

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ В МАШИНОСТРОЕНИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РИСК-ОРИЕНТИРОВАННОГО ПОДХОДА

Кандидат техн. наук *А.Н. Панов*  
ООО «ЮРС-Русь», Санкт-Петербург, Россия

*Разработаны методология и комплексные инновационные модели: риск-ориентированного проектирования в машиностроении; оптимизации зависимостей «вероятность-ущерб» для продукции и используемой измерительной системы; идентификации значимости приоритета расчетных характеристик в конструкторско-технологической документации; определения приоритетных цепей причинно-следственных связей, индукции/дедукции источников отказов на основе менеджмента знаний; выбора статистических методов для верификации достижения соответствия на основе рисков; оптимальной связи значимости ущерба и вероятности событий с учетом изменения уровня знаний; оптимизации эффективности для организации в проектах и для конечного потребителя в жизненном цикле продукции на основе приоритизации характеристик и оптимизации вариаций.*

**Ключевые слова:** система, качество, надежность, безопасность, риски, процессы, машиностроение.

## DESIGN IN MECHANICAL ENGINEERING USING A RISK-BASED APPROACH

Ph.D. (Tech.) *A.N. Panov*  
URS-Russia Ltd, Saint- Petersburg

*The methodology and complex innovative models have been developed: risk-oriented design in mechanical engineering; optimization of probability - damage dependencies for the product and the measurement system used; identification of the significance of the priority of design characteristics in the design and technological documentation; determination of priority chains of cause-and-effect relationships, induction/deduction of failure sources based on knowledge management; selection of statistical methods for verifying compliance based on risks; the optimal relationship between the significance of damage and the probability of events, taking into account changes in the level of knowledge; optimization of efficiency for the organization in projects and for the end user in the product lifecycle based on prioritization of characteristics and optimization of variations.*

**Key words:** system, quality, reliability, safety, risks, processes, engineering.

### **1. Постановка проблемы**

В настоящее время в мире в стандартах для машиностроительной отрасли устанавливаются требования и рекомендации, основанные на использовании фундаментально новой концепции — риск-ориентированного подхода, отраженного в стратегии национальной безопасности [1], в законодательстве о промышленной безопасности [2, 3], а также ряде национальных и международных стандартов (ISO 31000 и др.). К наиболее значи-

мым стандартам следует отнести определяющие взаимодействие и риски персонала при создании продукции, это стандарты для менеджмента организаций при достижения в областях: качество (ISO 9001), надежность (IEC 60300), безопасность (ISO 45001), экология (ISO 14001), знания (ISO 30401) и т.д.. Цель — эффективное создание конкурентоспособной продукции с ускоренными сроками подготовки и ведения производства машиностроительного комплекса [4-10].

Традиционная, сложившаяся как в мире, так и в СССР и СНГ, система разработки техники основана на единой системе проектирования продукции и процессов изготовления, обслуживания и ремонта для предупреждения отказов и разрушений по характеристикам прочности

$$\sigma_{\max}^{\sigma} = F_{\sigma} \{Q, (F, w)\} \leq [\sigma] = \frac{\sigma_o}{n_{\sigma}}, \quad (1)$$

где  $\sigma_{\max}^{\sigma}$  - максимальные номинальные или местные напряжения,  $Q$  – расчетные нагрузки (механические, аэрогидродинамические, электромагнитные, тепловые),  $F, w$  – размеры опасных сечений и моменты сопротивления,  $[\sigma]$  – допускаемые напряжения,  $\sigma_o$  – опасные напряжения,  $n_{\sigma}$  – запасы прочности.

Система включает правила разработки и оформления документации, в том числе назначения номинальных размеров, полей допусков, влияющих на  $Q, F$  и  $w$ . Действующие технологические нормы проектирования и производства являются основой для назначения соответствующих объемов выборки при проведении, например, контроля при изготовлении. Следует отметить, что термин «дефект» по ГОСТ 15467 подразумевает факт несоответствия продукции установленным требованиям, критичность – также рассматривается как совершенное событие.

Введение в (1) временных по  $\tau$  и вероятностных по  $p$  характеристик позволяет получить параметры новой платформы риск-ориентированного подхода с определением ресурса по времени  $\tau$  и числу циклов  $N$

$$\{\tau, N\} = F_{\tau, N} \{\sigma_{\max}(\tau, N), \sigma_{on}(\tau, N)\} \quad (2)$$

и надежности по характеристикам вероятности разрушения

$$p(\tau, N) = F_p \{Q(\tau, N, p), \sigma_{on}(\tau, N, p)\} \quad (3)$$

В целом платформа риск-ориентированного подхода (позволяющая достигать цели при общем планетарном сокращении ресурсов с фокусированием на приоритетах) в настоящее время в мире системно не достаточно подкреплена методологией связи последствий рисков с первопричинами - характеристиками продукции и процессов изготовления и эксплуатации [2 - 8]. Основными причинами этого являются:

- недостаточно развитый терминологический аппарат качества, надежности и т.п. (см. ГОСТ 16504, ГОСТ 15467, ГОСТ 22732, ISO 9000, ГОСТ 27.002-89, ГОСТ 27.002-2016 и др.) в частности в связи с определением термина риск (воздействие неопределенности, см. ISO 9000);

- несбалансированность систем [8 - 10] и целей, а также не достаточная разработанность методологий и моделей на базе риск-ориентированного подхода.

Традиционно в машиностроении используется классификации, которые разделяют по значимости компоненты технической системы изделия, например [9], «отказ приводит к

аварии», «отказ приводит к повышенным расходам». Наиболее часто причиной отказов в эксплуатации для серийно выпускаемых изделий является необеспечение качества при производстве, что может быть оценено расчетом надежности технологического процесса по параметрам качества продукции (например, по ГОСТ 27.202) и расчетом вариации процесса тиражирования.

В связи с тем, что на практике процессы проектирования, изготовления, эксплуатации, восстановления и утилизации реализуются в течение времени  $\tau$ , происходят значительные изменения, вариации и возникают бифуркации – на первый план выходит не столько анализ и оценка дефектности, а предупреждение и управление рисками, которые следует начинать с концептуального проектирования и продолжать на протяжении всего жизненного цикла продукции.

Следует отметить, что в настоящее время накоплены базы данных и базы знаний глубинных причинно-следственных связей для III – IV укладов техники, за исключением V, VI технологических укладов. Они позволяют не только идентифицировать первопричины отказов / рисков еще на стадии зарождения и формирования, но и управлять вероятностью  $p$  возникновения первопричин несоответствий как для типа продукции, так и для типа процесса тиражирования, восстановления, утилизации [4, 9, 10].

Предложены, уточнены [4-7] ряд терминов, определений и классификаций, например, приоритетность характеристик рисков: событий, вариаций, бифуркаций; ранжирования рисков: пренебрежимые, приемлемые и чрезмерные и др.

Совместное рассмотрение функций «качество — цена» для поставщика и потребителя позволило определить зоны оптимальности [4, 7] для заинтересованных сторон при использовании риск-ориентированного подхода. Совершенствование научной базы для нормативного обоснования безопасности мобильной высокоответственной и высокорисковой техники двойного назначения, например, для колесных машин [7], для подвижного состава железнодорожного транспорта [4], а также категорирование отказов, аварий и катастроф в зависимости от последствий - потенциального ущерба - широко представлено в многотомном издании «Безопасность России» [4]. Следует отметить, что практика [4-6] управления рисками транспортных средств серийного и массового производства без разработанной и внедренной методологической поддержки приводит к недостаточной результативности, даже при наличии фундаментальных наработок. Необходимо продолжить развитие методологии и методов результативного и эффективного управления рисками на основе системной взаимосвязи категорирования последствий отказов и научно-технической базы знаний их идентифицированных первопричин.

## ***2. Многокритериальное обоснование развития управления рисками***

В истории развития теории и практики машиностроения [4 - 7] можно выделить базовые положения, которые используются для достижения соответствия требованиям к продукции машиностроения, среди которых наиболее значимые:

- 1) изменение научных основ проектирования [2 – 4, 8]:
  - а) детерминированное — когда определено требование по установлению в технической документации номинальной величины характеристики;
  - б) вероятностное — когда для номинального значения характеристики появилось поле допуска — система качеств, а затем оценивается статистика попадания в это поле фактической величины при производстве;
- 2) анализ причины отказов техники и технологий осуществляется путем декомпозиции расчетов и испытаний машин и процессов их изготовления [4 - 10]: машина в целом, узел, деталь и далее зоны (например, концентрации) зарождения повреждений;

3) использование при анализе этапов жизненного цикла продукции соответствующих подходов:

а) детерминированный — нагруженность в эксплуатации и процессы изготовления неизменны;

б) вероятностный — все процессы нестабильны и им присущи вариации;

4) критерии достижения соответствия качества продукции, начиная с использования «запасов прочности», развивались далее - к планируемым и достигаемым параметрам ресурса и надежности / вероятности отказа, например по ГОСТ 15467 и [4-8];

5) критерии безопасности и защищенности по параметрам рисков [1 – 4, 7].

Следует отметить, что решение о совершенствовании системы нормирования технических требований без методологической поддержки приводит к недостаточной результативности управления рисками в практике, хотя при этом имеются фундаментальные наработки по управлению рисками [4 - 6], в том числе в машиностроении. Известен [4 - 8] статистический подход для достижения соответствия выхода процесса / цели потребителя который основан на снижении вариаций процесса, измерительной системы или робастности процесса (рис. 1).

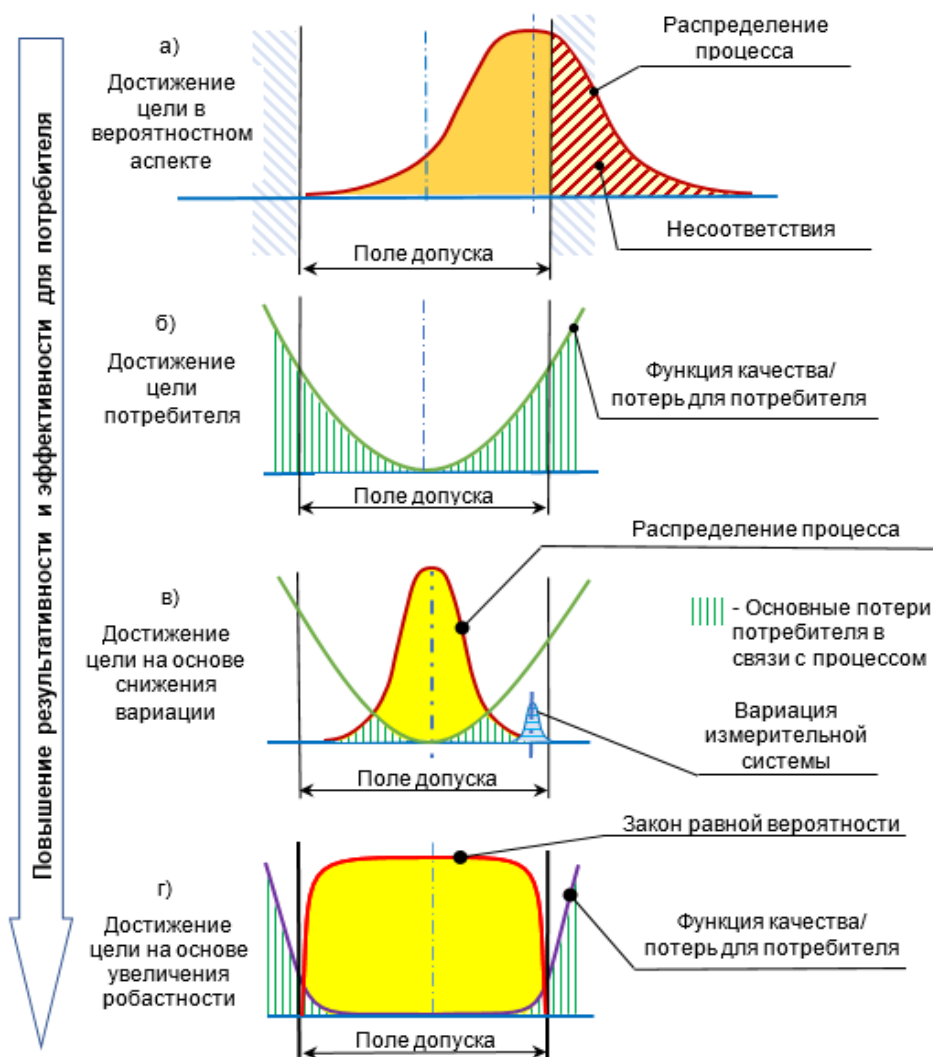


Рис. 1. Вероятностный подход к достижению соответствия выхода процесса / цели потребителя на основе снижения вариаций процесса, измерительной системы или робастности процесса

Для повышения результативности, эффективности и конкурентоспособности организаций в экономике создается научное обоснование методологии и моделей риск-ориентированного проектно-процессного подхода для нормирования рисков технических характеристик [4 - 6].

Разработаны [4 - 7] модели риск-ориентированного подхода для достижения приемлемой степени соответствия выходов процессов проектирования и изготовления целям потребителя и поставщика на основе оптимизации вариаций процессов и измерительной системы, а также достижения робастности процессов:

- риск-ориентированного подхода для достижению приемлемой степени соответствия выхода процесса / цели потребителя и поставщика на основе оптимизации вариаций процесса, измерительной системы, а также робастности процесса (рис. 2);

- оптимизации эффективности для потребителя и поставщика на основе риск-ориентированного подхода для достижения приемлемой степени соответствия выхода процесса / цели потребителя и поставщика на основе оптимизации вариации процесса (рис. 3).

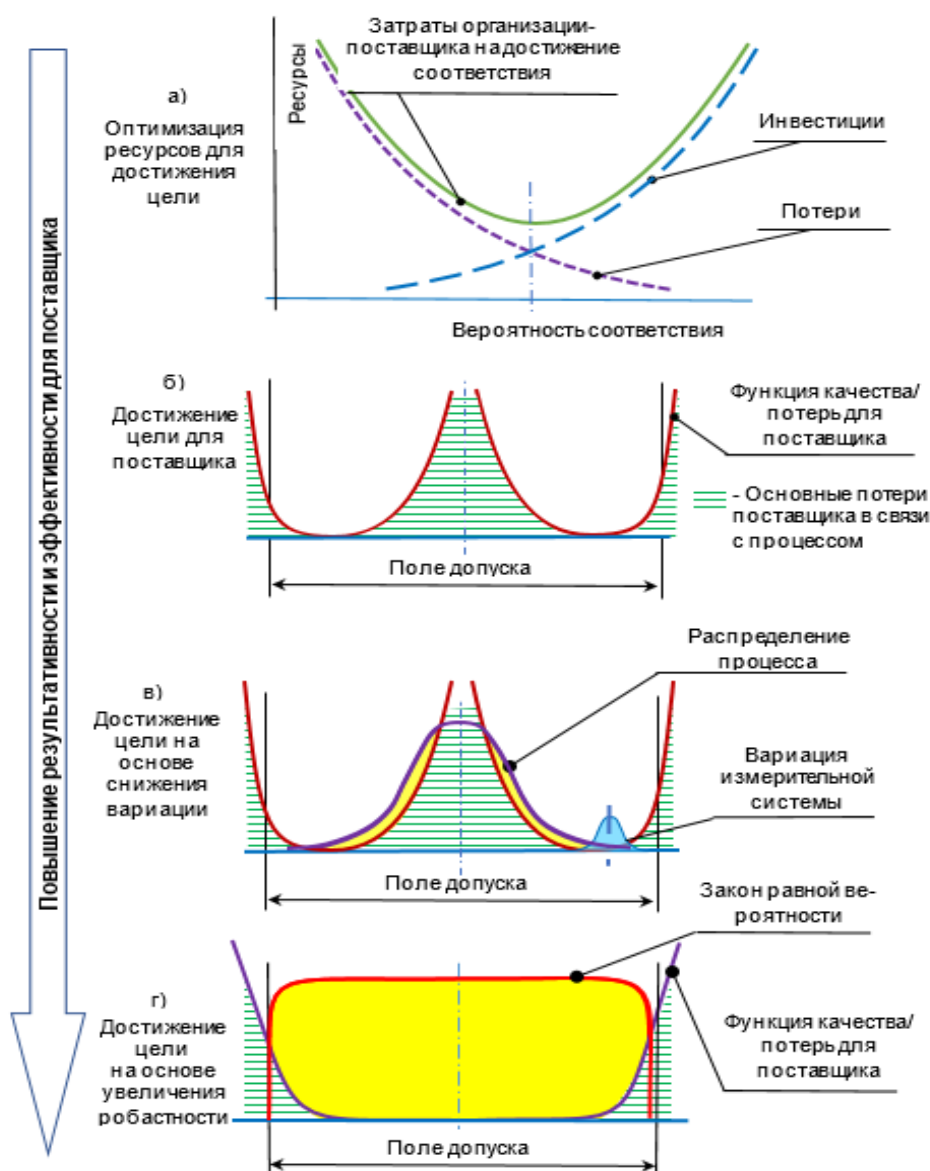


Рис. 2. Риск-ориентированный подход к достижению приемлемой степени соответствия выхода процесса / цели потребителя и поставщика на основе оптимизации вариаций процесса и измерительной системы или робастности процесса

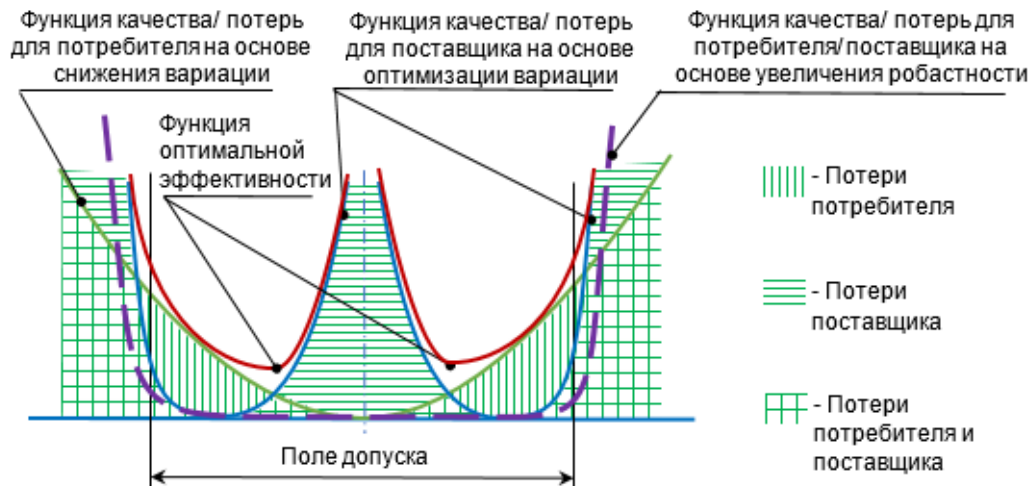


Рис. 3. Модель оптимизации эффективности для потребителя и поставщика на основе риск-ориентированного подхода к достижению приемлемой степени соответствия выхода процесса / цели потребителя и поставщика на основе оптимизации вариации процесса

Совместное рассмотрение функций качества поставщика и потребителя (рис. 2, 3) определяет зоны оптимальности. Указанные зоны являются результатом компромисса “качество-цена” при использовании риск-ориентированного подхода.

### 3. Решение проблемы риск-ориентированного проектирования

Для результативного применения риск-ориентированного подхода в машиностроении предложено [4 - 7] системно развить все четыре упомянутых блока.

Первый блок — введение в конструкторско-технологической документации (наряду с полем допуска) идентификаторов значимости (приоритетности) характеристик для заинтересованных сторон (например, по десятибалльной шкале, где балл 10 — наивысший приоритет (ущерб)).

Второй — проведение анализа корневой причины отказов (с учетом приоритетности) до уровня декомпозиции первопричины, определяемой актуальным на момент проектирования знанием науки, техники и технологий.

Третий — введение риск-ориентированного подхода и осуществление анализа процессов жизненного цикла машины / продукции по сценариям угроз (события, вариации, бифуркации) для идентификации уязвимости техники, технологии и возможных ущербов.

Четвертый — установление критериев качества:

- не просто обеспечение соответствия показателя типа продукции техническому заданию, а «ущерб – вероятность» не достижения соответствия типа продукции требованиям заинтересованных сторон;

- не вероятность попадания характеристики в поле допуска, например, при тиражировании / восстановлении / утилизации, а «достижение приемлемого риска» («ущерб — вероятность»).

Уровень неуязвимости технических систем (номинальных значений и оптимальной вариации характеристик) должен достигать уровня приемлемых рисков несоответствия требованиям заинтересованных сторон. Это возможно путем управления рисками с фокусированием на коренных первопричинах (рис. 4). Для этого в развитии существующей системы конструкторско-технологической документации предлагается ввести дополни-

тельные группы документов: «планы управления рисками продукции и процессов» (начиная с этапа концепции и заканчивая утилизацией), а также «анализ достижения приемлемых рисков продукции и процессов» [5, 6].

На основе развития приведенных парадигм обеспечения соответствия машиностроительной продукции при использовании риск-ориентированного подхода предложены [4 - 6]:

1. Фундаментальная пятикомпонентная модель оптимизации зависимостей «вероятность — ущерб» — «качество — цена» — «вариация — ущерб», а также шкала «значимость приоритета — вероятность» для продукции (процесса) (рис. 5).

При этом модель диалектики менеджмента рисков оптимизации зависимостей «вероятность-ущерб» развивалась начиная от двухступенчатой (соответствующая- несоответствующая продукция), через трехступенчатую (критические, значительные, незначительные дефекты) к многоступенчатой классификации (рис. 6).

2. Модель оптимизации выбора типа измерительной системы и ее вариации в зависимости от ущерба. Указанное позволяет на основе идентифицированной значимости приоритета адекватно управлять рисками измерительных систем.

3. Модель идентификации «значимости приоритета характеристики» в конструкторско-технологической документации в дополнении к традиционным параметрам — номинальной величине и полю допуска. Указанное является принципиально новым при разработке конструкторско-технологической и эксплуатационной документации, что позволяет эффективным образом управлять первопричинами возникновения последствий в зависимости от приоритетов.

4. Модель идентификации приоритетных цепей причинно-следственных связей источников отказов системы — «подсистема — элемент — первопричина» и их результатов «следствие — промежуточные события — следствие для конфигуратора, в которой функционирует система» на основе менеджмента знаний. Указанное позволяет снизить требуемые ресурсы на разработку техники и технологий без потери качества продукции, а также существенно сокращать время выхода на рынок.

5. Матрица [6], которая позволяет выбирать необходимые статистические методы, методы оценки вариации метрологических систем, видов аудитов продукции и процессов изготовления в зависимости от приоритетности характеристики для верификации приемлемости вариации для достижения целей (качества, надежности, безопасности) при тиражировании продукции (см. рис. 5).

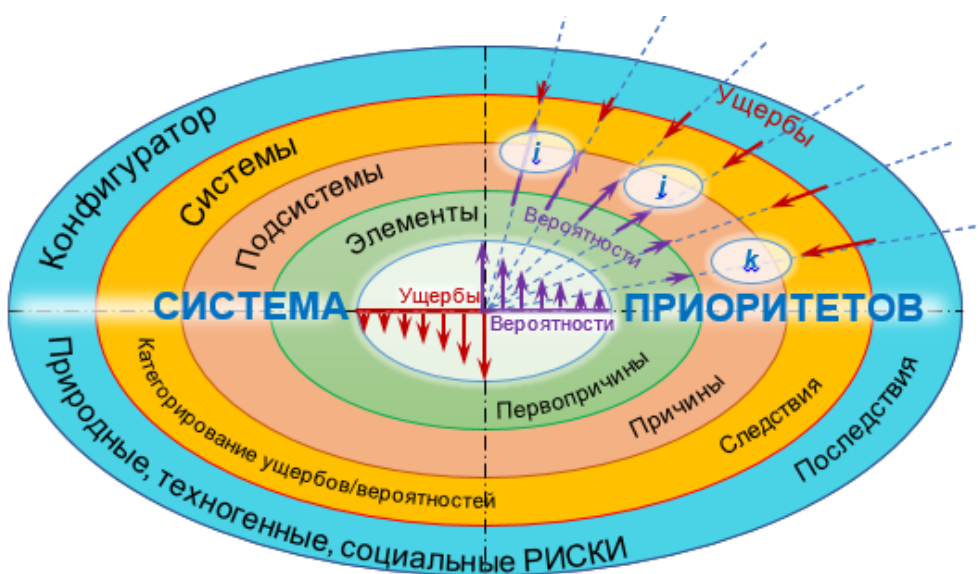


Рис. 4. Система приоритизации

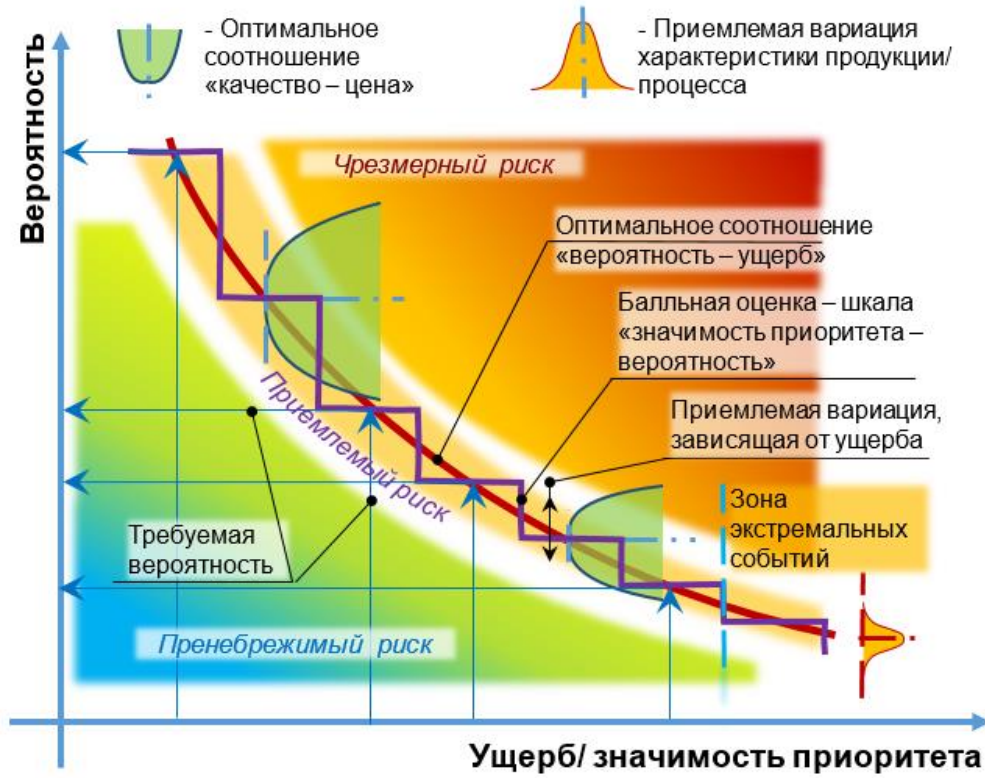


Рис. 5. Пятикомпонентная модель оптимизации зависимостей «вероятность–ущерб» – «качество–цена» - «вариация–ущерб» при риск-ориентированном подходе. Шкала «значимость приоритета – вероятность» для продукции/процесса

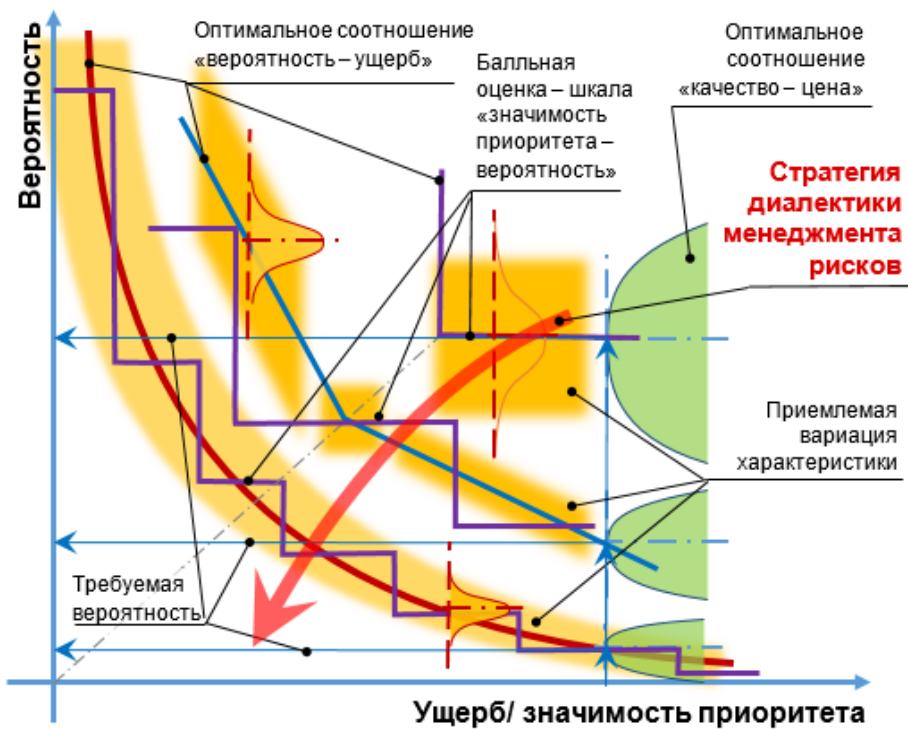


Рис. 6. Модель диалектики менеджмента рисков оптимизации зависимостей: «вероятность–ущерб», «качество–цена» и «вариация–ущерб»



6. Модель оптимальной связи значимости ущерба и вероятности событий с учетом изменения уровня знаний. Указанное направлено на обеспечение адекватной оценки вариантов повышения качества, надежности и безопасности продукции, а также рисков в зависимости от используемого при проектировании технологического уклада.

7. Модель оптимизации затрат на достижение требуемых знаний. Позволяет обосновывать и оптимизировать в рамках реализации проектов по созданию инновационной техники затраты на проведение НИР и ОК(Т)Р.

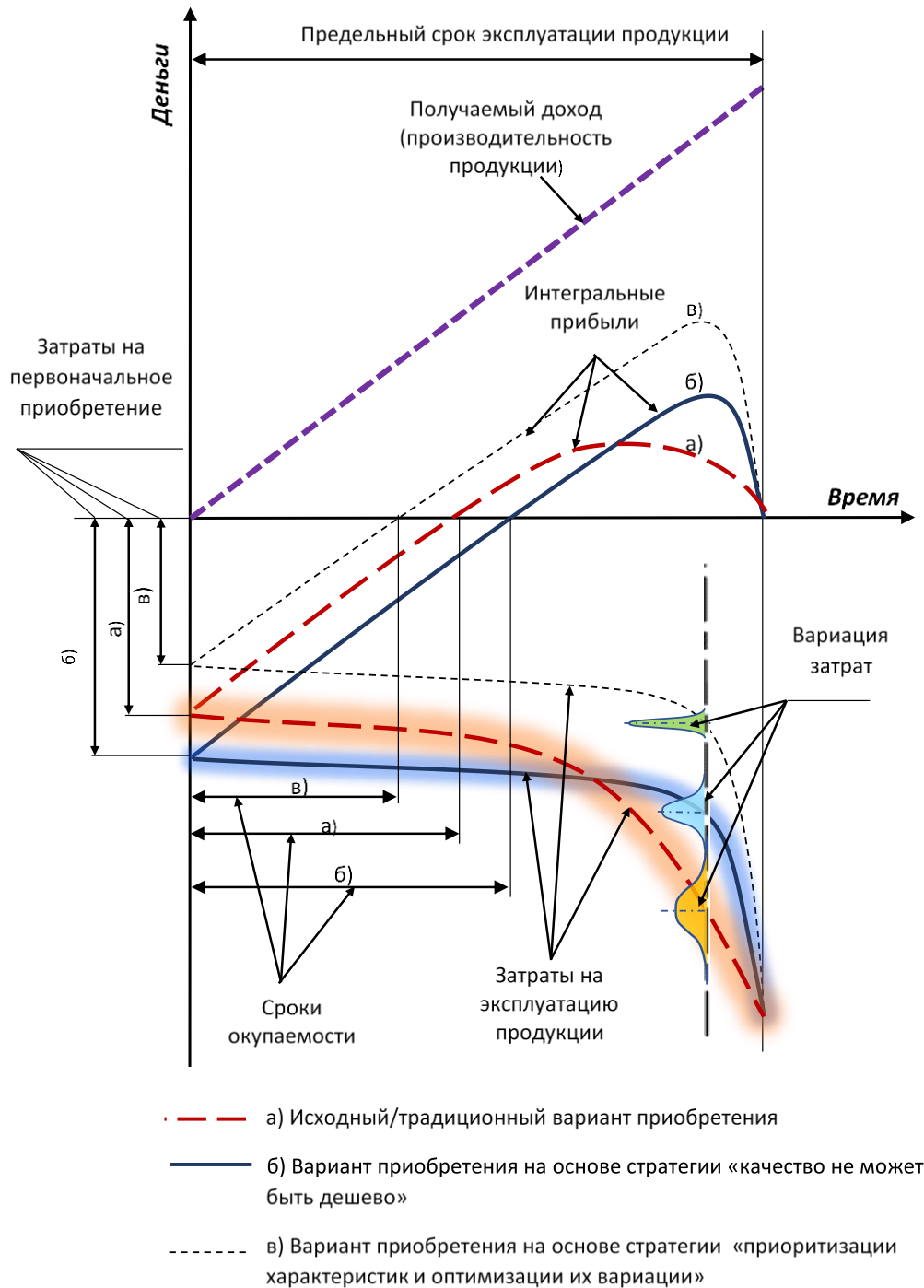


Рис. 7. Модель оптимизации эффективности для организации в проектах и для конечного потребителя в жизненном цикле продукции на основе приоритизации характеристик и оптимизации вариации при риск-ориентированном подходе

8. Модель оптимизации эффективности для организации в проектах и для конечного потребителя в жизненном цикле продукции (рис. 7). Модель позволяет используя систему идентификации приоритетов в конструкторско-технологической документации и оптимизации вариации при изготовлении и восстановлении (рис. 3) – снизить себестоимость продукции и эксплуатационные затраты при аналогичных технических характеристиках продукции, в том числе надежности и безопасности, что позволяет повысить объем производства в конкурентной экономике.

Таблица

**Рекомендуемые виды верификации продукции и процессов изготовления в зависимости от значимости характеристик для достижения приемлемого риска несоответствия в процессе производства**

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) <sup>1)</sup>							
	Высокая	Низкая	Высокая	Низкая	Высокая	Низкая	–	
	Показатель FMEA (RPN)							
Низкий	Высокий	Низкий	Высокий	Низкий	Высокий	–		
1) Проверка возможности оборудования (n ≥ 5 шт.)	–	+	+	+	+	+	+	Повторные настройки и верификация
	Меньше 100 % допуска	Меньше 50 % допуска	C <sub>m</sub> , C <sub>mk</sub> , P <sub>m</sub> , P <sub>mk</sub> ≥ 1,33		C <sub>m</sub> , C <sub>mk</sub> , P <sub>m</sub> , P <sub>mk</sub> ≥ 1,67			
2) Проверка образцов перед началом и после окончания работы (n ≥ 2 шт.)	–	+	–	+	–	+	+	Повторные настройки и верификация
	Меньше 20 % допуска							
3) Верификация опытной партии (n ≥ 50 шт.)	+	+	+	+	+	+	+	Повторные настройки и верификация
	C <sub>p</sub> , C <sub>pk</sub> , P <sub>p</sub> , P <sub>pk</sub> ≥ 1,33		C <sub>p</sub> , C <sub>pk</sub> , P <sub>p</sub> , P <sub>pk</sub> ≥ 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

<sup>1)</sup> Восемь 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) и слова regulated (регулирование и регулирование социотехнических систем – как свойство сложных систем).  
Примечание – 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.

Таким образом, развита методология и методы результативного и эффективного управления рисками на основе системной взаимосвязи категорирования последствий отказов и научно-технической базы знаний их идентифицированных первопричин путем введения в конструкторско-технологическую документацию характеристики идентификаторов классификации значимости последствий (в дополнении к номинальной величине и полю допуска). Разработанная методология и модели были использованы при создании и применении инновационных государственных стандартов Республики Беларусь на системы менеджмента и методики достижения эффективности СТБ 16949, СТБ 2298, СТБ В 15.004, СТБ 1505, СТБ 1506, СТБ 2450, СТБ 2484, СТБ 2582.

### Литература

1. Стратегия национальной безопасности Российской Федерации. Утверждена Указом Президента РФ от 02.07.2021 № 400
2. Федеральный закон "О промышленной безопасности опасных производственных объектов" от 21.07.1997. № 116-ФЗ
3. Федеральный закон "О техническом регулировании" от 27.12.2002 № 184-ФЗ
4. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Техногенная, технологическая и техносферная безопасность / под общ. ред. Махутова Н.А. — М.: МГОФ «Знание». - 2018. — 1016 с.
5. Панов А.Н. и др. Научно-методические основы проектирования. Системное обеспечение приемлемых рисков в автотракторосельхозмашиностроении: монография / Панов А.Н., Осмола И.И., Шкадрцов И.В., Ловкис И.Б., Маринич Л.А.; под общ. ред. Панова А.Н. — Минск: БГАТУ. - 2009. — 482 с.
6. Проектирование транспортных средств: нагруженность, повреждение, ресурс: монография / Горбачевич М.И., Панов А.Н., Минюкович С.М.; под общ. ред. Панова А.Н. — Минск.: «Технопринт». - 2005. — 264 с.
7. 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.- 238 с.: ил.
8. Махутов Н.А., Панов А.Н. Совершенствование научной базы и нормативного обоснования безопасности колесных мобильных машин. Журнал «Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций». - 2021 №1, С. 34-43.
9. Проников А.С. Параметрическая надежность машин.- М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. - 2002.-520 с.: ил.
10. Надежность машин. Т.IV-3/ В.В. Ключев, В.В. Болотин, Ф.Р. Соснин и др.; Под общ. ред. В.В. Ключева. - 2001.-592 с., ил.

### Сведения об авторе

**Панов Александр Николаевич** –главный эксперт, ООО «ЮРС-Русь», Санкт-Петербург, Россия. E-mail: a.panov@tut.by