

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЦИКЛИЧЕСКОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ И АНАЛИЗ РИСКОВ НЕСООТВЕТСТВИЙ НЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЙ МОБИЛЬНЫХ МАШИН

PREDICTION OF CYCLIC DURABILITY AND RISK ANALYSIS OF INCONSISTENCIES IN THE SUPPORTING STRUCTURES OF MOBILE VEHICLES

А.Н. ПАНОВ, к.т.н.

ЮПС-РУСб, Санкт-Петербург, Россия, a.panov@tut.by

A.N. PANOV, PhD in Engineering

URS Russia, Saint-Petersburg, Russia, a.panov@tut.by

Надежность и безопасность мобильных машин определяется их несущей системой. Достижение малой вероятности отказа конструкций и сокращение затрат на технику возможно при изменении традиционных методов прогнозирования надежности и применения анализа рисков, а также использования риск-ориентированного проектирования. Целью работы является разработка методик прогнозирования циклической долговечности элементов, крепежа сборных несущих конструкций и анализа для достижения приемлемых рисков мобильных машин на этапах риск-ориентированного проектирования. Для методического обеспечения риск-ориентированного проектирования разработаны соответствующие методики и стандарты, позволяющие применять новые методы конструирования и расчета создателям тракторной и сельскохозяйственной техники. Предложено ввести в существующую систему обозначений конструкторско-технологической документации идентификаторы для параметров – показатели приоритета – и достигать при проектировании вероятности появления каждой потенциальной причины отказа до заданного уровня риска с учетом приоритета. Инструментом достижения малых вероятностей отказа является построение диаграмм причинно-следственных связей отказов – «источник причины и последствия» – на основе метода дедукции и индукции. Разработана расчетно-экспериментальная методика прогнозирования надежности (ресурс) по критерию циклической долговечности несущих конструкций и крепежа. Методика основывается на локальном моделировании зон зарождения повреждений с учетом влияния конструкторско-технологических факторов производства, имитации нагрузочного режима мобильной машины, ее зон повреждений. Для расчета используются: метод конечных элементов, экспериментальная оценка нагруженности, характеристики сопротивления усталости несущих элементов, заклепок и болтов, гипотезы накопления повреждений. Анализ рисков проводится с использованием методики FMEA.

В результате анализа рисков в вероятностной постановке делается вывод о возможном ущербе для поставщика – количестве мобильных машин, которые не обеспечат выполнение заявленных требований по заданному ресурсу и гарантийному пробегу. Таким образом, появляются данные для оценивания рисков и принятия решения о целесообразности перепроектирования техники. Созданное методическое обеспечение прогнозирования циклической долговечности и анализа рисков для реализации риск-ориентированного проектирования позволяет: устранять неконкурентоспособный уровень качества продукции и качества производства, а также низкую эффективность и производительности труда; применять новые технологии проектирования, методики конструирования и подготовки производства, сокращающие сроки разработки. Разработанные методы и средства риск-ориентированного подхода широко апробированы и применяются в практике автотракторосельхозмашиностроения.

Ключевые слова: мобильные машины, несущие конструкции, прогнозирование, ресурс, риски, риск-ориентированное проектирование.

Для цитирования: Панов А.Н. Прогнозирование циклической долговечности и анализ рисков несоответствий несущих конструкций мобильных машин // Тракторы и сельхозмашины. 2021. № 6. С. 45–53.

DOI: 10.17816/0321-4443-2021-6-45-53

The reliability and safety of mobile vehicles is determined by their carrier system. Achieving a low probability of failure of structures and reducing the cost of equipment is possible by changing the traditional methods of predicting reliability and applying risk analysis, as well as using risk-based design. The aim of the work is to develop methods for predicting the cyclic durability of elements, fastening prefabricated load-bearing structures and analysis to achieve acceptable risks of mobile vehicles at the stages of risk-oriented design. The methods and standards were developed in order to provide methodological support of risk-based design. Those allow designers and engineers to use new methods of design and calculation of tractor and agricultural machinery. It is proposed to introduce into the existing notation system of design and technological documentation the identifiers for parameters as the priority indicators and to achieve when designing the probability of occurrence of each potential cause of failure up to a given level of risk, taking into account priority. The tool for achieving low failure probabilities is the construction of diagrams of cause-and-effect relationships of failures is the source of cause and effect based on the method of deduction and

induction. A calculation and experimental method for predicting reliability, according to the criterion of cyclic durability of load-bearing structures and fasteners was developed. The technique is based on local modeling of damage initiation zones, taking into account the influence of design and technological factors of production, simulating the load mode of a mobile vehicle, its damage zones. The following are used for the calculation: finite element method, experimental load assessment, fatigue resistance characteristics of load-bearing elements, rivets and bolts, damage accumulation hypotheses. Risk analysis is carried out using the FMEA methodology. As a result of the risk analysis in a probabilistic formulation, a conclusion is made about the possible damage to the supplier – the number of mobile vehicles that will not ensure the fulfillment of the stated requirements for a given resource and warranty mileage. Thus, data for assessing risks and making a decision on the advisability of redesigning equipment appear. The created methodological support for predicting cyclic durability and risk analysis for the implementation of risk-based design allows: to eliminate the uncompetitive level of product quality and production quality, as well as low efficiency and labor productivity; apply new design technologies, design and production preparation methods that reduce development time. The developed methods and means of the risk-based approach have been widely tested and are used in the practice of auto-tractor-agricultural machine building.

Keywords: mobile vehicles, load-bearing structures, forecasting, resource, risks, risk-based design.

Cite as: Panov A.N. Prediction of cyclic durability and risk analysis of inconsistencies in the supporting structures of mobile vehicles. *Traktory i sel'khoz mashiny*. 2021. No 6, pp. 45–53 (in Russ.). DOI: 10.17816/0321-4443-2021-6-45-53

Введение

Надежность и безопасность мобильных машин (ММ) в первую очередь определяется их несущей системой, например сборной рамной конструкцией [1–3]. В настоящее время требования ведущих производителей и потребителей техники при проектировании ММ значительно изменились; с одной стороны, вероятность отказов ММ должна быть значительно меньше – с 10^{-2} до 10^{-5} (т.е. на порядки), с другой – необходимо существенно сокращать сроки проектирования и подготовки производства и себестоимость техники [4, 5]. Риск-ориентированное проектирование [12–14] позволяет при выполнении требований потребителя о малых вероятностях несоответствия как сокращать сроки, затраты при создании новой техники, так и снижать ее себестоимость при тиражировании.

В связи с использованием риск-ориентированного подхода к нормированию и управлению ресурсом техники (ММ и т.д.) необходимо отметить некоторые новые особенности собственно прогнозирования [4–14]. Ими являются:

– прогнозирование потери функций до достижения заданного ресурса (гарантийного пробега и т.д.) на конкретном (в вероятностной постановке) количестве объектов (например, ММ);

– приоритетным является выполнение функций ММ, т.е. вероятность последствий отказа, а не вероятность отказа, например разрушение несущей конструкции;

– переориентация с использования при проектировании основной парадигмы – прогнозирование, экспериментальная оценка надежности для доводки конструкции, на парадигму – про-

гнозирование, предупреждение и «загон» вероятности появления каждой потенциальной причины отказа до заданного уровня риска еще до изготовления опытного образца.

Цель исследований

Разработка методик прогнозирования циклической долговечности элементов и крепежа сборных несущих конструкций и анализа для достижения приемлемых рисков мобильных машин на этапах риск-ориентированного проектирования.

Материалы и методы

Для методического обеспечения риск-ориентированного проектирования разработаны соответствующие методики и стандарты, позволяющие распространять и применять новые методы конструирования и расчета создателям автомобильной, тракторной, сельскохозяйственной техники, а также погрузочно-транспортного, карьерного и специального машиностроения [15–21].

Для реализации риск-ориентированного проектирования предложено [4–14] развить и дополнить традиционную модель проектирования и прогнозирования циклической долговечности. Концептуальные положения предлагаемой модели:

1) применяемая, например, в технических условиях трехступенчатая классификация параметров продукции, процессов – дефекты «критические», «значительные» и «малозначительные» – заменяется на шкалу баллов «значимость последствий»; в существующую систему обозначений конструкторско-технологической документации в дополнение к но-

минальному значению и полю допуска характеристики вводятся идентификаторы приоритета [4, 5, 11–14];

2) создаются новые виды конструкторско-технологических документов: перечни приоритизации характеристик продукции/процесса; планы управления рисками продукции/процесса; отчеты по анализу рисков продукции/процесса [4, 5, 11–14].

Предложено в дополнение к существующим этапам проектирования [1–3] для применения риск-ориентированного подхода при выполнении этапов проекта по созданию продукции и подготовке производства реализовывать следующие действия [4–14]:

– установление целей в области качества, надежности и безопасности для продукции и процессов на основе гиперболической зависимости «вероятность – ущерб» – «качество – цена» – «вариация – ущерб» [8–14]; например, вероятность – число несоответствий на миллион, ppm; значимость приоритета риска – баллы; приоритетное число рисков – RPN (при использовании методики анализа рисков [16] FMEA);

– составление (на основе информации от потребителей, изучения нормативных документов – ГОСТ, ТР ТС и т.д., технических документов, достижений науки и техники, опыта предыдущих разработок) для сборочной единицы и деталей: перечней приоритизации характеристик типа продукции (сборочной единицы и деталей), выделяя по группам характеристики, например функциональные, надежность, безопасность, внешний вид и др.; планов управления рисками продукции (сборочной единицы и деталей); отчетов по анализу рисков продукции;

– построение диаграмм причинно-следственных связей отказов и их причин и последствий на основе метода дедукции и индукции: «дерево конструкции»; «дерево функций»; «дерево дефектов/причин», «сдвоенное дерево дедукции – индукции»;

– уточнение перечня приоритизации характеристик деталей, разделяя по группам первопричин отказов: геометрические параметры (например, радиус галтели – зона зарождения повреждения), материал (например, механические свойства) и т.д.;

– уточнение планов управления рисками типа продукции, типа деталей по результатам определения причинно-следственных связей

отказов вероятности их возникновения и обнаружения;

– уточнение конструкторской документации путем проставления к параметрам продукции характеристик балла значимости приоритета;

– проведение анализа рисков, например, с помощью методики FMEA, для продукции (сборная конструкция и детали) и составление отчетов [15–21].

Заданный (приемлемый/допустимый) уровень несоответствий выпускаемой продукции определяется возможными потерями для организации в ходе реализации проекта и производства ММ [21] в связи с возвратом несоответствующего количества техники и оценивается вероятностью – количеством несоответствий на миллион – ppm (например, 2000 на 1000000, или 0,2 % выпущенных ММ получит рекламации и/или возникнут экономические последствия для поставщика в том или ином виде) [19, 20].

Заданный уровень рисков (в баллах) по методике FMEA [16] определяется числом RPN и устанавливается организацией исходя из стоимости возможных неблагоприятных экономических последствий и т.д. [19–21] с использованием значения коэффициентов: «С» – значимость последствий, «О» – вероятность возникновения отказа, «D» – вероятность обнаружения при контроле. Произведение коэффициентов определяет конкретную величину риска (метод экспертных оценок) для каждой причины, которая может привести к несоответствию [16].

Результаты и обсуждение

Разработанная [4–14] расчетно-экспериментальная методика прогнозирования надежности (ресурса) по критерию циклической долговечности несущих конструкций и крепежа (заклепок, болтов) ММ включает:

– оценку характеристики сопротивления усталости зон разрушений, лимитирующих долговечность конструкций, полученных на основе иерархии локального моделирования (натурная конструкция, узел, соединение с группой крепежа, соединение с единицей крепежа, локальная опасная зона) усталостного повреждения при учете конструкторско-технологических факторов (шероховатость поверхности, зазоры, хим. состав, микроструктура, остаточные напряжения и т.п.) действующего производства и различной вероятности разрушения [4, 5];

- исследование нагруженности исследуемых зон в условиях, характеризующих эксплуатацию ММ;
- формирование блоков нагружения несущей конструкции ММ, в целом имитирующих воздействие ездового цикла (например, режим форсированных испытаний полигона, испытания на стенде) для заданных условий эксплуатации (см. рис.);
- анализ напряженно-деформированного состояния несущих элементов, внутренних силовых факторов в крепеже по итогам расчета, например методом конечных элементов (МКЭ), на воздействие ездового цикла ММ;
- приведение процессов нагружения типичных зон повреждений с переменным коэффициентом асимметрии цикла нагружения к эквивалентному по повреждению симметричному;
- составление блока нагружения для каждой интересующей зоны повреждения (схематиза-

ция случайного процесса нагружения и приведение его к эквивалентному по повреждению регулярному);

- анализ напряженно-деформированного состояния зон повреждения по итогам расчета МКЭ локальных моделей на вид воздействия, приводящего к повреждению, оценка чувствительности конечно-элементной модели и корректировка блока нагружения зоны повреждения;
- анализ напряженно-деформированного состояния зон повреждений несущего элемента по итогам расчета МКЭ остаточных напряжений от сборки (для учета влияния существующего процесса сборки либо создания благоприятного воздействия от сборки на напряженно-деформированное состояние в зоне разрушения) и моделирование действия остаточных напряжений на зону повреждения;
- расчет циклической долговечности по гипотезам суммирования усталостных поврежде-



Рис. Моделирование эксплуатационного нагружения мобильной машины

Fig. Simulation of operational loading of a mobile vehicle

ний (линейной, скорректированной и с учетом снижения предела выносливости) с различной вероятностью неразрушения при варьировании технологий изготовления зоны разрушения и моделирования напряжений от упругой сборки и получение данных о среднем значении ресурса и его стандартном отклонении;

- расчет перегрузки крепежа;
- расчетную оценку глобальной и локальной жесткости конструкции «не имеющей» и «имеющей повреждения» и сравнение с критериями предельного состояния – «входными проектными данными»;
- оценку значимости последствий появления несоответствия по функциям – последствий отказа;
- построение сценариев угроз и уязвимостей и поиск причин возникновения последствий для ММ несоответствий путем последовательного построения «дерева конструкции», «дерева дефектов», «дерева отказов/причин»;
- принятие решения о перепроектировании, направленном на устранение причин появления несоответствия.

Следует отметить, что оценка вероятного количества несоответствий проводится, исходя из того, что каждая причина (повреждение элемента системы, зазор между несущими элементами конструкции т.п.) приведет к возникновению отказа в целом ММ. Критерии каждого несоответствия – недостижение ММ заданного среднего ресурса, гарантийной наработки и т.д.

Оценка рисков осуществляется путем сравнения расчетной величины вероятности причины несоответствий (ppm) с базовой [ppm]. При этом оценка вероятности появления несоответствия рассматривается в связи с потенциальным ущербом – значимостью последствий. Для этого используются полученные фактические показатели FMEA – RPN и сравниваются их с допустимой величиной [RPN] [16].

На основании анализа потенциальных затрат и потерь принимается решение о соответствии конструкции требованиям контракта, о необходимости корректировки конструкторской документации (снижение рассеяния характеристик соответствия деталей путем изменения требований к субпоставщикам, резервирование ресурсов на рекламации и т.п.) либо экономической нецелесообразности совершенствования продукции (запланированное снятие продукции с производства и т.п.) [19–21].

Применение разработанных методик проиллюстрируем на примерах повреждений несущих элементов и крепежа несущих конструкций ММ. Например, имеется проектная документация на опытный образец сборочной единицы, при этом восстановление и диагностика в эксплуатации не предусмотрены. В техническом задании нормируются средний ресурс и гарантийный срок эксплуатации. Дополнительными исходными данными при риск-ориентированном проектировании являются: величина потерь (в денежном выражении) для организации-поставщика из-за недостижения соответствия в гарантийный период и заданный ресурс; классификация значимости приоритета (балл) последствий из-за несоответствий на всех уровнях декомпозиции ММ; приемлемый/допустимый показатель рисков FMEA для типа конструктивного исполнения/продукта – [RPN]; значение вероятного количество несоответствий на миллион – [ppm]. Величины параметров, упомянутых в дополнении, могут определяться не только внутренними требованиями организации, но и условиями контракта на поставку.

Объект – рама мобильной машины, состоящая из несущих элементов и крепежных деталей: заданный средний ресурс – 800000 км; гарантийная наработка – 80000 км; критерий отказа – необеспечение функционирования закрепленных на раме узлов и агрегатов в заданных кинематических условиях; причина – разрушение несущих элементов и крепежных деталей; вид воздействия – циклическая нагрузка на ММ от заданных условий эксплуатации (например, приведенная к эквивалентному блоку форсированных испытаний).

Исходя из результатов анализа и планирования организацией назначаются:

- стоимости возврата и гарантийного ремонта одной ММ из-за обнаруженных несоответствий;
- затраты на перепроектирование и дополнительную подготовку производства;
- потери (штрафы и т.д.) на каждую несоответствующую ММ;
- система показателей рисков: значимости последствий несоответствия – «С»; вероятности возникновения причины несоответствия – «О»; вероятности обнаружения при контроле – «D» определенные согласно рекомендациям [16, 19–21];
- показатель [ppm] = 2000;

- объем выпуска в год – 10000 шт. ММ;
- показатель $[RPN] = 200$.

Для иллюстрации оценки рисков на основе прогнозирования циклической долговечности несущих элементов рамы используем следующие данные о ресурсе [4, 7].

1. Для полки лонжерона рамы (трехосного самосвала) среднее значение циклической долговечности равно 1100000 км при значении среднеквадратического отклонения 184547 км, тогда:

– фактический показатель $RPN = 8 \cdot 8 \cdot 10 = 640 > 200$, поскольку значимость последствий – «отказ не связан с безопасностью, полная потеря функции продукции», $C = 8$, $O = 8$, $D = 10$;

– фактический $ppm = 52000 > 2000$, т.е. 5,2 % машин не выработает средний ресурс.

2. Для лонжерона рамы (трехосного самосвала) для зоны стыка усилителей среднее значение циклической долговечности равно 82980 км, при значении среднеквадратического отклонения 14208 км. Показатель рисков $RPN = 8 \cdot 10 \cdot 10 = 800$. 41,7 % ММ не пройдет гарантийный пробег.

3. Определим количество возвратов двухосных тягачей в гарантийный период по показателю «трещина на стенке лонжерона у третьей поперечины». Для показателей $C = 7$, $O = 10$, определим для среднего значения циклической долговечности – 91831 км и величины среднеквадратического отклонения – 19647 км вероятность отказа. 27,4 % автомобилей могут быть возвращены из-за отказа по данному показателю в гарантийный период. $D = 10$, $RPN = 700$.

Для иллюстрации оценки рисков рассмотрим данные прогнозирования циклической долговечности крепежа, соединяющего несущие элементы рамы – лонжероны, поперечины, надрамники. Для каждой заклепки либо болта, установленных в несущих конструкциях, используем данные оценок предела выносливости соединения по критерию разрушения крепежа с вероятностью не разрушения 0,5, полученные по результатам испытаний при различных видах нагружения [4, 7]. Рассмотрим следующие примеры.

1. Оценим потенциальное количество возвратов трехосных самосвалов по причине разрушения заклепок либо болтов (варианты конструктивного исполнения) для крепления надрамника к раме. Исходим из того, что среднеквадратическое отклонение показателя сте-

пени перегрузки крепежа в % не превышает 10 %. Тогда для рассматриваемой заклепки получим, что практически ни одна машина не дойдет до установленного ресурса (меньше $1 \cdot 10^6$ циклов) без разрушения данной единицы крепежа. Фактический $RPN = 7 \cdot 6 \cdot 10 = 420 > 200$; то есть практически все 100 % ММ при среднем ресурсе будут иметь разрушенный крепеж.

2. Проведем оценку рисков невыполнения функции соединения лонжерон – поперечина для двухосного седельного тягача по критерию ослабления крепежа. Для полученного значения среднеквадратического отклонения показателя величины затяжки болтов равного 7 % прогнозируется, что около 30 % от всех крепежных деталей разрушатся. Следовательно, показатель рисков $RPN = 7 \cdot 6 \cdot 10 = 420 > 200$, что не соответствует установленным требованиям, а конструкция требует перепроектирования.

Поскольку анализ проекта конструкции показал, что требования невыполнены, необходимо принять решение об экономической целесообразности перепроектирования конструкции, либо с несоответствием можно смириться, поскольку величина потерь из-за недостижения качества несущественна. Указанный алгоритм повторяется до достижения требуемых значений риска, величин $[RPN]$, $[ppm]$ и оптимальных затрат на качество.

Выводы (заключение)

Разработанное методическое обеспечение прогнозирования циклической долговечности и анализа рисков при реализации риск-ориентированного проектирования направлено:

- на устранение основных проблем: неконкурентоспособного уровня качества продукции и качества производства; низкой эффективности и производительности труда;
- на создание и применение новых технологий проектирования, методик конструирования и подготовки производства для сокращения сроков разработки.

Методы и средства риск-ориентированного подхода при создании ММ широко апробированы [4–14] и применяются в практике авто-тракторосельхозмашиностроения [15–21].

Литература

1. Ксеневиц И.П., Гуськов В.В., Бочаров Н.Ф. и др. Тракторы. Проектирование, конструирование и расчет: учебник для студентов машиностро-

- ительных специальностей вузов / под общ. ред. И.П. Ксеневича. М.: Машиностроение. 1991. 544 с.
2. Афанасьев Б.А., Белоусов Б.Н., Гладов Г.И. и др. Проектирование полноприводных колесных машин: учебник для вузов. В 3 т. Т. 1 / под ред. А.А. Полуняна. М.: Изд-во ИГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. 496 с.
 3. Белоусов Б.Н., Попов С.Д. Колесные транспортные средства особо большой грузоподъемности. Конструкция. Теория. Расчет / под об. ред. Б.Н. Белоусова. М.: Изд-во МГТУ и. Н.Э. Баумана, 2006. 728 с.
 4. Горбачевич М.И., Панов А.Н., Минюкович С.М. Проектирование транспортных средств: нагруженность, повреждение, ресурс: монография / под общей ред. А.Н. Панова. Минск: Технопринт, 2005. 264 с.
 5. Панов А.Н., Осмола И.И., Шкадрцов И.В., Ловкис В.Б., Маринич Л.А. Научно-методические основы проектирования: системное обеспечение приемлемых рисков в автотракторосельхозмашиностроении: монография / под общей ред. А.Н. Панова. Минск: БГАТУ, 2009. 486 с.
 6. Махутов Н.А., Панов А.Н., Юдина О.Н. Анализ и нормирование безопасности мобильных машин на основе обеспечения приемлемых рисков // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. 2014. № 2. С. 76–89.
 7. Махутов Н.А., Панов А.Н., Юдина О.Н. Методы и средства экспериментальной оценки нагруженности и моделирования механизмов повреждения опасных зон несущих конструкций мобильных машин // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2014, № 5. С. 51–56.
 8. Панов А.Н. Приемлемые риски функционирования сложных социотехнических систем // Стандарты и качество. 2014. № 8. С. 98–99.
 9. Panov A.N., Reznirov D.O., Yudina O.N. Development of models for risk analysis and optimization of risk reduction costs. Published under licence by IOP Publishing Ltd. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 1023, V International Scientific Conference «Survivability and Structural Material Science» (SSMS 2020) 27–29th October 2020, Moscow Russia Citation A.N. Panov et al 2021 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 1023 012019.
 10. Makhutov N.A., Panov A.N., Yudina O.N. The development of models of risk assessment complex transport systems. Published under licence by IOP Publishing Ltd. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 1023, V International Scientific Conference «Survivability and Structural Material Science» (SSMS 2020) 27–29th October 2020, Moscow Russia Citation N.A. Makhutov et al 2021 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 1023 012017.
 11. Махутов Н.А., Панов А.Н. Совершенствование научной базы и нормативного обоснования безопасности колесных мобильных машин // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. 2021. № 1. С. 34–43.
 12. Панов А.Н. Качество, надежность и безопасность техники // Стандарты и качество. 2021. № 6. С. 104–105.
 13. Панов А.Н. Риск-ориентированное проектирование в машиностроении // Стандарты и качество. 2021. № 8. С. 106–108.
 14. Панов А.Н. Надежность и машиностроении. Нормирование рисков // Стандарты и качество. 2021. № 10. С. 108–109.
 15. СТБ 15052015. Системы менеджмента. Менеджмент процессов. Методы статистического управления процессами (Панов А.Н. и др.). Введ. 01.06.2016. Минск: Госстандарт, 2016. 179 с.
 16. СТБ 15062015. Системы менеджмента. Менеджмент риска. Метод анализа видов и последствий потенциальных отказов (Панов А.Н. и др.). Введ. 01.04.2016. Минск: Госстандарт, 2016. 109 с.
 17. СТБ 24502016. Системы менеджмента. Менеджмент измерений. Анализ измерительных систем (Панов А.Н. и др.). Введ. 01.03.2017. Минск: Госстандарт, 2017. 250 с.
 18. СТБ 2484-2016. Системы менеджмента. Менеджмент верификации и валидации в цепи поставок (Панов А.Н. и др.). Введ. 01.09.2017. Минск: Госстандарт, 2017. 137 с.
 19. СТБ 16949-2018. Системы менеджмента качества. Особые требования по применению СТБ ISO 9001-2015 для организаций, участвующих в цепях поставок автотракторного, сельскохозяйственного, погрузочно-транспортного, карьерного и специального машиностроения (Панов А.Н. и др.). Введ. 01.01.2019. Минск: Госстандарт, 2018. – 93 с.
 20. СТБ В 15.004-2009. Система разработки и постановки на производство оборонной продукции. Военная техника. Системы менеджмента качества. Требования (Панов А.Н. и др.). Введ. 01.01.2011. Минск: Госстандарт, 2009. 52 с.
 21. СТБ 2582-2020. «Системы менеджмента. Менеджмент проекта. Риск-ориентированное планирование качества продукции, услуг и процессов» (Панов А.Н. и др.). Введ. 01.12.2020. Минск: Госстандарт, 2020.

Reference

1. Ksenevich I.P., Gus'kov V.V., Bocharov N.F. i dr. Traktory. Proyektirovaniye, konstruirovaniye i raschet [Tractors. Design, construction and calculation]. Uchebnik dlya studentov mashinostroitel'nykh spetsial'nostey vuzov. Pod obshch.red. I.P. Ksenevicha. Moscow: Mashinostroyeniye Publ., 1991. 544 p.
2. Afanas'yev B.A., Belousov B.N., Gladov G.I. i dr. Proyektirovaniye polnoprivodnykh kolesnykh mashin [Design of all-wheel drive vehicles]: Uchebnik dlya vuzov; V 3 t. T. 1. Pod red. A.A. Polungyana. Moscow: Izd-vo IGTU im. N.E. Baumana Publ., 2008. 496 p.
3. Belousov B.N., Popov S.D. Kolesn-yye transportnyye sredstva osobo bol'shoy gruzopod'yemnosti. Konstruktsiya. Teoriya. Raschet [Wheeled vehicles of extra large payload. Design. Theory. Calculation]. Pod ob. Red. B.N. Belousova. Moscow: Izd-vo MGTU i. N.E. Baumana Publ., 2006. 728 p.
4. Gorbatshevich M.I., Panov A.N., Minyukovich S.M. Proyektirovaniye transportnykh sredstv: nagruzhenost', povrezhdeniye, resurs [Vehicle design: load, damage, reliability]: Monografiya. Pod obshchey red. A.N. Panova. Minsk: «Tekhnoprint» Publ., 2005. 264 p.
5. Panov A.N., Osmola I.I., Shkadretsov I.V., Lovkis V.B., Marinich L.A. Nauchno-metodicheskiye osnovy proyektirovaniya: sistemnoye obespecheniye priyemlyemykh riskov v avtotraktorosel'khozmashtroyeni [Scientific and methodological foundations of design: system support of acceptable risks in automotive and tractor agricultural engineering]. Monografiya. Pod obshchey red. A.N. Panova. Minsk: BGATU Publ., 2009. 486 p.
6. Makhutov N.A., Panov A.N., Yudina O.N. Analysis and standardization of the safety of mobile machinery based on acceptable risks. Problemy bezopasnosti i chrezvychaynykh situatsiy. 2014. No 2, pp. 76–89 (in Russ.).
7. Makhutov N.A., Panov A.N., Yudina O.N. Methods and tools for experimental assessment of loading and modeling of mechanisms of damage to hazardous areas of load-bearing structures of mobile vehicles. Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov. 2014, No 5, pp. 51–56 (in Russ.).
8. Panov A.N. Acceptable risks of functioning of complex socio-technical systems. Standarty i kachestvo. 2014. No 8, pp. 98–99 (in Russ.).
9. Panov A.N., Reznirov D.O., Yudina O.N. Development of models for risk analysis and optimization of risk reduction costs. Published under licence by IOP Publishing Ltd. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 1023, V International Scientific Conference “Survivability and Structural Material Science” (SSMS 2020) 27–29th October 2020, Moscow Russia Citation A.N. Panov et al 2021 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 1023 012019.
10. Makhutov N.A., Panov A.N., Yudina O.N. The development of models of risk assessment complex transport systems. Published under licence by IOP Publishing Ltd. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 1023, V International Scientific Conference “Survivability and Structural Material Science” (SSMS 2020) 27–29th October 2020, Moscow Russia Citation N.A. Makhutov et al 2021 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 1023 012017.
11. Makhutov N.A., Panov A.N., Yudina O.N. Improving the scientific base and regulatory justification for the safety of wheeled mobile vehicles. Problemy bezopasnosti i chrezvychaynykh situatsiy. 2021. No 1, pp. 34–43 (in Russ.).
12. Panov A.N. Quality, reliability and safety of equipment. Standarty i kachestvo. 2021. No 6, pp. 104–105 (in Russ.).
13. Panov A.N. Risk based design in mechanical engineering. Standarty i kachestvo. 2021. No 8, pp. 106–108 (in Russ.).
14. Panov A.N., Reliability and mechanical engineering. Risk rationing. Standarty i kachestvo. 2021. No 10, pp. 108–109 (in Russ.).
15. STB 1505-2015 Sistemy menedzhmenta. Menedzhment protsessov. Metody statisticheskogo upravleniya protsessami [Management systems. Process management. Methods of statistical process control] (Panov A.N. i dr.). Vved. 01.06.2016. Minsk: Gosstandart Publ., 2016. 179 p.
16. STB 1506-2015 Sistemy menedzhmenta. Menedzhment riska. Metod analiza vidov i posledstviy potentsial'nykh otkazov [Management systems. Risk management. Method for analyzing the modes and consequences of potential failures] (Panov A.N. i dr.). Vved. 01.04.2016. Minsk: Gosstandart Publ., 2016. 109 p.
17. STB 2450-2016 Sistemy menedzhmenta. Menedzhment izmereniy. Analiz izmeritel'nykh sistem [Management systems. Measurement management. Analysis of measuring systems] (Panov A.N. i dr.). Vved. 01.03.2017. Minsk: Gosstandart Publ., 2017. 250 p.
18. STB 2484-2016 Sistemy menedzhmenta. Menedzhment verifikatsii i validatsii v tsepi postavok [Management systems. Management of verification and validation in the supply chain] (Panov A.N. i dr.).

- Vved. 01.09.2017. Minsk: Gosstandart Publ., 2017. 137 p.
19. STB 16949-2018 Sistemy menedzhmenta kachestva. Osobyye trebovaniya po primeneniyu STB ISO 9001-2015 dlya organizatsiy, uchastvuyushchikh v tsepyakh postavok avtotraktornogo, sel'skokhozyaystvennogo, pogruzochno-transportnogo, kar'yernogo i spetsial'nogo mashinostroyeniya [Quality management systems. Special requirements for the application of STB ISO 9001-2015 for organizations involved in the supply chains of automotive, tractor, agricultural, loading and transport, quarry and special machine building] (Panov A.N. i dr.). Vved. 01.01.2019. Minsk: Gosstandart Publ., 2018. 93 p.
20. STB V 15.004-2009 Sistema razrabotki i postanovki na proizvodstvo oboronnoy produktsii. Voyennaya tekhnika. Sistemy menedzhmenta kachestva. Trebovaniya [The system for the development and production of defense products. Military equipment. Quality management systems. Requirements] (Panov A.N. i dr.). Vved. 01.01.2011. Minsk: Gosstandart Publ., 2009. 52 p.
21. STB 2582-2020 Sistemy menedzhmenta. Menedzhment proyekta. Riskoriyentirovannoye planirovaniye kachestva produktsii, uslug i protsessov [Management systems. Project management. Risk-based planning for the quality of products, services and processes] (Panov A.N. i dr.). Vved. 01.12.2020. Minsk: Gosstandart Publ., 2020.