



Научная статья

УДК 519.216.2

URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=187463>

EDN: <https://www.elibrary.ru/GZJBLK>

МЕТОД ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ПАЛЬМА ПРИ АНАЛИЗЕ НАДЁЖНОСТИ БОРТОВЫХ УСТРОЙСТВ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ В СОСТАВЕ ОРБИТАЛЬНОЙ СПУТНИКОВОЙ ГРУППИРОВКИ

А.В. Воловик¹, А.А. Клавдиев², С.В. Ефименко³, Д.А. Гаранин³✉

¹Акционерное общество «ОДК Климов», г. Санкт-Петербург, Россия

²ИП Клавдиев А.А., г. Санкт-Петербург, Россия

³Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
г. Санкт-Петербург, Россия

✉ garanin@spbstu.ru

Цитирование: Воловик А.В., Клавдиев А.А., Ефименко С.В., Гаранин Д.А. Метод преобразования Пальма при анализе надёжности бортовых устройств космических аппаратов в составе орбитальной спутниковой группировки // Труды МАИ. 2026. № 146. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=187463>

Аннотация. Статья описывает преобразование потоков Пальма в простейшие (пуассоновские) потоки с целью применения математического аппарата марковских случайных процессов для анализа систем надёжности. Поток Пальма представляет собой ординарный поток событий, где интервалы времени между последовательными событиями являются независимыми, одинаково распределёнными случайными величинами с произвольным законом распределения. Основная проблема заключается в том, что многие реальные потоки событий в технических системах являются рекуррентными (потоками Пальма), что затрудняет их аналитическое описание. В статье предложен метод марковизации процесса путем введения дополнительных переменных и преобразования параметров потоков методом моментов. Это позволяет свести не-марковский процесс к марковскому и использовать дифференциальные

уравнения Колмогорова для описания процесса. В работе рассматривается система с двумя состояниями – исправным и неисправным. Для преобразования потоков с нормальным и равномерным распределениями интервалов между событиями в эквивалентные пуассоновские потоки используются формулы, полученные из равенства вторых начальных моментов. Предложенный подход позволяет рассчитывать, как стационарные, так и нестационарные вероятности состояний системы. В аэрокосмической сфере данный метод может быть применен для моделирования надежности сложных систем, таких как бортовое оборудование космических аппаратов или авиационные системы управления. Это позволяет обоснованно назначать периодичность технического обслуживания, оценивать гамма-процентные ресурсы и сроки службы оборудования, а также оптимизировать стратегии восстановления и резервирования систем.

Ключевые слова: поток Пальма, марковские процессы, надежность систем, стационарные и нестационарные вероятности состояния системы, пуассоновские потоки событий

THE PALM TRANSFORMATION METHOD FOR RELIABILITY ANALYSIS OF ON-BOARD SPACECRAFT EQUIPMENT WITHIN AN ORBITAL SATELLITE CONSTELLATION

A.V. Volovik¹, A.A. Klavdiev², S.V. Efimenko³, D.A. Garanin³✉

¹Joint Stock Company «UEC-Klimov», Saint Petersburg, Russia

²Individual Entrepreneur Klavdiev A.A. Saint Petersburg, Russia

³Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russia

✉ garanin@spbstu.ru

Citation: Volovik A.V., Klavdiev A.A., Efimenko S.V., Garanin D.A. The Palm transformation method for reliability analysis of on-board spacecraft equipment within an orbital satellite constellation // Trudy MAI. 2026. No. 146. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=187463>

Abstract. The article focuses on transforming Palm flows into simple (Poisson) flows to apply the mathematical apparatus of Markov random processes for reliability system analysis. A Palm flow is an ordinary flow of events where time intervals between consecutive events are independent, identically distributed random variables with an arbitrary distribution law. The main problem is that many real event flows in technical

systems are recurrent (Palm flows), which complicates their analytical description. The article proposes a method for Markovizing the process by introducing additional variables and transforming the flow parameters using the moment method. This makes it possible to reduce a non-Markov process to a Markov one and use Kolmogorov differential equations to describe the process. The work considers a system with two states – operational and faulty. To transform flows with normal and uniform distributions of time between events into equivalent Poisson flows, formulas derived from the equality of the second initial moments are used. The proposed approach allows calculating both stationary and non-stationary probabilities of system states. In the aerospace field, this method can be applied to model the reliability of complex systems such as spacecraft onboard equipment or aviation control systems. This makes it possible to reasonably schedule maintenance periods, estimate gamma-percent resources and equipment service life, and optimize system recovery and redundancy strategies.

Keywords: Palm flow, Markov processes, system reliability, stationary and non-stationary system state probabilities, and Poisson event streams

Введение

Для математического описания многих явлений, представляемых в виде случайного процесса, часто и успешно применяется математический аппарат, разработанный в теории вероятностей для так называемых марковских случайных процессов [1]. При рассмотрении случайных процессов, протекающих в системах с дискретными состояниями и непрерывным временем, используется понятие потока событий, под которым понимается последовательность однородных событий, следующих одно за другим в случайные моменты времени.

Ординарный поток событий называется потоком Пальма, если интервалы времени между последовательными событиями представляют собой независимые, одинаково распределенные случайные величины [1]. Простейший (пуассоновский) поток является частным случаем потока Пальма: в нем интервалы времени между событиями распределены по показательному закону. Для описания состояний системы в этом случае разработан аппарат дифференциальных уравнений Колмогорова. В статье предлагается с помощью

марковизации процесса путем введения дополнительных переменных [2] преобразовать параметры потока Пальма в параметры простейшего потока с целью использования дифференциальных уравнений Колмогорова для описания процесса.

Рассмотрим случайный процесс с дискретными состояниями и непрерывным временем. Если все потоки пуассоновские, то процесс, протекающий в системе, будет марковским случайным процессом [1-2]. Для наглядности будем исследовать процесс, когда система имеет два состояния:

S_0 – исправное состояние;

S_1 – неисправное состояние.

На рисунке 1 приведен граф состояний системы.

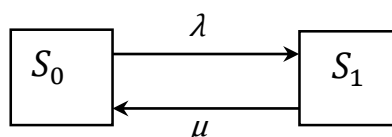


Рисунок 1 – Граф состояний системы

Переходы из состояния в состояние осуществляются с постоянными интенсивностями λ и μ . Уравнения для финальных вероятностей состояний системы запишутся следующим образом [1]

$$\lambda p_0 = \mu p_1; \tag{1}$$

$$p_0 + p_1 = 1, \tag{2}$$

где p_k – вероятность пребывания системы в состоянии S_k .

Решая совместно уравнения (1) и (2), получим стационарные значения вероятностей

$$p_0 = \frac{\mu}{\lambda + \mu}; \tag{3}$$

$$p_1 = \frac{\lambda}{\lambda + \mu}. \tag{4}$$

В реальных условиях потоки событий рассмотренного процесса часто являются рекуррентными (потоки Пальма). Это означает, что они стационарны и ординарны, а интервалы времени между событиями представляют собой независимые случайные величины с одинаковым произвольным распределением.

Аналитическое описание такого процесса возможно с помощью различных преобразований. В частности, для стационарного режима предлагается вводить коэффициенты пересчёта интенсивностей рекуррентных потоков [3]. Однако, допущение об известности стационарных вероятностей состояний с требуемой точностью и достоверностью сомнительно для начальной стадии разработки такой модели. А в случае, когда все потоки рекуррентны, сложность описания такого процесса становится сравнимой с построением имитационной модели, адекватность которой может оказаться выше.

В случае, если потоки событий представляют собой потоки Эрланга, то, вводя в схему возможных состояний системы псевдосостояния, представляется возможным свести не-марковский процесс к марковскому и описать его с помощью обыкновенных дифференциальных уравнений, которые при $t \rightarrow \infty$ переходят в алгебраические уравнения для предельных вероятностей состояний [4]. Однако с помощью потоков Эрланга удастся описать ограниченный класс систем. Поэтому для более широкого класса распределений представляется целесообразным воспользоваться марковизацией процесса путем введения дополнительных переменных [5] с преобразованием параметров потоков методом моментов для использования их в явных решениях.

Пусть переход системы из состояния S_0 в состояние S_1 происходит под воздействием потока, время между соседними событиями которого распределено по нормальному закону с математическим ожиданием m и среднеквадратическим отклонением σ . Обратный переход происходит под воздействием потока, время между соседними событиями которого распределено по равномерному в интервале $[a - b, a + b]$ закону.

В общем случае интенсивность потока событий [1]

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{1 - F(t)}, \quad (5)$$

где $f(t)$ и $F(t)$ – плотность и функция распределения случайной величины t .

На рисунке 2 приведены диаграммы интенсивностей для нормального и равномерного законов распределения случайной величины t в одном и том же диапазоне.

Нетрудно заметить, что интенсивности непостоянны. Такие объекты называются стареющими, которые заменяются фиктивным аналогом, поток отказов которого стационарен [5-6]. Для таких объектов речь может идти лишь о квазистационарном определении вероятностей состояний системы. Оно заключается в определенным образом изменении интенсивностей, входящих в стационарные вероятности состояний системы.

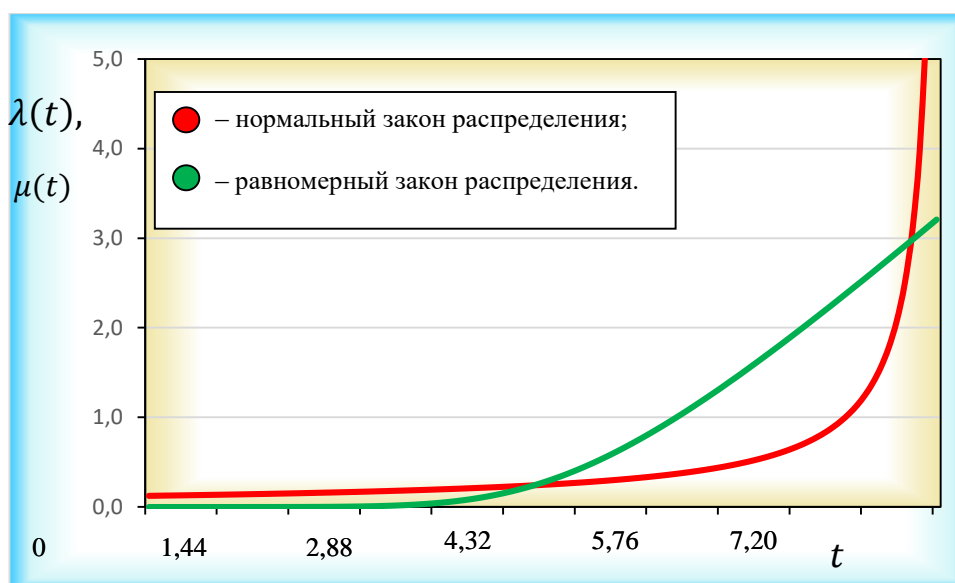


Рисунок 2 – Интенсивности потоков

В отличие от коэффициентов пересчета интенсивностей [5] предлагается в качестве дополнительных переменных в явных решениях использовать интенсивности переходов, определенные методом моментов [7], т.к. для нормального и равномерного законов распределения для интенсивности (5) $\lim_{t \rightarrow \infty} \lambda(t) = \infty$.

Для равномерного закона распределения с плотностью

$$f(t) = \frac{1}{2b}, \quad a - b < t < a + b \quad (6)$$

второй начальный момент запишется следующим образом

$$\alpha_2 = a^2 + \frac{b^2}{3}, \quad (7)$$

где a и b – параметры равномерного закона распределения.

Для нормального закона распределения с плотностью

$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-m}{\sigma}\right)^2}, \quad -\infty < t < \infty \quad (8)$$

второй начальный момент запишется следующим образом

$$\alpha_2 = m^2 + \sigma^2, \quad (9)$$

где m и σ – параметры нормального закона распределения.

Для экспоненциального закона распределения с плотностью

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t}, \quad 0 \leq t$$

второй начальный момент запишется следующим образом

$$\alpha_2 = \frac{2}{\lambda^2}, \quad (10)$$

где λ – параметр экспоненциального закона распределения.

Тогда для постулированных выше законов распределений случайных величин:

– из равенства моментов (9) и (10) интенсивность

$$\lambda = \sqrt{\frac{2}{m^2 + \sigma^2}}; \quad (11)$$

– из равенства моментов (7) и (10) интенсивность

$$\mu = \sqrt{\frac{6}{3a^2 + b^2}}. \quad (12)$$

С учетом интенсивностей (11) и (12) квазистационарные вероятности (3) и (4) нахождения системы в состояниях S_0 и S_1 примут следующий вид

$$p_0 = \frac{\mu}{\lambda + \mu} = \frac{1}{1 + \sqrt{\frac{3a^2 + b^2}{3(m^2 + \sigma^2)}}}, \quad (13)$$

$$p_1 = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} = \frac{1}{1 + \sqrt{\frac{3(m^2 + \sigma^2)}{3a^2 + b^2}}}. \quad (14)$$

Можно показать, что нормировка (2) соблюдается. Кроме того, при $\sigma = b = 0$ (исключается по одному параметру), $m = \lambda^{-1}$ и $a = \mu^{-1}$ и формулы (13) и (14) принимают первоначальный вид (3) и (4).

Проверка данного способа расчета вероятностей состояний проведена с помощью имитационной модели при числе испытаний 10^6 . Относительная ошибка не превышает 5%. Причем, параметры распределений могут варьироваться в достаточно широких пределах без ущерба для точности. В частности, при $m=5$, $\sigma=3$, $a=6$ и $b=4$ вероятность (13) $p_0 = 0,476$. С помощью имитационной модели получена оценка $\hat{p}_0 = 0,453$.

Данный подход позволяет получать и нестационарные решения. Так, для графа состояний, изображенного на рисунке 1, дифференциальные уравнения Колмогорова имеют вид:

$$\frac{dp_0}{dt} = -\lambda p_0 + \mu p_1; \quad (15)$$

$$\frac{dp_1}{dt} = \lambda p_0 - \mu p_1. \quad (16)$$

Решая систему (15, 16) при условии (2), получим нестационарное решение в явном виде [8-9]

$$p_0(t) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \left[1 + \frac{\lambda}{\mu} e^{-(\lambda + \mu)t} \right]; \quad (17)$$

$$p_1(t) = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \left[1 - e^{-(\lambda + \mu)t} \right]. \quad (18)$$

На рисунке 3 приведены графики функций (17) и (18) при следующих исходных данных: $m = 5$, $\sigma = 3$, $a = 6$ и $b = 4$, которые преобразованы в интенсивности по формулам (11) и (12).

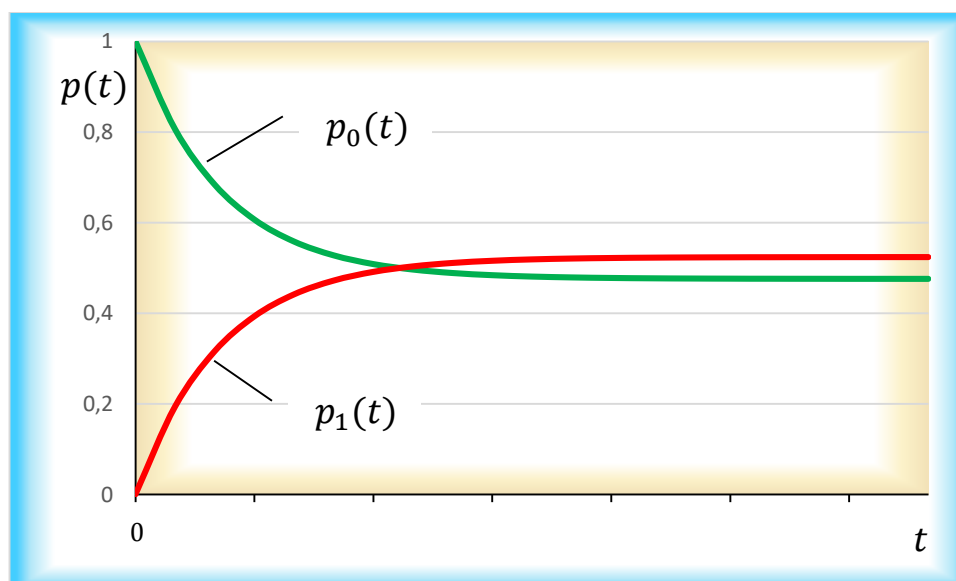


Рисунок 3 – Графики зависимостей $p_0(t)$ и $p_1(t)$

Из рисунка видно, что преобразования потоков позволяют получать и нестационарные решения, для которых сохраняются все условия размеченного графа состояний.

На рисунке 4 приведены графики тех же функций (15) и (16) при $m = 5$, $\sigma = 0$, $a = 5$ и $b = 0$. То есть, потоки характеризуются только средними значениями времени между соседними событиями. Иначе говоря, становятся простейшими (экспоненциальный закон распределения времени между ними). Из рисунка видно, что вероятности $p_0(t)$ и $p_1(t)$ при $t \rightarrow \infty$ стремятся к своим стационарным значениям, равным 0,5 при $m = a = 5$.

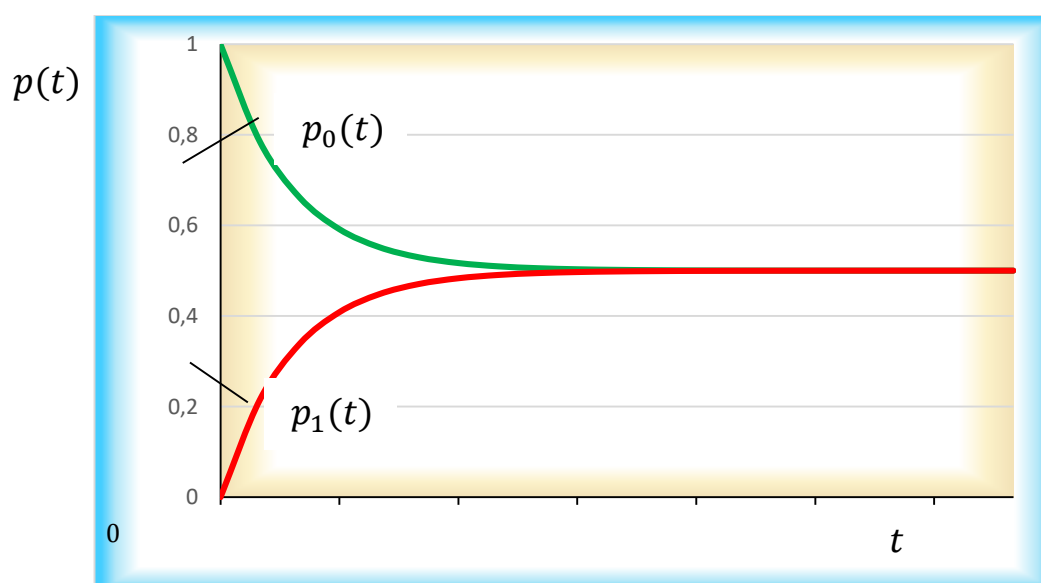


Рисунок 4 – Графики зависимостей $p_0(t)$ и $p_1(t)$

Предложенный метод преобразования произвольного рекуррентного потока (Пальма) в простейший (пуассоновский) находит прямое применение в задачах построения долгосрочных прогнозов надежности необслуживаемых систем в безлюдных технологиях [10-12]. Также, метод особенно актуален имеет в сфере проектирования надежности космических аппаратов и долговременных спутниковых группировок. В системах такого типа потоки отказов часто не являются пуассоновскими, а описываются более сложными распределениями (нормальным, равномерным и др.), что делает невозможным прямое использование аппарата уравнений Колмогорова. Преобразование реального потока в эквивалентный простейший с интенсивностью, рассчитанной методом

моментов (11, 12), позволяет использовать хорошо разработанный математический аппарат для марковских процессов.

В связи с вышесказанным, представляется целесообразным рассмотреть преобразование потоков для нестационарного решения путем дополнения системы дифференциальных уравнений (15, 16) уравнениями, описывающими изменения интенсивностей во времени.

Для равномерного закона распределения с плотностью (6) интенсивность (5) примет следующий вид

$$\lambda(t) = \frac{1}{a + b - t}, \quad 0 \leq t \leq a + b. \quad (19)$$

Для нормального закона распределения с плотностью (8) интенсивность (5) примет следующий вид

$$\mu(t) = \frac{\varphi(t)}{1 - \Phi(t)}, \quad (20)$$

где $\Phi(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^t \varphi(t) dt$ – функция нормального закона распределения.

Дополненная система дифференциальных уравнений (15, 16) выглядит следующим образом

$$\frac{dp_0}{dt} = -\lambda p_0 + \mu p_1; \quad (21)$$

$$\frac{dp_1}{dt} = \lambda p_0 - \mu p_1. \quad (22)$$

$$\frac{d\lambda(t)}{dt} = (a + b - t)^2; \quad (23)$$

$$\frac{d\mu(t)}{dt} = \frac{d}{dx} \frac{\varphi(t)}{[1 - \Phi(t)]}. \quad (24)$$

Её решение для исходных данных $m = 5$, $\sigma = 1$, $a = 5$ и $b = 3$ и начальных условий $p_0 = 1$ и $p_1 = 0$ на интервале времени $[0; a + b]$ представлено графиками вероятностей $p_0(t)$ и $p_1(t)$ на рисунке 5.

Можно показать, что точки пересечения интенсивностей $\lambda(t)$ и $\mu(t)$ на графиках рисунка 2 по времени совпадают с колебанием вероятностей на рисунке 5 вследствие изменения доминирования интенсивностей потоков.

Такую модель можно использовать для обоснования системы технического обслуживания [13]. Например, по требуемой вероятности пребывания системы в исправном состоянии назначить периодичность проведения регламентных работ. Если под состояниями S_0 и S_1 подразумевать работоспособное и неработоспособное состояния, то можно обосновать гамма-процентные ресурсы и сроки службы [14-15].

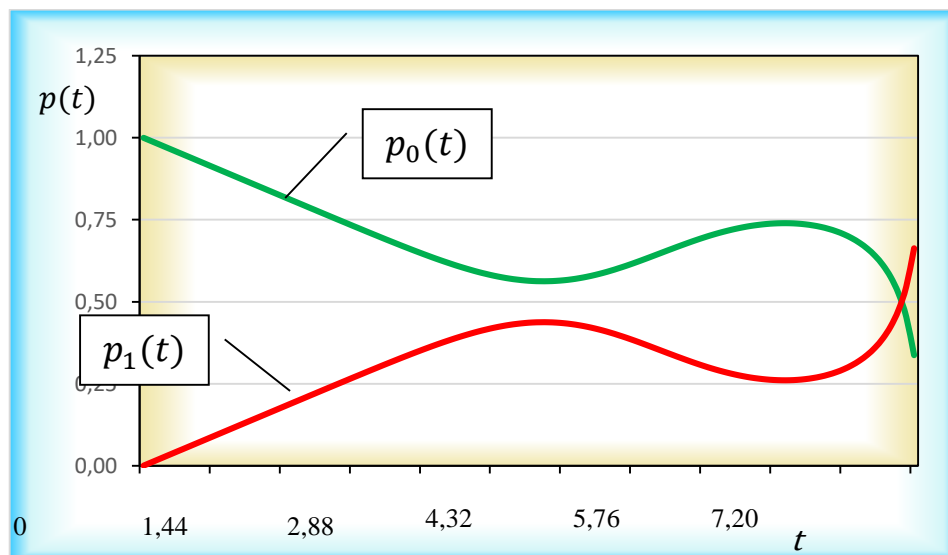


Рисунок 5 – Графики зависимостей $p_0(t)$ и $p_1(t)$

Преобразование потоков описанным способом и его проверка с помощью имитационной модели при числе испытаний 10^6 показали, что относительная ошибка не превышает 5%. Таким образом, предложенный подход позволяет с достаточной для практики точностью моделировать процессы, протекающие в системах, потоки которых могут существенно отличаться от простейших.

Заключение

Предложенный метод преобразования произвольного рекуррентного потока (Пальма) в простейший (пуассоновский) находит прямое применение в задачах прогнозирования и проектирования надежности космических аппаратов, долговременных спутниковых группировок, а также необслуживаемых систем в безлюдных технологиях [16-18]. В таких системах потоки отказов часто не являются пуассоновскими, когда прямое использование аппарата уравнений Колмогорова становится невозможным. Преобразование реального потока в эквивалентный простейший с интенсивностью, рассчитанной методом моментов,

позволяет использовать хорошо разработанный математический аппарат для марковских процессов.

Полученные квазистационарные (13, 14) и нестационарные (17, 18) решения для вероятностей состояний системы являются аналитической основой для построения функций надежности. В частности, вероятность безотказной работы $p_0(t)$ напрямую связана с непараметрической оценкой функции выживаемости $S(t)$ в модели Каплана-Мейера, широко используемой для анализа цензурированных данных о наработке на отказ в космической технике [19-20]. Если в модели Каплана-Мейера $S(t)$ строится эмпирически по данным наблюдений, то предложенный метод позволяет получить ее аналитический аналог $p_0(t)$ на основе априорных данных о распределении наработки между отказами, что особенно ценно на этапе проектирования, когда статистика отказов отсутствует или крайне мала [21-26].

Таким образом, преобразование потока Пальма в простейший служит связующим звеном между теоретическим вероятностным моделированием и практическими статистическими методами оценки надежности космических систем, такими как модель Каплана-Мейера и Марковские процессы.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликтов интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflicts of interest.

Список источников

1. Вентцель Е.С. Исследование операций. – М.: Советское радио, 1972. – 552 с.
2. Рыков В.В. Модели надежности на основе распределения Вейбулла. – М.: МГТУ им. Баумана, 2019. – 210 с.
3. Баранов Л.А., Ермолин Ю.А. Надежность объектов с нестационарной интенсивностью отказов // Надежность. 2017. Т. 17, № 4. С. 3-9. DOI: 10.21683/1729-2646-2017-17-4-3-9.

4. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория вероятностей и ее инженерные приложения. – М.: Высшая школа, 2020. – 480 с.
5. Абрамов П.Б., Десятирикова Е.Н., Чурсин М.А. Марковские модели стационарного режима немарковских процессов. Математические методы системного анализа и управления. – Вестник ВГУ, Серия: Системный анализ и информационные технологии, 2015, №3. – с.5-10.
6. Rykov V.V., Kozyrev D.V. Analysis of Renewable Reliability Systems by Markovization Method // Analytical and Computational Methods in Probability Theory. ACMPT 2017. Lecture Notes in Computer Science(). – Cham: Springer, 2017. Vol. 10684. P. 243-256. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-71504-9_19
7. Гнеденко Б.В., Беляев Ю.К., Соловьев А.Д. Математические методы в теории надежности. – М.: Ленанд, 2019. – 567 с.
8. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Прикладные задачи теории вероятностей. – М.: Радио и связь, 1983. – 416 с.
9. Efrosinin D., Rykov V., Vishnevskiy V. Sensitivity of reliability models to the shape of life and repair time distributions // 2014 9th International Conference on Availability, Reliability and Security (ARES). 2014. P. 430-437. DOI: <https://doi.org/10.1109/ARES.2014.65>
10. Боровков А.И., Мамчиц Д.В., Немов А.С., Новокшенов А.Д. Задачи моделирования и оптимизации панелей переменной жесткости и конструкций из слоистых композитов // Известия Российской академии наук. Механика твердого тела. - 2018. - № 1. - С. 113-122.
11. Дорожко И.В., Мусиенко А.С. Модель мониторинга технического состояния сложных устройств с применением искусственного интеллекта // Труды МАИ. 2024. № 137. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=181885>
12. Дорожко И.В., Осипов Н.А., Иванов О.А. Прогнозирование технического состояния сложных технических систем с помощью метода Берга и байесовских сетей // Труды МАИ. 2020. № 113. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=118181>

13. Асаад А., Сериков С.А. Применение рекуррентных нейронных сетей для повышения точности навигационных систем подвижных объектов // Труды МАИ. 2025. № 141. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=184508>
14. Омельченко А.В., Петров С.Н. Применение распределения Вейбулла для оценки ресурса авиационных двигателей // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2021. № 3. С. 45–52.
15. Смирнов И.П. Анализ надежности технических систем с использованием распределения Вейбулла // Автоматика и телемеханика. 2022. № 5. С. 78–89.
16. Айвазян С.А. Прикладная статистика: Основы моделирования и первичная обработка данных. – М.: Финансы и статистика, 1983. – 471 с.
17. Козырев Д.В., Рыков В.В. Методы марковизации в теории массового обслуживания: учеб. пособие. – М.: ИНФРА-М, 2020. – 223 с.
18. ГОСТ Р 27.003-2021 Надежность в технике. Термины и определения. — М.: Стандартиформ, 2021.
19. Коваленко И.Н. Исследования по анализу надежности сложных систем. – Киев: Научная думка, 1975. – 210 с.
20. Nefedov Y., Griбанov D., Gasimov E., Peskov D., Гао Хань, Vostrikov N., Pashayeva S. Development of Achimov deposits sedimentation model of one of the West Siberian oil and gas // Reliability: Theory & Applications. 2023. Vol. 18, No. 5. P. 441-448.
21. Рыков В.В. Основы теории массового обслуживания (Основной курс: марковские модели, методы марковизации): учебное пособие / В.В. Рыков, Д.В. Козырев. – М.: ИНФРА-М, 2019. – 223 с.
22. Rykov V., Kozyrev D., Zaripova E. Modeling and simulation of reliability function of a homogeneous hot double redundant repairable system // Proceedings of the European Council for Modeling and Simulation, ECMS 2017. 2017. DOI: <https://doi.org/10.7148/2017-0701>
23. Ефименко С.В., Гаранин Д.А., Гаранин Е.Д. Адаптация фильтра Калмана для расширения возможностей контроля сложных систем // Труды МАИ. 2025. № 144. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=186319>

24. Cattivelli F.S., Sayed A.H. Diffusion Strategies for Distributed Kalman Filtering and Smoothing // IEEE Transactions on Automatic Control. 2010. Vol. 55, No. 9. P. 2069-2084. DOI: <https://doi.org/10.1109/TAC.2010.2042987>
25. Sun M., Davies M.E., Proudler I.K., Hopgood J.R. Adaptive Kernel Kalman Filter // IEEE Transactions on Signal Processing. 2023. Vol. 71. P. 713-726. DOI: <https://doi.org/10.1109/TSP.2023.3250829>
26. Zhang Q., Zhao L., Zhao L., Zhou J. An Improved Robust Adaptive Kalman Filter for GNSS Precise Point Positioning // IEEE Sensors Journal. 2018. Vol. 18, No. 10. P. 4176-4186. DOI: <https://doi.org/10.1109/JSEN.2018.2820097>

References

1. Ventzel E.S. Operations research. Moscow: Sovetskoe Radio, 1972. 552 p. (In Russ.)
2. Rykov, V.V. Reliability Models Based on the Weibull Distribution. Moscow: Bauman Moscow State Technical University, 2019. 210 p. (In Russ.)
3. Baranov L.A., Yermolin Yu. A. Reliability of facilities with non-stationary failure rates. Dependability. 2017; 17(4): 3-9. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2017-17-4-3-9>. (In Russ.)
4. Ventzel E.S., Ovcharov L.A. Probability theory and its engineering applications. Moscow: Higher School, 2020. 480 p. (In Russ.)
5. Abramov P.B., Desyatirikova E.N., Chursin M.A. Markov models of stationary regime of non-Markov processes. Mathematical methods of system analysis and management. – VSU Bulletin, Series: System Analysis and Information Technologies, 2015, No. 3. – pp. 5-10. (In Russ.)
6. Rykov V.V., Kozyrev D.V. Analysis of Renewable Reliability Systems by Markovization Method // Analytical and Computational Methods in Probability Theory. ACMPT 2017. Lecture Notes in Computer Science. – Cham: Springer, 2017. Vol. 10684. P. 243-256. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-71504-9_19
7. Gnedenko B.V., Belyaev Yu.K., Solovyov A.D. Mathematical Methods in Reliability Theory. Moscow: Nauka, 2020. 567 p. (In Russ.)

8. Ventzel E.S., Ovcharov L.A. Applied problems of probability theory. Moscow: Radio and Communications, 1983. 416 p. (In Russ.)
9. Efrosinin D., Rykov V., Vishnevskiy V. Sensitivity of reliability models to the shape of life and repair time distributions // 2014 9th International Conference on Availability, Reliability and Security (ARES). 2014. P. 430-437. DOI: <https://doi.org/10.1109/ARES.2014.65>
10. Borovkov A.I., Mamchits D.V., Nemov A.S., Novokshenov A.D. Problems of modeling and optimization of variable stiffness panels and structures made of layered composites // Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Solid-state mechanics. - 2018. - No. 1. - pp. 113-122. (In Russ.)
11. Dorozhko I.V., Musienko A.S. Model of Monitoring the Technical Condition of Complex Devices Using Artificial Intelligence // Proceedings of the Moscow Aviation Institute. 2024. No. 137. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=181885>. (In Russ.)
12. Dorozhko I.V., Osipov N.A., Ivanov O.A. Predicting the Technical Condition of Complex Technical Systems Using the Berg Method and Bayesian Networks // Proceedings of the Moscow Aviation Institute. 2020. No. 113. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=118181>. (In Russ.)
13. Assad A., Serikov S.A. Application of Recurrent Neural Networks to Improve the Accuracy of Mobile Object Navigation Systems // Proceedings of the Moscow Aviation Institute. 2025. No. 141. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=184508>. (In Russ.)
14. Omelchenko A.V., Petrov S.N. Application of the Weibull Distribution for Estimating the Resource of Aircraft Engines // Problems of Mechanical Engineering and Machine Reliability. 2021. No. 3. Pp. 45–52. (In Russ.)
15. Smirnov I.P. Analysis of the Reliability of Technical Systems Using the Weibull Distribution // Automation and Remote Control. 2022. No. 5. Pp. 78–89. (In Russ.)
16. Ayvazyan S.A. Applied statistics: Fundamentals of modeling and primary data processing. Moscow: Finance and Statistics, 1983. 471 p. (In Russ.)
17. Kozyrev D.V., Rykov V.V. Markovization methods in queuing theory: textbook. The manual. Moscow: INFRA-M, 2020. 223 p. (In Russ.)
18. GOST R 27.003-2021 Reliability in Engineering. Terms and Definitions. — Moscow: Standartinform, 2021.

19. Kovalenko I.N. Investigations on analysis of complex systems reliability. – Kiev: Naukova Dumka, 1975. – 210 p. (In Russ.).
20. Nefedov Y., Griбанov D., Gasimov E., Peskov D., Гао Хань, Vostrikov N., Pashayeva S. Development of Achimov deposits sedimentation model of one of the West Siberian oil and gas // Reliability: Theory & Applications. 2023. Vol. 18, No. 5. P. 441-448.
21. Rykov V.V. Fundamentals of queuing theory (Basic course: Markov models, Markovization methods): textbook / V.V. Rykov, D.V. Kozyrev. Moscow: INFRA-M, 2019. 223 p. (In Russ.).
22. Rykov V., Kozyrev D., Zaripova E. Modeling and simulation of reliability function of a homogeneous hot double redundant repairable system // Proceedings of the European Council for Modeling and Simulation, ECMS 2017. 2017. DOI: <https://doi.org/10.7148/2017-0701>
23. Efimenko S.V., Garanin D.A., Garanin E.D. Adaptation of the Kalman filter to expand the control capabilities of complex systems // Proceedings of MAY 2025, No. 144. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=186319> (In Russ.)
24. Cattivelli F.S., Sayed A.H. Diffusion Strategies for Distributed Kalman Filtering and Smoothing // IEEE Transactions on Automatic Control. 2010. Vol. 55, No. 9. P. 2069-2084. DOI: <https://doi.org/10.1109/TAC.2010.2042987>
25. Sun M., Davies M.E., Proudler I.K., Hopgood J.R. Adaptive Kernel Kalman Filter // IEEE Transactions on Signal Processing. 2023. Vol. 71. P. 713-726. DOI: <https://doi.org/10.1109/TSP.2023.3250829>
26. Zhang Q., Zhao L., Zhao L., Zhou J. An Improved Robust Adaptive Kalman Filter for GNSS Precise Point Positioning // IEEE Sensors Journal. 2018. Vol. 18, No. 10. P. 4176-4186. DOI: <https://doi.org/10.1109/JSEN.2018.2820097>

Информация об авторах

Воловик Александр Васильевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, ведущий инженер-конструктор АО «ОДК-Климов», Санкт-Петербург, Россия; e-mail: volovik_aleksandr@mail.ru

Клавдиев Александр Александрович, кандидат технических наук, доцент, ИП Клавдиев Александр Александрович, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: kss1959@mail.ru

Ефименко Сергей Владимирович, аспирант, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: falcon.sergey@yandex.ru

Гаранин Дмитрий Анатольевич, кандидат экономических наук, доцент, доцент высшей школы промышленного менеджмента (ИПМЭиТ), Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: garanin@spbstu.ru, тел: + 7 (911) 924-09-55

Information about the authors

Alexander V. Volovik, Associate Professor, Senior Researcher, Leading Design Engineer, OAK Klimov, St. Petersburg, Russia, e-mail: volovik_aleksandr@mail.ru

Alexander A. Klavdiev, Associate Professor, IP Klavdiev A.A., St. Petersburg, Russia, e-mail: kss1959@mail.ru

Sergey V. Efimenko, Postgraduate Student, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia, e-mail: falcon.sergey@yandex.ru

Dmitry A. Garanin, Associate Professor, Associate Professor of the Higher School of Industrial Management (IIMET), Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia, e-mail: garanin@spbstu.ru, tel: + 7 (911) 924-09-55

Получено 10 октября 2025 ● Принято к публикации 26 января 2026 ● Опубликовано 27 февраля 2026

Received 10 October 2025 ● Accepted 17 January 2026 ● Published 27 February 2026
