

УДК 621.396.49
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-5-45-53>



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Оценка эффективности скользящего резервирования радиоэлектронных средств

Т.Э. Гельфман[®],
А.П. Пирхавка

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия
[®] Автор для переписки, e-mail: gelfman@mirea.ru

Резюме

Цели. Повышение надежности радиоэлектронных средств достигается применением структурного и нагрузочного резервирования. Эффективность структурного резервирования зависит от кратности резервирования и от интенсивности отказов элементов радиоэлектронных средств. При нагрузочном резервировании путем облегчения электрических, тепловых и механических режимов работы элементов можно снизить их интенсивности отказов. Выбор способа резервирования определяется требованиями к показателям безотказности, которые часто находятся в противоречии. Поэтому весьма актуальной является проблема эффективного сочетания методов структурного резервирования и способов нагрузочного резервирования. В радиоэлектронных средствах длительного срока действия, например, в ретрансляторах спутниковых систем связи, при ограничении на массогабаритные параметры и потребляемую энергию применяется скользящее резервирование. Цель работы – оценка эффективности скользящего резервирования по различным показателям надежности при изменении кратности резервирования, режима работы резерва, интенсивности отказов элементов и переключающего устройства.

Методы. Для описания структуры сложной системы скользящего резервирования используется логико-вероятностный метод, в котором зависимость показателей надежности системы от показателей надежности элементов формулируется в виде логической функции работоспособности. Для сравнения различных вариантов логических схем надежности применяются графоаналитические методы.

Результаты. Получены математические модели для оценки эффективности скользящего резервирования. Проведен сравнительный анализ эффективности скользящего резервирования с нагруженным и ненагруженным резервом по вероятности безотказной работы, по гамма-процентному ресурсу, по интенсивности отказов при изменении дробной кратности резервирования и интенсивности отказов элементов. Исследовано влияние надежности переключающего устройства на эффективность скользящего резервирования.

Выводы. Построенные математические модели коэффициентов эффективности скользящего резервирования по разным показателям надежности позволяют дать практические рекомендации по выбору режима резерва. Определено соотношение показателей безотказности элементов и переключающего устройства, при котором надежностью переключающего устройства можно пренебречь. Для повышения эффективности скользящего резервирования радиоэлектронных средств необходимо сочетать кратность резервирования, режим работы резерва и способы уменьшения интенсивности отказов элементов.

Ключевые слова: надежность, радиоэлектронное средство, вероятность безотказной работы, гамма-процентный ресурс, интенсивность отказов, скользящее резервирование

• Поступила: 23.03.2023 • Доработана: 27.04.2023 • Принята к опубликованию: 06.07.2023

Для цитирования: Гельфман Т.Э., Пирхавка А.П. Оценка эффективности скользящего резервирования радио-электронных средств. *Russ. Technol. J.* 2023;11(5):45–53. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-5-45-53>

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Evaluation of the effectiveness of sliding redundancy of radioelectronic facilities

Tatyana E. Gelfman[@],
Alexey P. Pirkhavka

MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

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

Abstract

Objectives. The increased reliability of radioelectronic facilities can be achieved by the application of structural and load redundancy. Structural redundancy is achieved taking into account multiplicity of redundancy and the intensity of failures of elements of radioelectronic facilities, while load redundancy involves an easing of electrical, thermal, and mechanical operating modes of the elements. The choice of a redundancy method is determined according to reliability indicator requirements, which may often be contradictory. Therefore, the problem of how to effectively combine structural redundancy and load redundancy methods is very topical. In long-life radioelectronic facilities, for example, in satellite communication repeater systems, sliding redundancy is applied when limiting mass-dimensional parameters and consequently consumed energy. The aim of the work is to evaluate the efficiency of sliding redundancy according to various reliability indicators when altering redundancy multiplicity, reserve operating mode, element failure intensity, and switching device type.

Methods. To describe the structure of a complex sliding redundancy system, a logical-probabilistic method is used, in which the dependence of the system reliability indicators on the reliability indicators of the elements is formulated as a logical function of operability. Graph-analytical methods are used to compare different variants of reliability logic schemes.

Results. Mathematical models have been obtained to evaluate the effectiveness of sliding reservation. A comparative analysis of the efficiency of sliding redundancy with a loaded and unloaded reserve was carried out in terms failure-free operation probability, as well as gamma-percentage resource, failure rate when changing the fractional multiplicity of the redundancy, and element failure rate. The influence of the reliability of the switching device on the efficiency of the sliding redundancy is considered.

Conclusions. Practical recommendations on the selection of the redundancy mode are presented according to different reliability indices and constructed mathematical models of the sliding redundancy efficiency coefficients. The correlation between the reliability indices of elements and the switching device whose reliability can be discounted, is determined. To increase the efficiency of sliding redundancy of radioelectronic facilities, it is necessary to combine multiplicity of redundancy and the operating mode of the reserve with approaches aimed at reducing the intensity of failure of elements.

Keywords: reliability, radioelectronic facilities, probability of failure-free operation, gamma-percentage resource, failure rate, sliding redundancy

• Submitted: 23.03.2023 • Revised: 27.04.2023 • Accepted: 06.07.2023

For citation: Gelfman T.E., Pirkhavka A.P. Evaluation of the effectiveness of sliding redundancy of radioelectronic facilities. *Russ. Technol. J.* 2023;11(5):45–53. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-5-45-53>

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

В обеспечении надежности радиоэлектронных средств (РЭС) существует противоречие между высокими темпами роста сложности систем и ограниченными темпами роста надежности элементной базы, что требует поиска новых решений. От надежности сложных РЭС зависят такие их показатели как эффективность, долговечность, готовность, живучесть, безопасность. При этом для достижения высоких показателей надежности РЭС должно удовлетворять требованиям по многим показателям: по вероятности безотказной работы, по средней наработке на отказ, по гамма-процентному ресурсу, по интенсивности отказов и т.д. Например, для достижения заданной эффективности РЭС необходимо гарантировать определенное значение вероятности безотказной работы, а для обеспечения долговечности – определенную величину гамма-процентного ресурса [1, 2].

Показатели надежности и эффективности РЭС имеют много общего. Многие задачи, связанные с обоснованием требований по надежности, разработкой программ обеспечения надежности, выбором систем обслуживания, контроля, эксплуатации должны ставиться как задачи исследования эффективности. Примерами задач такого типа являются:

- определение целесообразных сроков разработки;
- выбор оптимального ряда РЭС;
- выбор наилучшего сочетания проектных параметров РЭС;
- выбор из нескольких логических схем надежности схемы, обеспечивающей работоспособность при наибольшем числе отказов любых ее элементов;
- сравнение методов резервирования и топологий построения.

Оценку эффективности резервированных РЭС обычно проводят сравнением методов резервирования по разным показателям надежности. Для этого вводится коэффициент эффективности [1], который показывает, какой вид резервирования эффективнее по исследуемому показателю надежности.

Все показатели или критерии надежности связаны однозначными математическими моделями, в результате стремление удовлетворить сразу нескольким критериям часто приводит к противоречивым требованиям, к излишней избыточности, зависящей

от кратности резервирования. Поэтому выбор способа обеспечения надежности существенно зависит от критерия. Так, для обеспечения вероятности безотказной работы используется структурное резервирование [2–6], а для обеспечения средней наработки на отказ системы длительного существования – нагрузочное резервирование [1, 3, 7]. На практике необходимо сочетать методы структурного и нагрузочного резервирования.

В сложных системах возникают отказы разных видов [1, 8], причем все они носят случайный характер. В расчетах допускается независимость этих отказов и оценивается их влияние по разным математическим моделям: например, для внезапных отказов элементов при постоянной интенсивности отказов используется экспоненциальная модель, а для анализа влияния постепенных отказов – нормальное распределение. Однако постепенные отказы по причине старения изменяют вероятность возникновения внезапных отказов и сбоев, что усложняет анализ надежности РЭС [9, 10].

Высокая эффективность спутниковых сетей связи [11–13] обуславливается созданием ретрансляторов при применении в них скользящего резервирования, позволяющего достичь значительного повышения надежности при сравнительно небольшом увеличении массы, габаритов и потребляемой энергии [3]. Для резервирования отдельных элементов может использоваться один, два или несколько резервных элементов, каждый из которых подключается вместо любого из основных. Например, используют скользящее резервирование бортовых передатчиков или усилителей мощности этих передатчиков, причем резерв может быть нагруженный и ненагруженный [14, 15]. Для современных геостационарных спутников связи кратность скользящего резервирования передатчиков (соотношение количества резервных и рабочих передатчиков) может составлять от 1/5 до 1/2¹ [4].

¹ Дингес С.И., Иванюшкин Р.Ю., Козырев В.Б. и др. *Радиопередающие устройства*. Учебник для вузов. Под общ. ред. Р.Ю. Иванюшкина. М.: Горячая линия – Телеком; 2021. 1150 с. ISBN 978-5-9912-0774-4 [Dinges S.I., Ivanyushkin R.Yu., Kozyrev V.B., et al. *Radio transmitting devices*. Textbook for universities. Ivanyushkin R.Yu. (Ed.). Moscow: Goryachaya liniya – Telekom; 2021. 1150 p. (in Russ.). ISBN 978-5-9912-0774-4]

В отличие от ненагруженного или холодного резерва, при нагруженном или горячем резерве нет необходимости активировать или разрешать резервному устройству работать в режиме активного нагруженного резерва. По этой причине скользящее резервирование с нагруженным резервом повышает эксплуатационную доступность и быстродействие системы, однако это также увеличивает эксплуатационные расходы, поскольку такая структура требует больше энергии и более сложное переключающее устройство. В работах [4, 5, 15] отмечается, что при резервировании замещением с ненагруженным резервом автомат контроля и коммутации снижает вероятность безотказной работы резервированной системы, однако не дано никаких рекомендаций по выбору показателей безотказности переключающего устройства. Поэтому вопрос повышения надежности и эффективности скользящего резервирования, тесно связанный с выбором кратности резервирования и режима работы резерва и с обеспечением показателей безотказности переключающего устройства, не снижающих надежность системы в целом, является актуальным.

ВЕРОЯТНОСТЬ БЕЗОТКАЗНОЙ РАБОТЫ И ГАММА-ПРОЦЕНТНЫЙ РЕСУРС СХЕМ СКОльзяЩЕГО РЕЗЕРВИРОВАНИЯ

Структурная схема надежности скользящего резервирования с кратностью m/n представлена на рис. 1.

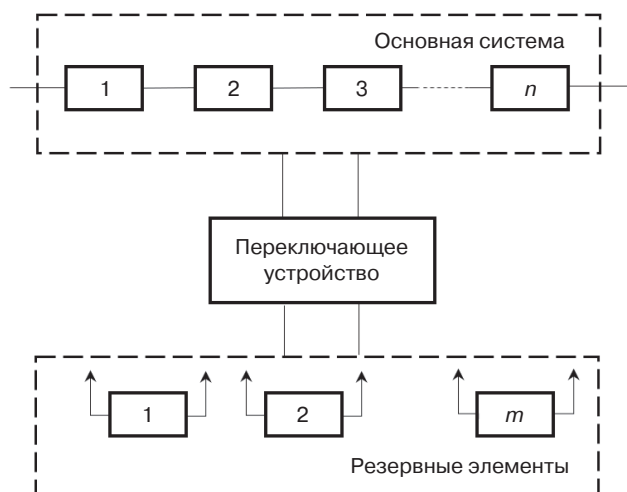


Рис. 1. Структурная схема надежности скользящего резервирования с кратностью m/n

Для схемы с ненагруженным резервом и кратности резервирования $1/n$ зависимость вероятности безотказной работы от времени описывается выражением²:

² Яншин А.А. *Теоретические основы конструирования, технологии и надежности ЭВА: учебное пособие для вузов*. М.: Радио и связь; 1983. 128 с. [Yanshin A.A. *Theoretical foundations of EVA design, technology and reliability: textbook for universities*. Moscow: Radio i svyaz'; 1983. 128 p. (in Russ.).]

$$P_1(t) = \left(n \frac{\lambda}{\lambda_k} + 1 \right) e^{-n\lambda t} - n \frac{\lambda}{\lambda_k} e^{-(\lambda_k + n\lambda)t}, \quad (1)$$

где λ – интенсивность отказов основных и резервных элементов, n – количество элементов основной системы, λ_k – интенсивность отказов переключающего устройства.

При кратности резервирования $1/n$ выражение для зависимости от времени вероятности безотказной работы схемы скользящего резервирования с нагруженным резервом может быть получено без учета надежности переключающего устройства [1]:

$$P_2(t) = e^{-n\lambda t} \left[1 + n(1 - e^{-\lambda t}) \right]. \quad (2)$$

Выражение для вероятности безотказной работы схемы скользящего резервирования при кратности резервирования $2/3$ может быть получено также без учета надежности переключающего устройства [1]:

- для схемы с ненагруженным резервом

$$P_3(t) = e^{-3\lambda t} (1 + 3\lambda t + 4.5\lambda^2 t^2), \quad (3)$$

- для схемы с нагруженным резервом

$$P_4(t) = e^{-3\lambda t} (10 + 6e^{-2\lambda t} - 15e^{\lambda t}). \quad (4)$$

Рис. 2 иллюстрирует зависимости (1) и (2) для $n = 2$ и $n = 4$ при различных интенсивностях отказов основных и резервных элементов. Для схемы с ненагруженным резервом при построении зависимостей рис. 2 принято значение интенсивности отказов переключающего устройства $\lambda_k = 10^{-8} \text{ ч}^{-1}$.

Из графиков рис. 2 видно, что ненагруженный резерв даже с учетом надежности переключающего устройства обеспечивает большую вероятность безотказной работы. Например, для ненагруженного резерва с $\lambda = 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$ и $\lambda_k = 10^{-8} \text{ ч}^{-1}$ при кратности резервирования $1/4$ и $1/2$ вероятность безотказной работы для времени $4 \cdot 10^5 \text{ ч}$ составляет соответственно 0.52 и 0.8. В случае применения нагруженного резерва аналогичные значения вероятности безотказной работы составляют соответственно 0.46 и 0.74.

По графикам рис. 2 можно определить показатель долговечности – гамма-процентный ресурс [2] схем резервирования. При использовании элементов с интенсивностью отказов $\lambda = 10^{-7} \text{ ч}^{-1}$ гамма-процентный ресурс схемы с ненагруженным резервом составляет $1.3 \cdot 10^6 \text{ ч}$ при кратности резервирования $1/4$ и $2.6 \cdot 10^6 \text{ ч}$ при кратности резервирования $1/2$. Аналогичные значения гамма-процентного ресурса схемы с нагруженным резервом составляют соответственно $1.2 \cdot 10^6 \text{ ч}$ и $2.2 \cdot 10^6 \text{ ч}$, т.е. схема с ненагруженным резервом более долговечна.

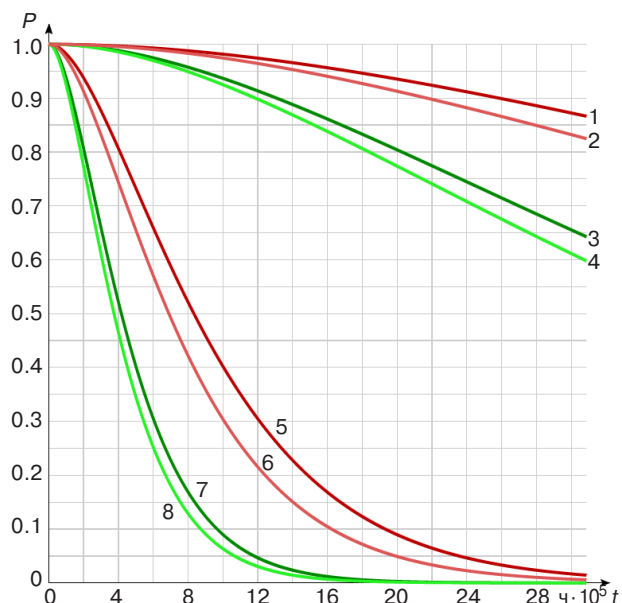


Рис. 2. Зависимости от времени вероятности безотказной работы схемы скользящего резервирования:
1, 2, 3, 4 – $\lambda = 10^{-7} \text{ ч}^{-1}$; 5, 6, 7, 8 – $\lambda = 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$;
1, 3, 5, 7 – резерв ненагруженный;
2, 4, 6, 8 – резерв нагруженный;
1, 2, 5, 6 – кратность резервирования 1/2;
3, 4, 7, 8 – кратность резервирования 1/4

Из зависимостей рис. 2 также следует, что при увеличении интенсивности отказов основных и резервных элементов до $\lambda = 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$ происходит ухудшение на порядок гамма-процентного ресурса любой из рассматриваемых схем.

На рис. 3 представлены построенные в соответствии с выражением (2) графики зависимостей от времени вероятности безотказной работы схемы с ненагруженным резервом с кратностями резервирования 1/4 и 1/2, $\lambda = 10^{-7} \text{ ч}^{-1}$ при различных интенсивностях отказов переключающего устройства.

С помощью графиков рис. 3 можно оценить влияние надежности переключающего устройства на долговечность схемы скользящего резервирования с ненагруженным резервом. Например, при использовании в схеме с кратностью резервирования 1/4 переключающего устройства с интенсивностями отказов $2 \cdot 10^{-7} \text{ ч}^{-1}$, $5 \cdot 10^{-8} \text{ ч}^{-1}$ и 10^{-8} ч^{-1} гамма-процентный ресурс составляет соответственно $1.1 \cdot 10^6$, $1.24 \cdot 10^6$ и $1.3 \cdot 10^6$ ч. Аналогичные значения гамма-процентного ресурса для схемы с кратностью резервирования 1/2 составляют соответственно $1.9 \cdot 10^6$, $2.4 \cdot 10^6$ и $2.6 \cdot 10^6$ ч. Из близости кривых 1 и 2, а также 6 и 7 следует, что при соотношении $\lambda/\lambda_k > 10$ надежность переключающего устройства практически не влияет на долговечность схемы скользящего резервирования с ненагруженным резервом.

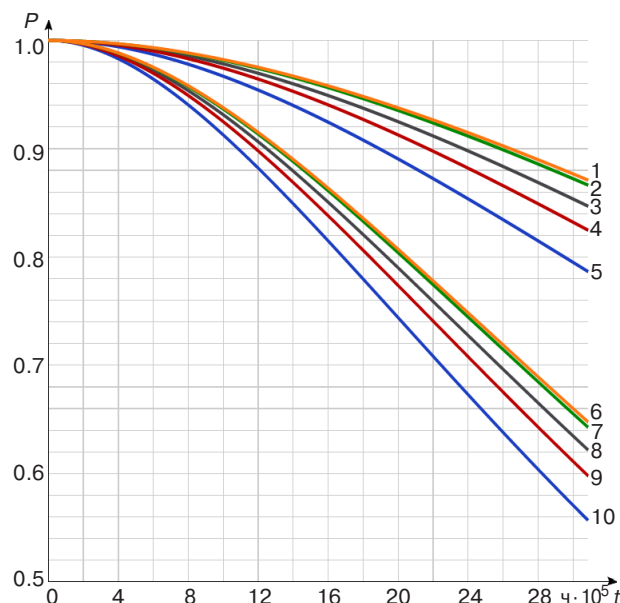


Рис. 3. Зависимости от времени вероятности безотказной работы схемы с ненагруженным резервом:
1, 2, 3, 4, 5 – кратность резервирования 1/2;
6, 7, 8, 9, 10 – кратность резервирования 1/4;
1, 6 – $\lambda_k = 10^{-9} \text{ ч}^{-1}$; 2, 7 – $\lambda_k = 10^{-8} \text{ ч}^{-1}$;
3, 8 – $\lambda_k = 5 \cdot 10^{-8} \text{ ч}^{-1}$; 4, 9 – $\lambda_k = 10^{-7} \text{ ч}^{-1}$;
5, 10 – $\lambda_k = 2 \cdot 10^{-7} \text{ ч}^{-1}$

КОЭФФИЦИЕНТ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕЗЕРВИРОВАНИЯ ПО ВЕРОЯТНОСТИ БЕЗОТКАЗНОЙ РАБОТЫ

Проведем анализ влияния состояния резерва при скользящем резервировании на эффективность резервирования с помощью коэффициента эффективности резервирования K_p по вероятности безотказной работы:

$$K_p(t) = \frac{P_1(t)}{P_2(t)}.$$

Для кратности резервирования 1/2 в соответствии с (1) и (2) коэффициент эффективности определяется выражением:

$$K_{p1/2}(t) = \frac{2 \frac{\lambda}{\lambda_k} (1 - e^{-\lambda_k t}) + 1}{3 - 2e^{-\lambda t}}.$$

Для кратности резервирования 1/4 формула для коэффициента эффективности имеет вид:

$$K_{p1/4}(t) = \frac{4 \frac{\lambda}{\lambda_k} (1 - e^{-\lambda_k t}) + 1}{5 - 4e^{-\lambda t}}.$$

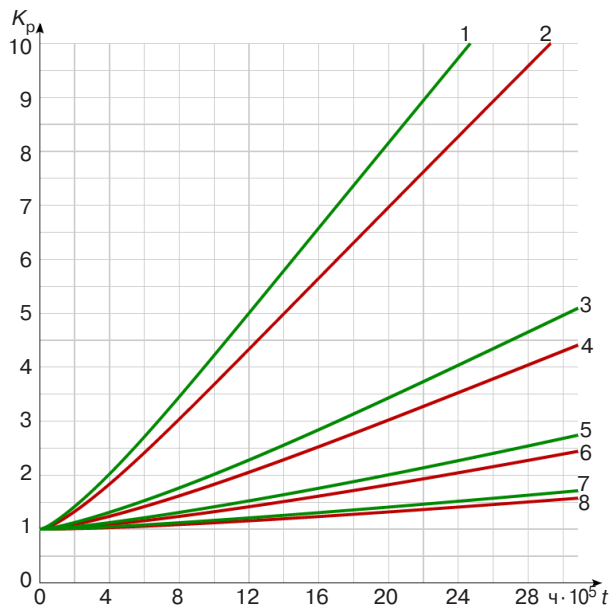


Рис. 4. Зависимости от времени коэффициента эффективности резервирования по вероятности безотказной работы:
1, 2 – $\lambda = 5 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$; 3, 4 – $\lambda = 2 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$;
5, 6 – $\lambda = 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$; 7, 8 – $\lambda = 5 \cdot 10^{-7} \text{ ч}^{-1}$;
1, 3, 5, 7 – кратность резервирования 1/4;
2, 4, 6, 8 – кратность резервирования 1/2

Для кратности резервирования 2/3 без учета надежности переключающего устройства формула для коэффициента эффективности по вероятности безотказной работы в соответствии с (3) и (4) имеет вид:

$$K_{p2/3}(t) = \frac{1 + 3\lambda t + 4.5\lambda^2 t^2}{10 + 6e^{-2\lambda t} - 15e^{-\lambda t}}.$$

Рис. 4 иллюстрирует зависимости от времени коэффициента эффективности резервирования при интенсивности отказов переключающего устройства 10^{-8} ч^{-1} , кратностях резервирования 1/2 и 1/4 и различных интенсивностях отказов элементов. На рис. 5 показаны графики зависимости от времени коэффициента эффективности резервирования для кратности резервирования 2/3 при различных интенсивностях отказов элементов.

Анализ графиков рис. 4 и рис. 5 показывает, что коэффициент эффективности по вероятности безотказной работы растет со временем, а также при увеличении λ . Так, например, для времени 10^6 ч и $1.4 \cdot 10^6 \text{ ч}$ при кратности резервирования 1/4, $\lambda = 5 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$ и $\lambda_k = 10^{-8} \text{ ч}^{-1}$ коэффициент эффективности равен соответственно 4.2 и 5.8. При кратности резервирования 1/2 аналогичные значения K_p составляют 3.7 и 5.0. В случае снижения интенсивности отказов до $\lambda = 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$ для времени 10^6 ч и кратностей резервирования 1/4 и 1/2 коэффициент эффективности равен соответственно 2.0 и 1.8.

В случае применения кратности резервирования 2/3 при $\lambda = 5 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$ для времени 10^6 ч и $1.4 \cdot 10^6 \text{ ч}$

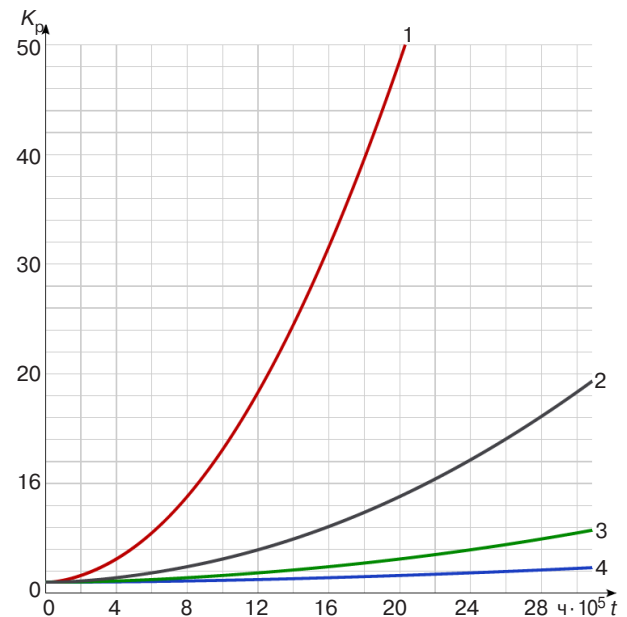


Рис. 5. Зависимости от времени коэффициента эффективности резервирования по вероятности безотказной работы для кратности резервирования 2/3: 1 – $\lambda = 5 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$;
2 – $\lambda = 2 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$;
3 – $\lambda = 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$;
4 – $\lambda = 5 \cdot 10^{-7} \text{ ч}^{-1}$

коэффициент эффективности резервирования равен соответственно 13.3 и 24.5 (рис. 5). При снижении интенсивности отказов до $\lambda = 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$ аналогичные значения K_p составляют соответственно 1.7 и 2.2.

ИНТЕНСИВНОСТЬ ОТКАЗОВ СХЕМ СКОЛЬЗЯЩЕГО РЕЗЕРВИРОВАНИЯ

Одним из основных показателей безотказности РЭС является интенсивность отказов. Исследуем, как изменяется интенсивность отказов схем скользящего резервирования с нагруженным и ненагруженным резервом для различных значений λ и λ_k при изменении кратности резервирования.

При кратности резервирования 1/n интенсивность отказов схемы с ненагруженным резервом определяется выражением:

$$\lambda_1(t) = -\frac{dP_1(t)}{dt} / P_1(t) = \frac{n\lambda \left(n \frac{\lambda}{\lambda_k} + 1 \right) (1 - e^{-\lambda_k t})}{n \frac{\lambda}{\lambda_k} (1 - e^{-\lambda_k t}) + 1}, \quad (5)$$

а для схемы с нагруженным резервом интенсивность отказов определяется выражением:

$$\lambda_2(t) = -\frac{dP_2(t)}{dt} / P_2(t) = \frac{n\lambda(n+1)(1 - e^{-\lambda t})}{n(1 - e^{-\lambda t}) + 1}. \quad (6)$$

Таблица. «Скорость старения» резервированной системы

$\lambda, \text{ч}^{-1}$	Кратность резервирования					
	1/2		1/4		2/3	
	Нагруженный резерв	Ненагруженный резерв	Нагруженный резерв	Ненагруженный резерв	Нагруженный резерв	Ненагруженный резерв
10^{-6}	$1.38 \cdot 10^6$	$4.36 \cdot 10^6$	$1.03 \cdot 10^6$	$2.22 \cdot 10^6$	$1.75 \cdot 10^6$	$6.29 \cdot 10^6$
$5 \cdot 10^{-7}$	$2.79 \cdot 10^6$	$8.93 \cdot 10^6$	$2.02 \cdot 10^6$	$4.17 \cdot 10^6$	$3.51 \cdot 10^6$	$12.7 \cdot 10^6$

В случае кратности резервирования 2/3 формулы для интенсивности отказов имеют следующий вид:

- для схемы с ненагруженным резервом

$$\lambda_3(t) = -\frac{dP_3(t)}{dt} / P_3(t) = \frac{27\lambda^3 t^2}{2 + 6\lambda t + 9\lambda^2 t^2}, \quad (7)$$

- для схемы с нагруженным резервом

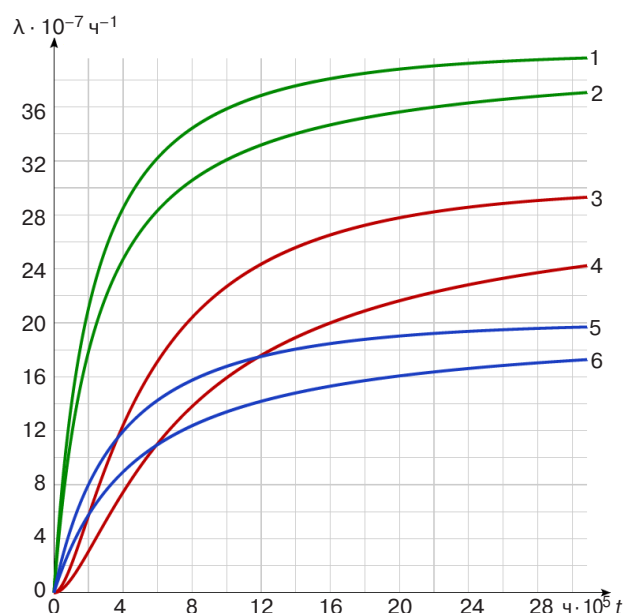
$$\lambda_4(t) = -\frac{dP_4(t)}{dt} / P_4(t) = \frac{30\lambda(1 + e^{-2\lambda t} - 2e^{-\lambda t})}{10 + 6e^{-2\lambda t} - 15e^{-\lambda t}}. \quad (8)$$

Из формул (5)–(8) следует, что для всех рассматриваемых схем скользящего резервирования при $t = 0$ интенсивность отказов равна нулю, а при $t \rightarrow \infty$ интенсивность отказов равна $n\lambda$, как для нерезервированной системы. Такие системы называют стареющими.

На рис. 6 представлены построенные в соответствии с выражениями (5)–(8) зависимости интенсивности отказов от времени схем скользящего резервирования с кратностями резервирования 1/2, 1/4 и 2/3 при $\lambda = 10^{-6} \text{ч}^{-1}$. Для схемы с ненагруженным резервом для кратностей резервирования 1/2 и 1/4 при построении зависимостей рис. 6 принято значение интенсивности отказов переключающего устройства $\lambda_k = 10^{-8} \text{ч}^{-1}$.

Для сравнения интенсивности отказов резервированных систем с различной кратностью введем показатель «скорость старения» – время достижения интенсивностью отказов уровня 0.9 от максимального, т.е. время, когда резервирование уже практически не влияет на интенсивность отказов. В таблице приведены определенные по формулам (5)–(8) и графикам рис. 6 значения этого времени в часах для некоторых значений λ при различных вариантах резервирования.

Повышение надежности РЭС, в частности систем спутниковой связи, связано с увеличением сроков активного существования и определяется функционально-структурными решениями, позволяющими отодвинуть процессы старения и деградации элементов и систем в целом. Из формул (5)–(8), а также представленных на рис. 6 графиков и данных таблицы следует, что

**Рис. 6.** Зависимости интенсивности отказов от времени схем скользящего резервирования:

- 1, 2 – кратность резервирования 1/4;
- 3, 4 – кратность резервирования 2/3;
- 5, 6 – кратность резервирования 1/2;
- 1, 3, 5 – нагруженный резерв;
- 2, 4, 6 – ненагруженный резерв

- замедлить процесс старения систем скользящего резервирования с ненагруженным и нагруженным резервом при разных кратностях резервирования можно путем применения нагрузочного резервирования;
- «скорость старения» рассмотренных схем со скользящим резервированием зависит от кратности резервирования и меньше для кратности 2/3.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренная методика определения эффективности скользящего резервирования по математическим моделям вероятности безотказной работы и интенсивности отказов позволяет сделать следующие выводы:

1. Схема скользящего резервирования с ненагруженным резервом даже при учете интенсивности отказов переключающего устройства более эффективна, чем схема с нагруженным резервом.

Причем эффективность скользящего резервирования с ненагруженным резервом растет со временем, а также при увеличении интенсивностей отказов основных и резервных элементов.

2. При соотношении интенсивности отказов элементов и интенсивности отказов переключающего устройства более десяти надежность переключающего устройства практически не влияет на долговечность схемы скользящего резервирования с ненагруженным резервом.
3. Сочетание нагрузочного резервирования для уменьшения интенсивности отказов элементов и структурного резервирования позволяет добиться снижения «скорости старения» систем со скользящим резервированием, т.е. продлить время действия резервирования

при ненагруженном и нагруженном резерве. Наилучшие результаты дает схема с дробной кратностью 2/3.

Таким образом, для повышения эффективности скользящего резервирования РЭС длительного срока действия необходимо сочетать кратность резервирования, режим работы резерва и способы уменьшения интенсивности отказов элементов.

Вклад авторов

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

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

Authors' contributions

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

A.P. Pirkhavka – conducting research, writing 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., 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>
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. Saleh J.H., Hassan R., Torres-Padilla J.P., Hastings D.E., Newman D.J. Impact of subsystem reliability on satellite revenue generation and present value. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 2005;42(6):1122–1129. <https://doi.org/10.2514/1.13137>
5. Гельфман Т.Э., Калмыков М.Н., Сердитов А.А., Чуев Е.А., Богачев В.Н., Харитонов А.Ю. Надежность систем космической связи. В сб.: *Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. Материалы Международной научно-технической конференции «INTERMATIC – 2012»*. 2012;12(6):157–161.
6. Кислаев А.Г., Хропов А.Н. Оптимальное резервирование, как метод повышения надежности систем космической связи. *Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. Материалы Международной научно-технической конференции «INTERMATIC – 2010»*. 2010;10(1–3):109–112.
7. Жаднов В.В. Расчетная оценка показателей долговечности электронных средств космических аппаратов и систем. *Надежность и качество сложных систем*. 2013;2:65–73. URL: https://nikas.pnzgu.ru/files/nikas.pnzgu.ru/zhadnov_65_73.pdf
8. Ямпурин Н.П., Баранова А.В. *Основы надежности электронных средств*. М.: Академия; 2010. 240 с. ISBN 978-5-7695-5908-2

REFERENCES

1. Polovko A.M., Gurov S.V. *Osnovy teorii nadezhnosti (Fundamentals of Reliability Theory)*. St. Petersburg: BKhV-Peterburg; 2008. 704 p. (in Russ.). ISBN 978-5-94157-541-1
2. 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>
3. Sevastyanov N.N., Andreev A.I. *Osnovy upravleniya nadezhnost'yu kosmicheskikh apparatov s dlitel'nymi 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. Saleh J.H., Hassan R., Torres-Padilla J.P., Hastings D.E., Newman D.J. Impact of subsystem reliability on satellite revenue generation and present value. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 2005;42(6):1122–1129. <https://doi.org/10.2514/1.13137>
5. Gelfman T.E., Kalmykov M.N., Serditov A.A., Chuev E.A., Bogachev V.N., Kharitonov A.Yu. Reliability of space communication systems. In: *Fundamental Problems of Radioengineering and Device Construction. Proceedings of the International Scientific and Technical Conference "INTERMATIC 2012"*. 2012;12(6):157–161 (in Russ.).
6. Kislav A.G., Khropov A.N. Optimal redundancy as a method for improving the reliability of space communication systems. *Fundamental Problems of Radioengineering and Device Construction. Proceedings of the International Scientific and Technical Conference "INTERMATIC 2010"*. 2010;10(3):109–112 (in Russ.).
7. Zhadnov V.V. Calculation assessment of durability indicators of spacecrafts and systems electronic means. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and Quality of Complex Systems*. 2013;2:65–73 (in Russ.). Available from URL: https://nikas.pnzgu.ru/files/nikas.pnzgu.ru/zhadnov_65_73.pdf

9. Алешин В.Ф., Колобов А.Ю., Петров Ю.А. Проблемные вопросы прогнозирования и подтверждения надежности космических аппаратов длительного функционирования. *Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана*. 2015;6:31–41. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23852897>
10. Kofanov Y.N., Lvov B.G., Meleh N.A., Sotnikova S.Y. Reliability of space infocommunications equipment. In: *Proceedings of the 2018 International Conference "Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies" (IT&QM&IS)*. IEEE. 2018. P. 354–357. <https://doi.org/10.1109/ITMQIS.2018.8525088>
11. 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>
12. Jung S., Choi J.P. Reliability of small satellite networks with software-defined radio and enhanced multiple access protocol. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*. 2021;57(3):1891–1902. <https://doi.org/10.1109/TAES.2021.3050652>
13. 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>
14. Аскинази Г.Б., Быков В.Л., Дьячкова М.Н. и др. *Спутниковая связь и вещание: справочник*; ред. Л.Я. Кантор. М.: Радио и связь; 1988. 344 с.
15. Mehmet N., Selman D., Hasan H.E., Cenk S. Reliability and cost focused optimization approach for a communication satellite payload redundancy allocation problem. *Int. J. Electrical, Electronic and Communication Sciences*. 2018;11.0(5). <https://doi.org/10.5281/zenodo.1316576>
8. 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
9. Alyoshin V.F., Kolobov A.Yu., Petrov J.A. Challenging issues for predicting and validating reliability of sustained spacecraft operation. *Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie MGTU im. N.E. Bauman = Science and Education of Bauman MSTU*. 2015;6:31–41 (in Russ.). Available from URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23852897>
10. Kofanov Y.N., Lvov B.G., Meleh N.A., Sotnikova S.Y. Reliability of space infocommunications equipment. In: *Proceedings of the 2018 International Conference "Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies" (IT&QM&IS)*. IEEE. 2018. P. 354–357. <https://doi.org/10.1109/ITMQIS.2018.8525088>
11. 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>
12. Jung S., Choi J.P. Reliability of small satellite networks with software-defined radio and enhanced multiple access protocol. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*. 2021;57(3):1891–1902. <https://doi.org/10.1109/TAES.2021.3050652>
13. 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>
14. Askinazi G.B., Bykov V.L., Dyachkova M.N., et al. *Sputnikovaya svyaz' i veshchaniye: spravochnik (Satellite Communication and Broadcasting. Handbook)*. Kantor L.Ya. (Ed.). Moscow: Radio i svyaz'; 1988. 344 p. (in Russ.).
15. 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>

Об авторах

Гельфман Татьяна Элевна, доцент, кафедра 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, кафедра 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>

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>