

DOI: 10.12731/3033-5965-2025-15-3-374

EDN: WMTHFY

УДК 621.396.6.07.019.3



Научная статья |

Системный анализ, управление и обработка информации, статистика

РАСЧЕТ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ В УСЛОВИЯХ ИНТЕРВАЛЬНОЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

П.В. Калашиников

Аннотация

Обоснование. В приведенном исследовании рассматриваются ключевые вопросы, связанные с оценкой значений параметров функциональной надежности информационной системы в условиях неопределенности и неполноты информации.

Целью исследования является разработка эффективных методов оценки значений параметров функциональной надежности информационной системы в условиях интервальной неопределенности обеспечивающих ее стабильное функционирование.

Материалы и методы. Расчет значений параметров надежности информационной системы проводится на основе методов интервального анализа и основных инструментов обработки данных в случае рассматриваемого типа неопределенности.

Научная новизна. В проведенном исследовании основные подходы к расчету параметров функциональной надежности информационной системы рассматриваются в контексте неопределенности, описываемой на основе интервальных данных, что позволяет давать более корректные оценки и учитывать имеющие место на практике погрешности.

Результаты. Предложенный в статье подход имеет большую теоретическую и практическую значимость и выступает в качестве базового инструмента расчета параметров функциональной надежности

информационной системы в условиях интервальной неопределенности, позволяющей учитывать факторы погрешности и определять допустимые интервалы отклонения параметров от расчетных номинальных значений.

Ключевые слова: информационная система; статистика интервальных данных; показатели функциональной надежности

Для цитирования. Калашников, П. В. (2025). Расчет показателей надежности информационной системы в условиях интервальной неопределенности. *Transportation and Information Technologies in Russia*, 15(3), 108–124. <https://doi.org/10.12731/3033-5965-2025-15-3-374>

Original article | System Analysis, Management and Information Processing, Statistics

CALCULATION OF RELIABILITY INDICATORS OF AN INFORMATION SYSTEM UNDER CONDITIONS OF INTERVAL UNCERTAINTY

P.V. Kalashnikov

Abstract

Background. The presented study covers key issues related to the assessment of the values of the parameters of functional reliability of an information system under conditions of uncertainty and incomplete information.

The aim of the study is to develop effective methods for assessing the values of the parameters of functional reliability of an information system under conditions of interval uncertainty, ensuring its stable operation.

Materials and methods. The calculation of the values of the reliability parameters of the information system is carried out on the basis of interval analysis methods and basic data processing tools in the case of the type of uncertainty under consideration.

Scientific novelty. In the conducted study, the main approaches to calculating the parameters of functional reliability of an information system

are considered in the context of uncertainty described on the basis of interval data, which allows for more accurate assessments and taking into account errors that occur in practice.

Results. The approach proposed in the article has great theoretical and practical significance and serves as a basic tool for calculating the parameters of functional reliability of an information system under conditions of interval uncertainty, allowing one to take into account error factors and determine the permissible intervals of deviation of parameters from the calculated nominal values.

Keywords: information system; interval data statistics; functional reliability indicators

For citation. Kalashnikov, P. V. (2025). Calculation of reliability indicators of an information system under conditions of interval uncertainty. *Transportation and Information Technologies in Russia*, 15(3), 108–124. <https://doi.org/10.12731/3033-5965-2025-15-3-374>

Введение

Информационные системы представляют собой неотъемлемую часть жизни современного общества. Применение данного класса систем в эпоху всеобщей цифровизации особенно актуально и находит свое применение в множестве отраслей производства, транспорта, здравоохранения и других. Обеспечение надежного функционирования данного класса систем является гарантом стабильного развития общества и государства. В работах [1-7] раскрыты основные аспекты описанной выше проблематики.

Решение задачи обеспечения стабильного функционирования информационной системы напрямую сопряжена с необходимостью расчета показателей ее функциональной надежности.

В работе [8] показано, что применение классической теории надежности в контексте информационных систем сталкивается с следующими ключевыми проблемами: сложность декомпозиции рассматриваемого класса систем на составные функциональные части, очень высокая скорость принятия решений, а также боль-

шое количество потенциальных ошибок, возникающих в ходе работы аппаратного и программного обеспечения.

Особую актуальность изложенные выше проблемы принимают в случае неопределенности и неполноты информации, присущей рассматриваемому классу систем. В работе [8] ставилась общая задача обеспечения надежного функционирования информационной системы в условиях интервальной неопределенности, однако конкретные подходы, методы и алгоритмы расчета параметров функционирования рассматриваемого класса систем не приводились.

Цель настоящего исследования – разработка эффективных методов расчета параметров функциональной надежности информационных систем в условиях интервального типа неопределенности, имеющего место при описании погрешностей и допустимых интервалов отклонения значений параметров рассматриваемого класса систем от расчетных номинальных значений.

Задачи проводимого исследования состоят в описании основных подходов к решению задачи расчета значений параметров функциональной надежности информационных систем, а также построении математической модели, позволяющей адекватным образом учитывать фактор неопределенности в входных данных и давать оценки границ интервалов допустимого изменения значений ее параметров.

Основные подходы к расчету показателей надежности информационных систем

В работах [9-15] описаны основные подходы к расчету значений параметров надежности информационных систем. Однако описываемые в научной литературе подходы характеризуются большой степенью разобщенности и отсутствием единообразия в вопросе типизации и алгоритмов расчета параметров рассматриваемого класса систем, что в свою очередь обусловлено их широким спектром разнообразия, множеством выполняемых функций, а также неоднозначностью получаемых результатов.

Обозначенный выше факт в свою очередь приводит к необходимости разработки единого подхода к типизации параметров функциональной надежности информационных систем, а также алгоритмов их расчета. Базовыми критериями, составляющими основу описанного выше единого подхода являются следующие: измеримость, логическая непротиворечивость, эмпирическая верификация значений рассчитанных параметров информационной системы. Также создаваемая единая типология должна быть простой, понятной и гибкой, чтобы отражать возможные изменения в характеристиках функционального взаимодействия различных составных частей информационной системы, которые возникают в процессе ее реконфигурации в условиях неопределенности.

Как правило, при реальном функционировании информационных систем значения их параметров точно не известны и входные данные достаточно часто содержат погрешности. В связи с этим обстоятельством вместо точечных операций над значениями параметров информационной системы в дальнейшем предполагается использование их интервальных аналогов. Основные подходы к анализу данных интервального типа и математических операциях с ними описаны в работах [16-18].

При построении системы расчета показателей надежности информационной системы используются следующие основные принципы.

Во-первых, в создаваемой системе расчета показателей алгоритм расчета показателя должен соответствовать алгоритму работы системы.

Во-вторых, процесс расчета показателей имеет многошаговую иерархическую структуру, в которой на каждом этапе происходит выполнение своей части вычислений, соответствующих заданным функциональным структурам системы.

Пусть в информационной системе действует m независимых информационных процессов на уровне иерархии номер j . Тогда связь значений параметра процесса № k на $j+1$ уровне иерархии

можно описать в виде интервалозначного соотношения связи f следующего вида

$$a_{j+1}^k = f(a_j^1, \dots, a_j^m) \quad (1)$$

где

$a_j^k \in [a_j^k, \overline{a_j^k}]$ – допустимый интервал изменения значений для параметров процесса № k , $k = \overline{1, \dots, m}$.

В-третьих, пространство состояний рассматриваемой информационной системы соответствует множеству событий в ней. Под множеством событий понимаются имеющие место случаи корректного выполнения информационного процесса или случаи возникновения ошибок. Пространство состояний информационной системы – множество всех возможных состояний, которые могут иметь место в ходе выполнения информационных процессов в системе.

В-четвертых, исходная информационная система представляется в виде совокупности взаимосвязанных между собой функциональных структур и частей.

Под функциональной частью информационной системы понимается какой-либо материальный объект, выполняющий конкретное функциональное назначение.

Под функциональной структурой в дальнейшем, если не оговорено противное, будем понимать совокупность функциональных частей, связанных общим алгоритмом функционирования какого-либо информационного процесса.

Обозначим M – множество функциональных частей информационной системы S . Множество M содержит N элементов. Функциональная структура F_i создается как комбинация конечного элементов множества M , связанных единым алгоритмом функционирования. При этом некоторые элементы функциональных частей могут задействоваться для обеспечения работы сразу нескольких функциональных структур, а какие-то нет.

Рассмотрим основные показатели надежности информационной системы используемые при расчетах.

Степень возможности корректного выполнения информационного процесса $P_{norm} \in [P_{norm}, \overline{P_{norm}}]$.

Степень возможности возникновения ошибки при выполнении информационного процесса $P_{err} \in [P_{err}, \overline{P_{err}}]$.

Расчет показателей P_{norm} и P_{err} производится на основе принципа иерархичности расчета показателей надежности информационной системы.

К числу важных показателей, используемых при анализе надежности работы информационной системы можно отнести общее время простоя системы при обработке процесса № i $T_{i,stop} \in [T_{i,stop}, \overline{T_{i,stop}}]$.

При расчете времени простоя системы будем учитывать следующие факторы.

$T_{i,q} \in [T_{i,q}, \overline{T_{i,q}}]$ – интервал допустимой задержки в очереди при обслуживании информационного процесса № i ;

$T_{i,err} \in [T_{i,err}, \overline{T_{i,err}}]$ – допустимый интервал обнаружения ошибки при обслуживании информационного процесса № i ;

$T_{i,r} \in [T_{i,r}, \overline{T_{i,r}}]$ – допустимый интервал времени устранения ошибки и возобновления работы при обслуживании информационного процесса № i ;

$T_{i,c} \in [T_{i,c}, \overline{T_{i,c}}]$ – допустимый интервал времени контроля корректности выполнения информационного процесса № i ;

Общее время простоя системы при выполнении информационного процесса номер i задается в виде формулы

$$T_{i,stop} = T_{i,q} + T_{i,err} + T_{i,r} + T_{i,c} \quad (2)$$

Проблему обеспечения надежного функционирования информационной системы можно рассмотреть как задачу массового обслуживания, в которой заявки на обслуживание процессов образуют очередь. Обслуживание заявок производится исходя из приоритетов, назначенных процессам.

Ключевым фактором влияющим на надежность работы информационной системы является время выполнения информационных процессов. Чем оно меньше, тем большее количество процессов

может быть обслужено. При этом время загрузки каналов передачи информации уменьшается. Однако увеличение скорости обработки заявок может послужить фактором, влияющим на возникновение ошибок в системе.

Постановка общей задачи расчета показателей надежности информационной системы в условиях интервальной неопределенности

Для постановки общей задачи расчета показателей функциональной надежности информационной системы в условиях интервальной неопределенности введем следующие обозначения

$G_i(t)$ – интервальная функция распределения времени между заявками,

$i = \overline{1, L}$, L – общее количество заявок в системе;

$H_i(t)$ – интервальная функция времени выполнения информационного процесса $i = \overline{1, L}$;

$P_{i,err} \in [\underline{P}_{i,err}, \overline{P}_{i,err}]$ – степень возможности возникновения ошибки при выполнении информационного процесса № i , $i = \overline{1, L}$;

$w_{i,err} \in [\underline{w}_{i,err}, \overline{w}_{i,err}]$ – приоритет в очереди выполнения информационного процесса № i , $i = \overline{1, L}$;

Q – минимальное количество процессов, которые выполняются без ошибок.

Необходимо определить правила расчета показателей надежности информационной системы, обеспечивающие ее стабильное функционирование на всем горизонте планирования.

Решение задачи расчета параметров функциональной надежности информационной системы находит свое важное практическое применение при исследовании помехоустойчивости интегральных схем. Быстродействие работы такой схемы возрастает при уменьшении величины логического перепада.

Входящие сигналы представляют собой комбинацию эффективного сигнала и помехи. Помехи могут быть аддитивно пересчитаны и учтены при анализе надежности работы рассматриваемой схемы.

Введем обозначения

d_1 – пороговое значение сигнала при переходе 1→0

d_0 – пороговое значение сигнала при переходе 0→1

Δd – ширина интервала изменения рассматриваемого показателя

$$\Delta = |d_1 - d_0| \quad (3)$$

d_m – середина интервала изменения рассматриваемого показателя

$$d_m = \frac{d_1 + d_0}{2} \quad (4)$$

Рассмотрим следующий пример, поясняющий введенные выше обозначения.

Для нормальных условий функционирования интегральной схемы передаточная характеристика нормируемая по уровню «1» может быть оценена следующим образом $d_m = 0,375$, $\frac{\Delta d}{2} = 0,05$.

Левая граница интервала значений для передаточной характеристики определяется на основе соотношения

$$d_0 = d_m - \frac{\Delta d}{2} = 0,375 - 0,05 = 0,325 \quad (5)$$

Правая граница интервала значений для передаточной характеристики определяется на основе соотношения

$$d_1 = d_m + \frac{\Delta d}{2} = 0,375 + 0,05 = 0,425 \quad (6)$$

Интервал допустимых значений результирующего параметра передаточной характеристики имеет вид $[d_0, d_1] = [0,325; 0,425]$

Увеличение ширины интервала $[d_0, d_1]$ при заданной неизменной величине логического перепада схемы способствует снижению ее помехозащищенности.

Также при расчете параметров функциональной надежности информационных систем важную роль занимает моделирование их функциональных структур.

Постановка общей задачи моделирования функциональных структур информационной системы

Под функциональной структурой понимается материальная реализация какого-либо процесса путем связки составных частей информационной системы в единое целое общим алгоритмом работы.

При построении математической модели, описывающий процесс работы функциональных структур и позволяющей произвести оценку их надежности используются взвешенные ориентированные графы $G(V, X)$, чтобы отобразить множество допустимых комбинаций различных частей системы, связанных единым алгоритмом функционирования.

Элементы множества $V = \{v_1, \dots, v_n\}$ соответствуют элементам информационной системы. Элементы множества V делят на входные и выходные. Под входной вершиной будем понимать вершину, из которой выходит только одна дуга. Под выходной вершиной понимается такая вершина, из которой нет исходящих дуг.

Множество $X = \{x_1, \dots, x_n\}$ – множество дуг ориентированного графа, каждой из которой присвоен вес $w_{ij} \in [w_{ij}^{\cdot}, \overline{w_{ij}}]$, $i, j = \overline{1, n}$. Вес дуги интерпретируется как приоритет информационного процесса, который с ней ассоциирован.

Создаваемый на основе вышеизложенного граф G применяется для оценки надежности работы соответствующей функциональной структуры на основе математического аппарата статистики интервальных данных.

Маршруты в данном графе G представляют собой возможные варианты реализации функциональных структур, каждый из которых может быть выбран с определенной степенью достоверности.

Рассматриваемый граф при проведении расчетов рекомендуется привести к ациклическому виду. Поиск контуров в графе осуществляется методом обхода в глубину. При этом дуги добавляются в строящийся маршрут до тех пор, пока не образуется контур.

Важное значение при решении задачи обеспечения надежного функционирования информационной системы имеет прогнозирование возникновения ошибок в работе ее составных аппаратных компонентов и реализация комплекса профилактических мероприятий, направленного на минимизацию ущерба от их возникновения.

Прогнозирование ошибок при работе основных аппаратных компонентов информационной системы

Введем следующие обозначения.

$p_{qi} \in [p_{qi}, \overline{p_{qi}}]$ – степень возможности штатной отработки компонента информационной системы № i в интервале времени $[\underline{t}_i, \overline{t}_i]$;

$p_{qi} \in [p_{qi}, \overline{p_{qi}}]$ – степень возможности возникновения ошибки при работе компонента информационной системы № i ; в интервале времени $[\underline{t}_i, \overline{t}_i]$;

$T_{vi} \in [T_{mi}, \overline{T_{mi}}]$ – время доработки до отказа компонента информационной системы № i ;

$\mu_i \in [\underline{\mu}_i, \overline{\mu}_i]$ – интенсивность отказа компонента информационной системы № i .

В введенных обозначениях границы интервала времени доработки до отказа можно представить в виде соотношения

$$[\underline{T_{mi}}, \overline{T_{mi}}] = \left[\frac{\overline{t}-t}{p_{qi}}, \frac{\overline{t}-\underline{t}}{p_{qi}} \right] \quad (7)$$

Для границ интервала интенсивность отказа можно привести следующие оценки

$$[\underline{\mu}_i, \overline{\mu}_i] = \left[\frac{p_{qi}}{\overline{t}-t}, \frac{p_{qi}}{\underline{t}-t} \right] \quad (8)$$

Для оценки успешности работы в целом $P_{suc} \in [P_{suc}, \overline{P_{suc}}]$ информационной системы, состоящей из D компонентов имеет место соотношение

$$\overline{P_{suc}} = \prod_{i=1}^D \overline{p_{ri}}, \quad \underline{P_{suc}} = \prod_{i=1}^D p_{ri} \quad (9)$$

В случае реализации циклической схемы работы аппаратуры верхняя $\overline{T_c}$ и нижняя $\underline{T_c}$ граница интервала времени работы системы вычисляется по формуле

$$\overline{T_c} = \prod_{i=1}^D \overline{t}_i, \quad \underline{T_c} = \prod_{i=1}^D \underline{t}_i, \quad (10)$$

Верхняя $\overline{T_{suc,i}}$ и нижняя $\underline{T_{suc,i}}$ границы интервала времени наработки до отказа компонента информационной системы № i , задается соотношением

$$\begin{aligned} \overline{T_{suc,i}} &= \frac{\overline{t_i - t_i}}{1 - \prod_{i=1}^D \overline{p_{ri}}}, \\ \overline{T_{muc,i}} &= \frac{\overline{t_i - t_i}}{1 - \prod_{i=1}^D \overline{p_{ri}}}, \end{aligned} \quad (11)$$

В случае, когда время задержки компонентов электронной схемы принимают значение на одном и том же интервале $[\underline{t}, \overline{t}] = [t_i, \overline{t_i}]$, $i=1, \dots, D$.

Интервал допустимого отклонения степени возможности стабильной работы системы в целом имеет вид $[\underline{p_{\text{ыгс}}}, \overline{p_{\text{ыгс}}}] = [\underline{p_r}, \overline{p_r}]^D$.

Данная формула позволяет оценить верхнюю $\overline{p_{\text{ыгс}}}$ и нижнюю $\underline{p_{\text{ыгс}}}$ границы интервала степени возможности стабильной работы информационной системы для рассматриваемого горизонта планирования.

Заключение

В ходе проведенного исследования были рассмотрены основные подходы к расчету параметров функциональной надежности информационных систем. Проведенный анализ показал, что на данный момент в научной литературе существует множество разнонаправленных подходов к методологии расчета параметров надежности информационных систем причем данные подходы нередко противоречат друг другу. Наряду с вышеизложенным в научной литературе отсутствуют детальное описание возможности использования аппарата интервального анализа для учета погрешностей, имеющий место при расчете параметров функциональной надежности информационных систем.

Выполненное исследование ставило своей основной целью разработку унифицированного подхода к построению методологического базиса для расчета параметров надежности информационных систем. Были описаны основные критерии, которым должна удовлетворять система базовых параметров надежности сложной информационной системы, таких измеримость, экспериментальная верификация, а также гибкость рассматриваемой системы по отношению к добавлению новых параметров.

Наряду с вышеизложенным построенная математическая модель расчета параметров функциональной надежности информационной системы позволяет производить учет фактора неопределенности и погрешностей в исходных данных на основе методов статистики интервальных данных. Такой подход также отличает проведенное исследования от ранее описанных в научной литературе.

К перспективным направлениям данного исследования можно отнести задачу расчета параметров надежности критически важных информационных систем, а также оценку стабильности работы программного обеспечения.

Информация о спонсорстве. Работа выполнена в рамках государственного задания ИАПУ ДВО РАН (тема № FWW-2021-0003).

Список литературы

1. Острейковский, В. А. (2015). *Теория техногенного риска: математические методы и модели* [монография]. Сургут: КЦ СурГУ.
2. Острейковский, В. А. (2013). Количественная оценка риска в теории техногенной безопасности сложных динамических систем. В *Итоги науки. Т. 1. Избранные труды международного симпозиума по фундаментальным и прикладным проблемам науки* (гл. 2, с. 12–31). Москва: РАН.
3. Муравьев, И. И., Острейковский, В. А., & Шевченко, Е. Н. (2015). Модели оценки фактора времени в теории техногенного риска динамических систем. *Труды Международного симпозиума «Надежность и качество», 1*, 24–27. EDN: <https://elibrary.ru/UCGXTJ>
4. Королев, В. Ю. (2007). *Математические основы теории риска* [учебное пособие]. Москва: ФИЗМАТЛИТ.
5. Острейковский, В. А. (2013). О некоторых классах моделей риска в теории техногенной безопасности. В Н. К. Юрков (Ред.), *Надежность и качество. Труды Международного симпозиума* (Т. 1, с. 46–49). Пенза: Изд-во ПГУ. EDN: <https://elibrary.ru/RXEVLD>

6. Калашников, П. В. (2022). Математическая модель управления рисками, возникающими при функционировании сложных технических систем ответственного назначения в условиях неопределённости информации о значениях параметров и фазовом состоянии. *Transportation and Information Technologies in Russia*, 12(3), 22–39. <https://doi.org/10.12731/2227-930X-2022-12-3-22-39>. EDN: <https://elibrary.ru/QZGLRA>
7. Калашников, П. В. (2023). Применение сценарного подхода к анализу и управлению рисками при функционировании сложных динамических систем в условиях интервальной неопределённости. *Transportation and Information Technologies in Russia*, 13(3), 224–236. <https://doi.org/10.12731/2227-930X-2023-13-3-224-236>. EDN: <https://elibrary.ru/FEVMQD>
8. Калашников, П. В. (2024). К проблеме управления надёжностью информационной системы в условиях интервальной неопределённости. *Transportation and Information Technologies in Russia*, 14(3), 62–76. <https://doi.org/10.12731/2227-930X-2024-14-3-304>. EDN: <https://elibrary.ru/IKHVJI>
9. Наумов, Ю. Е., Аваев, Н. А., & Бедрековский, М. А. (1975). *Помехоустойчивость устройств на интегральных логических схемах*. Москва: Сов. радио.
10. Коваленко, О. В., & Петрик, С. В. (2010). *Вероятностный анализ безопасности сложных систем «человек-машина»*. Сарово: РФЯЦ-ВНИИЭФ.
11. Wang, Y. (2014). Budget-driven scheduling algorithms for batches of Map Reduce jobs in heterogeneous clouds. *Transactions on Cloud Computing*, 2(3), 306–319.
12. Berkhin, P., Kogan, J., Nicholas, C., & Teboulle, M. (2006). Survey of clustering data mining techniques. В *Grouping Multidimensional Data: Recent Advances in Clustering* (с. 25–71). Berlin: Springer.
13. Hoehle, H., Scornavacca, E., & Huff, S. (2012). Three decades of research on consumer adoption and utilization of electronic banking channels: A literature analysis. *Decision Support Systems*, 54(1), 122–132.

14. Hutchinson, D., & Warren, M. (2003). Security for internet banking: A framework. *Logistics Information Management*, 16(1), 64–73. <https://doi.org/10.1108/09576050310453750>. EDN: <https://elibrary.ru/EARZXX>
15. Jain, A. K., Murty, M. N., & Flynn, P. J. (1999). Data clustering: A review. *ACM Computing Surveys*, 31(3), 264–323.
16. Шарый, С. П. (2018). *Конечномерный интервальный анализ*. Новосибирск: XYZ. 623 с.
17. Добровец, Б. С. (2004). *Интервальная математика*. Красноярск: Издательский центр Красноярского государственного университета. 219 с.
18. Шарый, С. П. (2024). *Обработка и анализ интервальных данных*. Москва; Ижевск: Институт компьютерных исследований. 356 с.

References

1. Ostreykovsky, V. A. (2015). *Theory of technogenic risk: Mathematical methods and models* [Monograph]. Surgut: Publishing Center of Surgut State University.
2. Ostreykovsky, V. A. (2013). Quantitative assessment of risk in the theory of technogenic safety of complex dynamic systems. In *Results of Science. Vol. 1. Selected works of the International Symposium on Fundamental and Applied Problems of Science* (Ch. 2, pp. 12–31). Moscow: Russian Academy of Sciences.
3. Muravyov, I. I., Ostreykovsky, V. A., & Shevchenko, E. N. (2015). Models for assessing the time factor in the theory of technogenic risk of dynamic systems. *Proceedings of the International Symposium “Reliability and Quality”*, 1, 24–27. EDN: <https://elibrary.ru/UCGXTJ>
4. Korolev, V. Yu. (2007). *Mathematical foundations of risk theory* [Textbook]. Moscow: FIZMATLIT.
5. Ostreykovsky, V. A. (2013). On some classes of risk models in the theory of technogenic safety. In N. K. Yurkov (Ed.), *Reliability and Quality. Proceedings of the International Symposium* (Vol. 1, pp. 46–49). Penza: Penza State University Publishing House. EDN: <https://elibrary.ru/RXEVLD>

6. Kalashnikov, P. V. (2022). Mathematical model for managing risks arising during the operation of complex technical systems for critical applications under conditions of uncertainty about parameter values and phase state. *Transportation and Information Technologies in Russia*, 12(3), 22–39. <https://doi.org/10.12731/2227-930X-2022-12-3-22-39>. EDN: <https://elibrary.ru/QZGLRA>
7. Kalashnikov, P. V. (2023). Applying a scenario-based approach to risk analysis and management during the operation of complex dynamic systems under interval uncertainty. *Transportation and Information Technologies in Russia*, 13(3), 224–236. <https://doi.org/10.12731/2227-930X-2023-13-3-224-236>. EDN: <https://elibrary.ru/FEVMQD>
8. Kalashnikov, P. V. (2024). On the problem of managing information system reliability under interval uncertainty. *Transportation and Information Technologies in Russia*, 14(3), 62–76. <https://doi.org/10.12731/2227-930X-2024-14-3-304>. EDN: <https://elibrary.ru/IKHVJI>
9. Naumov, Yu. E., Avaev, N. A., & Bedrekovsky, M. A. (1975). *Noise immunity of devices based on integrated logic circuits*. Moscow: Sovetskoye Radio.
10. Kovalenko, O. V., & Petrik, S. V. (2010). *Probabilistic safety analysis of complex “human-machine” systems*. Sarov: Russian Federal Nuclear Center — All-Russian Research Institute of Experimental Physics (RFNC-VNIIEF).
11. Wang, Y. (2014). Budget driven scheduling algorithms for batches of MapReduce jobs in heterogeneous clouds. *Transactions on Cloud Computing*, 2(3), 306–319.
12. Berkhin, P., Kogan, J., Nicholas, C., & Teboulle, M. (2006). Survey of clustering data mining techniques. In *Grouping Multidimensional Data: Recent Advances in Clustering* (pp. 25–71). Berlin: Springer.
13. Hoehle, H., Scornavacca, E., & Huff, S. (2012). Three decades of research on consumer adoption and utilization of electronic banking channels: A literature analysis. *Decision Support Systems*, 54(1), 122–132.
14. Hutchinson, D., & Warren, M. (2003). Security for internet bank-

- ing: A framework. *Logistics Information Management*, 16(1), 64–73.
<https://doi.org/10.1108/09576050310453750>. EDN: <https://elibrary.ru/EARZXX>
15. Jain, A. K., Murty, M. N., & Flynn, P. J. (1999). Data clustering: A review. *ACM Computing Surveys*, 31(3), 264–323.
 16. Shary, S. P. (2018). *Finite-dimensional interval analysis*. Novosibirsk: XYZ. 623 pp.
 17. Dobrovets, B. S. (2004). *Interval mathematics*. Krasnoyarsk: Publishing Center of Krasnoyarsk State University. 219 pp.
 18. Shary, S. P. (2024). *Processing and analysis of interval data*. Moscow; Izhevsk: Institute of Computer Research. 356 pp.

ДААННЫЕ ОБ АВТОРЕ

Калашников Павел Викторович, младший научный сотрудник
Федеральное государственное учреждение науки «Институт автоматизации и процессов управления Дальневосточного отделения Российской академии наук»; Владивостокский государственный университет
ул. Радио, 5, г. Владивосток, 690041, Российская Федерация;
ул. Гоголя, 41, г. Владивосток, 690014, Российская Федерация
kalashnikovpv@iacp.dvo.ru

DATA ABOUT THE AUTHOR

Pavel V. Kalashnikov, Junior Researcher
Institute of Automation and Control Processes of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences; Vladivostok State University
5, Radio Str., Vladivostok, 690041, Russian Federation; 41, Gogol Str., Vladivostok, 690014, Russian Federation
kalashnikovpv@iacp.dvo.ru

Поступила 25.07.2025

После рецензирования 15.08.2025

Принята 17.08.2025

Received 25.07.2025

Revised 15.08.2025

Accepted 17.08.2025