

https://doi.org/10.53364/24138614_2024_35_4_3
МРНТИ 89.25.21

¹И.А. Искендеров, ¹С.С. Абдуллаева*

Национальная Академия Авиации, г.Баку, Азербайджан

*E-mail: sbaghirzada@naa.edu.az

ОБЗОР АНАЛИЗА ПРОБЛЕМЫ НАДЕЖНОСТИ В КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТАХ РАННИХ ЗАПУСКОВ

Аннотация. В статье дается обзор анализа причин и частоты отказов космических аппаратов ранних запусков. Рассматриваются результаты исследований надежности и анализируются особенности выявленных причин отказов. В результате, после изучения некоторых работ, посвященных данной проблеме проводится статистический анализ причинно-следственной гипотезы снижения частоты отказов космических аппаратов, а также исследуются недостатки проектирования или исполнения. Для оценки степени отказов приводится классификация отказов в порядке возрастания степени тяжести отказов и в свою очередь они разделяются на категории. В заключение статьи дается разделение отказов на категории опасности, показанном в табличном виде, и представляются итоговые данные.

Ключевые слова: космический аппарат, надежность, ранние отказы, систематические неисправности, ракета-носитель, программное обеспечение.

Введение. Спустя несколько лет после запуска первых спутников стали появляться статистические анализы надежности космических аппаратов и отказов на орбите [1].

Одно из самых ранних исследований надежности, согласно Leventhal и др. (1969), было опубликовано в 1962 г., и в нем анализировалось поведение 16 спутников, запущенных до ноября 1961 г. (ARINC, 1962). За эти годы были проведены аналогичные анализы с более крупными размерами или группировкой космических аппаратов. Например, Bean и Bloomquist (1968) проанализировали состояние 225 спутников во время отказа; Timmins и Heuser (1971) и Timmins (1974; 1975) проанализировали состояние 57 спутников во время отказа; Necht и Necht (1985) и Necht и Fiorentino (1987) проанализировали состояние около 300 спутников во время отказа. И в работе Saleh и Castet, несущую научную ценность и являющейся наиболее полным исследованием последних лет, анализируется неисправность и “поведение” 1584 спутников на околоземной орбите, запущенных в период с января 1990 г. по октябрь 2008 г [1-3].

Ранние исследования надежности космических аппаратов предполагали экспоненциальное распределение и постоянную частоту отказов. Однако, это предположение было опровергнуто Timmins и Heuser (1971 год), которые показали,

что для выбранной им 57 космических аппаратов, запущенных из центра космических полетов НАСА имени Годдарда, частота отказов была не постоянной, а более высокой в первые дни пребывания на орбите. Этот вывод о ранних отказах (infant mortality) космических аппаратов и снижении частоты отказов повторялся в последующих исследованиях (Timmins, 1974; 1975) [1-3].

Основная часть. Necht and Necht (1985 г.) проанализировали различные группировки космических аппаратов, состоящие примерно из 300 космических аппаратов, запущенных в период 1960-1984 годов, и охватывающих 96 различных космических программ. В ходе анализа было обнаружено снижение частоты отказов для выбранных космических аппаратов, а модели постоянной частоты отказов, предложенные в справочнике по военной надежности MIL-HDBK-217, разработанной в 1961 году и переработанной несколько раз после, были сочтены нереальными для прогнозирования надежности системы. Аналогичные выводы сделали так же Krasich (1995) и Sperber (1990 г.; 1994 г.) [1-3].

В результате в некоторых исследованиях изучались причинно-следственные гипотезы снижения частоты отказов космических аппаратов. Norris и Timmins (1976) объяснили это тем, что, так как космические аппараты состоят из множества компонентов, и компоненты с высоким риском выходят из строя, при этом остальные компоненты имеют более низкую частоту отказов. Baker и Baker (1980) исключили космическую среду как возможную причину, не считая ее суровой для космических аппаратов и объясняя тем, что если это было бы так, тогда степень опасности возрастала бы в зависимости от функции времени, поскольку кумулятивное воздействие приводит к отказам.

Но как отмечено в источнике [1], приведенные утверждения о причинах ранних отказов (infant mortality) в космических аппаратах являются сомнительными.

Помимо акцента на частоту отказов при исследовании надежности космических аппаратов Sperber (1994), подобно раннему выводу Bean и Bloomquist (1968) для 225 космических аппаратов, запущенных до 1968 г., которые видели главную причину неисправностей космических аппаратов в неадекватном проектировании, на долю которой приходится почти 60% всех происшествий с объяснимыми причинами, предположил что, причины отказов и неисправностей на орбите не являются случайные перегрузки или износ, а возможно, являются недостатки проектирования или исполнения, выявленной в ходе миссии [1-3]. Как приводится в работе [2] мнение, о преобладании (доминировании) отказов в первом году обусловлено с недостатками проектирования, которые обнаруживаются в начале миссии, так же подтверждается Мак Tafazoli, который изучив более 4000 космических аппаратов, выявил 156 отказов на 129 различных космических аппаратах с 1980 по 2005 гг [3], так и в других [4,7] работах. Результаты Tafazoli показывают, что ранние отказы верны для космических аппаратов (таблица 1).

Таблица.1. Отказы космических аппаратов, сгруппированные по сроку эксплуатации (из источника [3])

Отказы космических аппаратов, сгруппированные по их сроку эксплуатации					Пояснение
0-1	1-3	3-5	5-8	>8	
41%	17%	20%	16%	6%	Отказы космических аппаратов по исследованию Mak Tafazoli, охватывающий 4000 космических аппаратов с 1980 по 2005 гг

Поздние исследования проводились на уровне конкретных подсистем космических аппаратов. Например, Cho (2005 год) и Landis и др. (2006 год) сосредоточили внимание на отказах в подсистеме электропитания космических аппаратов, Brandhorst и Rodiek (2008 год) - на отказах в солнечных батареях, а Roberston и Stoneking (2003 год) - в подсистемах ориентации. Sperber (2002) и Tafazoli (2009) проанализировали сравнительный вклад различных подсистем в отказы космических аппаратов на орбите. А Bedingfield и др. (1996) исследовали отказы, обусловленные космической средой [1].

В работе J.H.Saleh и J.F.Castet [1] классифицируются отказы, выявленные в результате статистического анализа успешно запущенных в период с января 1990 года по октябрь 2008 года, 1584 космических аппаратов на околоземной орбите. В данной работе исследуются классы отказов в порядке возрастания степени тяжести (серьезности) отказов:

Класс IV: незначительный / временный / исправимый отказ, который не оказывает существенного постоянного влияния на работу спутника или его подсистем;

Класс III: серьезный, неисправимый отказ, приводящий к потере резервирования для работы спутника или его подсистем на постоянной основе;

Класс II: серьезный неисправимый отказ, который влияет на работу спутника или его подсистем на постоянной основе.

Класс I: отказ подсистемы, приводящий к выходу из строя спутника. Это фактически полный отказ спутника из-за серьезного отказа подсистемы.

Классы IV и III объединяются, так как влияние этих классов на функциональность спутника и его подсистем незначительно. На рисунке 1. показаны все неисправности и отказы выбранных космических аппаратов, и их распределение по различным классам [1].

Общее количество: 773

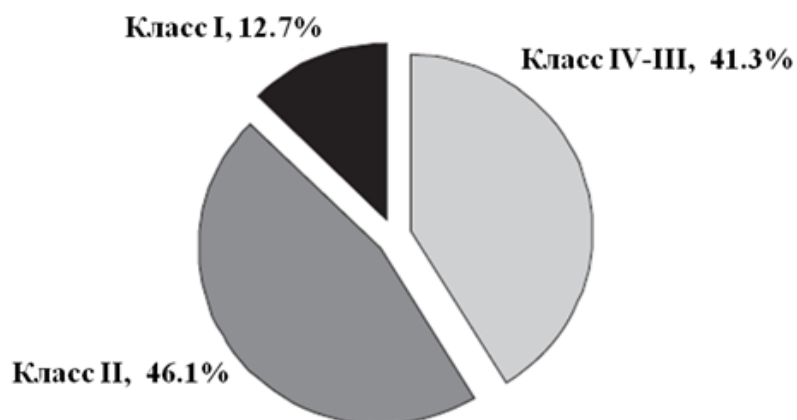


Рисунок 1. Распределение неисправностей и отказов по степени тяжести для космических аппаратов, успешно запущенных в период с января 1990 г. по октябрь 2008 г [21]

Так же в данной работе отмечается что, эти представленные числа не должны интерпретироваться за пределами важного, а именно фокусироваться исключительно на надежности космического аппарата, определяемой как вероятность нахождения в рабочем (а не в полном отказе) состоянии, пропуская важную часть деградации космического аппарата на орбите и его «поведение» при отказе.

В источнике [3] на основе двух работ¹ представлено разделение отказов на категории опасности, показанном в табличном виде (таблица 2). В ходе этого анализа было рассмотрено 325 «аномалий» космических аппаратов, в результате чего были получены значения, приведенные в таблице 3 и на рисунке 2. А на рисунке 3 показана разбивка систематических неисправностей (по общей причине).

Таблица 2. Категории анализа опасностей (из источника [3])

Категории Опасности	Определения
Аппаратные Неисправности	Случайные отказы деталей
Систематические неисправности (Общая Причина)	Все неисправности, выходящие за рамки аппаратных и программных сбоев, которые могут возникнуть в любое время жизненного цикла системы, включая стадии проектирования, реализации, эксплуатации и технического обслуживания.
Неисправности программного обеспечения	Отказы программного обеспечения при включении отказов в требования
Космическая среда	Электростатический разряд, микрометеориты, космический мусор...

Технические ошибки (Детали и Материалы)	Неправильное использование материалов для среды при проектировании
Технические ошибки (Проектирование)	Ошибки системного проектирования, проектные недочеты (не включая материалы), ошибки моделирования, ошибки интерфейса
Производственные дефекты (качество изготовления)	Отказы материалов и процессов деталей
Ограниченные инженерные знания	Неудача первой попытки новой феноменологии
Отказы РН	Отказы в результате отказов РН через разделение, включая вывод на низкую орбиту
Неизвестная причина	Категория для всех других отказов или неисправностей

Таблица 3. Общее количество «аномалий» (неисправностей) космических аппаратов (из источника [3])

Категории опасности	Aerospace LL TOR	War Stories	Всего	Проценты	
Аппаратные неисправности	2	48	50	16%	100%
Неизвестная причина	2	32	34	11%	
Систематические неисправности	136	89	22	73%	
Неисправности Программного Обеспечения	7	9	16	7%	100%
Космическая среда	2	13	15	6%	
Технические ошибки (Детали и Материалы)	10	9	19	8%	
Технические ошибки (Проектирование)	40	13	53	22%	
Производственные дефекты (качество изготовления)	46	34	80	33%	
Ограниченные инженерные знания	1	9	10	4%	
Отказы РН	37	11	48	20%	



Рисунок 2. Итоговые данные по категориям опасности космических аппаратов (из источника [3])



Рисунок 3. Систематические неисправности космических аппаратов (из источника [7])

Заключение и выводы. Частичные отказы различной степени тяжести составляют значительную часть неисправных состояний, испытываемых космическими аппаратами во время эксплуатации, и поэтому их анализ дает дополнительную и важную информацию в понимании «поведения» и склонности к сбоям космических аппаратов и подсистем. На основе рисунка 1, в результате проведенных наблюдений пришли к некоторым выводам [1]:

- полные отказы космических аппаратов (класс I) представляют собой относительно небольшую часть происшествий, происходящих на орбите: около 13% этих событий приводят к потере космического аппарата; оставшиеся (большинство) события частичные отказы малой или большой тяжести.

- около 46% проблем, происходящих в выбранных космических аппаратах, являются серьезными отказами (класс II), что означает, что неисправность приводит к необратимым и значительным ухудшениям функциональности спутника / спутниковой подсистемы (но не полной потере).

- незначительные неисправности встречаются довольно часто (класс III и класс IV), и они составляют 41% всех происшествий, с которыми сталкиваются на орбите выбранные космические аппараты.

Представленные отказы классифицируются с целью интерпретации первопричины. Анализ показывает, что большинство отказов космических аппаратов вызвано общей причиной или систематическими неисправностями, нежели случайными аппаратными неисправностями.

И.А.Искендеров, С.С. Абдуллаева

ЕРТЕ ҰШЫРЫЛАТЫН ҒАРЫШ АППАРАТТАРЫНДАҒЫ СЕНІМДІЛІК МӘСЕЛЕЛЕРІН ТАЛДАУҒА ШОЛУ

Аңдатпа. Мақалада ғарыш аппараттарын ерте ұшыру кезіндегі талдауға шолу жасалады. Сенімділік зерттеулерінің нәтижелері қаралып, ақаулардың себептері анықталады. Нәтижесінде, кейбір зерттеулер ғарыш аппараттарының істен шығу жылдамдығын төмендетуге арналған себеп-салдар гипотезаларын зерттеді, ал кейбіреулері дизайн немесе орындау кемшіліктерін зерттеді. Сәтсіздік кластары сәтсіздіктердің ауырлық дәрежесінің жоғарылау ретімен тізімделеді және олар өз кезегінде санаттарға бөлінеді.

Мақаланың соңында ақаулардың қауіптілік санаттарына бөлінуі кесте түрінде көрсетіліп, қорытынды деректер келтіріледі.

Түйін сөздер: ғарыш аппараты, сенімділік, ерте істен шығулар, жүйелі ақаулар, зымыран тасығыш, бағдарламалық қамтамасыз ету.

İ.A. İsgandarov, S.S. Abdullayeva

REVIEW OF THE ANALYSIS OF RELIABILITY PROBLEMS IN EARLY LAUNCH SPACECRAFT

Abstract. The article provides an overview of the analysis of early spacecraft. The results of reliability studies are considered and the causes of failures are identified. As a result, some studies examined cause-and-effect hypotheses for reducing the failure rate of spacecraft, and some considered design or implementation deficiencies. Failure classes are listed in order of increasing severity of failures and they are in turn divided into categories.

The article concludes with a division of failures into hazard categories, shown in a tabular form, and summary data are presented.

Keywords: *spacecraft, reliability, infant mortality, systematic malfunctions, launch vehicle, software.*

Список использованной литературы

1. Joseph Homer Saleh and Jean-François Castet. *Spacecraft Reliability and Multi-State Failures: A Statistical Approach, First Edition.*2011.
2. ARINC Research Corporation. Final Report, Satellite Reliability Spectrum Report No. 173-5-280.2009.
3. Mak Tafazoli. A study of on-orbit spacecraft failures.
4. Sarsfield Liam. The cosmos on a shoestring: small spacecraft for space and earth science. 1998.
5. European power supply manufacturers association. Reliability Guidelines to Understanding Reliability Prediction.2005
6. M. S. Hurley Jr. and W. E. Purdy, "Cost vs. Reliability - Focusing on the Mission Objectives," in *Space mission engineering: The new SMAD*, J. R. Wertz, D. F. Everett, and J. J. Puschell, Eds., Hawthorne, CA: Microcosm Press, 2011.
7. Joseph N. Pelton • Scott Madry Sergio Camacho-Lara Editors Handbook of Satellite Applications Second Edition.2017

References

1. Joseph Homer Saleh and Jean-François Castet. *Spacecraft Reliability and Multi-State Failures: A Statistical Approach, First Edition.*2011.
2. ARINC Research Corporation. Final Report, Satellite Reliability Spectrum Report No. 173-5-280.2009.
3. Mak Tafazoli. A study of on-orbit spacecraft failures.
4. Sarsfield Liam. The cosmos on a shoestring: small spacecraft for space and earth science. 1998.
5. European power supply manufacturers association. Reliability Guidelines to Understanding Reliability Prediction.2005
6. M. S. Hurley Jr. and W. E. Purdy, "Cost vs. Reliability - Focusing on the Mission Objectives," in *Space mission engineering: The new SMAD*, J. R. Wertz, D. F. Everett, and J. J. Puschell, Eds., Hawthorne, CA: Microcosm Press, 2011.
7. Joseph N. Pelton • Scott Madry Sergio Camacho-Lara Editors Handbook of Satellite Applications Second Edition.2017

Искендеров Ислам Асад оглы	к.ф.-м.н., проф, зав. кафедрой «Аэрокосмические приборы», Национальная Академия Авиации Азербайджана, г. Баку, E-mail: iisgandarov@naa.edu.az
Искендеров Ислам Асад оглы	ф.м.-ғ.д., проф., Өзирбайжан Ұлттық авиация академиясының «Аэроғарыштық аспаптар» кафедрасының меңгерушісі, Баку қ., E-mail: iisgandarov@naa.edu.az
Isgandarov Islam Asad	PhD, prof., head of the department "Aerospace instruments", National Aviation Academy, Baku, E-mail: iisgandarov@naa.edu.az

<p>Абдуллаева Сакинаханум СеидМирза кызы</p>	<p>магистр, преподаватель кафедры «Аэрокосмические приборы», Национальной авиационной академии Азербайджана, г. Баку, E-mail: sbaghirzada@naa.edu.az</p>
<p>Абдуллаева Сакинаханум СеидМирза кызы</p>	<p>Әзірбайжан Ұлттық авиация академиясының «Аэроғарыштық аспаптар» кафедрасының магистрі, оқытушысы, Баку қ.; E-mail: sbaghirzada@naa.edu.az</p>
<p>Abdullayeva Sakinakhanum SeidMirza</p>	<p>master, lecturer, department of «Aerospace Instruments» National Aviation Academy, Baku; E-mail: sbaghirzada@naa.edu.az</p>