

Научная статья

УДК 681.5

URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=180675>

ПОВЫШЕНИЕ ОБОСНОВАННОСТИ ВЫБОРОЧНОГО КОНТРОЛЯ БОРТОВОЙ СИСТЕМЫ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ КОСМИЧЕСКИХ СРЕДСТВ

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 нечеткой логики для обоснования решающего правила перехода с нормального контроля на ослабленный контроль при проведении контрольных испытаний элементов космических средств с целью сокращения объема тестовой выборки и получения более достоверного решения о годности партии. Основным преимуществом предлагаемого подхода является возможность учета разнородных и взаимосвязанных факторов, оказывающих влияние на процесс проведения испытаний, в условиях, когда эти взаимосвязи не всегда ясны и очевидны и могут оставаться неизвестными до некоторого момента времени. Приводится реализация данного подхода при проведении контрольных испытаний, предлагается методика расчета агрегированного показателя, определяющего возможность определения плана выборочного контроля на основе приемлемого уровня качества, что способствует влиянию на решения поставщика путем

возможного отклонения партий, а также поддержанию среднего уровня качества процесса в соответствии с установленным приемлемым уровнем качества, одновременно обеспечивая выбранную верхнюю границу риска потребителя.

Ключевые слова: контрольные испытания, планы выборочного контроля, риск потребителя, функция принадлежности, консолидированная оценка

Для цитирования: 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>

Original article

INCREASING THE VALIDITY OF SELECTIVE CONTROL OF THE ON-BOARD SYSTEM DURING THE OPERATION OF SPACE ASSETS

Nikita A. Osipov¹, Anatoly S. Musienko²✉

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

²vka@mil.ru ✉

Abstract. The article describes a technique that combines a priori (additional) information and current monitoring data from testing space assets to achieve the goal of selecting and achieving a better assessment of the object.

The proposed method is based on the mathematical apparatus of dynamic Bayesian networks, as well as the basic concepts and connections of reliability theory and technical

diagnostics of systems. The initial data is information about the spacecraft elements technical condition during test monitoring, information about reliability (structural and logical diagrams, component failure rates) of technological equipment, as well as linked models for diagnosing various types of technical condition and signs of diagnosing component faults.

The article proposed to use the selection method in a dynamic Bayesian network to identify inconsistencies between products and devices in the process of monitoring and technical condition diagnosing of the technological equipment components and describing the its process dynamics.

A posteriori inference allows combining heterogeneous initial information and newly received data to obtain a comprehensive assessment of the technological process and the state of the technological device, so that the expert may make an better decision on whether continuing or suspending the technological process, if errors are detected, and take measures to eliminate them.

The advantage of this technique is its ability to account for a priori heterogeneous information, especially the format of the subjects under test representation and the results of control experiments.

The article presents this method implementation for controlled studies on a limited sample collection. This capability is being demonstrated based on the results of random inspection tests, which estimate the expected cost of a defective product in the entire lot with sufficient objectivity to make random inspection decisions.

The method under consideration combines a priori information and data obtained from test results, which, when compared, allows achieving the necessary accuracy in identifying product defects.

The proposed method may be employed by the specialists when conducting system monitoring and testing activities to increase the efficiency of selection and defective products identification.

Keywords: control tests, sampling plans, consumer risk, membership function, consolidated assessment

For citation: 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. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=180675>

Введение

Современные сложные технологические системы, к которым относятся элементы космических средств являются особым видом продукции, которые требуют повышенного внимания при организации контрольных испытаний при решении задачи обеспечения бесперебойной работы такого рода систем. Однако, 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 альтернативному

признаку для штучной продукции на основе приемлемого уровня качества. 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 количество данных [5]. Недостатком такого подхода является сильная зависимость итоговых результатов от качества априорных данных, что в условиях существенной неопределенности достичь затруднительно. С развитием методологии нечеткой логики открываются новые перспективы в обосновании объема контрольных испытаний с учетом надежности систем. Методы и алгоритмы нечеткой логики

позволяют учесть неопределенность и размытость в данных, что особенно важно при работе с реальными системами, подверженными воздействию различных переменных. В данной статье рассматривается решение задачи обоснования объема контрольных испытаний с использованием алгоритмов нечеткой логики, исследуется их применимость в повышении надежности функционирования технических систем.

В настоящее время при организации выборочного контроля используются планы и процедуры контроля по альтернативному признаку на основе приемлемого уровня качества [2], которые предназначены главным образом для контроля последовательности партий, достаточной для применения правил переключения на ослабленный или усиленный контроль. Правила должны обеспечивать, с одной стороны, защиту потребителя в случаях обнаружения снижения качества (в этом случае рекомендуется переключиться на усиленный контроль или контроль прекратить), а с другой – стимул к снижению затрат на контроль при достижении стабильного уровня качества (это обеспечивается переключением на ослабленный контроль). В стандарте [2] определены три уровня контроля основанные на отборе партий, причем в зависимости от четкости этого отбора, но критерии степени четкости этим документом не установлены. Для относительно небольших объемах выборки и больших значениях риска первого и второго рода указаны четыре специальных уровня, но также 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) текущее значение счетчика переключений не менее 30 – стандартом ничем не обосновано это число;

б) производство находится в установившемся режиме – признаки установившегося режима в каждом случае субъективны и зависят от конкретной ситуации;

с) ослабленный контроль уполномоченная сторона рассматривает как предпочтительный – никак не определяются критерии предпочтения.

Таким образом, предлагается дополнить систему выборочного контроля, которая в настоящее время определена объемом контролируемой партии, уровнями контроля и значением приемлемого уровня качества применением алгоритмов нечеткой логики 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

В общем виде задача может быть сформулирована следующим образом.

Организуется приемочный выборочный контроль [1, 2, 3] – одноступенчатый контроль:

- 1) из контролируемой партии продукции объемом N случайным образом отбирают n единиц продукции;
- 2) эту выборку проверяют и в ней подсчитывают число дефектных изделий m ;
- 3) применяется решающее правило – если число m меньше или равно приёмочному числу, то партия изделий принимается. В противном случае она бракуется.

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 число дефектных изделий.

Требуется по результатам анализа исходной информации о процессе проведения испытаний качества испытаний дополнить систему выборочного контроля моделью нечеткой логики 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.

Формализация нечетких переменных

Предложенный подход, основанный на использовании модели нечеткого вывода включает в себя несколько этапов. Первым является определение входных данных – нечетких переменных, выбор состава входных переменных и их формализация является важным этапом нечеткой модели, так как в основном их набор и состав термов (базовое терм-множество T), а также синтаксические правила, порождающие названия термов, семантические правила, задающие функции принадлежности нечетких термов, порожденными синтаксическими правилами определяет итоговый результат, и ошибочные априорные данные могут существенно исказить этот результат. Форма представления входных переменных воплощает объем знаний, которые испытатель имеет о неизвестном параметре перед началом испытаний. Чем более он информирован, тем более содержательным будут лингвистические переменные.

На первоначальном этапе выбираются показатели для оценки возможности переключения режима контроля. Используем следующие показатели – входные нечеткие переменные:

Первые две переменные характеризуют качество процесса отбора выборок:

- Коэффициент репрезентативности отбора выборок – X_1 .

Предполагается, что выбор единиц продукции для составления выборки проводят с помощью отбора простой случайной выборки, однако там, где это целесообразно, в выборку следует отбирать количество единиц на основе некоторого правила, определяемого испытателем перед организацией контроля.

- Коэффициент временной случайности взятия выборок – X_2 .

Предполагается два варианта: первый – отбор выборок проводят случайным образом после формирования партий, второй – в течение времени ее производства.

- Производство находится в установившемся режиме X_3 .

Данный параметр отражает качество технологического производственного процесса. Очевидно, что от того, как настроен технологический процесс производства, возможны ошибки при принятии решения о качестве продукции.

- Коэффициент предпочтения X_4 .

Данный параметр показывает, насколько ослабленный контроль уполномоченная сторона рассматривает как предпочтительный

Сформулируем предметную область «качество контроля» в терминах теории нечетких множеств [8], комплексный (агрегированный) показатель качества контроля определим в виде функции нескольких параметров, которая определена в декартовом пространстве как произведение множеств возможных значений параметров нормального и ослабленного контроля и принимает значения в диапазоне от нуля до единицы. Выходной переменной является значение в интервале $[0; 1]$, термножество которой принимает следующие значения:

- режим ослабленного контроля,
- режим нормального контроля;
- режим усиленного контроля.

Данная выходная переменная характеризуется тремя трапециевидными функциями принадлежности, например, с параметрами $[0 \ 0 \ 0,3 \ 0,5]$, $[0,3 \ 0,6 \ 0,8 \ 0,9]$ $[0,7 \ 0,8 \ 1 \ 1]$ соответственно.

В практических случаях испытатели должны определять границу значения выходной переменной, которое определяет переход из одного режима в другой. Например, можно считать, что следует перейти в режим ослабленного контроля, если значение выходной переменной превышает 0,5. Ниже будут сформулированы более подробно рекомендации по выбору решающего правила.

В заключении данного этапа определим для выбранных входных показателей базовое терм-множество T пятью нечеткими переменными: «очень низкий», «низкий», «средний», «высокий», «очень высокий».

Построение функций принадлежности

Следующий этап – распознавание уровней принадлежности выбранных показателей – строятся функции принадлежности $\mu_A(x)$ для каждого лингвистического термина из базового терм-множества T . Параметры основных функций принадлежности (треугольных, трапециевидных, гауссовых) достаточно полно описаны, например, в [6,7,8,11].

Для нечетких переменных сформируем трапециевидную функцию принадлежности [8] на основании наличия граничного значения. В общем виде такая функция принадлежности, определяемая параметрами (a, b, c, d) , описывается следующим выражением:

$$\mu_A(X) = \begin{cases} 1 - \frac{b-x}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ 1, & b \leq x \leq c \\ 1 - \frac{x-c}{d-c}, & c \leq x \leq d \\ 0, & \text{в остальных случаях} \end{cases},$$

Конкретные интервалы значений нечетких переменных определяются на предварительном этапе путем анализа технологического производственного процесса, методики отбора выборок, предполагаемого уровня качества изделий, субъективного мнения экспертов и являются предметом отдельных исследований. Результаты проведенных исследований представлены в таблице 1. Параметры функций принадлежности используются для вычисления уровней принадлежности нечетким подмножествам из терм-множества значений переменной, т.е. значения соответствующих функций принадлежности для заданных входных параметров, представленных ранее в таблице 2.

Таблица 1

Интервалы значений для анализируемых показателей

	Наименование показателя	Очень низкий	Низкий	Средний	Высокий	Очень высокий
X_1	Коэффициент репрезентативности отбора выборок	0:0.2	0.1:0.3	0.25:0.5	0.45:0.7	0.6:0.9
X_2	Коэффициент временной случайности взятия выборок	0:0.1	0.05:0.15	0.1:0.35	0.3:0.5	0.5:0.8
X_3	Производство находится в	0:0.2	0.15:0.3	0.25:0.6	0.45:0.8	0.65:1

	Наименование показателя	Очень низкий	Низкий	Средний	Высокий	Очень высокий
	установившемся режиме					
X ₄	Коэффициент предпочтения	0:0.25	0.1:0.3	0.25:0.5	0.45:0.8	0.7:1

Таблица 2

Параметры (вершины) трапециевидных функций принадлежности для анализируемых показателей

		Очень низкий	Низкий	Средний	Высокий	Очень высокий
X ₁	a	0	0,1	0,25	0,45	0,6
	b	0	0,2	0,3	0,5	0,7
	c	0,1	0,25	0,45	0,6	0,8
	d	0,2	0,3	0,5	0,7	0,9
X ₂	a	0	0,05	0,1	0,3	0,5
	b	0	0,1	0,2	0,35	0,55
	c	0,05	0,12	0,3	0,45	0,6
	d	0,1	0,13	0,35	0,5	0,75
X ₃	a	0	0,1	0,25	0,45	0,65
	b	0	0,2	0,3	0,5	0,7
	c	0,15	0,25	0,45	0,6	0,8
	d	0,2	0,3	0,5	0,8	1
X ₄	a	0	0,1	0,25	0,45	0,7
	b	0	0,2	0,3	0,5	0,75
	c	0,15	0,25	0,45	0,6	0,8
	d	0,25	0,3	0,5	0,8	1

Например, для наглядности полученных расчетов на рисунке 1 представлены виды функции принадлежности лингвистической переменной "Коэффициент репрезентативности отбора выборок".

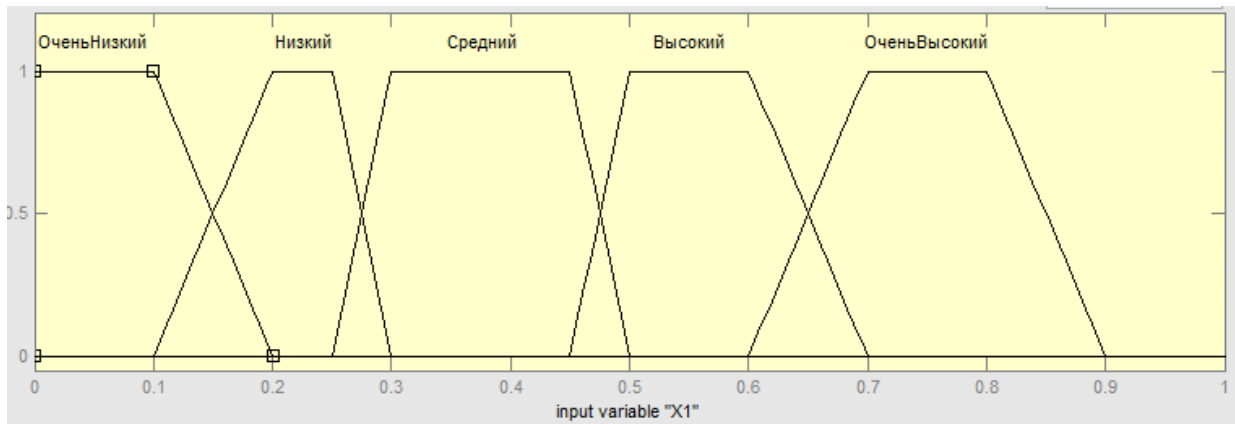


Рисунок 1 – График функций принадлежности для переменной X_1

Формирование нечетких правил

На основе экспертного опыта и предварительного анализа системы формируются нечеткие правила, которые определяют взаимосвязи между входными нечеткими переменными и выходным результатом, в данном случае – режимом контрольных испытаний.

Например, сформулируем характерных правила нечеткой продукции для рассматриваемой системы в рамках реализации алгоритма нечеткого вывода Мамдани:

Правило 1. Если « X_1 имеет значение высокий», « X_2 имеет значение высокий», « X_3 имеет значение средний», « X_4 имеет значение очень высокий», то «режим ослабленного контроля».

Правило 2. Если « X_1 имеет значение средний», « X_2 имеет значение высокий», « X_3 имеет значение средний», « X_4 имеет значение очень низкий», то «режим нормального контроля».

Правило 3. Если « X_1 имеет значение низкий», « X_2 имеет значение средний», « X_3 имеет значение средний», « X_4 имеет значение низкий», то «режим усиленного контроля».

Рассмотрим применение агрегированного показателя – оценка качества контроля. Данный показатель P можно рассчитать по формуле [6]:

$$P = \sum_{j=1}^5 p_j \sum_{i=1}^N r_i \gamma_{ij}$$

где:

p_j - узловые точки стандартного пятиуровневого классификатора, рекомендуется его определять следующим образом: $p_i = 0,9 - 0,2(j - 1)$;

r_i – уровень значимости показателя;

γ_{ij} – значение уровня принадлежности j -ого качественного уровня относительно текущего значения i -ого показателя.

Формирование решающего правила

Процесс нечеткой инференции основывается на нечетких правилах и использует их для генерации нечеткого вывода. Этот вывод представляет собой нечеткое число, которое затем преобразуется в конкретное действие или решение. Из полученного нечеткого множества значений выходной переменной определяется конечное решение о переключении на соответствующий режим контроля.

При использовании агрегированного параметра лингвистическое распознавание возможности переключения на режим контроля можно выполнить, воспользовавшись предложенными рекомендациями таблицы 3. Переключение

производится либо в сторону ослабления режима контроля, либо в сторону усиления в зависимости от текущего режима.

Таблица 3

Классификатор уровней агрегированного показателя

Численное значение переменной	Лингвистические значения переменной
[0 ; 0,6]	Переключение с нормального контроля на усиленный контроль
[0 ; 0,7]	Переключение с ослабленного контроля на нормальный контроль
[0,7 ; 1]	Переключение с нормального контроля на ослабленный контроль
[0,6 ; 1]	Переключение с усиленного контроля на нормальный контроль

Преимуществом предложенного подхода заключается в получении результирующего агрегированного значения, определяемого как средневзвешенное не только по выбранным показателям, но и по всем качественным уровням этих показателей.

Заключение

Рассмотренная методика применения процедур и алгоритмов нечеткого вывода при наличии недостаточно ясной и четко сформулированной дополнительной

информации 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 алгоритмами нечеткой логики в процедурах и правилах переключения между уровнями контроля, обеспечивает уменьшение неопределенности при анализе исходной информации и достаточный уровень качества принимаемых решений по результатам выборочного контроля.

Список источников

1. Тарасов А.Г., Миляев И.К., Мусиенко А.С. Модель оценки коэффициента готовности электрических кабельных систем космических средств, учитывающая особенности определения технического состояния // Труды МАИ. 2023. № 131. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=175923>. DOI: 10.34759/trd-2023-131-17
2. Захарова Е.А., Барановский А.М. Модель оценивания готовности сложных технических систем с учетом показателей качества диагностирования // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. 2019. № 669. С. 124–132.
3. Павлов А.Н., Умаров А.Б., Кулаков А.Ю., Гордеев А.В. Задача планирования реконфигурации системы управления движением малого космического аппарата дистанционного зондирования Земли в условиях неизвестной циклограммы его функционирования // Труды МАИ. 2022. № 126. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=169004>. DOI: 10.34759/trd-2022-126-18

4. Копкин Е.В., Чикуров В.А., Алейник В.В., Лазутин О.Г. Алгоритм построения гибкой программы диагностирования технического объекта по критерию ценности получаемой информации // Труды СПИИРАН. 2015. № 4 (41). С. 106–130.
5. 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=90383>
6. Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. - СПб.: БХВ Петербург, 2005. - 736 с.
7. Пегат А. Нечеткое моделирование и управление. - М.: Бинوم. Лаборатория знаний, 2009. – 798 с.
8. Кофман А. Введение в теорию нечетких множеств. - М.: Наука, 1982. – 432 с.
9. Хей Дж. Введение в методы байесовского статистического вывода. - М.: Финансы и статистика, 1987. - 336 с.
10. Кохендерфер М., Уилер Т., Рэй К. Алгоритмы принятия решений / пер. с англ. В. С. Яценкова. – М.: ДМК Пресс, 2023. – 684 с.
11. Флегонтов А.В, Вилков В.Б., Черных А.К. Моделирование задач принятия решений при нечетких исходных данных. – СПб.: Лань, 2020. – 332 с.
12. 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.

13. Сторожев С.А., Хижняков Ю.Н. Новый метод адаптации регулятора состояний с применением нечеткой логики // Труды МАИ. 2021. № 118. URL: <https://mai.ru/publications/index.php?ID=158255>. DOI: 10.34759/trd-2021-118-16
14. 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.
15. Дорожко И.В. Захарова Е.А., Осипов Н.А. 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.
16. 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: <http://trudymai.ru/published.php?ID=118181>. DOI: 10.34759/trd-2020-113-14
17. 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
18. 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

19. 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>

20. Привалов А.Е., Дорожко И.В., Захарова Е.А., Копейка А.Л. 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>

References

1. Tarasov A.G., Milyaev I.K., Musienko A.S. *Trudy MAI*, 2023, no. 131. URL:

<https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=175923>. DOI: 10.34759/trd-2023-131-17

2. Zakharova E.A., Baranovskii A.M. *Trudy Voенно-kosmicheskoi akademii imeni A.F. Mozhaiskogo*, 2019, no. 669, pp. 124–132.

3. Pavlov A.N., Umarov A.B., Kulakov A.Yu., Gordeev A.V. *Trudy MAI*, 2022, no. 126.

URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=169004>. DOI: 10.34759/trd-2022-126-18

4. Kopkin E.V., Chikurov V.A., Aleinik V.V., Lazutin O.G. *Trudy SPIIRAN*, 2015, no. 4 (41), pp. 106–130.

5. Osipov N.A., Musienko A.S., Merkushev O.A. *Trudy MAI*, 2023, no. 132. URL:

<https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=90383>

6. Leonenkov A.V. *Nechetkoe modelirovanie v srede MATLAB i fuzzyTECH* (Fuzzy modeling in MATLAB and fuzzyTECH), Saint Petersburg, BKhV Peterburg, 2005, 736 p.
7. Pegat A. *Nechetkoe modelirovanie i upravlenie* (Fuzzy modeling and control), Moscow, Binom. Laboratoriya znanii, 2009, 798 p.
8. Kofman A. *Vvedenie v teoriyu nechetkikh mnozhestv* (Introduction to the theory of fuzzy sets), Moscow, Nauka, 1982, 432 p.
9. Khei Dzh. *Vvedenie v metody baiesovskogo statisticheskogo vyvoda* (Introduction to Bayesian statistical inference methods), Moscow, Finansy i statistika, 1987, 336 p.
10. Kokhenderfer M., Uiler T., Rei K. *Algoritmy prinyatiya reshenii* (Decision-making algorithms), Moscow, DMK Press, 2023, 684 p.
11. 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', 2020, 332 p.
12. Solov'ev V.A., Lyubinskii V.E., Zhuk E.I. *Pilotiruemye polety v kosmos*, 2012, no. 2 (4), pp. 44-51.
13. Storozhev S.A., Khizhnyakov Yu.N. *Trudy MAI*, 2021, no 118. URL: <https://mai.ru/eng/publications/index.php?ID=158255>. DOI: 10.34759/trd-2021-118-16
14. Osipov N.A., Dorozhko I.V. *Izvestiya vuzov. Priborostroenie*, 2013, vol. 56, no. 1, pp. 18–26.
15. Dorozhko I.V. Zakharova E.A., Osipov N.A. *Trudy VoЕННО-kosmicheskoi akademii im. A.F. Mozhaiskogo*, 2019, no. 669, pp. 216–223.

16. Dorozhko I.V., Osipov N.A., Ivanov O.A. *Trudy MAI*, 2020, no. 113. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=118181>. DOI: 10.34759/trd-2020-113-14
17. Dorozhko I.V., Gorokhov G.M., Kirillov I.A. *Trudy MAI*, 2022, no. 125. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=168195>. DOI: 10.34759/trd-2022-125-23
18. Dorozhko I.V., Ivanov O.A. *Trudy MAI*, 2021, no. 118. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=158259>. DOI: 10.34759/trd-2021-118-19
19. Gusenitsa Ya.N., Dorozhko I.V., Kochanov I.A., Petukhov A.B. *Trudy MAI*, 2018, no. 98. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=90383>
20. Privalov A.E., Dorozhko I.V., Zakharova E.A., Kopeika A.L. *Trudy MAI*, 2018, no. 103. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=101526>

Статья поступила в редакцию 07.04.2024

Одобрена после рецензирования 12.04.2024

Принята к публикации 27.06.2024

The article was submitted on 07.04.2024; approved after reviewing on 12.04.2024; accepted for publication on 27.06.2024