

## РИСК-ОРИЕНТИРОВАННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ. УПРАВЛЕНИЕ КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ РИСКАМИ НЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЙ МОБИЛЬНЫХ МАШИН

Панов А.Н.<sup>1</sup>, Юдина О.Н.<sup>2</sup>, Мрочек Ж.А.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>ООО ЮРС-РУСЬ, Санкт-Петербург;

<sup>2</sup>Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук, Москва;

<sup>3</sup>Белорусский национальный технический университет, Минск

**Ключевые слова:** проектирование, качество, надежность, риски, мобильные машины, несущие конструкции.

**Аннотация.** На основе методологии риск-ориентированного проектирования разработаны и доведены до практического применения методики управления рисками несущих конструкций мобильных машин. В технические требования к традиционным показателям (номинальному значению и полю допуска) характеристик добавлен идентификатор значимости последствия отказа как для конечного потребителя, так и заинтересованных сторон. Разработаны новые виды конструкторских документов: перечень приоритизации характеристик, план управления рисками, анализ рисков (с использованием методик FMEA/ RFMEA) и др. Идентификатор значимости последствий (балл) – определяет величину интегрального ущерба. Риск-ориентированное проектирование, позволяет управлять массивами вероятностей несоответствия каждой критериальной характеристики, причем не только корневой первопричиной отказа техники, но и ее источниками на основе актуальных знаний науки и техники. Указанное, в конкурентной среде, позволяет иметь экономическое обоснование для внедрения оптимальных, с позиций потенциального ущерба, конструкторско-технологических решений на актуальной научной базе. На основе предложенных моделей управления рисками, можно снижать себестоимость техники для производителя и стоимости ее владения при эксплуатации. Для планомерного повышения достоверности анализа рисков путем использования данных испытаний, эксплуатации и отказов техники предложено выполнять «обратный» анализ рисков, позволяющий, в том числе, пополнять базу знаний. Методики проиллюстрированы на примере управления рисками несущих конструкций машин, которые, как правило, определяют ресурс/ срок службы техники. Показано, что результаты работы применены на практике: на предприятиях машиностроения; при разработке государственных стандартов для выполнения риск-ориентированного проектирования.

## RISK-ORIENTED DESIGN. MANAGEMENT OF DESIGN AND TECHNOLOGICAL RISKS OF LOAD-BEARING STRUCTURES OF MOBILE MACHINES

Panov A.N.<sup>1</sup>, Yudina O.N.<sup>2</sup>, Mrochek Zh.A.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>URS-RUS, Saint-Petersburg;

<sup>2</sup>Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow;

<sup>3</sup>Belarusian National Technical University, Minsk

**Keywords:** design, quality, reliability, risks, mobile machines, load-bearing structures.

**Abstract.** On the basis of the risk-oriented design methodology, risk management techniques for load-bearing structures of mobile machines have been developed and brought to practical application. In the technical requirements for traditional indicators (nominal value and tolerance field) of characteristics, an identifier of the significance of the consequences of failure for both the end user and interested parties has been added. New types of design documents have been developed: a list of prioritization of characteristics, a risk management plan, risk analysis (using FMEA/RFMEA techniques), etc. The significance identifier of the consequences (score) – determines the magnitude of the integral damage. Risk-oriented design allows you to manage arrays of probabilities of non-compliance with each criterion characteristic, and not only the root cause of the failure of technology, but also its sources based on current knowledge of science and technology. This, in a competitive environment, allows you to have an economic justification for the introduction of optimal, from the standpoint of potential damage, design and technological solutions on an up-to-date scientific basis. Based on the proposed risk management models, it is possible to reduce the cost of equipment for the manufacturer and the cost of its ownership during operation. In order to systematically increase the reliability of risk analysis by using test data, operation and failures of equipment, it is proposed to perform a "reverse" risk analysis, which allows, among other things, to replenish the knowledge base. The methods are illustrated by the example of risk

management of load-bearing structures of machines, which, as a rule, determine the resource / service life of equipment. It is shown that the results of the work are applied in practice: at machine-building enterprises; when developing state standards for the implementation of risk-oriented design.

**Введение.** Методология традиционного проектирования машин [1-5] основана на идентификации технических требований потребителя, заинтересованных сторон и формировании соответствующего массива характеристик (номинальные значения и поля допусков) проектного решения в конструкторской документации. Одним из основных критериев несоответствия в жизненном цикле (ЖЦ), например, мобильной машины (ММ), как вида наземных транспортно-технологических средств и комплексов, является отказ ее несущей конструкции. Следует отметить, что в компонентах машин повреждения зарождаются и развиваются в локальных зонах, таким образом, имеются критериальные характеристики которые и определяют конструкторско-технологические риски несоответствий машины [6-9]. При риск-ориентированном проектировании [6-11], в дополнении к традиционно устанавливаемым двум показателям – номинальному значению и полю допуска для каждой характеристики конструкции, материала и т.д., предложено [6-11] вводить идентификатор ее значимости на выполнение функций транспортной машины для потребителя и заинтересованных сторон. Например, отказ несущей конструкции трехосного тягача происходит из-за разрушения лонжерона в зоне крепления балансирной тележки подвески, что приводит к существенным последствиям – интегральному ущербу из-за отказа техники для организации, эксплуатирующей ММ, и заинтересованных сторон – конечных потребителей транспортной услуги. Наибольший ущерб может быть из-за не выполнения технологических операций ММ в заданный срок. Ущерб может возникать не только из-за отказа функционирования, а также вследствие аварии с жертвами, акций по отзыву техники из эксплуатации, штрафов. В итоге можно сформировать массивы экономических ущербов и эквивалентную шкалу значимости последствий [6-11]. С другой стороны, например, в техническом задании на ММ устанавливается заданный ресурс, а его вариация (как не достижение, так и превышение) на практике, приведет к удорожанию – ущербу и соответственно невостребованности машины потребителями при ее тиражировании. Достоверная оценка интегрального ущерба позволяет обосновано выделять ресурсы для достижения конструкторско-технологическими методами приемлемой вероятности разрушения в локальных зонах. Таким образом, развитие моделей, методик анализа и управления рисками в процессе риск-ориентированного проектирования [6, 7], в первую очередь, на этапах жизненного цикла «опытный образец конструкции» является актуальной задачей, решение которой позволит достигать оптимальных, конкурентоспособных показателей «качество-цена-риски соответствия».

#### **Управление конструкторско-технологическими рисками мобильных машин**

Предложено методику оценки достижения приемлемых конструкторско-технологических рисков [8-9] конструкций машины в рамках риск-ориентированного проектирования развить путем введения при конструировании шагов планирования приемлемых рисков, их анализа и синтеза новых конструкторско-технологических решений для типа конструкции на этапе «опытный образец» [6-9]. Для этого необходимо ввести новые факторы [11]: а) в конструкторско-технологической документации появляется третий обязательный показатель – «ущерб / значимость последствий» несоответствия [6, 8-11], предложена система идентификации – в графическом овале число, которое выбирается по десятибалльной шкале (балл 10 означает наибольший интегральный ущерб), балл проставляется возле технической характеристики [6, 8, 9]; б) в дополнение к существующему комплексу конструкторской документации (ЕСКД и т.п.) разрабатывать новые виды документов, включающие «перечень приоритетности характеристик продукции», «план управления рисками продукции», «анализ рисков продукции» (с использованием методики DFMEA/ RFMEA) и др. [10]; в) осуществление перепроектирования еще до проведения дорогостоящих испытаний в случае не достижения приемлемости проектного решения

конструкции по результатам анализа конструкторско-технологических рисков; г) продолжать проводить анализ рисков и после физического появления образца техники по результатам появляющейся информации (наблюдения при использовании, отказы при испытаниях и эксплуатации) с использованием методики «обратного» анализа рисков (RDFMEA) [8, 9, 10]. В результате на этапе «проектирование конструкции» жизненного цикла ММ управлением рисками достигается оптимальное соотношение «вероятность – ущерб», а выбранные технические решения формируют аттрактор достижения соответствия [11].

В процессе риск-ориентированного проектирования *типа конструкции* определяется целевая функция – обеспечить приемлемость рисков конфигулятора, в котором функционирует ММ, путем управления вероятностью возникновения и обнаружения несоответствий – в опасных зонах ММ для достижения приемлемого ущерба. По показателям результативности и эффективности как для потребителя, так и изготовителя оптимизация пригодности конструкторско-технологического решения *для типа конструкции* достигается путем управления [10] критериальными характеристиками на всех уровнях иерархии конструкции ММ. Указанные характеристики обеспечивают приемлемость рисков конфигулятора на основе данных массивов: классификации пренебрежимых, приемлемых, чрезмерных рисков; рисков, достигнутых при проектировании конструкции, из-за конструктивного и технологического решений; интегральных критериальных рисков [6, 8, 9-11]. Для этого предложено при проектировании ММ анализировать сценарии штатных, нештатных, проектных, запроектных и гипотетических ситуаций [6-11].

Для анализа вероятностей возникновения, обнаружения отказов и рисков предлагается использовать усовершенствованную методику FMEA, представленную в качестве требований по применению, в разработанном с участием авторов статьи стандарте [10]. При использовании разработанной методики риск структурируется как массивы: ущерба – значимости последствий отказа; несоответствия критериальной характеристики; вероятности соответственно возникновения и обнаружения несоответствий для различных конструкторско-технологических исполнений каждой зоны из массива зон зарождения отказов в иерархии сборной несущей конструкции [6-11].

В общем виде достоверность доказательств вероятности возникновения, обнаружения критериальных параметров в зависимости от значимости последствий [6, 7] основано на применении адекватных величине интегрального риска методов теории вероятности и математической статистики как при расчетах, прогнозировании, так и при оценке соответствия типа конструкции (с учетом конструкторско-технологических факторов) – при испытаниях и диагностики в эксплуатации.

В ходе риск-ориентированного проектирования и подготовки производства следует планировать, анализировать и управлять рисками конструкции и ее частей. Для этого необходимо и достаточно доведение вероятности появления каждой из причин каждого из идентифицированных рисков до приемлемой в соответствии с предложенной моделью «вероятность – ущерб» [8-11]. Вероятности риска, приводящего к ущербу, определяются вероятностями возникновения и обнаружения.

Использование предложенных [6-9] моделей планирования и управления рисками проиллюстрировано на примере управления рисками несущих конструкций для различных типов ММ и фокусированием на локальных зонах разрушений – первопричинах источников отказов рамы лонжеронного типа. Алгоритм управления рисками включает следующие массивы данных: а) установленные цели по качеству, ресурсу, безопасности и т.д. ММ в ТЗ/ТТЗ; б) регламентированные показатели чрезмерных, приемлемых, пренебрежимых рисков, зависимости «вероятность-ущерб» (например, наличие матрицы связи вероятностей, ущербов [6-9]); в) концептуальное проектирование конструкции и процессов изготовления, техническое проектирование в рамках плана проекта; г) идентификация приоритетности характеристик («Перечень приоритизации характеристик»); д) планирование управления рисками («План управления рисками»); е) идентификация причинно-следственных связей на основе конструкторско-технологических решений («дерево - конструкции», «дерево -

функций», «дерево-отказов», «дерево-причин», «дерево-источников причин», «сдвоенной дерево индукции-дедукции», «дерево событий» и др.); ж) проведение анализа и управления рисками (переход от контроля техники путем проведения расчетов вероятности и получения статистики отказов при испытании на анализ рисков для предупреждения отказов техники) для принятия решения о необходимости перепроектирования до физического появления конструкции ММ; з) оценка приемлемой вероятности возникновения каждой из причин отказов – критериальных конструкторско-технологических характеристик; и) оценка эффективности перепроектирования на основе результатов прогнозирования рисков ущербов (прямых, косвенных, отдаленных) в рамках реализации проекта ЖЦ ММ.

Для проведения анализа рисков использована усовершенствованная методика FMEA в рамках выполнения требований системного стандарта [10]. Расчет приоритетного числа рисков предложено осуществлять на основе количественных данных прогнозирования вероятности отказов – первопричин – источников появления разрушений в локальных зонах конструкции. Заданный (допустимый уровень) несоответствий определяется возможными потерями для организации-изготовителя и потребителей в связи, например, отказом, возвратом несоответствующей ММ и оценивается вероятностью – количеством несоответствий на миллион – ppm.

Анализ и оценка рисков выполнена для рамных несущих конструкций серии двух- и трехосных ММ (седельные тягачи, самосвалы). Оценка вероятного количества несоответствий, исходя из того, что каждая причина (повреждение элемента несущей системы, зазор между несущими элементами и т.п.) приведет к возникновению отказа и т.п. Критерии несоответствия – недостижение заданного среднего ресурса, гарантийной наработки. Сравнение расчетной величины количества несоответствий (ppm) с базовой [ppm] проводится на основе данных о вероятности появления несоответствия в связи со значимостью последствий отказа ММ. На основании анализа потенциальных затрат и потерь связанных с обеспечением качества (надежности, безопасности и т.д.) [6-11] принимаем решение о соответствии конструкции требованиям или о необходимости корректировки (конструкторской документации, ресурсов на рекламации и т.п.) либо экономической нецелесообразности совершенствования продукции.

Для проведения анализа рисков использованы данные: оценок характеристик сопротивления усталости типичных зон повреждений несущих элементов рам, циклической долговечности крепежа (усталость; фреттинг-усталость, ослабление соединений, разрушение крепежа болтов и заклепок, разрушение сварных соединений); нагруженности конструкций в условиях эксплуатации и эквивалентных стендовых условиях экспериментальными и расчетными методами; расчетов циклической долговечности на основе гипотез суммирования усталостных повреждений; по исследованиям влияния конструкторско-технологических факторов на долговечность зон повреждений (в том числе остаточных напряжений от сборки) [8, 9].

Применение методики анализа рисков проиллюстрируем на примере сборных рамных конструкций мобильных машин. Исходные данные: проектная документация на опытный образец (сборочной единицы); рама – объект невосстанавливаемый и контроль ее соответствия функционирования в эксплуатации не предусмотрен. В техническом задании нормируется средний ресурс эксплуатации и гарантийный пробег/ срок. Дополнительные исходные данные риск-ориентированного проектирования: величина потерь (в денежном выражении) из-за не достижения соответствия (прочность, надежность, безопасность и т.п.) ММ: классификация значимости последствий для несоответствий на всех уровнях детализации объекта; приемлемый/допустимый показатель рисков – для конструкции – приоритетное число рисков [RPN]; заданное количество несоответствий на миллион – [ppm].

Величины параметров, упомянутых в дополнении, могут определяться не только внутренними требованиями организации, но и условиями контракта на поставку. Например, объект – рама мобильной машины, состоящая из несущих элементов (лонжероны и поперечины) и крепежных деталей: средний ресурс,  $X_n = 800000$  км; гарантийная наработка

$x_n = 80000$  км; критерий отказа – не обеспечение функционирования закрепленных на раме узлов и агрегатов в заданных кинематических ограничениях, причина – полное или заданная величина разрушения несущих элементов и крепежных деталей; вид многоциклового нагружения – эксплуатационная нагрузка ММ в заданных условиях, приведенная к эквивалентному блоку.

Исходя из результатов планирования рисков на единицу несоответствующей машины заданы: а) экономические критерии: стоимость возврата ММ из-за обнаруженных несоответствий; затраты на гарантийный ремонт; затраты на перепроектирование; потери имиджа, штрафы и др., на каждую несоответствующую ММ; б) согласно рекомендациям зависимости «вероятность – ущерб» определяются показатели рисков: значимости последствий несоответствия; вероятности возникновения причины несоответствия; вероятности обнаружения при контроле; в) показатели для анализа серии ММ: [ppm] = 2000 в средний пробег и в гарантийный период; объем выпуска ММ – 10000 в год; показатель приоритетного числа рисков [RPN] = 200. Для установленной величины показателя рисков равной [RPN] = 200 можно отметить следующее, что на основе предложенной системы критериев методики DFMEA при наивысшей величине значимости последствий для рассматриваемых зон рамы значимости последствий (балл 8) и вероятностью обнаружения (балл 10), вероятность появления неблагоприятного события не должна превышать (балл 3), а следовательно, 30 несоответствий на миллион, либо 0,003%, или при программе выпуска 10000 ММ в год, практически ни на одной машине не будет зафиксирован отказ указанной значимости последствий.

Процедура прогнозирования и оценки вероятности циклической долговечности несущих элементов и степени перегрузки крепежных деталей (заклепок, болтов) соединений основана на использовании данных о прогнозировании и оценке циклической долговечности зон повреждений [8, 9]. Расчет циклической долговечности на этапе «анализа проекта» проиллюстрирован для блоков эквивалентного нагружения моделирующими режим форсированных испытаний и испытания на стенде несущей конструкции соответственно. Прогноз циклической долговечности крепежа (разрушение, ослабление заклепок, болтов и т.п.) осуществлялся при имитации технологического цикла применения ММ. Необходимо отметить, что при прогнозировании учитывались не только рабочие величины внутренних силовых факторов в крепеже, но и возникающие при сборке рамы. Для подтверждения достоверности прогнозов проводилось сравнение с результатами стендовых, эксплуатационных и полигонных испытаний. Анализ результатов сравнения свидетельствует, что прогноз циклической долговечности несущих элементов и крепежа с приемлемой достоверностью совпадает с результатами имеющихся экспериментальных данных физического моделирования на элементах и натурной конструкции. Анализ результатов прогнозирования, оценки ресурса и рисков свидетельствует о приемлемой достоверности моделей и полученных зависимостей.

Пример анализа рисков DFMEA сборной рамой конструкции ММ выполнен с использованием данных [6, 7] прогнозирования циклической долговечности несущих элементах рамы:

а) для полки лонжерона рамы (трехосного самосвала): фактический ppm равен  $52000 > 2000$ , т.е. 5,2% ММ не выработает средний ресурс; показатель  $RPN = 640 > 200$  (значимость последствий – «отказ не связан с безопасностью человека, полная потеря функции продукции»);

б) для зоны стыка усилителей лонжерона рамы (трехосного самосвала): 41,7% ММ не пройдет гарантийный пробег; показатель рисков  $RPN = 800 > 200$ .

Для иллюстрации оценки рисков разрушения крепежа [6, 7] оценим потенциальное количество возвратов трехосных самосвалов по причине разрушения заклепок и болтов. Рассмотрено два варианта крепления рамы к надрамнику:

а) для анализируемой заклепки со значением степени перегрузки крепежа получим, что практически на каждой ММ заданный ресурс будет достигнут при разрушении

анализируемой единицы крепежа. Фактический риск превышает установленное требование  $RPN = 420 > 200$ , значимость последствий – "функционирование продукции на очень низком уровне, потребитель крайне не удовлетворен, фактический ppm стремится к  $10^6$ , то есть практически все 100% машин при среднем ресурсе будут иметь разрушенный крепеж;

б) по результатам расчета МКЭ и оценки характеристик сопротивления усталости, установлено, что конкретные единицы крепежа конструкции не обеспечивают заданный ресурс по критерию надежности болтового соединения.

Определим, какова должна быть степень перегрузки крепежа (заклепок/болтов), чтобы выполнить установленное в ТЗ количество отказов. Показано, что степень перегрузки крепежа не должна превышать 29 и 20 % для заклепок и болтов соответственно. Установлено, что конкретные крепежные элементы – заклепки не удовлетворяют данным условиям, а все болты не соответствуют требованиям. Указанное составляет свыше 30% всех единиц крепления надрамника к лонжерону – для варианта крепления заклепок, и почти 80% для болтов за пробег равный ресурсу.  $RPN = 420 > 200$ . Следовательно, требование по числу рисков не достигнуто, необходимы корректирующие мероприятия.

Проведенная оценка рисков невыполнения функции соединения лонжерон-поперечина (двухосного тягача) по критерию ослабления крепежа показала, что степень превышения усилия "срыва стыка" не должна превышать 21%, а установленное количество болтов, которые данному условию не удовлетворяют, составляет около 30% от всех крепежных деталей. Следовательно, показатель рисков  $RPN = 420 > 200$ , что не соответствует установленным требованиям, а конструкция требует перепроектирования [8, 9].

Поскольку анализ рисков конструкции показал, что требования не выполнены, необходимо принять решение об экономической целесообразности перепроектирования конструкции. Указанный алгоритм повторяется до достижения требуемых величин [RPN], [ppm] и оптимальных затрат на управление рисками.

Проиллюстрируем применение методики обратного анализа риска с использованием методики RFMEA для зоны – «трещина на стенке лонжерона у третьей поперечины» разрушений лонжерона (двухосного тягача). Данный анализ проводился после проведения циклических испытаний рамы на стенде и выявления трещины. Проведенный обратный анализ рисков, не выявленного ранее, позволил оценить, что до 27,43% ММ могут вернуться изготовителю из-за данного вида разрушения в гарантийный период.  $RPN = 700 > 200$ . В конструкцию необходимо вносить изменения.

Следует отметить, что принятие оптимального решения по результатам анализа рисков в общем случае включает: а) оценку соответствия конструкции ММ требованиями и необходимости корректировки (например, учет влияния на циклическую долговечность шероховатости поверхности, зазора, хим. состава материала детали и т.п.); б) уточнение требований к поставщикам (оптимизации номинальных значений характеристик, вариации / снижение рассеяния характеристик соответствия комплектующих и т.п.); в) выдачу заключения о необходимости перепроектирования, резервирование ресурсов на рекламации, акции по отзыву и т.п., либо об экономической нецелесообразности совершенствования разработки.

## **Выводы**

1. Развито методическое обеспечение для управления конструкторско-технологическими рисками в рамках риск-ориентированного проектирования в основе которого модели «вероятность - ущерб/ значимость приоритета», оптимизации затрат на управление рисками, оптимизации эффективности в жизненном цикле продукции, а также методика идентификации значимости приоритета технической характеристики в конструкторской документации.

2. Развита методика анализа рисков DFMEA, RFMEA, отличающиеся тем, что для оценивания вероятности возникновения риска используется результаты прогнозирования вероятности отказа на основе гипотез суммирования повреждений, а не экспертной оценки

рисков. Указанное позволяет повысить достоверности управления рисками и адекватность принятия решений о перепроектировании.

3. Разработанный комплекс методик анализа рисков сборных несущих конструкций ММ на основе прогнозирования ресурса несущих элементов, крепежных соединений, в целом конструкции и оценки вероятности не выполнения характеристик позволяет на этапе «опытный образец» риск-ориентированного проектирования и изготовления:

- оценивать вероятное количество несоответствующих ММ в эксплуатации с учетом значимости возможных последствий, как для потребителя, так и производителя;
- достигать вероятности отказа до приемлемой величины в зависимости от потенциального ущерба для конфигуратора, в котором функционирует ММ;
- при заданных ресурсных ограничениях (себестоимости) максимально удовлетворять требования как потребителя, так и изготовителя.

4. Системное применение методологии риск-ориентированного проектирования на основе, разработанных с участием авторов государственных стандартов, позволяет повысить конкурентоспособность, эффективность создаваемой продукции и в целом машиностроительного комплекса стран и союзов.

5. Методики управления рисками, устанавливаемые серией разработанных стандартов, элементы риск-ориентированного проектирования, внедряются и используются для повышения результативности и эффективности в машиностроительных организациях (БелАЗ, Минский тракторный завод, Минский моторный завод, Гомсельмаш, МАЗ и их поставщики).

#### Список литературы

1. Решетов Д.Н., Иванов А.С., Фадеев В.З. Надежность машин: Учеб. пособие для машиностр. спец. вузов / Под. ред. Д.Н. Решетова. – М.: Высш. шк., 1988. – 238 с.
2. Болотин В.В. Ресурс машин и конструкций. – М.: Машиностроение, 1990. – 448 с.
3. Ключев В.В., Болотин В.В., Соснин Ф.Р. и др. Надежность машин. Т. IV-3 / Под общ. ред. В.В. Ключева. М.: Машиностроение, 2001. – 592 с.
4. Проников А.С. Параметрическая надежность машин. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 520 с.
5. Якушев А.И., Воронцов Л.Н., Федотов Н.М. Взаимозаменяемость, стандартизация и технические измерения. Учеб. для вузов. – 6-е изд., доп. и перераб. – М.: Машиностроение, 1986. – 352 с.
6. Махутов Н.А. и др. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Научные основы техногенной безопасности. – М.: МГФО «Знание», 2015. – 936 с.
7. Махутов Н.А. и др. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Техногенная, технологическая и техносферная безопасность. – М.: МГОФ «Знание», 2018. – 1016 с.
8. Панов А.Н., Осмола И.И., Шкадрцов И.В., Ловкис И.Б., Маринич Л.А. Научно-методические основы проектирования. Системное обеспечение приемлемых рисков в автотракторосельхозмашиностроении: монография. – Минск: БГАТУ, 2009. – 482 с.
9. Горбачевич М.И., Панов А.Н., Минюкович С.М. Проектирование транспортных средств: нагруженность, повреждение, ресурс: монография. – Минск: Технопринт, 2005. – 264 с.
10. СТБ 16949-2018. Системы менеджмента качества. Особые требования по применению ISO 9001-2015 для организаций, участвующих в цепях поставок автотракторного, сельскохозяйственного, погрузочно-транспортного, карьерного и специального машиностроения.
11. Панов А.Н., Мрочек Ж.А., Пашкевич В.М. Фракталы и аттракторы нормирования и стандартизации техники и процессов деятельности организаций. Эффективное планетарное развитие машиностроения в парадигме рисков // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2022. – №4(77). – С. 35-47.

#### References

1. Reshetov D.N., Ivanov A.S., Faddeev V.Z. Reliability machine: Reliability of machines: Textbook for engineering specialties of universities / Ed. by D.N. Reshetov. – M.: High School, 1988. – 238 p.
2. Bolotin V.V. Resource of machines and structures. – M.: Mechanical Engineering, 1990. – 448 p.
3. Klyuev V.V., Bolotin V.V., Sosnin F.R. et al. Reliability of machines. Vol. IV-3 / Under the general editorship of V.V. Klyuev. – M.: Mechanical Engineering, 2001. – 592 p.
4. Pronikov A.S. Parametric reliability of machines. – M.: Publ. house of Bauman Moscow State Technical University, 2002. – 520 p.
5. Yakushev A.I., Vorontsov L.N., Fedotov N.M. Interchangeability, standardization and technical measurements. Studies for higher education institutions. – 6th ed., add. and revision. – M.: Mechanical Engineering. 1986. – 352 p.
6. Makhutov N.A. et al. Security of Russia. Legal, socio-economic, scientific and technical aspects. Scientific foundations of technogenic safety. – M.: MSEI "Knowledge", 2015. – 936 p.

7. Makhutov N.A. et al. Security of Russia. Legal, socio-economic, scientific and technical aspects. Technogenic, technological and technosphere safety. – М.: MSEI "Knowledge", 2018. – 1016 p.
8. Panov A.N., Osmola I.I., Shkadretsov I.V., Lovkis I.B., Marinich L.A. Scientific and methodological foundations of design. System support of acceptable risks in automotive agricultural machinery: monograph. – Minsk: BSATU, 2009. – 482 p.
9. Gorbatshevich M.I., Panov A.N., Minyukovich S.M. Vehicle design: loading, damage, resource: monograph. – Minsk: Technoprint, 2005. – 264 p.
10. STB 16949-2018. Quality management Systems. Special requirements for the application of ISO 9001-2015 for organizations involved in the supply chains of automotive, agricultural, loading and transport, quarry and special engineering.
11. Panov A.N., Mrochek Zh.A., Pashkevich V.M. Fractals and attractors of rationing and standardization of equipment and processes of organizations. Effective planetary development of mechanical engineering in the risk paradigm // Belarusian-Russian University Bulletin. 2022, no. 4(77), pp. 35-47.

*Сведения об авторах:*

*Information about authors:*

<b>Панов Александр Николаевич</b> – кандидат технических наук, главный эксперт	<b>Panov Alexander Nikolayevich</b> – candidate of technical sciences, chief expert
<b>Юдина Ольга Николаевна</b> – научный сотрудник лаборатории	<b>Yudina Olga Nikolaevna</b> – research associate of the laboratory
<b>Мрочек Жорж Адамович</b> – доктор технических наук, профессор	<b>Mrochek Zhorzh Adamovich</b> – doctor of technical sciences, professor
a.panov@tut.by	

*Получена 07.04.2023*