарея.

8. Распределения электроэнергии.
9. Развертывание солнечных батарей.
10. Работа солнечной батареи.
11. Телеметрии, слежения и управления.

Например, привод солнечной батареи, если его отказ приводит к неразвертыванию солнечных батарей, будет классифицироваться по подсистеме № 9 в предыдущем списке.

Когда не удалось идентифицировать подсистему-виновника, приведшую к отказу спутника, отказ космического аппарата приписывается в базе данных к категории «неизвестный».

Я, статистически анализируя «коллективное» поведение спутников, запущенных недавно, могу утверждать, что ни один из спутников не является действительно одинаковым, и что каждый спутник работает в отдельной среде (на разных орбитах или даже на одной и той же орбите, где спутники, если они не расположены совместно, подвергаются воздействию различных сред космической среды).

Следствием этого является то, что в отсутствие «массового производства спутников», статистический анализ данных об отказе спутников и надежности сталкивается с дилеммой выбора между вычислением точной «средней» надежности спутников или получением, неопределенной «специфической» надежности спутников. 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 времена отказа спутников независимы и одинаково распределены). 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 это допущение может быть нереалистичным, а вычисленная «коллективная» надежность может не отражать специфическую надежность конкретного типа космического аппарата.

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).

С учетом имеющегося количества спутников (несколько тысяч) специализация данных, которая могла бы уменьшить размер выборки до менее чем ста точек данных, привела бы к значительно большим доверительным интервалам и, таким образом, к высокорассредоточенным или неопределенным расчетам надежности «конкретных» спутников.

В этой статье я принимаю первый подход, то есть анализирую «коллективное» поведение отказов спутников и подсистем околоземной орбиты. Я также

обсуждаю второй подход и анализирую надежность спутников на орбите по типу полета, орбите и массовым категориям (также доступны данные по конкретным спутниковым платформам и по производителю). Тем не менее, независимо от выбора выборки, статистический подход и анализ, представленные в этом документе, остаются верными.

В следующем разделе я использую собранные данные (таблица 1) для проведения непараметрического анализа надежности всех спутниковых подсистем, идентифицированных ранее.

Непараметрическая надежность спутниковых подсистем. Далее я использую то, что упоминается в базе данных как отказ I класса, то есть отказ подсистемы, приводящий к выводу спутника из эксплуатации, для вычисления надежности рассматриваемой подсистемы. Только подсистема функционирования антенны не показывает отказа I класса в данном наборе данных. Таким образом, я изучаю 10 оставшихся подсистем и неизвестную категорию.

Цензурированная выборка данных и оценщик Каплана-Мейера. Цензура происходит, когда данные для статистического анализа набора элементов являются неполными, что и происходит в моей выборке. Более конкретно, есть цензура IV типа, то есть правая цензура с шахматным вводом. Это означает следующее:

- 1) Спутники в этой выборке активируются в различные моменты времени (т.е. спутники запускаются в различные календарные даты), но все эти времена активации в выборке известны;
- 2) Даты отказов 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.

Кроме того, при анализе отказа, обусловленного конкретной подсистемой, отказ, обусловленный любой другой подсистемой, представляет собой дополнительную форму цензуры. 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 беру и использую оценщик Каплана-Мейера, который лучше всего подходит для работы с тем типом цензуры, который имеется в образце. Вывод формулы оценки Каплана-Мейера можно найти в [3]. Оценщик Каплана-Мейера функции надежности с цензурированными данными задается:

$$\hat{R}(t) = \prod_{\substack{\text{все } i \\ \text{такие, что } t_{(i)} \leq t}} \hat{p}_i = \prod_{\substack{\text{все } i \\ \text{такие, что } t_{(i)} \leq t}} \frac{n_i - 1}{n_i} \quad (3)$$

где:

$$\left\{ \begin{array}{l} t_{(i)} - \text{время до } i\text{-го отказа (в порядке возрастания)} \\ \hat{p}_i = \frac{n_i - 1}{n_i} \\ n_i = \text{количество операционных блоков непосредственно перед } t_{(i)} = \\ n - [\text{число цензурированных блоков непосредственно перед } t_{(i)}] - \\ [\text{количество отказавших блоков непосредственно перед } t_{(i)}] \end{array} \right. \quad (4)$$

Если в моменты времени отказа имеются связи, скажем, что спутник отказал точно в $t_{(i)}$ – эта ситуация называется связью кратности 1, тогда в выражении (4) заменяется на m

$$\hat{p}_i = \frac{n_i - m_i}{n_i} \quad (5)$$

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

Анализ доверительных интервалов. Оценщик Каплана-Мейера (Выражение (3)) обеспечивает оценку максимального правдоподобия надежности, но не информирует нас о дисперсии вокруг $\hat{R}(t_i)$. Эта дисперсия фиксируется дисперсией или стандартным отклонением оценщика, которое затем используется для получения верхней и нижней границ, например 95% доверительного интервала (то есть 95% вероятности того, что фактическая надежность упадет между двумя вычисленными границами, при этом анализ Каплана-Мейера предоставляет нам наиболее вероятную оценку). Дисперсия оценщика обеспечивается формулой Гринвуда:

$$v\hat{a}r[R(t_i)] = \sigma^2(t_i) = [\hat{R}(t_i)]^2 \sum_{j < i} \frac{m_j}{n_j(n_j - m_j)} \quad (6)$$

И 95% доверительный интервал определяется, как

$$R_{95\%}(t_i) = \hat{R}(t_i) \pm 1.96\sigma(t_i) \quad (7)$$

Графики надежности спутниковых подсистем. С помощью этого краткого обзора функционала, оценщика Каплана-Мейера и доверительных интервалов теперь можно анализировать надежность спутниковых подсистем из наборов данных (по одному для каждой подсистемы). Для проанализированных спутников 1584 и рассмотренных 11 подсистем я получил 17 424 времени цензуры и отказа. Данные обрабатываются с помощью оценщика Каплана-Мейера (Выражение (3)), и получаются графики Каплана-Мейера надежности всех подсистем спутников, перечисленных в разделе 2. Кроме того, когда Выражение (6) и (7) применяются к данным из выборки, получим 95% кривые доверительного интервала. Графики Каплана надежности всех рассматриваемых здесь спутниковых подсистем вместе с 95% доверительными интервалами показаны на рисунке 2а и 2б.

Рисунки 2а и 2б гласят следующее. Рассмотрим подсистему гироскопа, её надежность показана в левом верхнем углу рисунке 2а: после успешного запуска надежность подсистемы гироскопа падает примерно до 99,5% через 4 года на

орбите. Точнее –

$$\bar{R}(t) = 0,9948 \text{ для } 1146 \text{ дней} < t < 1967 \text{ дней, что составляет } 3,137 \text{ года} \\ < t < 5,385 \text{ года}$$

Кроме того, надежность этой подсистемы будет падать между 99,09% и 99,86% с вероятностью 95% (доверительный интервал) за этот период времени. Та же самая «сетка считывания» на рисунке 2а и 2б относительно оцененной надежности $\bar{R}(t)$ и доверительного интервала применяется ко всем другим подсистемам. Например, надежность подсистемы телеметрии, слежения и управления (правый нижний угол на рис. 2б) падает до 0,984 через 8 лет на орбите. Необходимо обратить внимание на особую непараметрическую надежность развертывания солнечной батареи (константа), которая обусловлена одноразовым характером этой «подсистемы» (или, точнее, этой фазы подсистемы солнечной батареи). В следующем разделе приводится параметрическая подгонка Вейбулла для непараметрических результатов надежности каждой из этих подсистем.

Параметрическая надежность спутниковых подсистем. Непараметрический анализ дает мощные результаты, так как расчет надежности не ограничен тем, чтобы соответствовать какому-либо заранее определенному распределению 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. Существует несколько возможных методов подгонки параметрического распределения под непараметрическую оценочную функцию надежности (обеспечиваемую оценщиком Каплана-Мейера), таких как графические процедуры и процедуры вывода.

Далее будут кратко рассмотрены графики вероятности; я использую их для обоснования выбора распределения Вейбулла для моделирования надежности спутниковой подсистемы.

Вероятностный график или графическая оценка. Я начинаю обзор методов подгонки с простого в использовании и визуально привлекательного графического метода, известного как вероятностный график (или график позиций). Я использую этот метод, чтобы продемонстрировать, что распределение Вейбулла является подходящим выбором для захвата поведения отказа спутников и подсистем спутников.

Графики вероятностей представляют собой простую графическую методику для подгонки параметрического распределения к непараметрическим данным. Эта методика основана на том факте, что некоторые параметрические модели, такие как экспоненциальное распределение или распределение Вейбулла, могут иметь свою функцию надежности, линеаризованную с помощью конкретного математического преобразования. Рассмотрим, например, распределение Вейбулла. Взяв натуральный логарифм обеих сторон выражения(2), получим:

$$\ln(R(t)) = -\left(\frac{t}{\theta}\right)^{\beta} \quad (8)$$

Взяв снова натуральный логарифм (отрицательных) двух сторон этого

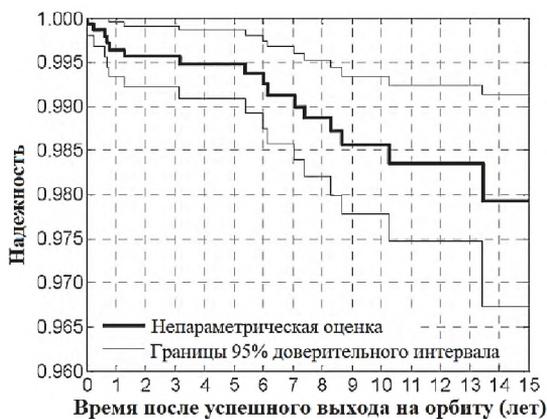
равенства, получим:

$$\ln[-\ln R(t)] = \beta \ln(t) - \beta \ln(\Theta) \quad (9)$$

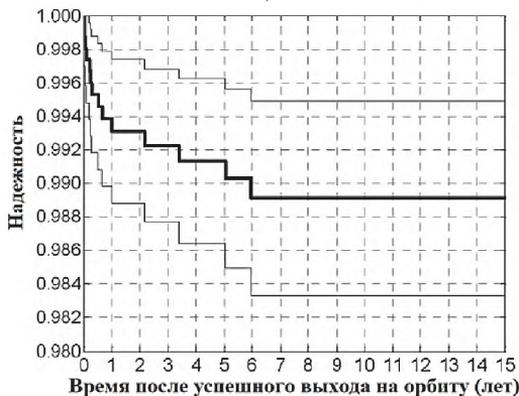
Выражение (9) эквивалентно Выражению (2)

$$R(t) = \exp \left[-\left(\frac{t}{\Theta}\right)^\beta \right] \leftrightarrow \ln[-\ln R(t)] = \beta \ln(t) - \beta \ln(\Theta) \quad (10)$$

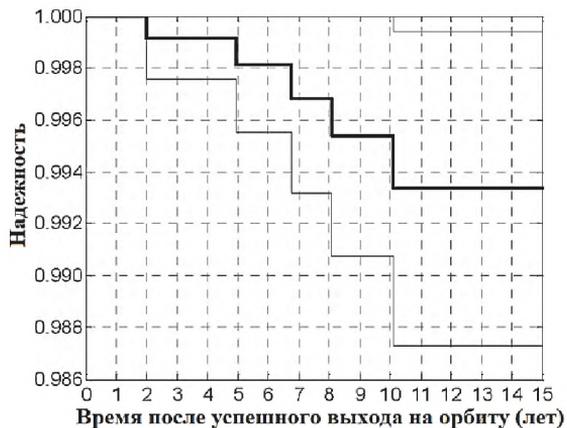
Теперь предположим, что я не знаю базового параметрического распределения, но у меня есть непараметрическая оценка надежности для элемента, $\hat{R}(t_i)$, в различные моменты времени t_i . Если я строю график $\ln[-\ln \hat{R}(t_i)]$ как функцию $\ln(t_i)$, то получаю точки данных, которые выровнены в пространство $(\ln(t); \ln[-\ln \hat{R}(t)])$ – результирующий граф называется графиком Вейбулла – тогда можно сделать вывод, что эффективные данные возникают из распределения Вейбулла (то есть основное параметрическое распределение действительно является распределением Вейбулла). Кроме того, наклон линии, которая соответствует этим точкам данных, предоставляет нам параметр формы β распределения Вейбулла. А параметр масштаба Θ может быть вычислен, например, по значению пересечения линии с осью Y .



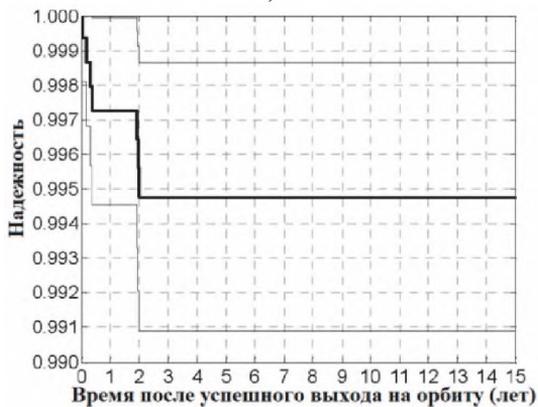
а)



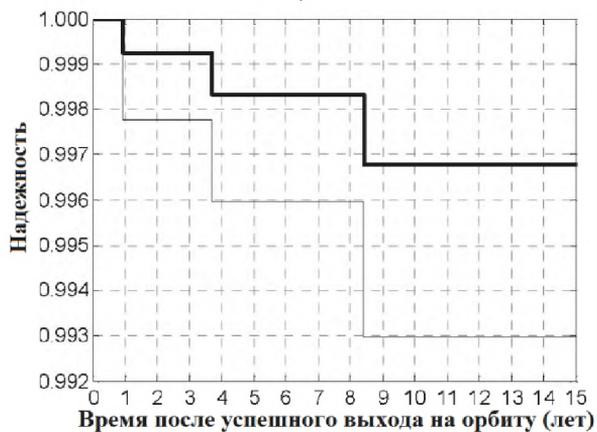
б)



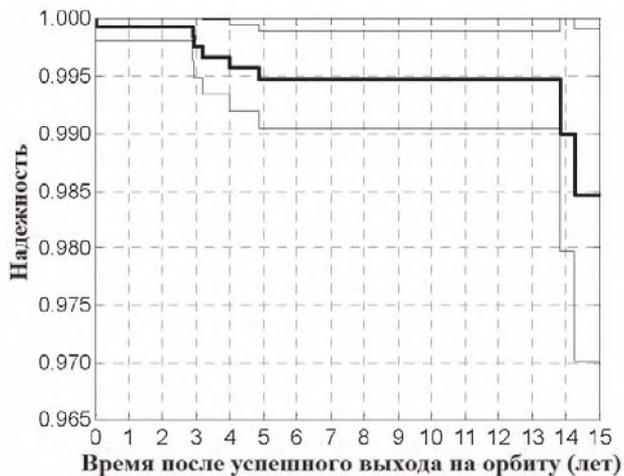
а)



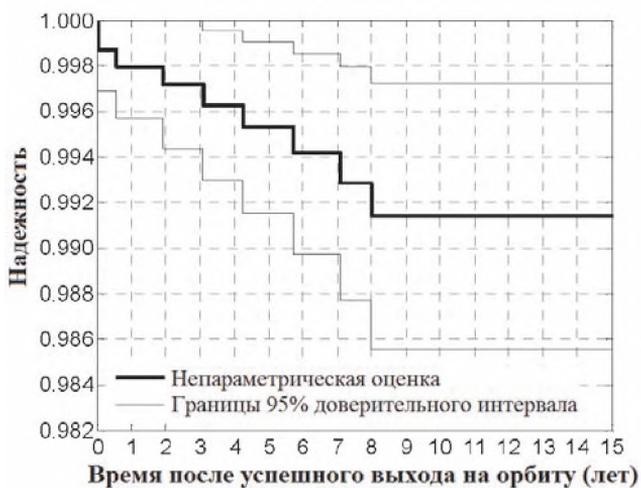
б)



в)



e)



ж)



з)

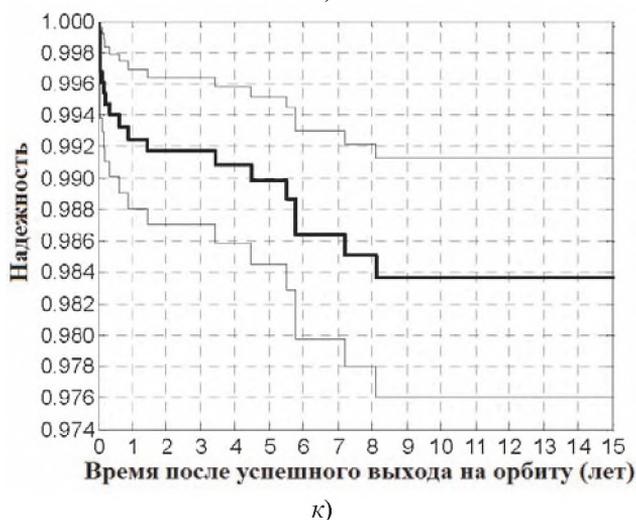
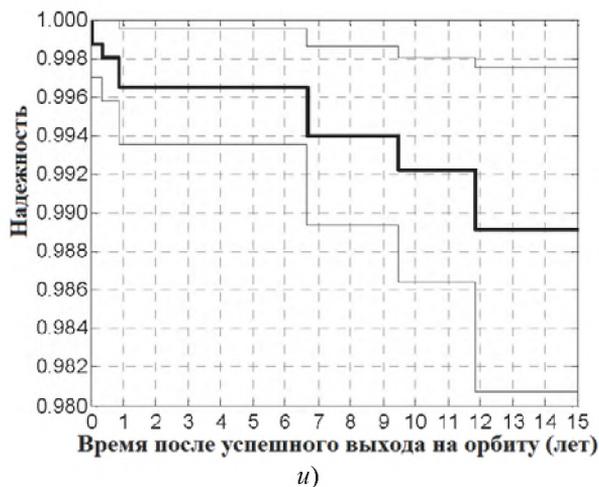


Рисунок 2 – Надежность подсистем космического аппарата с 95% доверительными интервалами, где: *a* – гироскоп / солнечный датчик; *b* – двигатель / топливная система двигателя; *v* – ЦВМ; *z* – механизмы; *d* – полезная нагрузка; *e* – аккумуляторная батарея; *ж* – распределения электроэнергии; *з* – разворачивание солнечных батарей; *и* – работа солнечной батареи; *к* – телеметрии, слежения и управления

Параметрические распределения, отличные от графиков Вейбулла, также имеют свои соответствующие «графики вероятности» (например, графики экспоненциальной, нормальной или логнормальной вероятности), и если вычисленные дискретные непараметрические данные выровнены на этих графиках вероятности, то можно сделать вывод, что данные эффективно возникают из ассоциированного распределения.

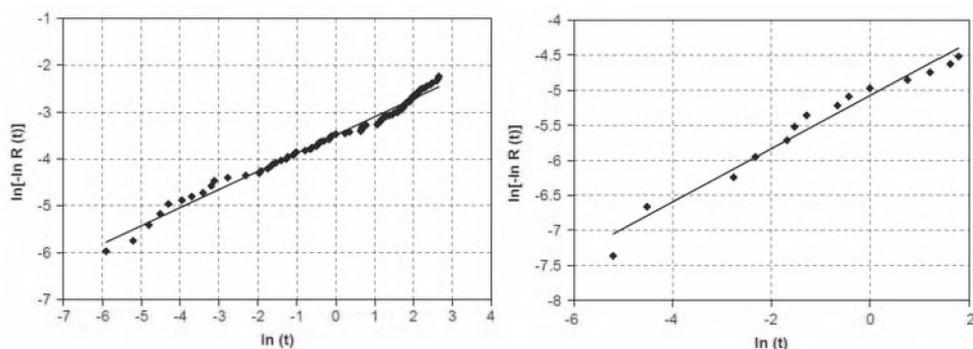


Рисунок 3 – Графики надежности спутника (слева) и двигателя, топливной подсистемы (справа)

Я ограничиваю себя в настоящей работе графиками Вейбулла (обратите внимание, что если нижележащее распределение является экспоненциальным, его можно легко идентифицировать на графике Вейбулла, когда наклон линии, соответствующей параметру формы, равен единице). На рисунке 3 показаны графики Вейбулла для надежности спутника и надежности подсистемы двигателя, топливной подсистемы.

Точки данных на рисунке 3 хорошо выровнены, таким образом, обеспечивая указание на то, что посадка Вейбулла действительно является хорошей как для надежности спутника, так и для надежности подсистемы двигателя, топливной системы.

Аналогичные результаты получены для других подсистем. Поэтому я могу утверждать, что надежность спутников и надежность спутниковых подсистем (за исключением развертывания солнечной батареи) может быть надлежащим образом аппроксимирована распределениями Вейбулла.

Вероятностные графики или графические методы параметрического вписывания имеют мощное преимущество в своей простоте: их легко настроить, они не требуют задействованных вычислений и дают немедленную (визуальную) информацию о достоверности (или нет) предполагаемого параметрического распределения. Кроме того, параметры предполагаемого распределения (в данном случае распределения Вейбулла) можно вычислить простой наименьшей квадратной линейной подгонкой данных на вероятностных графиках. Однако графики вероятностей имеют некоторые недостатки при использовании для расчета фактических параметров распределения. Например:

1) При распределениях, требующих логарифмических временных преобразований (например, Вейбулла или логнормального распределения), чрезмерный вес придается временам ранних отказов, и, как следствие, результирующая параметрическая подгонка смещается (в сторону большей точности для ранних отказов).

2) В результате (i) соответствие наименьших квадратов на графике вероятности не приводит к минимальной оценке дисперсии фактического распределения.

3) Оценка параметров может быть плохой, если время отказа не распре-

делено должным образом по диапазону данных.

Если цель или задачи проведения исследования надежности не требуют «точных» результатов, то графики вероятностей или графические оценки адекватны для проведения параметрических посадок. Для целей этой работы я использовал графики вероятностей для обоснования выбора распределения Вейбулла для моделирования надежности спутниковой подсистемы.

Выводы. Надёжность долгое время признавалась главным конструктивным атрибутом космических систем. Космические аппараты – это ценные активы, стоимость которых часто превышает сотни миллионов долларов и местоположение или операционная среда которых делает их физически недоступными для технического обслуживания для компенсации ненадежности. Несмотря на эти наблюдения, в технической литературе имеются ограниченные данные о статистическом анализе надежности космических аппаратов. В этой работе я заполнил этот пробел, проведя непараметрический статистический анализ надежности спутников и надежности подсистем спутников. Я также продемонстрировал, что распределение Вейбулла хорошо подходит для определения надежности подсистем космических аппаратов.

Литература

1. Krasich M. Reliability prediction using flight experience: Weibull adjusted probability of survival method. NASA technical report, Jet Propulsion Laboratory, Document ID: 20060041898, April 1995.
2. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.space-track.org/>.
3. Брусков А.А. Анализ отказов различных систем космического аппарата // «Информационно-технологический вестник». № 4(26). 2020. С. 34-46. ISSN 2409-1650.