

Труды МАИ. 2025. № 143
Trudy MAI. 2025. No. 143. (In Russ.)

Научная статья

УДК 681.5

URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=185654>

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

ПЛАНИРОВАНИЕ ВЫБОРОЧНОГО СТАТИСТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ЭЛЕМЕНТОВ КОСМИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ИСПЫТАНИЙ

Никита Алексеевич Осипов¹, Анатолий Сергеевич Мусиенко²✉

^{1,2}Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского,

Санкт-Петербург, Россия

²vka@mil.ru✉

Аннотация. Рассматривается применение методов проверки статистических гипотез для уменьшения объема выборочного контроля при проведении контрольных испытаний элементов космических средств и получения более достоверного решения о годности партии. Основным преимуществом предлагаемого подхода является возможность учета результатов предыдущих испытаний изделий-аналогов, подобных изделий и изделий, имеющие подобные составные части. Приводится реализация данного подхода при проведении выборочного контроля, предлагается методика обработки статистических данных на основе проверки статистических гипотез о свойствах распределения вероятностей, лежащего в основе наблюдаемых явлений.

Ключевые слова: контрольные испытания, планы выборочного контроля, риск потребителя, статистическая гипотеза, статистический тест

Для цитирования: Осипов Н.А., Мусиенко А.С. Планирование выборочного статистического контроля элементов космических средств при проведении эксплуатационных испытаний // Труды МАИ. 2025. № 143. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=185654>

Original article

PLANNING OF RANDOM STATISTICAL MONITORING OF SPACECRAFT ELEMENTS DURING OPERATIONAL TESTING

Nikita A. Osipov¹, Anatoly S. Musienko²✉

^{1,2}Military space Academy named after A.F. Mozhaisky,
Saint Petersburg, Russia

²vka@mil.ru✉

Abstract. In the conditions of strict requirements for reliability and limited resources during testing of spacecraft components, an urgent task is to optimize the volume of random control without reducing the reliability of decisions on the suitability of product batches. This article discusses an approach to solving this problem based on the systematic application of statistical hypothesis testing methods. The main objective of the study is to develop a methodology that can significantly reduce the volume of necessary random tests through the intelligent use of a priori information.

The article considers the application of statistical hypothesis testing methods to reduce the volume of random control during control tests of spacecraft components and to obtain a

more reliable decision on the suitability of a batch. The main advantage of the proposed approach is the ability to take into account the results of previous tests of analog products, similar products and products with similar components.

The purpose of the study is to reduce the number of testing stages to identify the absence of accidents and failures when a malfunction of the on-board system occurs. To achieve this goal, it is proposed to use an original heuristic algorithm for forming sets of tested products. The article provides a practical implementation of this approach within the framework of random control procedures. The methodology for processing and integrating statistical data from various sources is described in detail. The methodology is based on the sequential verification of a set of statistical hypotheses concerning the fundamental properties of the probability distribution underlying the observed reliability and failure indicators (such as the type of distribution, its parameters, for example, the mean time between failures or the probability of failure-free operation). The results of the study are of significant practical interest to organizations that carry out control tests of highly reliable and expensive products, in particular, in the space industry, where the requirements for the reliability of solutions are extremely high, and the cost of testing each sample is high.

Keywords: control tests, sampling plans, consumer risk, statistical hypothesis, statistical test

For citation: Osipov N.A., Musienko A.S. Planning of random statistical monitoring of spacecraft elements during operational testing. *Trudy MAI*. 2025. No. 143. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=185654>

Введение

Элементы космических средств, являющиеся составной частью современных сложных технологических систем представляют собой особый вид продукции, который требует повышенного внимания при организации контрольных испытаний для решения задачи обеспечения бесперебойной работы такого рода систем. Определение оптимального объема контрольных испытаний представляет собой сложную задачу, требующую учета множества факторов. В настоящее время в государственных и международных стандартах качества [1-4] предлагаются решения по определению планов и процедур выборочного контроля по количественному признаку для штучной продукции на основе установленных контрольных нормативов. Данные планы применяются для контроля партий, представляемых в виде последовательного набора, достаточного для применения правил переключения между режимами контроля. Предполагается, что эти правила обеспечат защиту потребителя в случаях обнаружения снижения качества переключением на усиленный контроль или прекращением контроля, а также стимулируют снижение затрат на контроль при достижении стабильного уровня качества переключением на ослабленный контроль. В целом, данные решения имеют своей целью обеспечить влияние на поставщика, давая обоснованную возможность отклонять партии изделий. Уменьшить неопределенность исходной информации можно с помощью применения ранее полученных данных, в этом случае точной информации о качестве контролируемой партии может и не быть, но испытатель может иметь предварительные знания или ожидания и это дает возможность испытателю

сформировать априорные представления о качестве партии. Такое объединение возможно в рамках байесовского параметрического обучения, которое занимается корректировкой предварительных знаний с учетом новой информации и тем самым устраняет недостатки оценки максимального правдоподобия при ограниченном объеме количества данных [5], а также данная проблема может быть решена с помощью методов и алгоритмы нечеткой логики [6], которые позволяют учесть неопределенность и размытость в данных, что особенно важно при работе с реальными системами, подверженными воздействию различных переменных. Недостатком таких подходов является сильная зависимость итоговых результатов от качества предварительных данных (априорного распределения и функций принадлежности), что в условиях существенной неопределенности достичь весьма затруднительно. В данной статье рассматривается решение задачи обоснования объема контрольных испытаний с использованием обработки статистических данных, полученных на предварительном этапе на основе проверки статистических гипотез о свойствах распределения вероятностей, лежащего в основе наблюдаемых явлений, исследуется их применимость в повышении качества функционирования технических систем.

Контроль по количественному признаку заключается [2] в определении с требуемой точностью фактических значений контролируемого параметра у единиц продукции из выборки. Фактические значения контролируемого параметра необходимы для последующего вычисления статистических характеристик, по которым принимается решение о применении правил переключения на ослабленный

или усиленный контроль). Такими статистическими характеристиками являются выборочное среднее или медиана и выборочное среднее квадратическое отклонение или размах.

В стандарте [4] определены пять уровней контроля (три общих и два специальных), определяющие соотношение между объемами партии и выборки. Для относительно небольших объемах выборки и больших значениях риска первого и второго рода указаны специальные уровни контроля, но не описаны конкретные рекомендации для их выбора, а отмечается, что при выборе специальных уровней необходима осторожность во избежание выбора уровня контроля, не соответствующего значению приемлемого уровня качества, т. е. особые уровни контроля служат для сочетания возможности применения выборок малого объема. Рекомендуется на каждом уровне контроля применять правила переключения на нормальный, усиленный или ослабленный контроль.

Правила переключения не в полной мере позволяют реализовать автоматический процесс переключения, так, например, нормальный контроль переключают на ослабленный контроль, если выполнены следующие условия:

а) при нормальном контроле последние десять партий приняты с первого предъявления – стандартом ничем не обосновано это число;

б) технологический процесс производства является стабильным – признаки стабильности в каждом случае субъективны, зависят от конкретной ситуации, а обоснование представляет отдельную сложную задачу теории статистических гипотез;

с) ослабленный контроль разрешен нормативно-технической документацией – не уточняется критерии принятия такого решения.

Таким образом, предлагается дополнить систему выборочного контроля, которая в настоящее время определена объемом контролируемой партии, уровнями контроля и значением контрольного параметра применением алгоритмов проверки статистических гипотез в процедурах и правилах переключения между уровнями контроля, что снизит неопределенность при анализе исходной информации и обеспечит достаточный уровень качества принимаемых решений по результатам выборочного контроля.

Постановка задачи

Задача может быть сформулирована следующим образом. Организуется приемочный выборочный контроль по количественному признаку [2, 4] – одноступенчатый контроль:

- 1) на основе приемочного уровня дефектности из контролируемой партии продукции объемом N случайным образом отбирают n единиц продукции;
- 2) элементы выборки проверяют и рассчитывают среднее арифметическое значение контролируемого параметра;
- 3) вычисляют выборочное среднее квадратическое отклонение и нормированные отклонения для двух границ – верхнего и нижнего;
- 4) применяется решающее правило – если вычисленное нормированное отклонение больше либо равно контрольному нормативу, то партия

принимается. В противном случае она бракуется. Если хотя бы одна из величин нормированных отклонений отрицательна, то партию бракуют.

При выборе плана выборочного контроля необходим компромисс в обосновании того объема выборки, которой устроил бы обе стороны (потребителя и поставщика).

Предлагается подвергать контролю меньший объем партии, из которого случайным образом отбирать единицы продукции и подсчитывать среднее арифметическое значение контролируемого параметра.

Требуется по результатам анализа исходной информации о процессе проведения испытаний качества испытаний дополнить систему выборочного контроля алгоритмами проверки статистических гипотез в процедуры и правила переключения между уровнями контроля, с целью снижения неопределенности при анализе исходной информации и обеспечения достаточного уровня качества принимаемых решений по результатам выборочного контроля.

Обработка дополнительной информации

Предложенный подход, основанный на использовании алгоритмов проверки статистических гипотез, включает в себя несколько этапов.

Первым является определение типа статистического теста на основе входных данных – объема и вида законов распределения случайного параметра при проведении предварительных испытаний. Ввиду того, что случайная величина – значения контролируемого параметра подчиняется нормальному распределению подходящими статистическими тестами будут Т-тест или Z-тест. Отметим

особенности выбора вида теста применительно к рассматриваемой задаче. Z-тест рекомендуется применять при объемах выборки больше 30, благодаря центральной предельной теореме, распределение средних значений выборки приближается к нормальному распределению, что делает Z-тест приемлемым, стандартное отклонение генеральной совокупности должно быть известно. В свою очередь, T-тест используется при размере выборки меньше 30 поскольку при малых выборках распределение средних значений может сильно отличаться от нормального, что требует использования T-распределения, не требует знания стандартного отклонения генеральной совокупности (вместо этого используется стандартное отклонение выборки). Таким образом, Z-тест обычно используется для определения, отличается ли среднее значение выборки от известного среднего значения генеральной совокупности, или для сравнения средних двух различных генеральных совокупностей при известных стандартных отклонениях, а T-тест применяется для сравнения средних значений двух групп, когда стандартное отклонение генеральной совокупности неизвестно.

Также на первоначальном этапе выбираются показатели для оценки возможности переключения режима контроля – для этого будем использовать тестовую статистику (Z или T в зависимости от применяемого теста) и уровень значимости (как правило он равен 0,05, но может принимать и другие значения, например, 0.01, 0.1). В практических случаях испытатели должны определять границу значения тестовой статистики (переменной), которое определяет переход из одного режима в другой. Например, можно считать, что следует перейти в режим

ослабленного контроля, если значение выходной тестовой статистики переменной не превышает критического значения.

Применение статистических тестов при планировании приемочного контроля

Существуют различные виды и Z-теста и Т-теста которые используются в зависимости от конкретной ситуации исследования.

Опишем применение Т-теста для уточнения результатов приемочного контроля на примере.

Пусть на контроль поступают изделия партиями объема N . Приемка проводится по результатам контроля по количественному признаку одного из параметров. Техническими условиями задан двухсторонний допуск на контролируемый параметр, например, верхняя граница $T_B = 64$, нижняя граница $T_H = 42$, номинальное значение 50. Дисперсия генеральной совокупности неизвестна, поэтому рассчитаем ее оценку по выборочному среднему квадратическому отклонению. Также для границ контролируемого параметра установлены различные значения AQL: для верхней $AQL_B = 0,65\%$, для нижней $AQL_H = 1,5\%$.

Требуется определить план контроля при заданных исходных данных.

Для решения поставленной задачи применим ГОСТ [4]:

1) по заданному объему партии, используя таблицу 1 стандарта [4] определяем код объема выборки – F;

2) по таблице 5 стандарта [4] для кода F находим объем выборки $n = 10$.

Таким образом, план контроля определен.

Далее предположим, что из партии сформирована случайным образом выборка объемом установленным планом (10) и получены значения контролируемого параметра $X : \{53, 49, 44, 59, 49, 48, 47, 48, 46, 53\}$.

В качестве оценки для неизвестного среднего значения контролируемой партии следует использовать среднее арифметическое значение выборки:

$$\bar{X} = 10^{-1} \sum_{i=1}^{10} X_i = 496/10 = 49,6 \quad (1)$$

Используя среднее значение, определим выборочное среднее квадратическое отклонение:

$$S = \sqrt{(10-1)^{-1} \sum_{i=1}^{10} (X_i - 49,6)^2} = \sqrt{18,71} = 4,33 \quad (2)$$

Далее требуется рассчитать относительные отклонения для каждой границы, для верхней:

$$Q_B = \frac{T_B - \bar{X}}{S} = \frac{64 - 49,6}{4,33} = 3,33 \quad (3)$$

и для нижней:

$$Q_H = \frac{\bar{X} - T_H}{S} = \frac{49,6 - 42}{4,33} = 1,76 \quad (4)$$

Если бы одно из этих значений было бы отрицательным, то это было бы достаточным условием для браковки партии.

И, наконец, для заданных значений AQL_B , AQL_H и объема выборки по таблице 6 стандарта [4] находим значения контрольных нормативов: $ks_B = 1,84$ и $ks_H = 1,58$.

Полученные значения сравниваем соответственно с $Q_B = 3,33$ и с $Q_H = 1,76$. Поскольку они больше значений контрольных нормативов ($3,33 > 1,84$ и $1,76 > 1,58$) партия изделий принимается.

Применение статистического теста позволяет сократить объем выборки при следующих проверках подобных изделий. Предлагается взять следующие выборки и сравнить их средние значения по Т или Z тестам. Первая выборка – испытания на предыдущем этапе, вторая, меньшая – на текущем этапе контроля, использование статистических тестов даст возможность обосновать меньший объем испытаний.

Поскольку имеем две нормально распределенные переменные X – испытания на предыдущем этапе и X_t – испытания на текущем этапе контроля, а соответствующие значения их дисперсий неизвестны рассмотрим использование Т-теста для определения статистической значимости различий средних величин при сравнении связанных совокупностей. Будем рассчитывать парный Т-критерий Стьюдента.

Предположим, что требуется сформировать новый план для проведения текущего приемочного контроля. Если принять результаты прошлого контроля во внимание, то можно выборку изделий сделать меньшей. Пусть для проведения новых контрольных испытаний из партии сформирована случайным образом выборка объемом меньшим в два раза – 5 и получены значения контролируемого параметра $X_t : \{50.1, 50.5, 43.4, 55.9, 47.9\}$.

Выдвигаем нулевую и альтернативную гипотезы:

H_0 : различия между двумя выборками незначительны, средние значения равны и можно для новых результатов испытаний принять результат приемочного контроля для первой выборки о годности партии.

H_1 : различия между двумя выборками значительны, средние значения нельзя считать равными и также нельзя для новых результатов испытаний принять результат приемочного контроля для первой выборки о годности партии. Требуется провести дополнительный приемочный контроль для получения результатов.

Для сравнения средних величин Т-критерий Стьюдента рассчитывается по следующей формуле:

$$t = \frac{M_1 - M_2}{\sqrt{m_1^2 + m_2^2}} \quad (5)$$

где:

M_1 и M_2 – средние арифметические первой и второй сравниваемых совокупностей (партий), m_1 и m_2 – средние ошибки первой и второй средних арифметических.

В результате расчетов для исходных данных выборок X и Xt значение критерия получилось равным $t = 1.06$.

Для определения критического значения t-критерия используем средства анализа данных MS Excel “Двухвыборочный t-тест с различными дисперсиями”. В итоге были получены следующие результаты (см. рис. 1):

Двухвыборочный t-тест с различными дисперсиями		
	X	Xt
Среднее	49,6	47,57406
Дисперсия	18,71111111	8,860062
Наблюдения	10	5
Гипотетическая разность средних	0	
df	11	
t-статистика	1,061425723	
P(T<=t) одностороннее	0,155622552	
t критическое одностороннее	1,795884819	
P(T<=t) двухстороннее	0,311245105	
t критическое двухстороннее	2,20098516	

Рисунок 1 – Результаты двухвыборочного t-теста

Сравним полученное значение t-критерия Стьюдента (1,06) с критическим при уровне значимости 0,05 (2,2). Так как рассчитанное значение критерия меньше критического, делаем вывод о том, справедлива нулевая гипотеза H_0 : наблюдаемые различия статистически незначимы, средние значения равны и можно для новых результатов испытаний принять результат приемочного контроля для первой выборки о годности партии.

Теперь используем Z-тест для уточнения результатов приемочного контроля на тех же самых исходных данных.

Двухвыборочный Z-тест для средних значений сравнивает две независимые выборки, чтобы определить различаются ли средние значения генеральных совокупностей, которые их сгенерировали. Он основан на предположении, что выборки имеют нормальное распределение, известны дисперсии совокупностей из которых получены эти выборки, и что они случайным образом и независимо взяты из соответствующих совокупностей. Как правило, этот тест используется, когда известны стандартные отклонения двух совокупностей – при приемочном контроле

первая совокупность это данные и результаты предыдущих испытаний, вторая – данные текущих испытаний приемочного контроля.

Хотя двухвыборочный Z-тест используется, когда размеры выборки велики (обычно $n \geq 30$) используем его для рассматриваемого выше плана статистического контроля с выборкой объема 10. Стандартные отклонения совокупности могут быть оценены на основе данных выборки.

В рассматриваемом примере эти предположения выполняются, распределение выборочных средних значений выборки следует нормальному распределению, и статистика Z-теста может использоваться для проверки нулевой гипотезы о том, что нет существенной разницы между средними значениями двух совокупностей.

Формула z-статистики для двухвыборочного z-теста для средних значений при известном стандартном отклонении генеральной совокупности имеет следующий вид:

$$Z = \frac{(\bar{x}_1 - \bar{x}_2) - (\mu_1 - \mu_2)}{\sqrt{\frac{\sigma_1^2}{n_1} + \frac{\sigma_2^2}{n_2}}} \quad (6)$$

$\bar{x}_1$ — среднее значение первой выборки, $\bar{x}_2$ — среднее значение второй выборки;

μ_1, μ_2 — средние значения первой и второй совокупностей;

$(\mu_1 - \mu_2)$ — предполагаемая разница между средними значениями совокупностей;

σ_1, σ_2 — стандартные отклонения каждой совокупности;

n_1, n_2 — количество данных в первой и второй выборках.

Для определения критического значения Z-критерия используем средства анализа данных MS Excel “Двухвыборочный z-тест для средних”. В итоге были получены следующие результаты (см. рис. 2):

Двухвыборочный z-тест для средних		
	X	Xt
Среднее	49,6	47,57406
Известная дисперсия	18,7	14,97
Наблюдения	10	5
Гипотетическая разность средних	0	
z	0,918607	
P(Z<=z) одностороннее	0,179151	
z критическое одностороннее	1,644854	
P(Z<=z) двухстороннее	0,358301	
z критическое двухстороннее	1,959964	

Рисунок 2 – Результаты двухвыборочного Z-теста

Кроме вычисления значения z-статистики для принятия статистического решения следует использовать p-значение, которое указывает на вероятность получения z-значения, столь же экстремального, как и рассчитанное при нулевой гипотезе.

Сравним p-значения (0,179) с уровнем значимости ($\alpha = 0.05$), чтобы определить, следует ли отвергнуть или не отвергнуть нулевую гипотезу:

- если p-значение меньше α , то отвергаем нулевую гипотезу и приходим к выводу, что существует значительная разница между средними значениями двух совокупностей;
- если p-значение больше или равно α , то нет основания отвергнуть нулевую гипотезу и нет достаточных доказательств, чтобы предположить, что средние значения двух совокупностей различны.

Таким образом, Z-тест, аналогично T-тесту подтверждает возможность использовать для новых результатов испытаний результат приемочного контроля для первой выборки о годности партии.

Заключение

Рассмотренная методика применения проверки статистических гипотез при наличии результатов предыдущих испытаний позволяет получить обоснованное решение о возможности проведения ослабленного контроля с приемлемым качеством. Система выборочного контроля, которая в настоящее время определена объемом контролируемой партии, уровнями контроля и значением приемлемого уровня качества, дополненная проверки статистических гипотез в процедурах и правилах переключения между уровнями контроля, обеспечивает достаточный уровень качества принимаемых решений по результатам выборочного контроля.

Список источников

1. Дорожко И.В., Мусиенко А.С. Модель мониторинга технического состояния сложных технических устройств с применением искусственного интеллекта // Труды МАИ. 2024. № 137. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=181885>
2. Дорожко И.В., Мусиенко А.С., Сундиев Д.С. Имитационная модель, связывающая показатели надежности с показателями тестового и функционального контроля технических систем // Труды МАИ. 2023. № 130. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=174618>. DOI: [10.34759/trd-2023-130-19](https://doi.org/10.34759/trd-2023-130-19)

3. Барановский А.М., Мусиенко А.С. Динамические диагностические модели и метод обеспечения устойчивости контроля технического состояния бортовых систем управления летательных аппаратов // Труды МАИ. 2024. № 139. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=183468>
4. Осипов Н.А., Мусиенко А.С., Меркушев О.А. Сокращение объема тестовой выборки элементов космических средств при проведении контрольных испытаний // Труды МАИ. 2023. № 132. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=176857>
5. Осипов Н.А., Мусиенко А.С. Повышение обоснованности выборочного контроля бортовой системы при эксплуатации космических средств // Труды МАИ. 2024. № 136. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=180675>
6. Кофман А. Введение в теорию нечетких множеств. - М.: Наука, 2082. – 432 с.
7. Кохендерфер М., Уилер Т., Рэй К. Алгоритмы принятия решений. – М.: ДМК Пресс, 2023. – 684 с.
8. Флегонтов А.В., Вилков В.Б., Черных А.К. Моделирование задач принятия решений при нечетких исходных данных. – СПб.: Лань, 2020. – 332 с.
9. Соловьев В.А., Любинский В.Е., Жук Е.И. Текущее состояние и перспективы развития системы управления полетами космических аппаратов // Пилотируемые полеты в космос. 2012. № 2 (4). С. 44 – 51.
10. Сторожев С.А., Хижняков Ю.Н. Новый метод адаптации регулятора состояний с применением нечеткой логики // Труды МАИ. 2021. № 118. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=158255>. DOI: [10.34759/trd-2021-118-16](https://doi.org/10.34759/trd-2021-118-16)

11. Осипов Н.А., Дорожко И.В. Методика диагностирования автоматизированных систем управления сложными объектами с использованием априорной информации // Известия вузов. Приборостроение. 2013. Т. 56, № 1. С. 18–26.
12. Дорожко И.В. и др. Модель оценки вероятности безотказной работы сложных технических комплексов на основе динамических байесовских сетей // Труды Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского. 2019. № 669. С. 216–223.
13. Дорожко И.В. и др. 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>. DOI: [10.34759/trd-2020-113-14](https://doi.org/10.34759/trd-2020-113-14)
14. Дорожко И.В., Горохов Г.М., Кириллов И.А. Методический подход к разработке системы поддержки принятия решений оператора автоматизированной системы управления технологическими процессами на основе динамических байесовских сетей // Труды МАИ. 2022. № 125. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=168195>. DOI: [10.34759/trd-2022-125-23](https://doi.org/10.34759/trd-2022-125-23)
15. Дорожко И.В., Иванов О.А. Модель системы поддержки принятия решений для диагностирования бортовых систем космического аппарата на основе байесовских сетей // Труды МАИ. 2021. № 118. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=158259>. DOI: [10.34759/trd-2021-118-19](https://doi.org/10.34759/trd-2021-118-19)

16. Гусеница Я.Н., Дорожко И.В., Кочанов И.А., Петухов А.Б. Научно-методический подход к оцениванию готовности сложных технических комплексов с учетом метрологического обеспечения // Труды МАИ. 2018. № 98. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=90383>
17. Привалов А.Е. и др. Имитационная модель оценивания коэффициента готовности сложных технических систем с учетом характеристик процесса диагностирования // Труды МАИ. 2018. № 103. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=101526>
18. Ляшевский А.В., Астанков А.М., Суворов А.Н., Головчинская Н.В. Методика прогнозирования остаточного ресурса технологического оборудования на основании наблюдаемого параметра потока отказов // Авиакосмическое приборостроение. 2025. № 2. DOI: [10.25791/aviakosmos.2.2025.1463](https://doi.org/10.25791/aviakosmos.2.2025.1463)
19. Тарасов А.Г., Мусиенко А.С. Алгоритм функционирования агентов обнаружения и локализации отказов бортовой системы // Авиакосмическое приборостроение. 2024. № 8. DOI: [10.25791/aviakosmos.8.2024.1426](https://doi.org/10.25791/aviakosmos.8.2024.1426)
20. Лупашко М.Н., Степанов И.В., Тимофеев В.В. Методика определения периодичности использования запасных элементов вычислительной системы военного назначения // Труды Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского. 2021. № 678. С. 310–315.

References

1. Dorozhko I.V., Musienko A.S. A model for monitoring the technical condition of complex using artificial intelligence. *Trudy MAI*. 2024. No. 137. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=181885>
2. Dorozhko I.V., Musienko A.S., Sundiev D.S. Simulation model linking reliability indicators with indicators of test and functional control of technical systems. *Trudy MAI*. 2023. No. 130. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=174618>. DOI: [10.34759/trd-2023-130-19](https://doi.org/10.34759/trd-2023-130-19)
3. Baranovskii A.M., Musienko A.S. Dynamic diagnostic models and method for ensuring the stability of monitoring the technical condition of on-board control systems of aircraft. *Trudy MAI*. 2024. No. 139. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=183468>
4. Osipov N.A., Musienko A.S., Merkushev O.A. Reducing the volume of the test sample of spacecraft elements during control tests. *Trudy MAI*. 2023. No. 132. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=176857>
5. Osipov N.A., Musienko A.S. Increasing the validity of selective control of the on-board system during the operation of space assets. *Trudy MAI*. 2024. No. 136. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=180675>
6. Kofman A. *Vvedenie v teoriyu nechetkikh mnozhestv* (Introduction to the Theory of Fuzzy Sets). Moscow: Nauka Publ., 2082. 432 p.
7. Kokhenderfer M., Uiler T., Rei K. *Algoritmy prinyatiya reshenii* (Decision-Making Algorithms). Moscow: DMK Press Publ., 2023. 684 p.

8. Flegontov A.V., Vilkov V.B., Chernykh A.K. *Modelirovanie zadach prinyatiya reshenii pri nechetkikh iskhodnykh dannykh* (Modeling of Decision-Making Problems with Fuzzy Initial Data). Saint Petersburg: Lan' Publ., 2020. 332 p.
9. Solov'ev V.A., Lyubinskii V.E., Zhuk E.I. Current state and prospects of development of the flight control system of spacecraft. *Pilotiruemye polety v kosmos*. 2012. No. 2 (4). P. 44 – 51. (In Russ.)
10. Storozhev S.A., Khizhnyakov Yu.N. A new status regulator adapting method employing fuzzy logic. *Trudy MAI*. 2021. No. 118. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=158255>. DOI: 10.34759/trd-2021-118-16
11. Osipov N.A., Dorozhko I.V. Diagnostics of Automated Control Systems for Complex Objects Using A Priori Information. *Izvestiya vuzov. Priborostroenie*. 2013. Vol. 56, No. 1. P. 18–26. (In Russ.)
12. Dorozhko I.V. et al. Model for Estimating the Probability of Uninterrupted Operation of Complex Technical Systems Based on Dynamic Bayesian Networks. *Trudy Voenno-kosmicheskoi akademii im. A.F. Mozhaiskogo*. 2019. No. 669. P. 216– 223. (In Russ.)
13. Dorozhko I.V. et al. Technical state prediction of complex technical systems by the Berg algorithm and Bayesian networks. *Trudy MAI*. 2020. No. 113. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=118181>. DOI: 10.34759/trd-2020-113-14
14. Dorozhko I.V., Gorokhov G.M., Kirillov I.A. Methodological approach to the development of a decision support system for the operator of an automated process control system based on dynamic bayesian networks. *Trudy MAI*. 2022. No. 125. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=168195>. DOI: 10.34759/trd-2022-125-23

15. Dorozhko I.V., Ivanov O.A. Decision-making support system model for spacecraft onboard systems diagnosing based on Bayesian networks. *Trudy MAI*. 2021. No. 118. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=158259>. DOI: [10.34759/trd-2021-118-19](https://doi.org/10.34759/trd-2021-118-19)
16. Gusenitsa YA.N., Dorozhko I.V., Kochanov I.A., Petukhov A.B. Scientific-methods approach to evaluating readiness of complex technical systems with account for metrological assurance. *Trudy MAI*. 2018. No. 98. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=90383>
17. Privalov A.E. et al. Simulation model for assessing the availability of technical systems taking into account characteristics of the diagnostic process. *Trudy MAI*. 2018. No. 103. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=101526>
18. Lyashevskii A.V., Astankov A.M., Suvorov A.N., Golovchinskaya N.V. Methodology for predicting the residual resource of technological equipment based on the observed failure rate parameter. *Aviakosmicheskoe priborostroenie*. 2025. No. 2. (In Russ.). DOI: [10.25791/aviakosmos.2.2025.1463](https://doi.org/10.25791/aviakosmos.2.2025.1463)
19. Tarasov A.G., Musienko A.S. Algorithm of functioning of agents of detection and localization of failures of onboard system. *Aviakosmicheskoe priborostroenie*. 2024. No. 8. (In Russ.). DOI: [10.25791/aviakosmos.8.2024.1426](https://doi.org/10.25791/aviakosmos.8.2024.1426)
20. Lupashko M.N., Stepanov I.V., Timofeev V.V. Technique of determination of the frequency of use of spare elements of the computing system of military purpose. *Trudy Voenno-kosmicheskoi akademii im. A.F. Mozhaiskogo*. 2021. No. 678. P. 310–315. (In Russ.)

Статья поступила в редакцию 09.06.2025

Одобрена после рецензирования 10.07.2025

Принята к публикации 25.08.2025

The article was submitted on 09.06.2025; approved after reviewing on 10.07.2025; accepted for publication on 25.08.2025