



**ПРОЕКТИРОВАНИЕ, КОНСТРУКЦИЯ И ПРОИЗВОДСТВО ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ/DESIGN,
CONSTRUCTION AND PRODUCTION OF AIRCRAFT**

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.167.25> EDN: FIFCP1**МНОГОКРИТЕРИАЛЬНЫЙ ХАРАКТЕР ОЦЕНКИ НАДЁЖНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ МНОГОРАЗОВЫХ
СИСТЕМ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ НА ЭТАПАХ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ОТРАБОТКИ**

Научная статья

Пронкин А.А.^{1,*}¹ ORCID : 0000-0001-9907-260X;¹ Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (pronkinalex[at]mail.ru)

Предложена: 10.02.2026; Принята: 01.04.2026; Опубликовано: 18.05.2026

Аннотация

В статье рассматривается проблема оценки надёжности элементов многоразовых систем ракетно-космической техники на этапах экспериментальной отработки. В условиях поэтапного накопления статистических данных и высокой стоимости испытаний, применение однокритериальных показателей является ограниченным. Установлено, что данные показатели изменяются несогласованно при вариации параметров экспериментальной отработки. Улучшение одного показателя сопровождается ухудшением или отсутствием улучшения других, что исключает возможность сведения оценки надёжности к одному обобщённому показателю. Целью работы является обоснование принципиально многокритериального характера оценки надёжности элементов многоразовых систем ракетно-космической техники и пояснение необходимости применения методов многокритериального анализа для совместного рассмотрения различных показателей надёжности.

Ключевые слова: многоразовые системы ракетно-космической техники, надёжность, экспериментальная отработка, показатели надёжности, конфликт критериев, однокритериальная оценка, многокритериальный анализ.

**THE MULTI-CRITERIA NATURE OF RELIABILITY EVALUATION OF REUSABLE ROCKET AND SPACE
EQUIPMENT SYSTEMS DURING THE EXPERIMENTAL TESTING PHASE**

Research article

Pronkin A.A.^{1,*}¹ ORCID : 0000-0001-9907-260X;¹ Moscow Aviation Institute, Moscow, Russian Federation

* Corresponding author (pronkinalex[at]mail.ru)

Suggested: 10.02.2026; Accepted: 01.04.2026; Published: 18.05.2026

Abstract

The article examines the problem of assessing the reliability of components in reusable rocket and space equipment systems during the experimental development phase. Given the gradual accumulation of statistical data and the high cost of testing, the use of single-criterion indicators is limited. It has been established that these indicators vary inconsistently with changes in the parameters of experimental testing. An improvement in one indicator is accompanied by a deterioration or lack of improvement in others, which precludes the possibility of reducing the reliability evaluation to a single generalised indicator. The aim of this work is to substantiate the fundamentally multi-criteria nature of reliability assessment for components of reusable rocket and space systems and to explain the necessity of applying multi-criteria analysis methods for the joint review of various reliability indicators.

Keywords: reusable rocket and space equipment systems, reliability, experimental testing, reliability indicators, conflicting criteria, single-criterion evaluation, multi-criteria analysis.

Введение

Повышение надёжности элементов ракетно-космической техники остаётся одной из задач, определяющих эффективность экспериментальной отработки многоразовых систем. На указанных этапах экспериментальная отработка выступает не только как средство подтверждения заданных требований, но и как процесс формирования и уточнения показателей надёжности по мере накопления экспериментальной информации. Данные особенности обуславливают необходимость принятия инженерных решений в условиях высокой стоимости испытаний, неоднородности требований и ограниченной исходной информации о надёжности элементов [1], [3], [4], [5].

Традиционно оценка надёжности элементов технических систем основывается на вероятностно-динамических моделях и связанных с ними однокритериальных показателях, таких как вероятность безотказной работы, интенсивность отказов и производные от них характеристики [2], [7]. Указанные показатели широко применяются как на этапах проектирования, так и при анализе результатов испытаний. Вместе с тем в задачах экспериментальной отработки многоразовых систем использование таких показателей в изолированном виде не позволяет в полной мере учитывать влияние ресурсных ограничений, трудоёмкости подтверждения и текущего уровня риска отказов, что существенно осложняет обоснование решений по формированию программ испытаний [1], [4], [6].

В ряде исследований продемонстрирована применимость методов многокритериального анализа при решении задач выбора и оценки альтернатив в сложных технических системах [9], [10]. Однако в области обеспечения надёжности элементов ракетно-космической техники многокритериальные подходы, как правило, используются фрагментарно либо на уровне оптимизационных процедур, без предварительного анализа природы несогласованности показателей надёжности. В результате многокритериальный характер задачи нередко трактуется как следствие выбранного метода, а не как объективное свойство процесса экспериментальной отработки.

Целью настоящего исследования является обоснование принципиально многокритериального характера оценки надёжности элементов многоразовых систем ракетно-космической техники на этапах экспериментальной отработки. Научная новизна работы заключается в выявлении и качественном анализе несогласованного поведения вероятностных, риск-ориентированных и трудоемких показателей надёжности при вариации параметров экспериментальной отработки. Это исключает возможность сведения оценки надёжности к одному обобщённому показателю и обосновывает необходимость применения методов многокритериального анализа для совместного рассмотрения различных аспектов надёжности.

Специфика оценки надёжности элементов многоразовых систем на этапах экспериментальной отработки

Экспериментальная отработка элементов многоразовых систем ракетно-космической техники характеризуется рядом особенностей, отличающих её от этапов проектирования и серийной эксплуатации. На данном этапе надёжность элемента не рассматривается как заранее заданная характеристика, а формируется и уточняется по мере проведения испытаний и накопления экспериментальной информации. При этом решения по объёму, структуре и последовательности испытаний принимаются в условиях ограниченных ресурсов и неполной информации о фактических показателях надёжности элементов [1], [3].

Одной из характерных особенностей экспериментальной отработки является поэтапный характер накопления данных о надёжности. Результаты каждого цикла испытаний позволяют уточнять вероятностные оценки, выявлять характерные механизмы отказов и корректировать требования к дальнейшим экспериментам. В условиях многоразового применения элементов данный процесс усложняется необходимостью учитывать влияние повторных циклов функционирования, деградиционных эффектов и возможного изменения характеристик надёжности во времени, что отмечается в работах, посвящённых испытаниям и обеспечению надёжности ракетно-космических систем [3], [4].

Проведение испытаний элементов ракетно-космической техники, особенно в режимах, приближенных к реальным условиям функционирования, связано со значительными временными и материальными затратами. В результате возникает необходимость поиска компромисса между глубиной экспериментальной отработки и допустимым объёмом испытаний. При этом увеличение количества испытаний или ужесточение требований к их результатам не всегда приводит к пропорциональному росту информативности получаемых данных [5], [6].

Совокупность указанных факторов формирует предпосылки для рассмотрения оценки надёжности элементов как многокритериальной задачи, что требует перехода от изолированного анализа отдельных показателей к их совместному рассмотрению.

Показатели надёжности элементов и ограниченность однокритериальной оценки

Оценка надёжности элементов многоразовых систем ракетно-космической техники традиционно основывается на использовании вероятностно-динамических моделей функционирования и связанных с ними количественных показателей. Базой для формирования таких показателей является модель времени до отказа элемента, описываемая функцией надёжности $R(t)$, плотностью распределения отказов $f(t)$ и интенсивностью отказов $\lambda(t)$ [2], [7]. Указанные характеристики позволяют формализовать различные аспекты надёжности и широко применяются при анализе результатов испытаний.

Одним из наиболее распространённых показателей является вероятность безотказной работы элемента на протяжении заданного числа циклов функционирования, что особенно важно для многоразовых систем. В общем виде данный показатель может быть представлен следующим образом:

$$P_n = P\{T > Nt_{ц}\}, \quad (1)$$

где T — случайная величина наработки элемента до отказа; N — число повторных циклов функционирования; $t_{ц}$ — длительность одного цикла функционирования.

Показатель P_n отражает интегральную способность элемента сохранять работоспособность при многократном использовании и часто используется в качестве основного критерия при оценке соответствия элемента заданным требованиям по надёжности. Однако данный показатель не содержит информации о характере распределения отказов во времени и не позволяет оценить текущий уровень риска отказа на отдельных этапах функционирования.

Для учёта указанных особенностей применяется локальный показатель риска отказа, связанный с интенсивностью отказов и функцией надёжности элемента. В простейшем виде он может быть записан как

$$R_n = \frac{f(t^*)}{R(t^*)}, \quad (2)$$

где $f(t)$ — плотность распределения времени до отказа; $R(t)$ — функция надёжности; t^* — характерный момент времени или этап функционирования элемента.

Показатель R_n позволяет оценивать мгновенную склонность элемента к отказу и выявлять потенциально опасные режимы функционирования, которые могут не проявляться при анализе только интегральных вероятностных характеристик. В то же время снижение локального уровня риска, как правило, требует увеличения объёма экспериментальной отработки и ужесточения требований к результатам испытаний.

В условиях экспериментальной отработки существенное значение приобретает показатель, характеризующий трудоёмкость подтверждения заданного уровня надёжности. В обобщённом виде данный показатель может быть представлен в виде зависимости объёма испытаний от параметра строгости подтверждения надёжности:

$$C_{\text{исп}} = N_{\text{исп}}(k), \quad (3)$$

где $N_{\text{исп}}$ — объём испытаний, необходимый для подтверждения заданных требований; $k \in [0;1]$ — безразмерный параметр, характеризующий уровень строгости подтверждения надёжности.

В отличие от вероятностных и риск-ориентированных показателей, величина $C_{\text{исп}}$ не является характеристикой надёжности элемента как таковой, а отражает затраты ресурсов, времени и средств, связанных с её подтверждением. При этом рост значения k приводит к увеличению объёма испытаний, что неизбежно вступает в противоречие с ограничениями экспериментальной программы.

Следует отметить, что в рамках многокритериального анализа в общем случае может рассматриваться расширенная система показателей, включающая ресурсные, экономические и эксплуатационные характеристики [9], [10]. Однако в настоящей работе анализ ограничен тремя показателями. Такое упрощение является осознанным методологическим приёмом и направлено на наглядное выявление принципиальной несводимости задачи оценки надёжности к одному показателю. Даже при рассмотрении минимального набора взаимосвязанных характеристик возникает необходимость совместного анализа показателей, изменяющихся несогласованно.

Несогласованность поведения показателей надёжности при вариации параметров экспериментальной отработки

Для анализа совместного поведения показателей надёжности рассмотрим их изменение при вариации параметра строгости подтверждения надёжности k , принимающего значения в интервале от 0 до 1. Увеличение значения параметра k соответствует последовательному ужесточению требований к подтверждению надёжности элементов, что приводит к изменению вероятностных характеристик, уровня локального риска отказа, а также количества испытаний. Значения вероятностного показателя надёжности P_n , локального показателя риска отказа R_l и показателя трудоёмкости подтверждения надёжности $C_{\text{исп}}$ рассчитываются на основе выражений (1)–(3).

Поскольку рассматриваемые показатели имеют различные физические размерности и существенно отличающиеся диапазоны изменения, для сопоставления их динамики используется приведение к безразмерной шкале. Нормированные значения показателей определяются соотношением:

$$\tilde{Q}_i(k) = \frac{Q_i(k) - Q_i^{\min}}{Q_i^{\max} - Q_i^{\min}}, \quad i = 1, 2, 3, \quad (4)$$

где $Q_i(k)$ — значения показателей, определяемые выражениями (1)–(3), а Q_i^{\min} и Q_i^{\max} — минимальные и максимальные значения соответствующих показателей на рассматриваемом диапазоне параметра k . Корректность применения нормировки обеспечивается выполнением условия

$$Q_i^{\max} \neq Q_i^{\min}, \quad i = 1, 2, 3. \quad (5)$$

Следует подчеркнуть, что нормировка применяется к уже вычисленным значениям показателей и не изменяет их физического смысла, а используется исключительно для анализа относительной динамики и наглядного выявления несогласованности поведения показателей.

На рисунке 1 приведены зависимости нормированных значений вероятности безотказной работы \tilde{P}_n , определяемой выражением (1), и трудоёмкости подтверждения надёжности $\tilde{C}_{\text{исп}}$, определяемой выражением (3), от параметра строгости подтверждения надёжности k . Нормирование показателей выполнено в соответствии с выражением (4). Представленные зависимости иллюстрируют несогласованность поведения вероятностного показателя надёжности и показателя, характеризующего ресурсные затраты на её подтверждение, при ужесточении требований экспериментальной отработки.

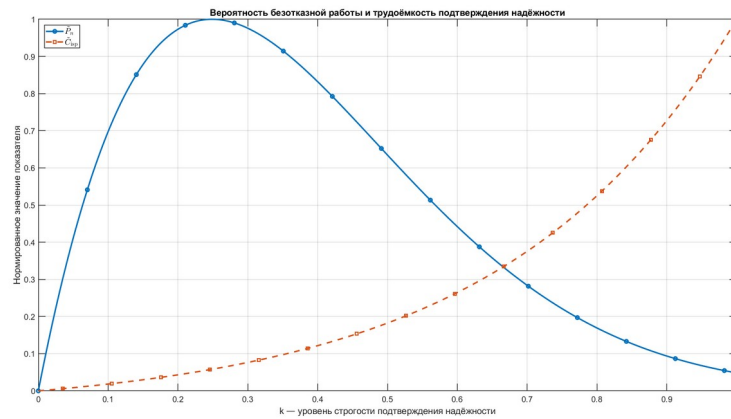


Рисунок 1 - Зависимость нормированных показателей вероятности безотказной работы и трудоёмкости подтверждения надёжности от параметра строгости k
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.167.25.1>

На рисунке 2 показаны зависимости нормированных значений вероятности безотказной работы \tilde{P}_H , определяемой выражением (1), и локального уровня риска отказа \tilde{R}_L , определяемого выражением (2), от параметра строгости подтверждения надёжности k .

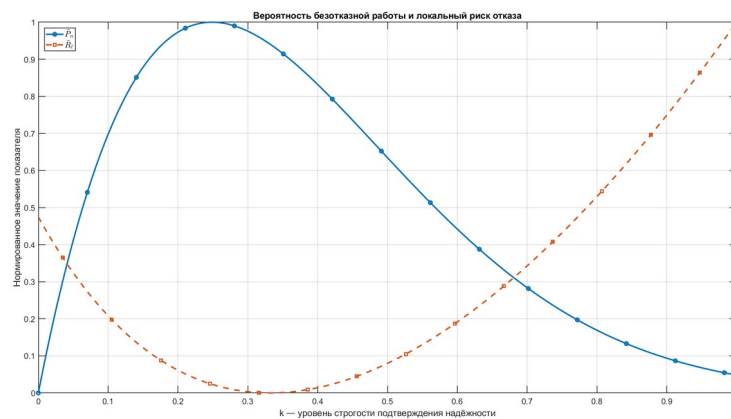


Рисунок 2 - Зависимость нормированных показателей вероятности безотказной работы и локального риска отказа от параметра строгости k
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.167.25.2>

Анализ рисунка 2 показывает, что рост интегральной вероятности безотказной работы не сопровождается пропорциональным снижением локального уровня риска отказа. В отдельных областях диапазона изменения параметра k снижение риска носит замедленный или неравномерный характер. Это свидетельствует о том, что использование только вероятностного показателя не позволяет выявить потенциально опасные режимы функционирования элемента, связанные с повышенным локальным риском отказа, что согласуется с результатами исследований, посвящённых анализу надёжности сложных технических систем [2], [6], [7].

На рисунке 3 представлена зависимость нормированных значений локального показателя риска отказа \tilde{R}_L и показателя трудоёмкости подтверждения надёжности $\tilde{C}_{исп}$ от параметра строгости k .

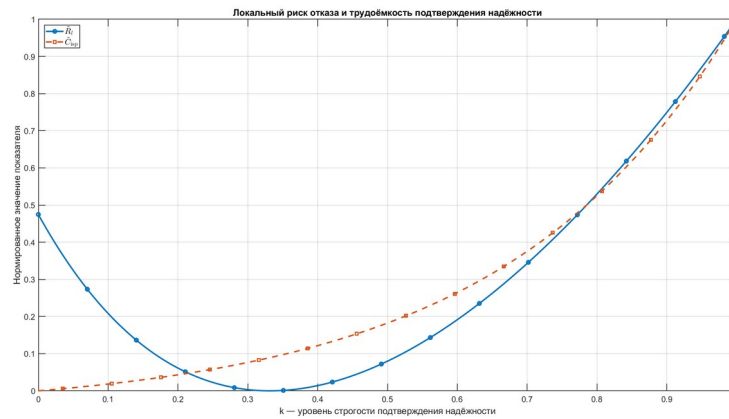


Рисунок 3 - Зависимость нормированных показателей локального риска отказа и трудоёмкости подтверждения надёжности от параметра строгости k
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.167.25.3>

Из приведённого графика (рисунок 3) следует, что снижение локального уровня риска отказа достигается за счёт увеличения объёма экспериментальной отработки. При этом уменьшение риска на отдельных участках диапазона изменения параметра k сопровождается резким ростом трудоёмкости подтверждения надёжности. Указанное обстоятельство подчёркивает наличие конфликта между требованиями по снижению риска отказов и ограничениями по ресурсам экспериментальной программы [1], [4], [5].

Совместный анализ представленных зависимостей показывает, что на рассматриваемом диапазоне изменения параметра строгости подтверждения надёжности отсутствует область значений k , в которой все показатели, определяемые выражениями (1)–(3), одновременно улучшаются. Каждый из показателей отражает отдельный аспект оценки надёжности и изменяется по собственной закономерности. В результате выбор параметров экспериментальной отработки на основе одного показателя неизбежно приводит к ухудшению других характеристик, существенных с точки зрения обеспечения надёжности и эффективности испытаний.

Заключение

В работе рассмотрены особенности оценки надёжности элементов многоразовых систем ракетно-космической техники на этапах экспериментальной отработки. Показано, что в условиях поэтапного накопления экспериментальной информации, высокой стоимости испытаний и неоднородности требований традиционный однокритериальный подход не позволяет адекватно отражать состояние и перспективы надёжности элементов. Использование вероятностно-динамических моделей и связанных с ними показателей остаётся необходимым, однако их изолированное применение не обеспечивает обоснованного принятия решений при формировании программ экспериментальной отработки.

Таким образом, даже при рассмотрении минимального набора показателей, задача оценки надёжности элементов многоразовых систем ракетно-космической техники носит принципиально многокритериальный характер. Выявленная несогласованность поведения показателей обусловлена объективными особенностями процесса экспериментальной отработки и не является следствием выбранного способа представления данных. Это исключает возможность сведения оценки надёжности к одному обобщённому показателю и обосновывает необходимость совместного рассмотрения различных критериев надёжности.

Перспективы дальнейших исследований связаны с развитием формальных методов многокритериального анализа применительно к задачам экспериментальной отработки элементов ракетно-космической техники: разработка параметрических и взвешенных методов многокритериальной оценки, учитывающих особенности вероятностно-динамических моделей надёжности, формирование подходов к выделению компромиссных областей допустимых решений при ограниченных ресурсах испытаний. Полученные в настоящей работе результаты могут служить методологической основой для последующих исследований, направленных на разработку алгоритмов и программных средств поддержки принятия решений при обеспечении надёжности многоразовых систем.

Благодарности

Автор выражает благодарность кафедре 610 «Управление эксплуатацией ракетно-космических систем» МАИ.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Acknowledgement

The author expresses his gratitude to the faculty 610 "Operation Management of Space Launch Systems", MAI.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.



Список литературы / References

1. Гусев Е.В. Модель обеспечения надежности на этапе комплексной отработки изделий ракетно-космической техники / Е.В. Гусев, А.А. Пронкин // Международный научно-исследовательский журнал. — 2026. — № 1 (163). — DOI: 10.60797/IRJ.2026.163.38.
2. Gusev E.V. Forecasting of maintenance indicators of complex technical systems during storage / E.V. Gusev, A.A. Pronkin // Aerospace Systems. — 2023. — Vol. 6. — P. 383–391. — DOI: 10.1007/s42401-023-00225-6.
3. Галеев А.В. Разработка технологии испытаний криогенных ракетных двигателей с имитацией воздействующих факторов: дис. ... канд. техн. наук: 05.07.05 / А.В. Галеев. — Москва, 2018. — 126 с.
4. Золотов А.А. Прикладные задачи обеспечения надёжности при разработке аппаратов ракетно-космических систем / А.А. Золотов, В.В. Родченко, Е.В. Гусев. — Москва: Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), 2023. — 160 с.
5. Федоров В.К. Контроль и испытания в проектировании и производстве радиоэлектронных средств / В.К. Федоров, Н. Сергеев, А. Кондрашин ; под ред. В.К. Федорова. — Москва: Техносфера, 2005. — 502 с.
6. Абрамов О.В. Управление состоянием сложных технических систем / О.В. Абрамов // Труды Международного симпозиума «Надёжность и качество». — 2010. — Т. 1. — С. 24–26.
7. Гусев Е.В. Разработка математической модели оценки надёжности аппаратуры летательного аппарата на основе метода статистического моделирования / Е.В. Гусев // Научно-технический вестник Поволжья. — 2023. — № 3. — С. 24–27.
8. Гусев Е.В. Модель определения оптимального количества запасных элементов и принадлежностей методом динамического программирования / Е.В. Гусев, А.А. Пронкин // Научно-технический вестник Поволжья. — 2024. — № 5. — С. 46–49.
9. Разумов Д.А. Разработка методики многокритериальной оценки проектов космических средств и систем: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.13.01 / Д.А. Разумов. — Москва, 2021.
10. Гончаров К.А. Применение автоматизированных средств анализа данных в задачах многокритериального анализа альтернатив в нечеткой информационной среде / К.А. Гончаров, В.А. Судаков // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. — 2025. — Т. 27. — № 4. — С. 17–23.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Gusev E.V. Model' obespechenija nadezhnosti na jetape kompleksnoj otrabotki izdelij raketno-kosmicheskoy tehniki [Model for ensuring reliability at the stage of integrated testing of rocket and space technology products] / E.V. Gusev, A.A. Pronkin // Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal [International Research Journal]. — 2026. — No. 1 (163). — DOI: 10.60797/IRJ.2026.163.38. [in Russian].
2. Gusev E.V. Forecasting of maintenance indicators of complex technical systems during storage / E.V. Gusev, A.A. Pronkin // Aerospace Systems. — 2023. — Vol. 6. — P. 383–391. — DOI: 10.1007/s42401-023-00225-6.
3. Galeev A.V. Razrabotka tehnologii ispytaniy kriogennyh raketnyh dvigatelej s imitaciej vozdeystvujushchih faktorov [Development of a test technology for cryogenic rocket engines with simulation of influencing factors]: diss. ... Cand. Tech. Sci.: 05.07.05 / A.V. Galeev. — Moscow, 2018. — 126 p. [in Russian].
4. Zolotov A.A. Prikladnye zadachi obespechenija nadezhnosti pri razrabotke apparatov raketno-kosmicheskikh sistem [Current problems of ensuring reliability in the development of rocket and space system devices] / A.A. Zolotov, V.V. Rodchenko, E.V. Gusev. — Moscow: Moscow Aviation Institute (National Research University), 2023. — 160 p. [in Russian].
5. Fedorov V.K. Kontrol' i ispytaniya v proektirovaniji i proizvodstve radioelektronnyh sredstv [Control and testing in the design and production of electronic equipment] / V.K. Fedorov, N. Sergeev, A. Kondrashin ; ed. by V.K. Fedorov. — Moscow: Tehnosfera, 2005. — 502 p. [in Russian].
6. Abramov O.V. Upravlenie sostojaniem slozhnyh tehnicheskikh sistem [Control of the state of complex technical systems] / O.V. Abramov // Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma "Nadezhnost' i kachestvo" [Proceedings of the International Symposium "Reliability and Quality"]. — 2010. — Vol. 1. — P. 24–26. [in Russian].
7. Gusev E.V. Razrabotka matematicheskoy modeli ocenki nadezhnosti apparatury letatel'nogo apparata na osnove metoda statisticheskogo modelirovaniya [Development of a mathematical model for assessing the reliability of aircraft equipment based on the method of statistical simulation] / E.V. Gusev // Nauchno-tehnicheskij vestnik Povolzh'ja [Scientific and Technical Bulletin of the Volga Region]. — 2023. — № 3. — P. 24–27. [in Russian].
8. Gusev E.V. Model' opredelenija optimal'nogo kolichestva zapasnyh jelementov i prinadlezhnostej metodom dinamicheskogo programmirovaniya [Model for determining the optimal number of reserve parts using dynamic programming] / E.V. Gusev, A.A. Pronkin // Nauchno-tehnicheskij vestnik Povolzh'ja [Scientific and Technical Bulletin of the Volga Region]. — 2024. — № 5. — P. 46–49. [in Russian].
9. Razumov D.A. Razrabotka metodiki mnogokriterial'noj ocenki proektov kosmicheskikh sredstv i sistem [Development of a methodology for multicriteria evaluation of space systems projects]: abstract of diss. ... Cand. Tech. Sci.: 05.13.01 / D.A. Razumov. — Moscow, 2021. [in Russian].
10. Goncharov K.A. Primenenie avtomatizirovannyh sredstv analiza dannyh v zadachah mnogokriterial'nogo analiza al'ternativ v nechetkoj informacionnoj srede [Application of automated data analysis tools in multicriteria analysis of alternatives in a fuzzy information environment] / K.A. Goncharov, V.A. Sudakov // Nejrokomp'jutery: razrabotka, primenenie [Neurocomputers: Development, Application]. — 2025. — Vol. 27. — № 4. — P. 17–23. [in Russian].