

Современные радиотехнические и телекоммуникационные системы
Modern radio engineering and telecommunication systems

УДК 621.396.49
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-1-51-59>



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Анализ эффективности методов обеспечения надежности ретранслятора спутника связи

Т.Э. Гельфман[®],
А.П. Пирхавка,
В.О. Скрипачев

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

[®] Автор для переписки, e-mail: gelfman@mirea.ru

Резюме

Цели. Повышение качества и долговечности работы спутниковых систем связи с момента начала их практического использования развивается в направлении увеличения надежности бортовых ретрансляторов. Это достигается применением методов резервирования и использованием элементной базы с меньшей интенсивностью отказов. Наряду с резервированием большие перспективы в этом плане открывает создание новых технологий и материалов. Весьма актуальной является проблема эффективного сочетания методов резервирования и способов уменьшения интенсивности отказов элементов. Испытания на долговечность сложных систем могут продолжаться несколько лет. Цель работы – анализ эффективности методов обеспечения надежности ретранслятора спутниковой связи на основании предложенной методики определения показателя долговечности по математической модели вероятности безотказной работы.

Методы. Для описания структуры сложной системы, в данном случае бортового ретранслятора системы спутниковой связи, используется логико-вероятностный метод, в котором зависимость показателей надежности системы от показателей надежности элементов формулируется в виде логической функции работоспособности. Эта функция дает возможность создавать различные математические модели надежности систем и построить их логические схемы надежности, в т.ч. для резервированных систем. Для сравнения различных систем применяются графоаналитические методы.

Результаты. Рассмотрено влияние различных методов резервирования устройств ретранслятора и применения более надежной элементной базы на показатели безотказности и долговечности. Представлена методика определения показателя долговечности – гамма-процентного ресурса – по построенным математическим моделям вероятности безотказной работы. Проведен сравнительный анализ мероприятий по увеличению гамма-процентного ресурса ретранслятора.

Выводы. Рассмотренная методика определения показателя долговечности по математической модели вероятности безотказной работы позволяет определить интервал времени, в пределах которого резервирование дает выигрыш по вероятности безотказной работы по сравнению с уменьшением интенсивности отказов элементов. Таким образом возможно обеспечить эффективное сочетание методов резервирования и способов уменьшения интенсивности отказов элементов.

Ключевые слова: надежность, спутниковая связь, бортовой ретранслятор, резервирование, гамма-процентный ресурс

• Поступила: 08.07.2022 • Доработана: 29.09.2022 • Принята к опубликованию: 08.11.2022

Для цитирования: Гельфман Т.Э., Пирхавка А.П., Скрипачев В.О. Анализ эффективности методов обеспечения надежности ретранслятора спутника связи. *Russ. Technol. J.* 2023;11(1):51–59. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-1-51-59>

Прозрачность финансовой деятельности: Авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Analysis of the effectiveness of methods for ensuring the reliability of a communication satellite transponder

Tatyana E. Gelfman[@],
Alexey P. Pirkhavka,
Vladimir O. Skripachev

MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

[@] Corresponding author, e-mail: gelfman@mirea.ru

Abstract

Objectives. Since the launch of satellite communication systems in practical use, approaches towards enhancing their operational quality and durability have been developing in the direction of increased reliability of airborne transponders. This is mainly achieved by increasing redundancy and using components with a lower failure rate. In this regard, the creation of new technologies and new materials is a particularly promising direction. However, since durability testing of complex systems can take several years, the problem of ensuring an effective combination of redundancy methods and elements having a reduced failure rate remains challenging. The purpose of the work is to analyze the effectiveness of methods for ensuring the reliability of a communication satellite transponder based on a proposed methodology for determining the durability index using a mathematical model of the probability of failure-free operation.

Methods. In order to describe the complex structure of a satellite communication system transponder, a logical-probabilistic method is used, in which the dependence of the system reliability indicators on the reliability indicators of the transponder elements is formulated as a logical function of operability. Mathematical models of system reliability are created on this basis including for redundant systems. Graphs and analytical methods are used to compare different systems.

Results. The influence of various methods for ensuring the redundancy of transponder devices and the use of more reliable components on the reliability and durability indicators is considered. A gamma-percentage resource-based technique for determining the durability indicator based on the constructed mathematical models of the probability of failure-free operation is presented along with a comparative analysis of measures to increase the gamma-percentage resource of the transponder.

Conclusions. The presented method for determining the durability index using a mathematical model of the probability of no-failure operation can be used to determine the time interval within which redundancy increases the probability of no-failure operation as compared with a decrease in the failure rate of elements. On this basis, the most effective combination of redundancy methods and approaches for reducing the failure rate of elements can be identified.

Keywords: reliability, satellite communication, airborne transponder, redundancy, gamma-percentage resource

• Submitted: 08.07.2022 • Revised: 29.09.2022 • Accepted: 08.11.2022

For citation: Gelfman T.E., Pirkhavka A.P., Skripachev V.O. Analysis of the effectiveness of methods for ensuring the reliability of a communication satellite transponder. *Russ. Technol. J.* 2023;11(1):51–59. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-1-51-59>

Financial disclosure: The authors have no a financial or property interest in any material or method mentioned.

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Надежность спутниковых систем связи определяют их характеристики: эффективность, долговечность, готовность и риск [1]. Для обеспечения высоких показателей надежности необходимо, чтобы спутниковая система удовлетворяла требованиям по множеству критериев, таких как вероятность безотказной работы, средняя наработка до отказа, гамма-процентный ресурс и коэффициент оперативной готовности [2]. Повышение надежности спутниковых систем связи с момента начала их практического использования развивается в направлении увеличения вероятности безотказной работы бортовых ретрансляторов [3–7]. Срок службы современных спутниковых ретрансляторов достигает 15 лет [4, 8], что обеспечивается применением методов резервирования и использованием элементной базы с меньшей интенсивностью отказов. Для достижения требуемых значений показателей надежности используются разные методы резервирования [1, 9–11]. Например, в [1] показано, что при раздельном резервировании замещением с ненагруженным резервом обеспечивается больший выигрыш по средней наработке до отказа и гамма-процентному ресурсу, а при постоянном резервировании обеспечивается больший выигрыш по вероятности безотказной работы. Кроме того, реализация постоянного резервирования менее затратна. Применение резервирования ведет к усложнению ретрансляторов и, следовательно, к увеличению энергопотребления, массогабаритных и стоимостных показателей систем. Поэтому часто приходится искать оптимальное решение, позволяющее получить заданный показатель надежности при минимальных затратах, либо максимальную надежность при заданных показателях качества [8, 12–14]. Например, в [15] выполнена оценка эффективности оптимального резервирования замещением и показано, что ненагруженный резерв, по сравнению с нагруженным, обеспечивает больший выигрыш по вероятности безотказной работы для любых наработок и по средней наработке до отказа. К тому же стоимость ретранслятора с нагруженным резервом выше, т.к. увеличены массогабаритные и энергетические показатели.

Методы снижения интенсивности отказов элементов базируются на новых технологиях и принципах

проектирования [3, 8], а также на нагрузочном резервировании, связанном с облегчением электрических, тепловых, механических и других режимов работы элементов [1, 9]. Рост надежности элементной базы характеризуется закономерностями, имеющими ярко выраженные участки «насыщения», определяемые тем, что после начального периода достаточно эффективного воздействия на надежность дальнейшие действия и материальные вложения в совершенствование процессов разработки и изготовления элементов не оказывают существенного влияния на рост надежности. Это происходит по причине достижения физических ограничений, присущих каждому классу элементной базы. Смена поколений элементной базы позволяет скачкообразно увеличивать ее уровни надежности.

Очевидно, что выбор методов обеспечения надежности бортовых ретрансляторов значительно влияет на их массогабаритные, энергетические и стоимостные показатели.

Цель работы – проанализировать эффективность сочетания методов резервирования и уменьшения интенсивности отказов элементов на основе определения показателя долговечности – гамма-процентного ресурса – по математической модели вероятности безотказной работы.

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ВЕРОЯТНОСТИ БЕЗОТКАЗНОЙ РАБОТЫ

Пусть логическая схема надежности бортового ретранслятора имеет вид, представленный на рис. 1. Схема ретранслятора состоит из трех участков.

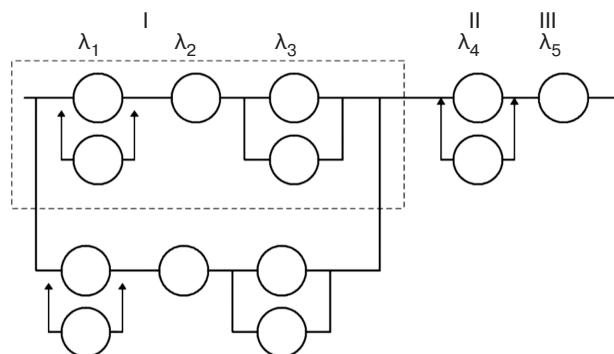


Рис. 1. Логическая схема надежности бортового ретранслятора

Вероятность безотказной работы всего ретранслятора $P_{\text{ртр}}$ равна произведению вероятностей безотказной работы каждого участка схемы:

$$P_{\text{ртр}} = P_I P_{II} P_{III} \quad (1)$$

Участок I представляет собой основное приемное устройство (выделено на рис. 1 штриховой линией), состоящее из трех последовательно соединенных элементов, первый из которых имеет интенсивность отказов λ_1 и резервирован замещением (резерв ненагруженный), второй элемент с интенсивностью отказов λ_2 не резервирован, третий элемент с интенсивностью отказов λ_3 имеет постоянное резервирование.

Вероятность безотказной работы основного приемного устройства равна произведению вероятностей безотказной работы каждого из этих трех элементов с учетом их резервирования:

$$P_{\text{прм}} = P_1 P_2 P_3 \quad (2)$$

Для первого элемента, резервированного замещением,

$$P_1 = e^{-\lambda_1 t} (1 + \lambda_1 t) \quad (3)$$

Второй элемент не резервирован, поэтому

$$P_2 = e^{-\lambda_2 t} \quad (4)$$

Для третьего элемента с постоянным резервированием

$$P_3 = 1 - (1 - e^{-\lambda_3 t})^2 \quad (5)$$

Подставив (3)–(5) в (2), получим:

$$P_{\text{прм}} = e^{-\lambda_1 t} (1 + \lambda_1 t) e^{-\lambda_2 t} \left(1 - (1 - e^{-\lambda_3 t})^2 \right)$$

Когда приемное устройство дублировано, вероятность безотказной работы первого участка схемы рис. 1 определяется выражением:

$$P_I = 1 - (1 - P_{\text{прм}})^2 \quad (6)$$

Участок II состоит из одного передающего устройства с интенсивностью отказов λ_4 , резервированного замещением (резерв ненагруженный). Вероятность безотказной работы этого участка определяется выражением:

$$P_{II} = e^{-\lambda_4 t} (1 + \lambda_4 t) \quad (7)$$

Участок III состоит из одного нерезервированного устройства – антенно-фидерного устройства ретранслятора. Вероятность безотказной работы участка

$$P_{III} = e^{-\lambda_5 t} \quad (8)$$

где λ_5 – интенсивность отказов антенно-фидерного устройства.

Подставим (6)–(8) в (1) и получим выражение для вероятности безотказной работы бортового ретранслятора спутника связи для случая дублирования приемного устройства и резервирования замещением передатчика, а также при резервировании замещением первого элемента и постоянного резервирования третьего элемента приемного устройства:

$$P_{\text{ртр}} = \left(1 - (1 - P_{\text{прм}})^2 \right) e^{-\lambda_4 t} (1 + \lambda_4 t) e^{-\lambda_5 t}$$

В случае отсутствия дублирования приемного устройства в целом, а также без резервирования первого и третьего элементов приемного устройства, вероятность безотказной работы ретранслятора описывается формулой:

$$P_{\text{ртр}} = e^{-\lambda_1 t} e^{-\lambda_2 t} e^{-\lambda_3 t} e^{-\lambda_4 t} (1 + \lambda_4 t) e^{-\lambda_5 t}$$

Для варианта резервирования замещением первого элемента и постоянного резервирования третьего элемента приемного устройства, но при отсутствии дублирования приемного устройства в целом, вероятность безотказной работы ретранслятора описывается формулой:

$$P_{\text{ртр}} = e^{-\lambda_1 t} (1 + \lambda_1 t) e^{-\lambda_2 t} \left(1 - (1 - e^{-\lambda_3 t})^2 \right) e^{-\lambda_4 t} (1 + \lambda_4 t) e^{-\lambda_5 t}$$

ВЛИЯНИЕ РЕЗЕРВИРОВАНИЯ НА ВЕРОЯТНОСТЬ БЕЗОТКАЗНОЙ РАБОТЫ

Рассмотрим влияние методов резервирования на вероятность безотказной работы и долговечность ретранслятора при изменении интенсивности отказов приемного устройства, передатчика и антенно-фидерного устройства. В качестве показателя долговечности используем гамма-процентный ресурс, который определяется по графикам зависимости вероятности безотказной работы ретранслятора от времени при $P_{\text{ртр}} = 0.9$.

Графики зависимости вероятности безотказной работы ретранслятора от времени для трех методов резервирования приведены на рис. 2–4 при разных интенсивностях отказов элементов (каскадов).

Метод 1. Дублирование приемного устройства и резервирование замещением передатчика, а также резервирование замещением первого элемента и постоянное резервирование третьего элемента приемного устройства. Графики зависимости вероятности безотказной работы от времени представлены на рис. 2. В табл. 1 приведены параметры графиков и результаты расчета гамма-процентного ресурса.

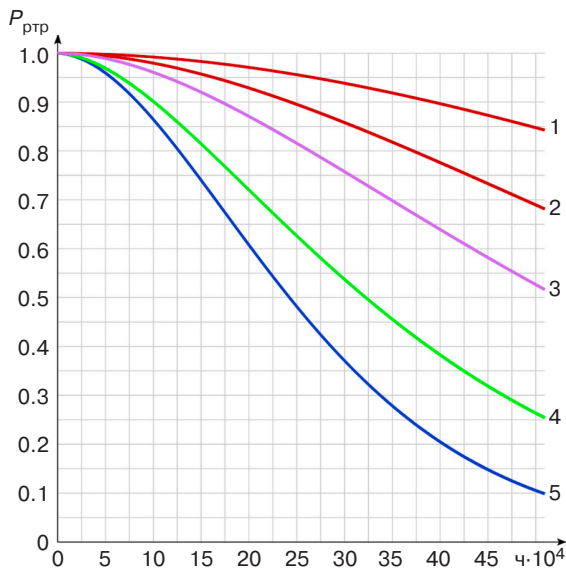


Рис. 2. Зависимости вероятности безотказной работы от времени для первого метода резервирования

Таблица 1. Параметры графиков и результаты расчетов (рис. 2)

№ кривой	Интенсивность отказов элементов схемы, $10^{-8}/ч$					Гамма-процентный ресурс, $ч \cdot 10^4$
	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	λ_5	
1	20	50	50	100	1	38.8
2	20	50	50	200	1	24.0
3	20	50	50	300	1	16.9
4	20	50	50	500	1	9.8
5	100	200	200	500	1	8.2

Как и следовало ожидать, гамма-процентный ресурс растет с уменьшением интенсивности отказов элементов. Так, например, при уменьшении интенсивности отказов передатчика в 2, 3 и 5 раз гамма-процентный ресурс увеличивается соответственно в 1.6, 2.3 и 4 раза.

Метод 2. Резервирование замещением передатчика, без резервирования приемного устройства и его элементов. Графики зависимости вероятности безотказной работы от времени представлены на рис. 3. В табл. 2 приведены параметры графиков и результаты расчета гамма-процентного ресурса.

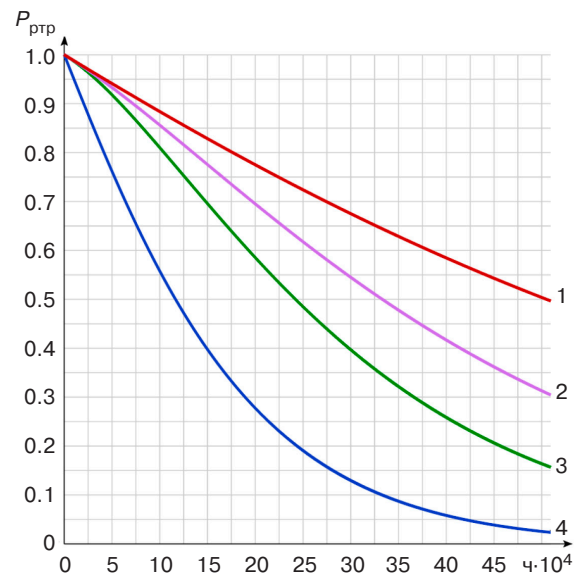


Рис. 3. Зависимости вероятности безотказной работы ретранслятора от времени для второго метода резервирования

Таблица 2. Параметры графиков и результаты расчетов (рис. 3)

№ кривой	Интенсивность отказов элементов схемы, $10^{-8}/ч$					Гамма-процентный ресурс, $ч \cdot 10^4$
	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	λ_5	
1	20	50	50	100	1	8.4
2	20	50	50	300	1	7.1
3	20	50	50	500	1	5.7
4	100	20	20	500	1	2.1

Анализ графиков рис. 2 и 3 и данных табл. 1 и 2 показывают, что без резервирования приемного устройства при одинаковых интенсивностях отказов элементов гамма-процентный ресурс снижается более, чем в 4 раза. Однако при более надежных элементах в отсутствие резервирования приемного устройства наблюдается не такое существенное уменьшение гамма-процентного ресурса и его снижение не превышает в рассматриваемых случаях 1.7 раза.

Метод 3. Общее дублирование приемного устройства отсутствует, реализуется резервирование передатчика, первого и третьего элементов приемного устройства. Графики зависимости вероятности безотказной работы от времени представлены на рис. 4. Результаты расчета гамма-процентного ресурса и параметры графиков представлены в табл. 3.

Анализ графиков рис. 4 и данных табл. 3 показывает, что имеющее наиболее высокую надежность антенно-фидерное устройство практически не влияет на гамма-процентный ресурс: в рассматриваемом случае при увеличении интенсивности отказов λ_5 в 10 раз гамма-процентный ресурс снижается менее, чем на 5%.

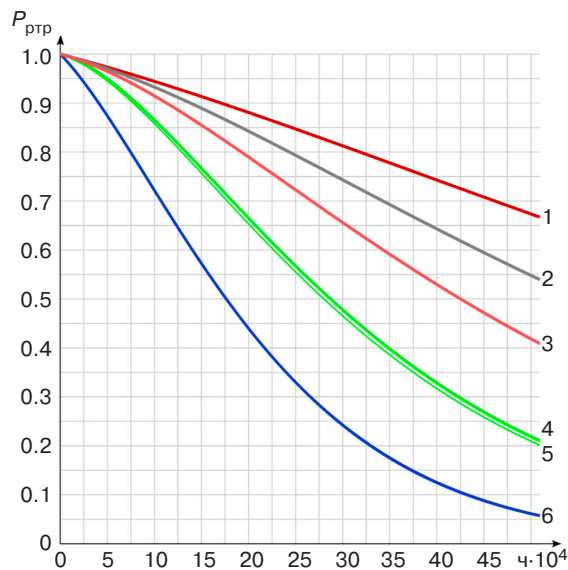


Рис. 4. Зависимости вероятности безотказной работы ретранслятора от времени для третьего метода резервирования

Таблица 3. Параметры графиков и результаты расчетов (рис. 4)

№ кривой	Интенсивность отказов элементов схемы, $10^{-8}/ч$					Гамма-процентный ресурс, $ч \cdot 10^4$
	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	λ_5	
1	20	50	50	100	1	16.9
2	20	50	50	200	1	13.6
3	20	50	50	300	1	11.1
4	20	50	50	500	1	8.0
5	20	50	50	500	10	7.6
6	100	200	200	500	1	4.0

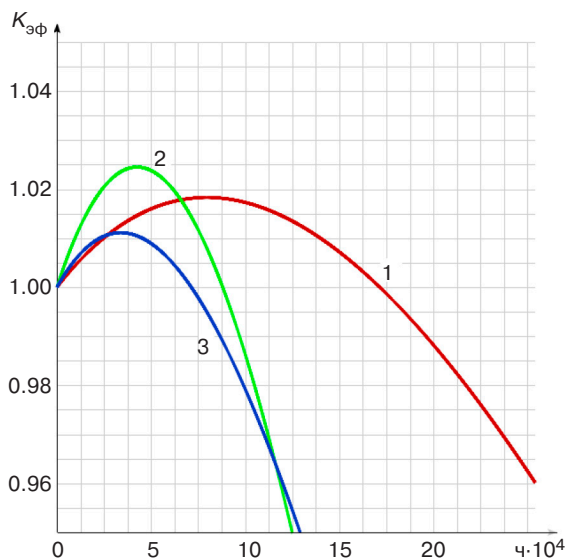


Рис. 5. Коэффициент эффективности резервирования

Обратим внимание на варианты резервирования различными методами, у которых значения гамма-процентного ресурса отличаются незначительно. Оценим эффективность методов резервирования ретранслятора для указанных случаев по вероятности безотказной работы путем определения коэффициента эффективности метода резервирования $K_{эф}$ как соотношения вероятностей безотказной работы вариантов с одинаковыми значениями гамма-процентного ресурса. На рис. 5 приведены зависимости от времени коэффициентов эффективности резервирования сравниваемых вариантов. В табл. 4 приведены параметры графиков и результаты определения эффективности методов резервирования.

Из графиков рис. 5 можно сделать важный для практики вывод: существует пороговое значение времени, до которого резервирование дает выигрыш по вероятности безотказной работы ретранслятора по сравнению с уменьшением интенсивности отказов элементов. Например, первый метод резервирования обеспечивает выигрыш по сравнению с третьим методом в интервале времени от 0 до $1.69 \cdot 10^5$ ч даже при увеличении интенсивности отказов передатчика в 3 раза, а также преимущество, по сравнению со вторым методом, в интервале времени от 0 до $8.7 \cdot 10^4$ ч даже в случае увеличения интенсивностей отказов первого и четвертого элементов в 5 раз, второго и третьего элементов – в 4 раза.

Третий метод резервирования обеспечивает выигрыш по сравнению со вторым методом в интервале времени от 0 до $7.1 \cdot 10^4$ ч даже при увеличении интенсивности отказов передатчика в 5 раз.

При превышении порогового значения времени выигрыша от резервирования нет и надежность элементов ретранслятора является фактором, определяющим вероятности безотказной работы.

Таблица 4. Параметры графиков (рис. 5) и результаты определения эффективности методов резервирования

№ кривой	Сравниваемые методы резервирования	Интенсивность отказов элементов схемы, $10^{-8}/ч$					Пороговое время, $ч \cdot 10^4$	Максимальное значение $K_{эф}$
		λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	λ_5		
1	1	20	50	50	300	1	16.9	1.018
	3	20	50	50	100	1		
2	1	100	200	200	500	1	8.7	1.025
	2	20	50	50	100	1		
3	3	20	50	50	500	1	7.1	1.011
	2	20	50	50	100	1		

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Гамма-процентный ресурс ретранслятора растет с уменьшением интенсивности отказов элементов. При отсутствии резервирования приемника и его элементов этот показатель долговечности снижается, но при более надежных элементах это снижение не так существенно. Предложенная методика расчета гамма-процентного ресурса по математическим моделям вероятности безотказной работы позволяет определить интервал времени, в пределах которого резервирование дает выигрыш по вероятности безотказной работы по сравнению с повышением надежности элементов. Таким образом можно обеспечить эффективное сочетание методов резервирования и способов уменьшения интенсивности отказов элементов.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке Фонда содействия инновациям (ФСИ) в рамках Договора № 94C2/МОЛ/73887 от 25.03.2022 г.

ACKNOWLEDGMENTS

The work was supported by the Foundation for Assistance to Small Innovative Enterprises (FASIE), Contract No. 94C2/МОЛ/73887, dated March 25, 2022.

Вклад авторов

Т.Э. Гельфман – идея исследования, научное редактирование.

А.П. Пирхавка – проведение исследования, написание и редактирование текста статьи.

В.О. Скрипачев – анализ литературы, подготовка графических материалов, редактирование текста статьи.

Authors' contributions

T.E. Gelfman – the research idea, scientific editing.

A.P. Pirkhavka – conducting research, writing and editing the text of the article.

V.O. Skripachev – analysis of literature, preparation of graphic materials, editing of the text of the article.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Половко А.М., Гуров С.В. *Основы теории надежности*. СПб.: БХВ-Петербург; 2008. 704 с. ISBN 978-5-94157-541-1
2. Гельфман Т.Э., Пирхавка А.П. Коэффициент оперативной готовности спутниковых сетей связи. *Russ. Technol. J.* 2022;10(1):35–40. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-1-35-40>
3. Севастьянов Н.Н., Андреев А.И. *Основы управления надежностью космических аппаратов с длительными сроками эксплуатации*. Томск: ТГУ; 2015. 266 с. ISBN 978-5-94621-460-5
4. Maral G., Bousquet M., Sun Zh. *Satellite Communications Systems: Systems, Techniques and Technology*. 6th ed. Wiley & Sons Ltd; 2020. 792 p. ISBN 978-1-119-38208-9
5. Verma A.S., Jaiswal A.K., Kumar M., Nigam G., Srivastava S.K. Measurement of reliability and availability of satellite communication links: Progress and challenges. In: *2013 International Conference on Intelligent Systems and Signal Processing (ISSP)*. 2013:268–271. <https://doi.org/10.1109/ISSP.2013.6526916>
6. Elbert B.R. *Introduction to Satellite Communication*. 3rd ed. Artech House Publishers; 2008. 447 p. ISBN 978-1-59693-210-4
7. Jung S., Choi J.P. End-to-end reliability of satellite communication network systems. *IEEE Systems Journal*. 2021;15(1):791–801. <https://doi.org/10.1109/jsyst.2020.2980760>

REFERENCES

1. Polovko A.M., Gurov S.V. *Osnovy teorii nadezhnosti (Fundamentals of Reliability Theory)*. St. Petersburg: BKHV-Petersburg; 2008. 704 p. (in Russ.). ISBN 978-5-94157-541-1
2. Gelfman T.E., Pirkhavka A.P. The operational readiness factor of satellite communication networks. *Russ. Technol. J.* 2022;10(1):35–40 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-1-35-40>
3. Sevastyanov N.N., Andreev A.I. *Osnovy upravleniya nadezhnost'yu kosmicheskikh apparatov s dlitel'nyimi srokami ekspluatatsii (Fundamentals of Reliability Management of Spacecraft with Long Service Life)*. Tomsk: TGU; 2015. 266 p. (in Russ.). ISBN 978-5-94621-460-5
4. Maral G., Bousquet M., Sun Zh. *Satellite Communications Systems: Systems, Techniques and Technology*. 6th ed. Wiley & Sons Ltd; 2020. 792 p. ISBN 978-1-119-38208-9
5. Verma A.S., Jaiswal A.K., Kumar M., Nigam G., Srivastava S.K. Measurement of reliability and availability of satellite communication links: Progress and challenges. In: *2013 International Conference on Intelligent Systems and Signal Processing (ISSP)*. 2013:268–271. <https://doi.org/10.1109/ISSP.2013.6526916>
6. Elbert B.R. *Introduction to Satellite Communication*. 3rd ed. Artech House Publishers; 2008. 447 p. ISBN 978-1-59693-210-4

8. Mehmet N., Selman D., Hasan H.E., Cenk S. Reliability and cost focused optimization approach for a communication satellite payload redundancy allocation problem. *International Journal of Electrical, Electronic and Communication Sciences*. 2018;11.0(5). <https://doi.org/10.5281/zenodo.1316576>
9. Антонов А.В., Никулин М.С. *Статистические модели в теории надежности*. М.: Абрис; 2012. 390 с. ISBN 978-5-4372-0009-4
10. Гельфман Т.Э., Гнучев О.Е., Лобынцев Р.Ю. Методы резервирования спутниковых систем связи. В сб.: *Актуальные проблемы и перспективы развития радиотехнических и инфокоммуникационных систем «Радиоинфоком – 2017»*. Сб. научных трудов III Международной научно-практической конференции. Московский технологический университет (МИРЭА). 2017. С. 366–374.
11. Ямпурин Н.П., Баранова А.В. *Основы надежности электронных средств*. М.: Академия; 2010. 240 с. ISBN 978-5-7695-5908-2
12. Bouwmeester J., Menicucci A., Gill E.K.A. Improving CubeSat reliability: Subsystem redundancy or improved testing? *Reliab. Eng. Syst. Saf.* 2022;220:108288. <https://doi.org/10.1016/j.res.2021.108288>
13. Castet J.F., Saleh J.H. Satellite and satellite subsystems reliability: Statistical data analysis and modeling. *Reliab. Eng. Syst. Saf.* 2009;94(11):1718–1728. <https://doi.org/10.1016/j.res.2009.05.004>
14. Кислаев А.Г., Хропов А.Н. Оптимальное резервирование, как метод повышения надежности систем космической связи. В сб.: *Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. Материалы Международной научно-технической конференции «INTERMATIC – 2010»*. 2010;10(1–3):109–112.
15. Гельфман Т.Э., Пирхавка А.П. Оптимальное резервирование ретранслятора спутника связи. В сб.: *Труды международной конференции «Радиоэлектронные устройства и системы для инфокоммуникационных технологий», РЭУС-2015*. М.: 2015. Вып. LXX. С. 217–220.
7. Jung S., Choi J.P. End-to-end reliability of satellite communication network systems. *IEEE Systems Journal*. 2021;15(1):791–801. <https://doi.org/10.1109/jsyst.2020.2980760>
8. Mehmet N., Selman D., Hasan H.E., Cenk S. Reliability and cost focused optimization approach for a communication satellite payload redundancy allocation problem. *International Journal of Electrical, Electronic and Communication Sciences*. 2018;11.0(5). <https://doi.org/10.5281/zenodo.1316576>
9. Antonov A.V., Nikulin M.S. *Statisticheskie modeli v teorii nadezhnosti (Statistical Models in Reliability Theory)*. Moscow: Abris; 2012. 390 p. (in Russ.). ISBN 978-5-4372-0009-4
10. Gelfman T.E., Gnuchev O.E., Lobynstev R.Yu. Reservation methods satellite communication systems. In: *Actual Problems and Prospects of Development of Radioengineering and Infocommunication Systems. Proceedings of the III International Scientific and Practical Conference*. Moscow: Technological University (MIREA); 2017. P. 366–374 (in Russ.).
11. Yampurin N.P., Baranova A.V. *Osnovy nadezhnosti elektronnykh sredstv (Fundamentals of Reliability of Electronic Means)*. Moscow: Akademiya; 2010. 240 p. (in Russ.). ISBN 978-5-7695-5908-2
12. Bouwmeester J., Menicucci A., Gill E.K.A. Improving CubeSat reliability: Subsystem redundancy or improved testing? *Reliab. Eng. Syst. Saf.* 2022;220:108288. <https://doi.org/10.1016/j.res.2021.108288>
13. Castet J.F., Saleh J.H. Satellite and satellite subsystems reliability: Statistical data analysis and modeling. *Reliab. Eng. Syst. Saf.* 2009;94(11):1718–1728. <https://doi.org/10.1016/j.res.2009.05.004>
14. Kislav A.G., Khropov A.N. Optimal redundancy as a method for improving the reliability of space communication systems. In: *Fundamental Problems of Radioengineering and Device Construction. Proceedings of the International Scientific and Technical Conference “INTERMATIC 2010.”* 2010;10(3):109–112 (in Russ.).
15. Gelfman T.E., Pirkhavka A.P. Optimal redundancy of a communications satellite transponder. In: *Proceedings of the International conference “Radio Electronic Devices and Systems for Infocommunication Technologies,” REDS 2015*. Moscow: 2015. Issue LXX. P. 217–220 (in Russ.).

Об авторах

Гельфман Татьяна Элевна, доцент кафедры радиоэлектронных систем и комплексов Института радиоэлектроники и информатики ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: gelfman@mirea.ru. <https://orcid.org/0000-0002-8302-6999>

Пирхавка Алексей Петрович, к.т.н., доцент кафедры радиоэлектронных систем и комплексов Института радиоэлектроники и информатики ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: pirkhavka@mirea.ru. <https://orcid.org/0000-0002-2460-7507>

Скрипачев Владимир Олегович, к.т.н., начальник отдела радиомониторинга и дистанционного зондирования Земли, доцент кафедры радиоэлектронных систем и комплексов Института радиоэлектроники и информатики ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: skripachev@mirea.ru. Scopus Author ID 35105951000, ResearcherID M-9770-2015, SPIN-код РИНЦ 8322-7260, <https://orcid.org/0000-0003-3538-5943>

About the authors

Tatyana E. Gelfman, Associate Professor, Department of Radio Electronic Systems and Complexes, Institute of Radio Electronics and Informatics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: gelfman@mirea.ru. <https://orcid.org/0000-0002-8302-6999>

Alexey P. Pirkhavka, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Radio Electronic Systems and Complexes, Institute of Radio Electronics and Informatics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: pirkhavka@mirea.ru. <https://orcid.org/0000-0002-2460-7507>

Vladimir O. Skripachev, Cand. Sci. (Eng.), Head of the Department of Radiomonitoring and Remote Sensing of Earth, Associate Professor, Department of Radio Electronic Systems and Complexes, Institute of Radio Electronics and Informatics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: skripachev@mirea.ru. Scopus Author ID 35105951000, ResearcherID M-9770-2015, RSCI SPIN-code 8322-7260, <https://orcid.org/0000-0003-3538-5943>