



МЕХАНИКА МОБИЛЬНЫХ МАШИН

УДК 629.113.001.63178.3

А.Н. ПАНОВ, канд. техн. наук
ведущий научный сотрудник
E-mail: a.panov@tut.by

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, г. Москва, Российская Федерация

Поступила в редакцию 14.02.2023.

МЕТОДОЛОГИЯ РИСК-ОРИЕНТИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТИ В МИРОВОМ МАШИНОСТРОЕНИИ

В статье представлены материалы по разработке методологии риск-ориентированного проектирования как нового этапа в развитии системы проектирования, изготовления, эксплуатации, обслуживания, ремонта и утилизации техники для результативного и эффективного обеспечения конкурентоспособности в мировом машиностроении. Показано, что традиционное проектирование уже не адекватно глобальным планетарным изменениям, сопровождающимся сокращением ресурсов, сроков проектирования, выхода на рынок в конкурентной среде и конфликтного мирового разделения труда. Отмечено, что в настоящее время значительно усложнились техника и технологии, в том числе в связи со встроенным программным обеспечением. Акцентировано внимание на том, что прогнозирование и оценка поведения, надежности и управления соответствием требований социотехнических систем по причине существенно нелинейных процессов функционирования человеко-машинных систем и деградации как для штатных, так и нештатных условий требует инновационных методов и средств. Обращено внимание на то, что создание техники сопровождается увеличением взаимосвязанных техногенных, природных и социальных рисков, первоисточником которых является неадекватность информации при создании и использовании техники. Для широкого практического применения риск-ориентированного проектирования предложены методология, методики для управления рисками на этапах жизненного цикла техники, государственные стандарты, а также способы идентификации значимости ущербов как в существующих формах конструкторской, технологической и другой документации на продукцию и процессы изготовления, так и в новых видах документов, например, в плане управления рисками. Отмечено, что в настоящее время осуществляется планирование дальнейших работ по широкому внедрению риск-ориентированного подхода в машиностроении и смежных областях промышленности отдельных стран и союзов для обеспечения эффективной конкурентоспособности цепей поставок.

Ключевые слова: машиностроение, методология, системы, проектирование, риски, результативность, эффективность, конкурентоспособность, стандарты

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2023-2-63-5-13>

Введение. Традиционно при проектировании в машиностроении используются детерминированные, статистические, вероятностные модели для прогнозирования и оценки достижения соответствия продукции в рамках разработки и постановки ее на производство (например, ГОСТ 15.001-88).

Оценка качества, в том числе надежности и безопасности, осуществляется согласно ГОСТам (номинальное значение и допуск на характеристику, брак, дефектность, наработка на отказ, гамма-процентный ресурс). Как правило, при проектировании продукции и процессов основываются на положе-

нии, что процессы применения, изготовления, восстановления и утилизации типовые и практически неизменные в рамках статистической вариации. Например, критерием пригодности процесса изготовления является попадание при контроле характеристики в поле допуска, а критерием соответствия подготовки производства по ГОСТ 27.202-83 — получение коэффициента точности, позволяющего достигать при тиражировании вероятности несоответствия 3000 ppm.

Исследования [1–12] и практика [13] свидетельствуют, что процессы жизненного цикла социотехнических систем следует рассматривать как существенно нелинейные, а функционирование техники и технологий необходимо оценивать как в штатных, так и нештатных условиях. Важнейшим, на чем необходимо сфокусировать внимание создателей техники, являются, во-первых, источники (определяемые актуальным достигнутым уровнем развития науки и техники) первопричин отказов в социотехнических системах и, во-вторых, последствия для конфигуратора с различным уровнем рисков (вероятностей и ущербов) (рисунок 1). Традиционные методы расчетов сосредоточены на прогнозировании и оценке вероятности отказа технической системы, а не на

риске (взаимосвязь вероятности и ущерба) для конечного пользователя (например, возникновение в конфигураторе ущерба из-за невыполнения технологических операций в ограниченный период уборки урожая из-за отказа техники). В настоящее время при создании продукции и процессов широкое распространение приобретает риск-ориентированный подход (стандарты ISO серий 9000, ISO 31000). В рамках данной статьи под риском (согласно ISO 9000) будем понимать «воздействие неопределенности».

В настоящее время в машиностроительных организациях достаточно широко применяют стандарты ISO 9001 и их отраслевые варианты, например, для авиационной, автомобильной и железнодорожной техники (EN 9100, IATF 16949, ISO/TS 22163). Эти документы в целом определяют управление качеством продукции в жизненном цикле организации и продукции наряду с существующей культурой организации. Отметим, что в настоящее время на практике прогнозирование, оценка соответствия техники и технологий в большей степени все еще основываются на детерминированном (расчетные случаи при проектировании техники), в меньшей степени на статистическом (оценка брака при производстве),

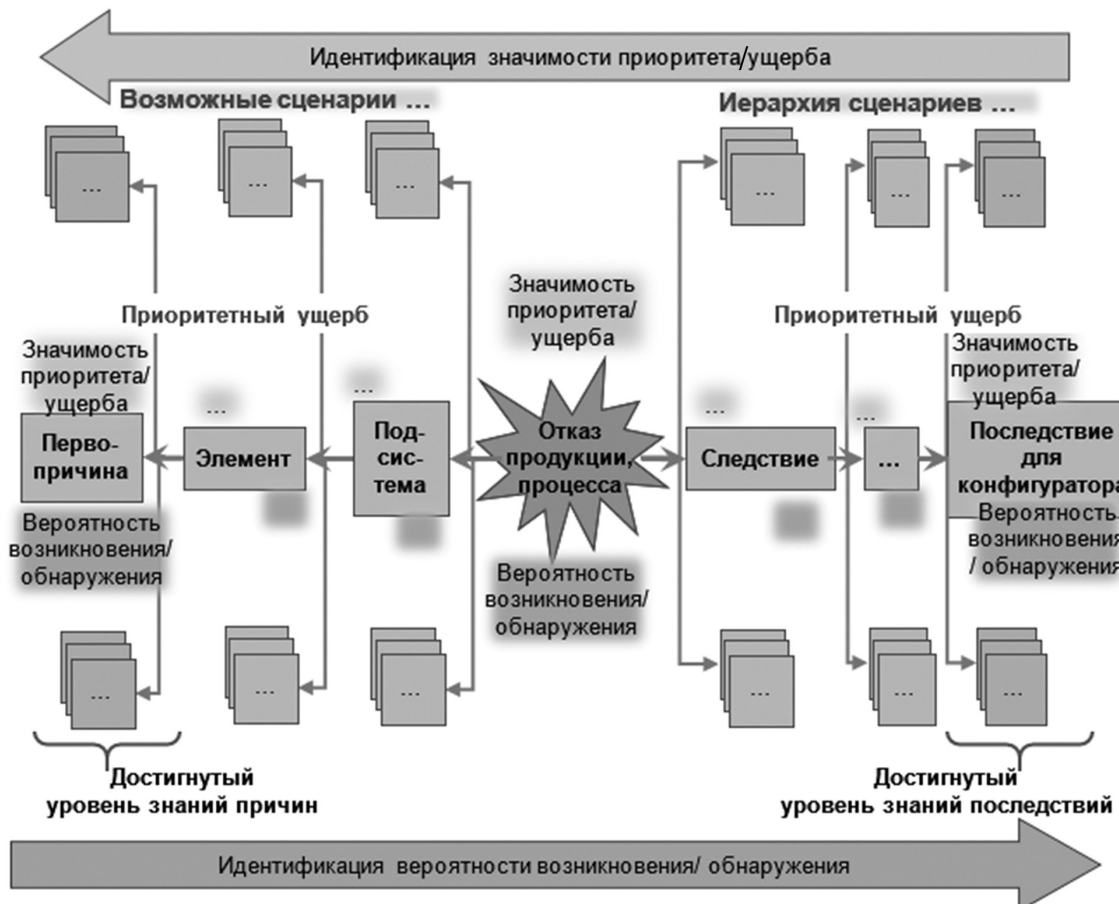


Рисунок 1 — Идентификация цепей причинно-следственных связей источников отказов «подсистема — элемент — первопричина» и их результатов «следствие — ... — последствие для конфигуратора» на основе менеджмента знаний. Сдвоенное дерево индукции/дедукции

Figure 1 — Identification of cause-effect chains of failure sources “subsystem — element — root cause” and their results “effect — ... — consequence for the configurator” based on knowledge management. Dual induction/deduction tree

немного на вероятностном (ресурсное проектирование), а не на заявленном стандартами серии ISO 9000 риск-ориентированном подходе. Соответственно необходимо:

- создавать новые фракталы — фундаментальные положения риск-ориентированного подхода в машиностроении;
- описывать состояние технических систем соответствующими аттракторами. Следовательно, разработка и развитие методологии, моделей, методик и средств риск-ориентированного подхода в машиностроении является актуальной задачей [2–6, 11–13].

Научная новизна работы заключается в разработке новых определений терминов, основ методологии, моделей, практических методик, а также типов конструкторско-технологических документов для практической реализации риск-ориентированного проектирования в машиностроении [2–6, 11–13].

Предложены фундаментальные изменения определений терминов (в развитии используемых, например, в ISO/IEC QUIDE 2:2004, ISO 9000, ГОСТ 27.002-89 и в законодательстве стран Таможенного союза), позволяющие эффективным образом обеспечивать достижение целей соответствия техники и технологий в риск-ориентированной фрактально-аттракторной [12] парадигме:

- *стандарт* — документ, обеспечивающий оптимальным образом упорядоченную, повторяющуюся деятельность и ее результативность *при достижении приемлемых рисков заинтересованными сторонами;*
- *стандартизация* — деятельность, направленная на оптимальную упорядоченность процессов и их результатов *при достижении приемлемых рисков заинтересованными сторонами;*

- *качество* — степень соответствия набора присущих характеристик объекта установленным требованиям, *достигнутая при приемлемом риске для заинтересованных сторон в жизненном цикле объекта;*

- *надежность* — это свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, хранения и транспортирования, *при приемлемом риске для заинтересованных сторон в жизненном цикле объекта.*

В результате проведенных исследований [2–6, 11–13] для реализации риск-ориентированного подхода предложено фундаментальное изменение — в технические требования (конструкторская, технологическая документация) в дополнение к номинальному значению и полю допуска характеристики введен показатель *значимости приоритета* [2–6, 11–13]. Для широкого практического применения в машиностроении развиты соответствующая методология, модели и ряд методик, которые для применения в широкой практике стандартизованы, например СТБ 16949-2018, СТБ 1506-2021, СТБ 2450-2016, СТБ 1505-2015, СТБ 2484-2016, СТБ 2582-2020. Разработаны в том числе:

- фундаментальная модель достижения приемлемого риска при создании техники и технологий в машиностроении «вероятность — ущерб» — «качество — цена» — «вариация — ущерб» (рисунок 2) [11–13];
- методы идентификации рисков в конструкторской и технологической документации — значимость приоритета характеристики (рисунок 3) [2–6, 11, 12];

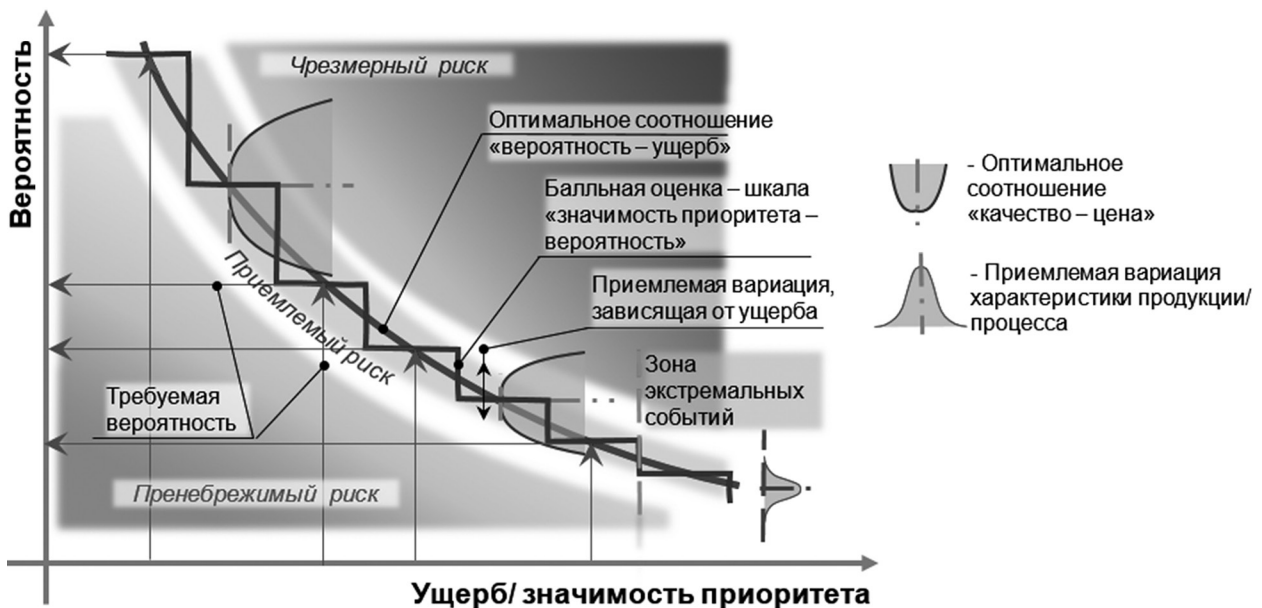


Рисунок 2 — Пятикомпонентная модель оптимизации зависимостей «вероятность — ущерб» — «качество — цена» — «вариация — ущерб» при риск-ориентированном подходе. Шкала «значимость приоритета» для продукции/процесса
 Figure 2 — Five-component model of optimization of dependencies “probability — damage” — “quality — price” — “variation — damage” with a risk-based approach. The “priority significance” scale for the product/process

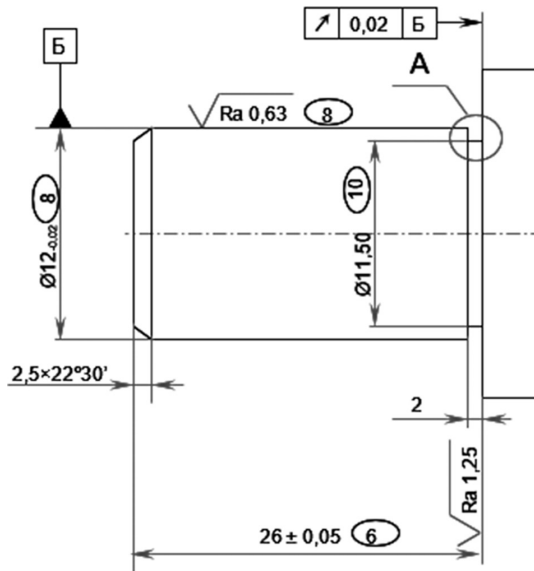


Рисунок 3 — Модель идентификации значимости приоритета *i* (в овале) характеристик в конструкторской и технологической документации при риск-ориентированном подходе: 1 — H14, h14, ±IT14/2; 2 — неуказанная значимость характеристик 3 (в овале)
 Figure 3 — Model for identifying the significance of priority *i* (in the oval) of characteristics in design and technological documentation with a risk-based approach: 1 — H14, h14, ±IT14/2; 2 — unspecified value of characteristics 3 (in the oval)

- модель оптимизации обеспечения надежности на основе рисков «нагруженность/деградация — время» (рисунок 4) [2–6, 11, 12];
- модель «интенсивность мгновенных отказов продукции» (рисунок 5) [11–12];

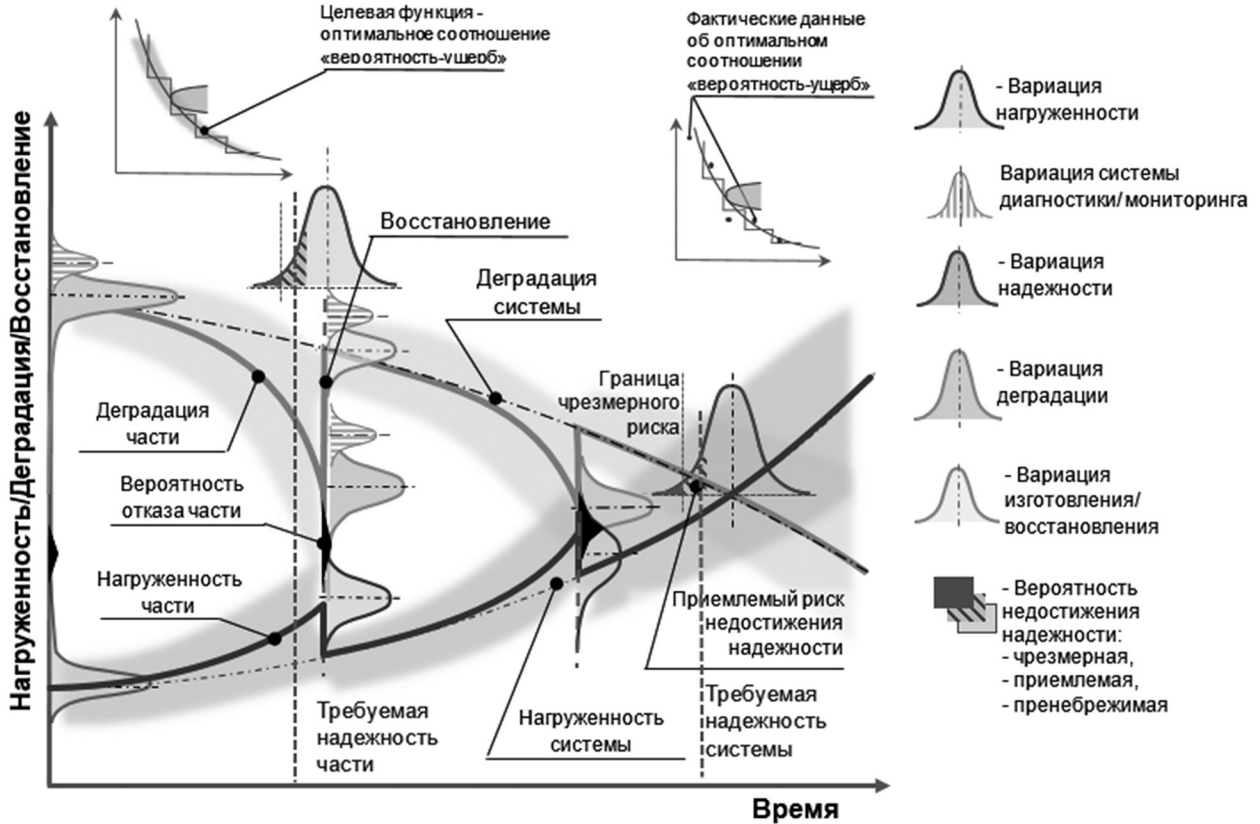


Рисунок 4 — Модель оптимизации обеспечения надежности для восстанавливаемой продукции «нагруженность/деградация — время» при риск-ориентированном подходе
 Figure 4 — Reliability optimization model for the restored products “loading/degradation — time” with a risk-based approach

- матрица выбора в зависимости от значимости приоритета методов верификации несоответствий характеристик продукции для достижения требуемой вариации при ее тиражировании — матрица Панова–Менделеева (таблица) [2-6, 11, 12];
- модель оптимизации затрат на достижение приемлемых рисков (рисунок 6) [2–6, 11–13];
- модель оптимизации затрат на создание техники (рисунок 7) [11–13];
- модель анализа прямых, косвенных и отдаленных рисков (рисунок 8) [11, 12];
- новые виды конструкторско-технологических документов, например, план управления рисками, анализ рисков [2–6, 11–13].

Предложено классифицировать риски события, вариации и бифуркации и следует не «минимизировать» (что, полагаем, является методологически неверным), а управлять уровнем рисков — чрезмерным, приемлемым и пренебрежимым. Соответственно, анализ рисков (события, вариации и бифуркации) включает сценарии угроз, уязвимостей социотехнических систем и ущерба для заинтересованных сторон [11–13].

На основе проведенных исследований и результатов внедрения в практику машиностроения предложены дополнения в проект Стратегии развития автомобильной промышленности Российской Федерации до 2035 г. (утвержден 28.12.2022). Указанное позволит создать нормативную основу для управления рисками развития автомобильной

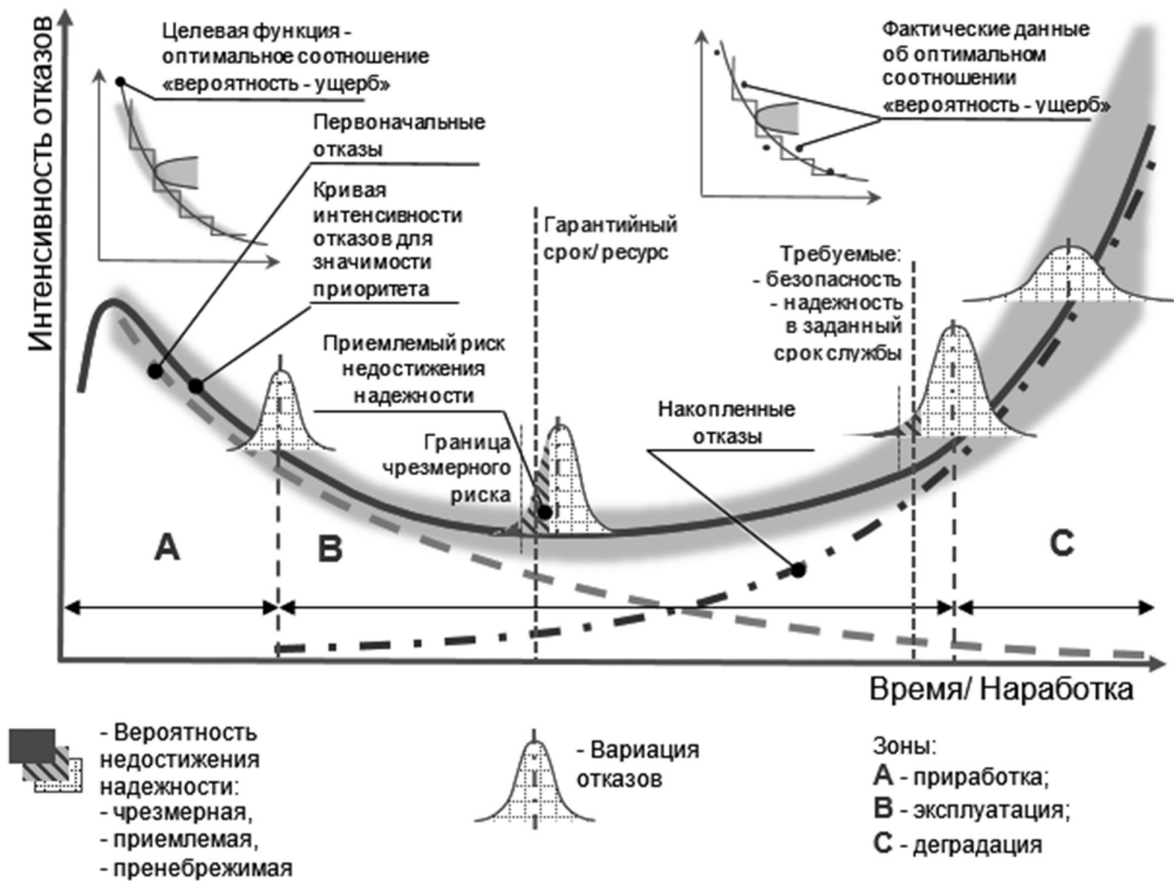


Рисунок 5 — Модель «интенсивность мгновенных отказов продукции» при риск-ориентированном подходе
 Figure 5 — “Intensity of sudden product failures” model with a risk-based approach

промышленности Союзного государства Российской Федерации и Республики Беларусь и совершенствования системного подхода к обеспечению качества, надежности техники в цепи поставок автомобилестроения. Предложено методологию риск-ориентированного проектирования в машиностроении использовать для:

- реализации мероприятий по выполнению Постановления Совета министров Республики Беларусь № 925 от 28.12.2022 по обеспечению гарантийного срока и срока службы на сельскохозяйственную технику;
- подготовки обоснования проекта Программы Союзного государства Российской Федерации и Республики Беларусь «Машиностроение СТ», направленной на повышение конкурентоспособности в мировом машиностроении на новом системном уровне.

Результаты. 1. Разработаны основополагающие определения терминов (качество, надежность, стандарт, стандартизация) методологии риск-ориентированного подхода в жизненном цикле продукции машиностроения на уровнях: типов конструкции; типов технологических процессов изготовления; выполнения проектов по разработке и постановке на производство техники; нормирования, стандартизации технических требований.

2. Разработаны и реализованы на практике методология и средства системного планирования

и обеспечения качества, надежности и безопасности машин и их элементов на этапах их риск-ориентированного проектирования и изготовления, эксплуатации, обслуживания, утилизации, позволяющие достигать максимума эффективности при приемлемом риске несоответствий техники установленным требованиям.

Методология отличается тем, что развиты методы расчета и проектирования машин, в том числе с учетом их жизненного цикла, на основе оптимизации нормирования и затрат на качество, надежность и безопасность в зависимости от значимости последствий и соответствующего категорирования (вероятностей и ущербов) последствий отказов техники как критерия приемлемости риска. Для этого при проектировании в дополнении к установленным конструкторско-технологическим характеристикам продукции/процесса изготовления машин идентифицируются значимости приоритета (балл)/ущерба; реализуются опережающее планирование вероятности несоответствий конструкции, а также процесса изготовления, а также планы для достижения вероятностей как возникновения всех причин несоответствий (при эксплуатации/изготовлении), так и их обнаружения (при испытаниях, контроле изготовления) до приемлемых, определяемых достигнутым уровнем развития науки и техники.

3. Созданы и применены в практике машиностроения новые методики риск-ориентированного

Таблица — Матрица выбора в зависимости от приоритета методов верификации несоответствий продукции для достижения требуемой вариации при ее тиражировании на основе риск-ориентированного подхода
 Table — Matrix of choice depending on the priority of methods for verifying nonconformities of products to achieve the required variation when replicating it based on a risk-based approach

Виды верификации продукции и процессов	Значимость характеристик продукции S						План реагирования	
	малозначительные		значительные			критические		
	1–5		6 или 7		8 или 9			10
	Устойчивость процесса (7M + R) ¹							
	высокая	низкая	высокая	низкая	высокая	низкая		–
	Показатель RPN (FMEA)							
	низкий	высокий	низкий	высокий	низкий	высокий		–
Значения показателей ²								
1. Проверка возможности оборудования ($n \geq 5$ шт.)	–	+	+	+	+	+	Повторные настройки и верификация	
	меньше 100 % допуска	меньше 50 % допуска	$C_{m^2}, C_{mk^2}, P_{m^2}, P_{mk^2} \geq 1,33$		$C_{m^2}, C_{mk^2}, P_{m^2}, P_{mk^2} \geq 1,67$			
2. Проверка образцов перед началом и после окончания работы ($n \geq 2$ шт.)	–	+	–	+	–	+	Повторные настройки и верификация	
	Меньше 20 % допуска							
3. Верификация опытной партии ($n \geq 50$ шт.)	+	+	+	+	+	+	Повторные настройки и верификация	
		$C_p, C_{pk}, P_p, P_{pk} \geq 1,33$			$C_p, C_{pk}, P_p, P_{pk} \geq 1,67$			
4. Статистическое управление процессом	–	–	+	+	+	+	Анализ особых причин	
5. Выборочный контроль/проверка	+	+	–	–	–	–	Сплошной контроль	
6. Сплошной контроль	+	+	+	+	+	+	При нестабильном процессе	
7. Проведение MSA. Приемлемая неопределенность	–	–	+	+	+	+	Коррекция измерительной системы	
			до 20 %	до 10 %				
8. Аудит процесса	–	–	+	+	+	+	Коррекция и корректирующие действия	
9. Аудит продукции	–	–	+	+	+	+	Коррекция и корректирующие действия	

Примечание:

¹Восемь факторов, влияние которых следует учитывать при оценке устойчивости процесса. 7M + R — происходит от семи английских слов: man (человек), method (метод, технология производства), machinery (оборудование, оснастка, инструмент), material (материалы, заготовка), meteo (окружающая среда), monday effect (эффект понедельника, когда происходит сбой в ритмичной и привычной работе), management (менеджмент, любые действия руководства), regulated (регулирование и разрегулирование социотехнических систем как свойство сложных систем); $C_{m^2}, C_{mk^2}, P_{m^2}, P_{mk^2}, C_p, C_{pk}, P_p, P_{pk}$ — статистические показатели возможности технологического оборудования и пригодности технологического процесса соответственно (СТБ 1505-2015).

²Оптимальные рекомендуемые значения приведенных в таблице данных устанавливаются в соответствии с целями по вероятности относительно потенциального ущерба. Не следует достигать величин больше либо меньше (в соответствии с целью) чем на 30 %. Например, при $C_{pk} \geq 1,33$ достигается вероятность несоответствий 63 ppm и менее. Соответственно, совершенствование процесса с позиций эффективности рекомендуется завершить при достижении 40 ppm.

MSA — методика анализа вариации измерительных систем (СТБ 2450-2016). Для строки «Проведение MSA» «+» означает, во-первых, приоритизацию выделения ресурсов для MSA в зависимости от значимости последствий (например, первоначально для балла 10), а во-вторых, необходимость выбора метода MSA и величины приемлемой неопределенности и внесения их в план управления рисками; «–» означает, что приемлемая вариация измерительной системы обеспечивается общим уровнем культуры в области метрологического обеспечения, а также проведением поверки и калибровки (СТБ 2450-2016).

FMEA — методика анализа рисков типа конструкции и типа процесса изготовления (СТБ 1506-2021).

проектирования, подготовки производства, которые позволяют обеспечивать повышение конкурентоспособности по продукту (технического уровня, надежности и безопасности) — уменьшать вероятность несоответствия требованиям качес-

тва, надежности при тиражировании с 3000 ppm и более до 50 ppm и менее; снижать себестоимость, затраты на эксплуатацию на 30–50 % и более; сокращать сроки разработки и постановки продукции на производство в 1,5–2 раза.

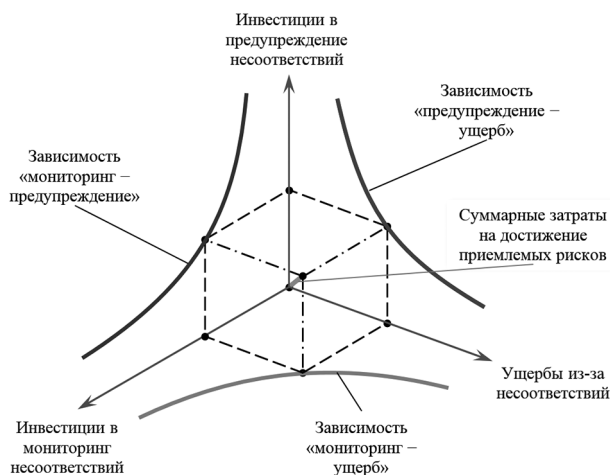


Рисунок 6 — Модель оптимизации затрат на достижение приемлемых рисков
Figure 6 — Cost optimization model for achieving acceptable risks

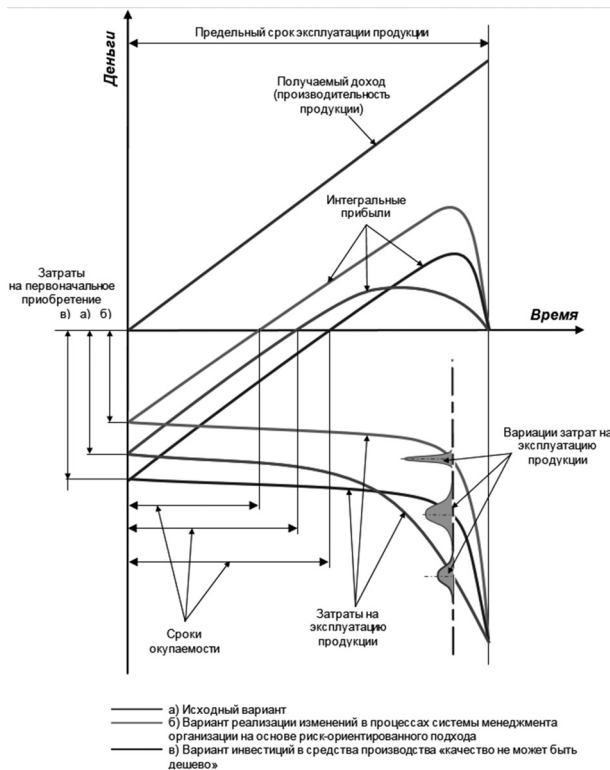


Рисунок 7 — Модель оптимизации эффективности в жизненном цикле продукции для организации и потребителя
Figure 7 — Model of efficiency optimization in the product lifecycle for the organization and the consumer

4. Полученные научные и практические результаты могут быть использованы при реализации утвержденных Стратегии развития автомобильной промышленности Российской Федерации и Планов повышения надежности сельскохозяйственной техники Республики Беларусь; процессов подготовки и выполнения запланированной Программы Союзного государства Российской Федерации и Республики Беларусь «Машиностроение СТ».

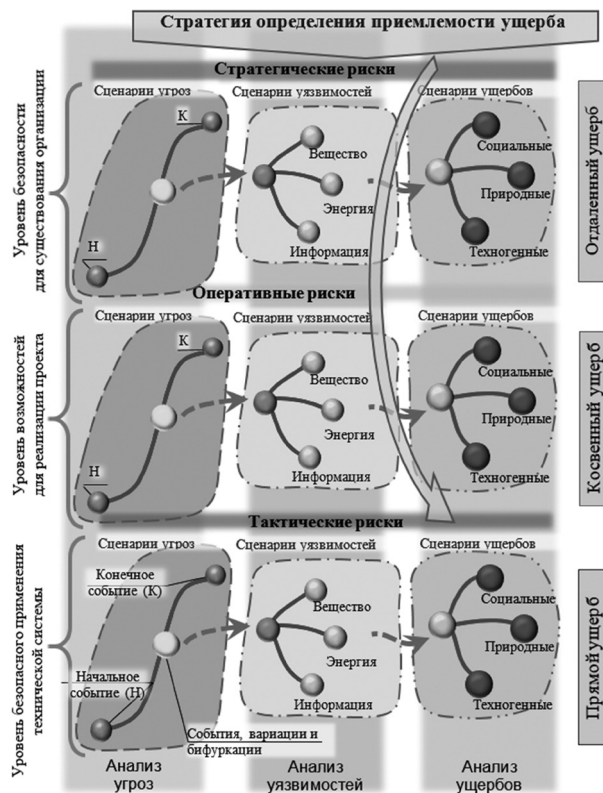


Рисунок 8 — Модель анализа прямых, косвенных и отдаленных рисков
Figure 8 — Model of direct, indirect and long-term risk analysis

Список литературы

1. Решетов, Д.Н. Надежность машин: учеб. пособие для машиностр. спец. вузов / Д.Н. Решетов, А.С. Иванов, В.З. Фадеев; под. ред. Д.Н. Решетова. — М.: Высш. шк., 1988. — 240 с.
2. Научно-методические основы проектирования: системное обеспечение приемлемых рисков в автотракторосельхозмашиностроении / А.Н. Панов [и др.]; под общ. ред. А.Н. Панова. — Минск: БГАТУ, 2009. — 483 с.
3. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Научные основы техногенной безопасности / Н.В. Абросимов [и др.]. — М.: Знание, 2015. — 936 с.
4. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты / Н.В. Абросимов [и др.]; под общ. ред. Н.А. Махутова. — М.: Знание, 2018. — 1016 с.
5. Махутов, Н.А. Проблемы прочности, техногенной безопасности и конструкционного материаловедения / Н.А. Махутов [и др.]; под ред. Н.А. Махутова, Ю.Г. Матвиенко, А.Н. Романова. — М.: ЛЕНАНД, 2018. — 720 с.
6. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты: тематич. блок «Безопасность железнодорожного транспорта» / В.А. Акимов [и др.]; под ред. Н.А. Махутова. — Раздел I. Научные основы техногенной безопасности железнодорожного транспорта. — М.: Знание, 2020. — 488 с.
7. Болотин, В.В. Ресурс машин и конструкций / В.В. Болотин. — М.: Машиностроение, 1990. — 448 с.
8. Машиностроение: энцикл. / Ред. совет: К.В. Фролов (пред.) и др. — М.: Машиностроение. — Т. IV-3: Надежность машин / В.В. Клюев [и др.]; ред.-сост. В.В. Клюев, А.П. Гусенков; отв. ред. К.С. Колесников. — М.: Машиностроение, 2003. — 592 с.
9. Проников, А.С. Параметрическая надежность машин / А.С. Проников. — М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. — 560 с.
10. Якушев, А.И. Взаимозаменяемость, стандартизация и технические измерения: учеб. для втузов / А.И. Якушев, Л.Н. Воронцов, Н.М. Федотов. — 6-е изд., доп. и перераб. — М.: Машиностроение, 1987. — 352 с.

11. Панов, А.Н. Методология и модели риск-ориентированного проектирования, производства, эксплуатации, обслуживания и утилизации — новая фундаментальная система обеспечения конкурентоспособности машиностроения / А.Н. Панов, Ж.А. Мрочек, В.М. Пашкевич // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. — 2022. — № 1(74). — С. 49–63.
12. Панов, А.Н. Фракталы и аттракторы нормирования и стандартизации техники и процессов деятельности организации. Эффективное планетарное развитие машиностроения в парадигме рисков / А.Н. Панов, Ж.А. Мрочек, В.М. Пашкевич // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. — 2022. — № 4(77). — С. 35–47.
13. Системы менеджмента качества. Особые требования по применению ISO 9001-2015 для организаций, участвующих в цепях поставок автотракторного, сельскохозяйственного, погрузочно-транспортного, карьерного и специального машиностроения: СТБ 16949-2018. — Введ. 01.01.2019. — Минск: БелГИСС, 2019. — 120 с.

PANOV ALEXANDER N., Ph. D. in Eng.

Leading Researcher

E-mail: a.panov@tut.by

Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

Received 14 February 2023.

RISK-BASED DESIGN METHODOLOGY FOR ENSURING COMPETITIVENESS IN THE GLOBAL ENGINEERING INDUSTRY

The article presents materials on the development of risk-based design methodology as a new stage in the development of the system of design, manufacture, operation, maintenance, repair and disposal of equipment for effective and efficient competitiveness in the global engineering industry. It is shown that traditional design is no longer adequate to global planetary changes accompanied by a reduction in resources, design deadlines, entering the market in a competitive environment and a conflicting global division of labor. It is noted that at present, machinery and technology have become much more complicated, including in connection with embedded software. Attention is focused on the fact that forecasting and evaluation of behavior, reliability and management of compliance with the requirements of sociotechnical systems in connection with the nonlinear processes of functioning of human-machine systems and degradation for both regular and non-standard conditions require innovative methods and tools. Attention is drawn to the fact that the creation of technology is accompanied by an increase in interrelated man-made, natural and social risks, the primary sources of which are inadequate information both when creating and using technology. For a wide practical application of risk-oriented design, a methodology, methods for risk management at the stages of the life cycle of equipment, state standards are suggested, as well as ways to identify the significance of damages in existing forms of design, technological, and other documentation for products and manufacturing processes, as well as in new types of documents, for example, in terms of risk management. It is noted that further work is currently being planned for the widespread introduction of a risk-based approach in mechanical engineering and related industries of both individual countries and unions to ensure the effective competitiveness of supply chains.

Keywords: mechanical engineering, methodology, systems, design, risks, effectiveness, efficiency, competitiveness, standards

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2023-2-63-5-13>

References

1. Reshetov D.N., Ivanov A.S., Fadeev V.Z. *Nadezhnost mashin* [Reliability of machines]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1988. 240 p. (in Russ.).
2. Panov A.N., Osmola I.I., Shkadretsov I.V., Lovkis I.B., Marinich L.A. *Nauchno-metodicheskie osnovy proektirovaniya. Sistemnoe obespechenie priemlemykh riskov v avtotraktoroselkhozmashtinostroenii* [Scientific and methodological foundations of design. System support of acceptable risks in the automotive and agricultural machinery industry]. Minsk, Belorusskiy gosudarstvennyy agrarnyy tekhnicheskiiy universitet Publ., 2009. 483 p. (in Russ.).
3. Abrosimov N.V., et al. *Bezopasnost Rossii. Pravovye, sotsialno-ekonomicheskie i nauchno-tekhicheskie aspekty. Nauchnye osnovy tekhnogemnoy bezopasnosti* [Security of Russia. Legal, socio-economic, scientific and technical aspects. Scientific foundations of technogenic safety]. Moscow, Znanie Publ., 2015. 936 p. (in Russ.).
4. Abrosimov N.V., et al. *Bezopasnost Rossii. Pravovye, sotsialno-ekonomicheskie i nauchno-tekhicheskie aspekty* [Security of Russia. Legal, socio-economic, scientific and technical aspects]. Moscow, Znanie Publ., 2018. 1016 p. (in Russ.).

5. Makhutov N.A., et al. *Problemy prochnosti, tekhnogennoy bezopasnosti i konstruksionnogo materialovedeniya* [Problems of strength, technogenic safety and structural materials science]. Moscow, LENAND Publ., 2018. 720 p. (in Russ.).
6. Akimov V.A., et al. *Bezopasnost Rossii. Pravovye, sotsialno-ekonomicheskie i nauchno-tekhnicheskie aspekty. Tematicheskii blok "Bezopasnost zheleznodorozhnogo transporta". Razdel I. Nauchnye osnovy tekhnogennoy bezopasnosti zheleznodorozhnogo transporta* [Security of Russia. Legal, socio-economic, scientific and technical aspects. Thematic block "Safety of railway transport". Part I. Scientific foundations of technogenic safety of railway transport]. Moscow, Znanie Publ., 2020. 488 p. (in Russ.).
7. Bolotin V.V. *Resurs mashin i konstruksiy* [Lifetime of machines and structures]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1990. 448 p. (in Russ.).
8. Klyuev V.V., et al. *Mashinostroenie. Entsiklopediya v 40 t. T. 4-3. Nadezhnost mashin* [Mechanical engineering. Encyclopedia in 40 vol. Vol. 4-3. Reliability of machines]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2003. 592 p. (in Russ.).
9. Pronikov A.S. *Parametricheskaya nadezhnost mashin* [Parametric reliability of machines]. Moscow, MGTU im. N.E. Bauman Publ., 2002. 560 p. (in Russ.).
10. Yakushev A.I., Vorontsov L.N., Fedotov N.M. *Vzaimozamenyaemost, standartizatsiya i tekhnicheskie izmereniya* [Interchangeability, standardization and technical measurements]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1987. 352 p. (in Russ.).
11. Panov A.N., Mrochek Zh.A., Pashkevich V.M. Metodologiya i modeli risk-orientirovannogo proektirovaniya, proizvodstva, ekspluatatsii, obsluzhivaniya i utilizatsii — novaya fundamentalnaya sistema obespecheniya konkurentosposobnosti mashinostroeniya [Methodology and models of risk-oriented design, production, operation, maintenance and utilization as a new fundamental system for ensuring competitiveness of mechanical engineering]. *Vestnik Belorussko-Rossiyskogo universiteta*, 2022, no. 1(74), pp. 49–63 (in Russ.).
12. Panov A.N., Mrochek Zh.A., Pashkevich V.M. Fraktaly i attraktory normirovaniya i standartizatsii tekhniki i protsessov deyatel'nosti organizatsiy. Effektivnoe planetarnoe razvitie mashinostroeniya v paradigme riskov [Fractals and attractors of technical regulation and standardization of equipment and activity processes of organizations. Effective planetary development of mechanical engineering in the risk paradigm]. *Vestnik Belorussko-Rossiyskogo universiteta*, 2022, no. 4(77), pp. 35–47 (in Russ.).
13. STB 16949-2018. *Sistemy menedzhmenta kachestva. Osobyie trebovaniya po primeneniyu ISO 9001-2015 dlya organizatsiy, uchastvuyushchikh v tsepyakh postavok avtotraktorного, sel'skokhozyaystvennogo, pogruzochno-transportnogo, karernogo i spetsialnogo mashinostroeniya* [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]. Minsk, Belorusskiy gosudarstvennyy institut standartizatsii i sertifikatsii Publ., 2019. 120 p. (in Russ.).