

Электронный научный журнал "Математическое моделирование, компьютерный и натурный эксперимент в естественных науках" <http://mathmod.esrae.ru/>

URL статьи: [mathmod.esrae.ru/33-125](http://mathmod.esrae.ru/33-125)

Ссылка для цитирования этой статьи:

Сидорова М.А., Барулина М.А., Ефремов М.В. Использование статистических методов для прогнозирования вероятности безотказной работы радиоэлектронного оборудования для высоконадежных приложений // Математическое моделирование, компьютерный и натурный эксперимент в естественных науках. 2021. №1

УДК 681.2

DOI: 10.24412/2541-9269-2021-1-17-24

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СТАТИСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ВЕРОЯТНОСТИ БЕЗОТКАЗНОЙ РАБОТЫ РАДИОЭЛЕКТРОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ВЫСОКОНАДЕЖНЫХ ПРИЛОЖЕНИЙ

Сидорова М.А.<sup>1</sup>, Барулина М.А.<sup>2</sup>, Ефремов М.В.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем точной механики и управления Российской академии наук (ИПТМУ РАН), г. Саратов, Россия, Научно-производственное предприятие "Антарес", г. Саратов, Россия, [gewissenheit@mail.ru](mailto:gewissenheit@mail.ru)

<sup>2</sup> Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем точной механики и управления Российской академии наук (ИПТМУ РАН), г. Саратов, [marina@barulina.ru](mailto:marina@barulina.ru)

<sup>3</sup> Научно-производственное предприятие "Антарес", г. Саратов, Россия [efremov@npp-antares.ru](mailto:efremov@npp-antares.ru)

## USE OF A NEURAL NETWORK FOR CONSTRUCTING AN ALGORITHM FOR STABILIZING AN UNMANNED AIRCRAFT OF A HELICOPTER TYPE

Sidorova M. A.<sup>1</sup>, Barulina M. A.<sup>2</sup>, Efremov M. V.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Institute of Precision Mechanics and Control of the Russian Academy of Sciences, Saratov, Russia, Research and Production Enterprise Antares, Saratov, Russia [gewissenheit@mail.ru](mailto:gewissenheit@mail.ru)

<sup>2</sup> Institute of Precision Mechanics and Control of the Russian Academy of Sciences, Saratov, Russia, [marina@barulina.ru](mailto:marina@barulina.ru)

<sup>3</sup>Research and Production Enterprise Antares, Saratov, Russia, [efremov@npp-antares.ru](mailto:efremov@npp-antares.ru)

**Аннотация.** В настоящее время статистические подходы используются для прогнозирования времени безотказной работы радиоэлектронного оборудования (РЭА), эксплуатируемого в составе космических аппаратов (КА). Такие методы прогноза показали свою эффективность для продуктов массового использования, но они могут быть недостаточными для уникальных устройств, не предназначенных для массового

использования, например, для использования в космосе. Альтернативный подход - это причинный (физический и технологический) подход к прогнозированию вероятности безотказной работы. В отличие от статистических подходов, причинный подход основан на анализе и оценке именно причин и механизмов сбоев. Но и такой подход не исключает полностью случайного характера отказов. В данной статье предпринята попытка адаптировать существующие методы прогнозирования надежности электронного оборудования для космических приложений с учетом современного уровня проектирования и производства уникальных устройств для космоса.

Ключевые слова: надежность, волоконно-оптический гироскоп, распределение Вейбулла. статистический подход, физико-технологический подход.

**Abstract.** At present, statistical approaches are used to predict the time of failure-free operation of radio-electronic equipment (REA) operated as part of spacecraft (SC). Such forecast methods have shown their effectiveness for mass-use products, but they can be insufficient for unique non-mass-use devices, such as those for the use in space. An alternative approach is a causal (physical and technological) approach to predict the probability of no-failure operation time. In contrast to statistical approaches, the causal approach is based on the analysis and assessment of precisely the causes and mechanisms of failures. But this approach does not completely exclude the random nature of failures either. In this article, an attempt to adapt the existing methods for predicting the reliability of electronic equipment for space applications was made considering the modern level of design and manufacture of the unique devices for space.

Keywords: reliability, fiber optic gyroscope, Weibull distribution, statistical approach, physico-technological approach.

## Введение

В настоящее время все более востребованной становится радиоэлектронная аппаратура (РЭА), предназначенная для так называемых высоконадежных применений, когда необходимо иметь высокий уровень безотказности в течение всего, как правило, длительного, срока активного существования. Примером такого высоконадежного применения может служить использование РЭА в космосе. При таком использовании, по опыту Research and Production Enterprise Antares, вероятность безотказной работы  $p(t)$  должна быть больше или равна 0.9 при времени активного существования космического аппарата (КА) минимум 5 лет. При этом возможности резервирования и восстановления РЭА сильно ограничены, поскольку это существенно усложняет РЭА, влияет на габаритно-массовые характеристики и потребление электроэнергии КА. Поэтому достоверность прогноза уровня безотказности РЭА является важно и актуальной задачей.

Для прогнозирования времени безотказной работы в настоящее время распространен статистический подход. На основе этого подхода прогноз надежности формулируется в виде следующего утверждения [1]: при

испытаниях или эксплуатации большого количества изделий процент отказавших изделий не превысит некоторого числа. Такой прогноз имеет определенную ценность, например, для изделий массового применения, но является недостаточным для единичных уникальных изделий, каковыми, по сути, и являются изделия космической техники. По-видимому, впервые на это противоречие обратил внимание С.П. Королев. Так, в [2] отмечается, что для космических полетов, когда осуществляются единичные пуски изделий, состоящих из нескольких десятков тысяч элементов, такой (статистический) подход методически неверен. Действительно, при подготовке пуска мы должны быть уверены, что именно данный пуск завершится благополучно, а не остальные из ста намеченных.

Покажем на примере волоконно-оптического гироскопа, который может быть частью РЭА, что чисто статистический подход к оцениванию надежности единичных уникальных изделий плохо применим.

### Оценка надежности ВОГ статистическим подходом

ВОГ является высокотехнологичным изделием, сочетающим в себе самые современные достижения волоконной оптики и полупроводниковой электроники. Возможность использования ВОГ для космического применения была доказана еще в 2002 году [3], натурные эксперименты на КА начаты в 2006 году, а основные результаты опубликованы 2013 году [4].

Для оценки величины  $p(t)$  выберем ВОГ с архитектурой, построенной по схеме прямого преобразования минимальной конфигурации, которая, в принципе, позволяет обеспечивать максимально возможную эксплуатационную надежность [4].

С точки зрения теории надежности ВОГ представляет собой простое нерезервированное изделие, структурная схема надежности которого может быть представлена в виде цепочки последовательно соединенных элементов, в которой отказ любого элемента приводит к отказу изделия в целом. Для оценки ВБР воспользуемся данными [5], где приведены результаты расчета среднего времени наработки  $T$  до отказа ВОГ. Расчет сделан на основе статистического подхода с использованием справочных данных об интенсивностях отказов и в предположении об экспоненциальном распределении времени наработки до отказа, для которого

$$p(t) = e^{-t/T}, \quad (1)$$

где  $t$  – время,  $T$  – среднего времени наработки до отказа.

На рис 1. приведен график зависимости (1) при расчетном значении  $T=93545$  часов.

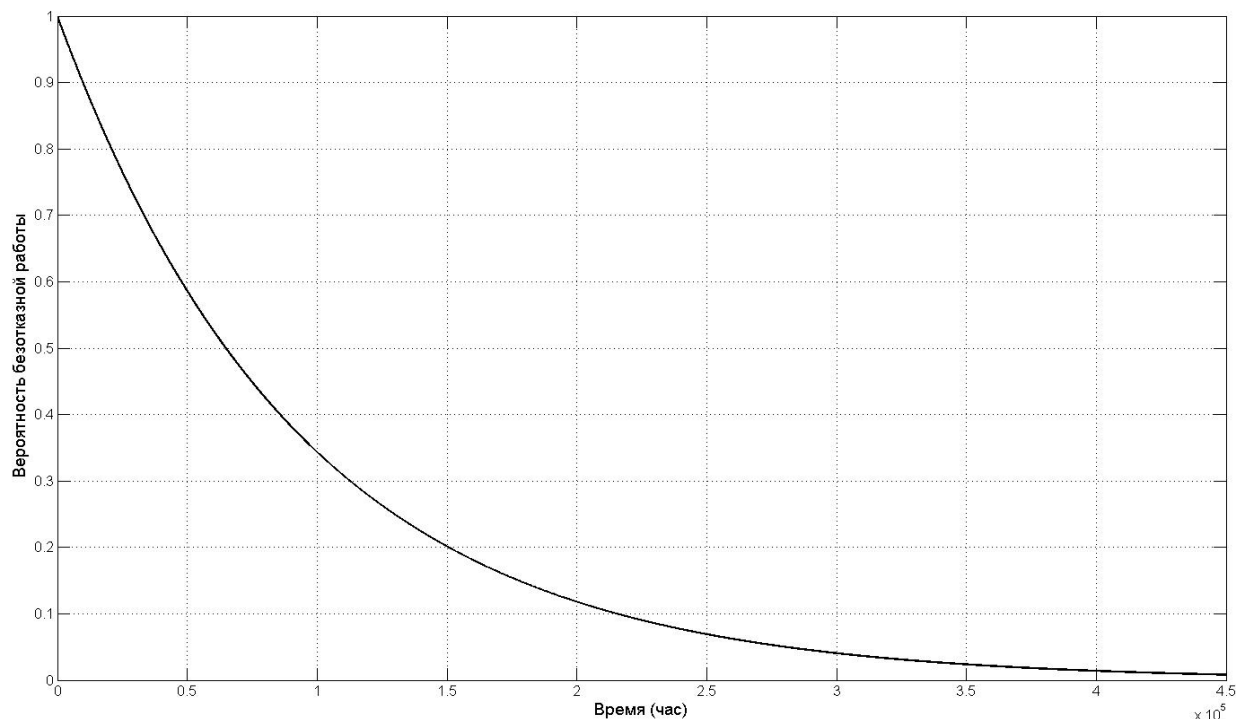


Рис. 1. График вероятности безотказной работы  $p(t)$ , полученные статистически методом при  $T= 93545$  часов

Как видно, статистический прогноз вероятности безотказной работы не позволяет даже надеяться на возможность космического применения ВОГ. Действительно, для типовых значений времени активного существования КА  $t > 50000$  часов, вероятность безотказной работы  $p(t) < 0.6$ , при требуемом значении не менее 0.9. При этом волоконно-оптические гироскопы широко используются в различных космических аппаратах, причем их безотказная наработка значительно превышает 50000 часов при эксплуатации в экстремальных условиях космического пространства (Таблица 1). Таким образом, сделанный статистический прогноз не соответствует действительности.

**Таблица 1 – Нарботка волоконно-оптических гироскопов**

Количество приборов, N	3	4	14	10	21	6	6	7	17
Нарботка, час	73720	44200	22600	12520	9640	8920	7480	4640	1720

### Оценка надежности ВОГ физико-технологическим подходом

Альтернативой статистическому подходу является причинный (физико-технологический) подход к прогнозированию ВБР. В отличие от статистического подхода, основанного на случайном характере возникновения и проявления отказов, причинный подход основан на анализе и оценке именно причин, а также механизмов отказов. Такой подход полностью не исключает случайного характера отказов, но именно при таком подходе появляется возможность более достоверного прогнозирования ВБР. Кроме этого, применение причинного подхода позволяет, в определенной мере, влиять на характеристики надежности вновь создаваемой РЭА. Показательным в этом отношении является пример, приведенный одним из основателей математической теории надежности Б.В. Гнеденко в предисловии к монографии [7]. В этом примере показано, что применение причинного подхода (была найдена и устранена всего одна причина так называемых ранних отказов) позволило повысить время безотказной работы керамических сопротивлений с 7000 до 700000 часов.

Применительно к РЭА вообще и электронным изделиям летательных аппаратов в частности, основы причинного подхода были заложены в [8,9,10] и развиты до практических применений в [7,11-16]. В соответствии с причинным подходом уровень безотказности определяется неидеальностью объектов на всех, без исключения, этапах жизненного цикла РЭА, начиная от ошибок проектирования, производства и эксплуатации, наличия различного вида дефектов комплектующих изделий и, заканчивая деградационными процессами физической структуры изделий. Причем, если причины отказов, помещенные в начале приведенного списка, вполне устранимы, например, в процессе совершенствования технологии производства, то причины деградационных отказов являются неустраняемыми в принципе, поскольку они связаны с фундаментальными процессами производства энтропии [7].

При использовании причинного подхода полагают, что в идентичных условиях и режимах эксплуатации, разброс значений наработок до отказа однотипных изделий определяются, прежде всего, их внутренними различиями (ВР), вносимыми в процессе производства. Причиной разнообразия ВР и случайности их попадания в отдельные изделия является нестабильность любого конкретного производства, которая проявляется в колебаниях качества поставляемых материалов и комплектующих изделий, старении технологического оборудования, нарушении технологических процессов и др.,

то есть, существенно зависит от уровня технологии производства [5]. Естественно, что по мере совершенствования технологии количество вносимых в процессе производства ВР и степень случайности их внесения в конкретные изделия снижается, а, значит, снижается разброс значений наработок до отказа от их среднего значения  $T$ , а само среднее значение увеличивается [5].

Во избежание логических противоречий следует предположить, что деградационные отказы, происходят позже, чем отказы всех других видов, а значит, при исключении в процессе совершенствования технологии большинства причин ВР, отказы будут наблюдаться, только, начиная с некоторого момента времени, значение которого, как впрочем, и значение средней наработки до отказа, будет уже неслучайной величиной для конкретного типа высоконадежных изделий и контролируемого уровня технологии[5].

Провести оценку надежности прибора с помощью причинного подхода можно, например, используя трехпараметрическое распределение Вейбулла, которое является обобщением экспоненциального распределения и содержит дополнительные параметры, которые и могут отражать причины и механизмы отказов. Для построения распределения Вейбулла, введем в рассмотрение время минимальной наработки до отказа  $T_{mn}$ , и будем считать, что на интервале времени  $[0; T_{mn}]$  отказов не наблюдается или вероятность их настолько мала, что можно считать, что их нет. По сути, это применение известного в теории вероятностей принципа практической уверенности [5]. Применяя этот принцип, можно записать

$$p(t)=1 \text{ при } 0 \leq t \leq T_{mn} \quad \text{и} \quad p(t)<1 \text{ при } t > T_{mn}. \quad (2)$$

Тогда распределение Вейбулла можно записать в виде:

$$p(t) = \begin{cases} 1, & 0 \leq t \leq T_{mn} \\ e^{-\lambda(t-T_{mn})^k}, & t > T_{mn}, k > 1. \end{cases} \quad (3)$$

где  $T_{mn}$  - время минимальной наработки до отказа;  $\lambda$  - интенсивность отказа в единицу времени;  $k$  – коэффициент, который подбирается на основе экспериментальных данных коэффициент формы, и учитывает интенсивность деградационных процессов.

На рис. 2 показана зависимость вероятности  $p(t)$  при параметре формы  $k=1.1$  и различных параметрах сдвига  $T_{mn}$

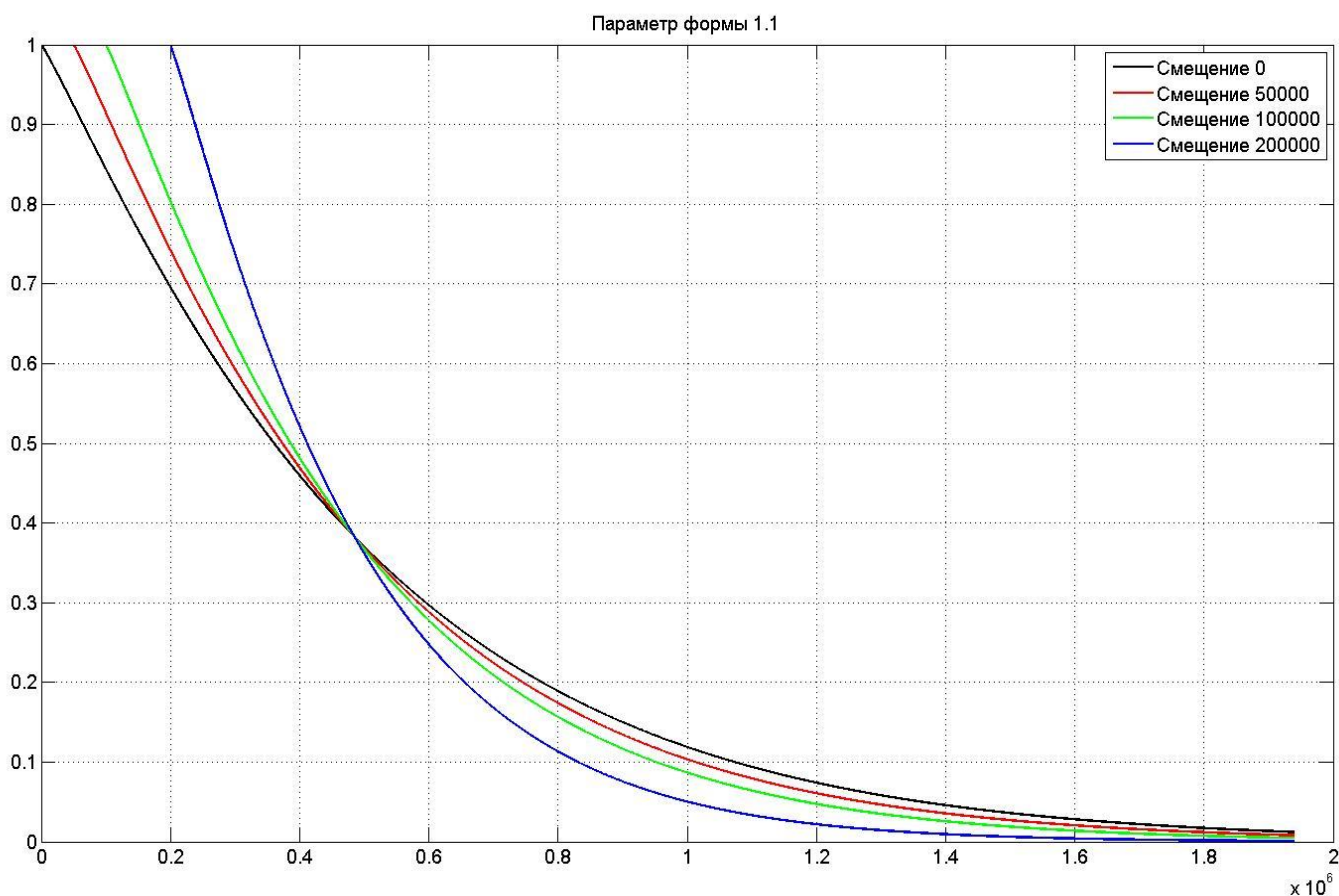


Рис. 2 - Зависимость  $p(t)$  при параметре формы  $k=1.1$  и различных параметрах сдвига  $T_{mn}$ .

Как видно из рис. 2, использование распределение Вейбулла позволяет получить оценку вероятности безотказной работы с большей точностью, чем с помощью статистического метода.

### Выводы

Предпринята попытка адаптировать существующие методы прогнозирования надежности электронного оборудования для космических приложений с учетом современного уровня проектирования и производства уникальных устройств для космоса. Распределение Вейбулла позволяет получить оценку вероятности отказа более точную, чем с помощью статистического метода. Однако, возможность использования этого распределения для других типов приборов еще требует изучения.

### Список литературы

1. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория вероятностей и ее инженерные приложения. М.: Высш. шк., 2000. – 480 с.
2. Творческое наследие академика С.П. Королева. Избранные труды и документы. Под ред. М.В.Келдыша. – М.: Наука, 1984. – 591 с.
3. Прилуцкий В.Е., Пылаев Ю.К., Губанов А.Г., Коркишко Ю. Н., Федоров В.А., Падерин Е.М.. Прецизионный волоконно-оптический гироскоп с линейным цифровым выходом // IX Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. СПб.: ЦНИИ «Электроприбор», 2002. - С. 180-189.
4. Пылаев Ю.К., Губанов А.Г., Ефремов М.В., Круглов С.А., Романов А.В.. Волоконно-оптический гироскоп космического применения – опыт разработки производства и эксплуатации // XX Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. СПб.: ЦНИИ «Электроприбор», 2013.
5. Губанов А., Пылаев Ю., Сидорова М. К вопросу прогнозирования вероятности безотказной работы радиоэлектронной аппаратуры для высоконадежных применений // Компоненты и технологии. 2016. № 9 (182). С. 114-119..
6. Стрельников В.П.. Оценка ресурса изделий электронной техники// Математичні машини і системи. - 2004. - № 2. - С.186-195.
7. Термодинамические основы диагностики и надежности микроэлектронных устройств/В.Л. Воробьев. – М.: Наука, 1989. – 160 с.
8. Брусевич Н.Г., Грабовский В.П. Об основных направлениях теории надежности. В сборнике. «Кибернетика на службу коммунизма, т.2. – М.: Энергия, 1964. – 320 с.
9. Надежность полупроводниковых радиоустройств летательных аппаратов. – М.: Машиностроение, 1968, - 350 с.
10. Теория надежности радиоэлектронных систем в примерах и задачах. Под ред. Г.В. Дружинина. – М.: Энергия , 1976. – 448 с.
11. Кейджан Г.А. Прогнозирование надежности микроэлектронной аппаратуры на основе БИС. – М.: Радио и связь, 1987. – 152 с.
12. Инженерный справочник по космической технике/ Под ред. А.В. Солодова.- М.: Военное издательство министерства обороны СССР, 1987. – 430 с.: ил.



13. Надежность технических систем: Справочник / Ю.К. Беляев, В.А. Богатырев, В.П. Болотин и др. ; Под. ред. И.А. Ушакова. – М.: Радио и связь. 1985. – 608 с.
14. Б.В. Гнеденко, Ю.К. Беляев, А.Д. Соловьев. Математические методы в теории надежности. М.: Наука. 1965. – 542 с.
15. Пылаев Ю.К., Губанов А.Г., Ефремов М.В. Круглов С.А., Романов А.В. Волоконно-оптический гироскоп в условиях воздействия факторов космического пространства // Материалы Всероссийской научной конференции с международным участием «Проблемы критических ситуаций в точной механике и управлении. – Саратов. ООО Издательский центр «Наука», 2013. – 392 с.
16. Андреева Е.В., Ильченко С.Н., Костин Ю.О., Лапин П.И., Мамедов Д.С., Якубович С.Д. Изменение выходных характеристик широкополосных СЛД в ходе продолжительной работы. Квантовая электроника.-2011. 41, 7. С. 595-601.