

УДК 658.5

## АКТУАЛЬНЫЕ МЕТОДОЛОГИИ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ И НАДЕЖНОСТЬЮ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ, В Т.Ч. СОДЕРЖАЩИХ СПЛОШНУЮ СРЕДУ: ОБЗОР И КРИТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

© 2025 Е.Ю. Головина, Д.М. Бободжонов, В.И. Буньковский

Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

Статья поступила в редакцию 26.07.2025

Современные требования к техническим системам и управленческим процессам обуславливают необходимость использования комплексных методологических подходов, обеспечивающих высокие стандарты качества, надежности и инновационности. В условиях быстрого технологического прогресса и усложнения систем актуальными становятся методы эффективной оценки и выбора решений с учетом множества критериев. В представленной работе осуществлен комплексный анализ современных методологий управления качеством, надежностью и рисками технологических систем, включая процессы, основанные на движении сплошной среды (гидродинамические, газодинамические, термомеханические и деформационные явления). Исследование универсальных процессов перемещения сплошной среды в условиях многоэтажной инфраструктуры предприятий позволяет разработать единые подходы к обеспечению качества продукции различных производств. Методологической основой исследования выступили принципы системного анализа, включая сравнительную оценку эффективности методологий и выявления синергетических эффектов при их интеграции. Особое внимание уделено цифровым технологиям как катализатору эволюции традиционных подходов. Результаты систематизированы в виде классификационных матриц, отражающих область применения, преимущества и ограничения каждой методологии. Практическая значимость исследования подтверждена успешными кейсами внедрения в ключевых отраслях промышленности, таких как авиастроение (оптимизация конструкции МС-21), энергетика (повышение надежности АЭС), нефтегазовом секторе (прогнозный ремонт инфраструктуры) и оборонно-промышленный комплекс (расчеты для перспективной техники).  
*Ключевые слова:* управление качеством, надежность технических систем, инновационный менеджмент, гибридные технологии, синергетический эффект, цифровая трансформация, технологии сплошных сред.

DOI: 10.37313/1990-5378-2025-27-4-36-45

EDN: BASXDR

### ВВЕДЕНИЕ

Современные производственные системы, в том числе, где движение сплошных сред имеет определяющее значение, сталкиваются с высокой динамичностью условий, необходимостью обеспечения высокого уровня качества продукции, надежности оборудования и минимизации рисков. Традиционные подходы к управлению зачастую оказываются недостаточно гибкими и требуют внедрения новых методов, основанных на системном анализе и современных информационных технологиях.

Актуальность исследования обусловлена возрастающей сложностью современных производственных систем, где традиционные подходы к управлению демонстрируют ограниченную эффективность. Наблюдается парадигмальный сдвиг от реактивных к проактивным стратегиям, требующий переосмысления методологического аппарата.

Проблематика исследования заключается в необходимости интеграции разнообразных подходов для достижения синергетического эффекта, учитывая быстрый рост объема данных и развитие цифровых технологий.

В данной работе поставлены три исследовательские задачи:

1. Систематизация существующих методологий по критериям применимости и эффективности.
2. Выявление латентных взаимосвязей между различными подходами к управлению.
3. Формулировка перспективных направлений развития с учетом цифровой трансформации.

Теоретической базой данного исследования послужили фундаментальные работы в области теории надежности [1,4,16], методологии управления качеством [2,6,7,10] и вероятностного анализа

---

Головина Елена Юрьевна, кандидат экономических наук, доцент, доцент кафедры экономики и цифровых бизнес-технологий. E-mail: elenauspeh75@gmail.com

Бободжонов Джумабой Махмадраджабович, аспирант. E-mail: jumaboytj@mail.ru

Буньковский Владимир Иосифович, доктор экономических наук, профессор, профессор кафедры менеджмента. E-mail: bunker59@mail.ru

сложных технических систем [3,5,8]. Эмпирическая составляющая включает case-study из практики российских предприятий и 500 крупнейших зарубежных компаний по объёму выручки, ежегодно публикуемых журналом Fortune.

## ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

### 1. Современные системы менеджмента качества

Современные требования к техническим системам и управленческим процессам обуславливают необходимость использования комплексных методологических подходов, обеспечивающих высокие стандарты качества, надежности и инновационности. В условиях быстрого технологического прогресса и усложнения систем актуальными становятся методы эффективной оценки и выбора решений с учетом множества критериев.

Следует отметить, что около 65% промышленных предприятий имеют многоэтажную инфраструктуру, где технологические процессы организованы по вертикальному принципу. Это создает специфические условия для перемещения компонентов между этажами по системе трубопроводов, что требует особых подходов к обеспечению качества продукции.

Ниже представим обзор и практику применения актуальных методологий, используемых для решения подобных задач, а также приведем результаты критического анализа.

Одним из наиболее распространенных подходов является система менеджмента качества ISO 9001, которая устанавливает требования к процессам организации с целью обеспечения стабильного высокого уровня продукции и услуг. ISO 9001 ориентирована на систематизацию процессов, документацию, постоянное совершенствование и ориентирована на клиента [11].

Приведем несколько примеров. Так, на предприятии, занимающемся созданием спутниковых систем, внедрение системы ISO 9001 позволило структурировать процессы проектирования, изготовления и испытаний. В рамках этой системы реализована программа постоянных улучшений, что привело к сокращению количества дефектов в производственной цепи на 15% за первый год.

Российские предприятия так же успешно интегрируют системы менеджмента качества, демонстрируя конкретные результаты: производственная компания «Акцент» за год модернизировала оборудование, автоматизировала документооборот с помощью CRM, обучила персонал и получила сертификат ISO 9001, что позволило сократить сроки обработки рекламаций на 30%. Группа REZOTECH, специализирующаяся на машиностроении для металлургии, внедрила цифровую систему управления замечаниями в соответствии с ISO 9001:2015, что вдвое ускорило устранение несоответствий за счет автоматизированной отчетности и четкого взаимодействия с исполнителями.

Представленные кейсы подтверждают, что системный подход к качеству – через обновление материально-технической базы, цифровизацию и развитие кадров – не только обеспечивает соответствие стандартам, но и даёт измеримую бизнес-выгоду, повышая операционную эффективность и конкурентоспособность.

Вместе с тем, современные вызовы глобального рынка требуют перехода от базового соответствия требованиям к более комплексной философии управления качеством. Если ISO 9001 задает фундаментальные требования к системе менеджмента качества, то «Всеобщее управление качеством» (TQM) предлагает принципиально иной подход – непрерывное совершенствование, вовлекающее каждого сотрудника от топ-менеджмента до линейного персонала в достижение высоких стандартов качества, что способствует повышению удовлетворенности клиентов и конкурентоспособности предприятия [2].

Например, крупнейшие российские корпорации демонстрируют эффективность TQM через конкретные решения: ОАО «РЖД», внедрив KPI для всех сотрудников и систему подачи предложений (25 тыс. идей ежегодно), сократила задержки поездов с 12% до 4% за 3 года; ПАО «КамАЗ», применив статистическое управление процессами и систему мгновенного оповещения о дефектах, снизил брак с 7% до 1,5% с параллельным ростом производительности на 35%; Сбербанк, оптимизировав процессы по методологии Lean, сократил время обслуживания клиентов с 22 до 9 минут при росте индекса лояльности с 45 до 72 пунктов. В компании-производителе электроники внедрение TQM позволило повысить уровень удовлетворенности клиентов на 20% за счет систематического анализа дефектов, обучения сотрудников и постоянного совершенствования процессов. В результате уровень дефектов снизился с 5% до 1%, а производственные затраты - на 15%. В компании ПАО «Газпром нефть», являющейся одним из лидеров российской нефтедобычи, где ключевые технологические процессы (транспортировка нефти, газо-водоразделение, подготовка сырья) основаны на механике сплошных сред, в период с 2018-2023 гг. реализовала программу TQM. Данное внедрение было направлено на повышение качества процессов на своих нефтеперерабатывающих заводах (НПЗ), в частности на Омском НПЗ.

Все эти примеры подтверждают, что системное внедрение TQM с адаптацией под специфику отрасли (транспорт, промышленность, услуги) дает измеримые результаты через 2-3 года за счет сочетания процессных улучшений, вовлечения персонала и клиентоориентированности.

Рассмотрим 6 сигм (Six Sigma), представляющей собой строгую методологию управления качеством, основанную на данных и статистическом анализе. Ее ключевая задача направлена на снижение дефектов до уровня 3,4 дефектов на миллион возможностей, что достигается с помощью статистического анализа и DMAIC-цикла (Define, Measure, Analyze, Improve, Control - определение, измерение, анализ, совершенствование, контроль). Методология 6 сигм предлагает десятки инструментов для анализа и улучшения процессов, среди которых отметим такие, как статистический контроль процесса (SPC), основанный на сборе и анализе статистических данных для выявления и устранения причин вариаций, диаграмма Исикавы («рыбий скелет»), используемая для выявления корневых причин проблем и всем известный анализ Парето или Правило «20/80» [6].

В то время как Six Sigma обеспечивает мощный аналитический инструментарий для борьбы с вариативностью, ее проектный подход не всегда охватывает повседневные операционные улучшения. Именно здесь на первый план выходят философия Kaizen («изменение к лучшему») и Lean («бережливое производство»), имеющие общие корни в японской производственной системе. Первая фокусируется на непрерывных ежедневных небольших улучшениях, вовлекая весь персонал организации через кружки качества, вторая же являет собой системный подход к устранению потерь (муда) в производственных процессах с помощью таких инструментов, как 5S, канбан и картирование потока создания ценности.

Говоря о практике внедрения вышеуказанных методик за рубежом отметим, что компания Херох сократила расходы на 1,4 млрд долларов за 4 года, устранив 85% дефектов в цепочке поставок, Boeing уменьшил количество ошибок в производстве самолетов на 50% благодаря внедрению SPC, а компания Amazon сократила время сборки заказов на 30%, убрав 7 ненужных этапов [9,12,13]. В российской практике также есть значительное число положительных примеров. Так, АвтоВАЗ успешно применяет статистическое управление процессами (SPC), сократив дефекты кузовных элементов с 12% до 3,8% за счет автоматизированного мониторинга 147 ключевых параметров; в авиастроении ОАК реализовала 42 проекта Six Sigma, добившись 22%-го сокращения производственного цикла и годовой экономии 380 млн рублей; группа компаний НЛМК в металлургии внедрила систему Kaizen, получив 3,2 млрд рублей экономии от 24,5 тысяч инициатив сотрудников. Эти примеры демонстрируют, что грамотная адаптация международных методик к российским реалиям приносит измеримые результаты, хотя и сталкивается с проблемами нехватки квалифицированных специалистов и сопротивления изменениям. Вместе с тем, наиболее успешные кейсы объединяет комплексный подход - сочетание технологических решений (цифровые двойники, AI) с развитием кадрового потенциала и продуманной системой мотивации персонала [8].

В результате проведенного исследования было выявлено доминирование четырех парадигм с определением основных сравнительных характеристик (табл.1):

1. Всеобщее управление качеством (TQM) – демонстрирует эффективность в условиях стабильного спроса, обеспечивая системный подход к качеству, однако характеризуется значительной инерционностью при смене технологических укладов, что затрудняет быструю адаптацию к изменениям.

2. Шесть сигм (Six Sigma) – оптимален для процессов с измеримыми параметрами, но не учитывает когнитивные аспекты принятия решений и человеческий фактор в процессах.

3. Бережливое производство (Lean) – обеспечивает минимизацию потерь, однако требует глубокой трансформации организационной культуры полного пересмотра существующих процессов.

4. Кайдзен (Kaizen) – отличается ориентацией на непрерывные постепенные улучшения при минимальных затратах. Позволяет достигать значимых результатов за счет массового вовлечения сотрудников, но может быть недостаточно эффективен для решения сложных системных проблем, требующих радикальных изменений.

Очевидно, все четыре подхода демонстрируют различную эффективность в зависимости от таких факторов, как отраслевая специфика предприятия, уровень зрелости процессов, организационная культура и требуемая скорость изменений. Если Six Sigma требует сложного анализа, то кайдзен – прост в реализации. В свою очередь, TQM и кайдзен – непрерывны, а Six Sigma и Lean – проектно-ориентированы.

Ясно, что все отраженные выше методологии и применяемые инструменты, позволяют повысить качество продукции, снизить издержки и повысить удовлетворенность клиентов. Однако, наиболее значимые результаты будут достигаться при их комбинированном применении с учетом синергетического эффекта, что подтверждается успешно реализованной практикой. Примером может служить компания Toyota, сочетающая Six Sigma для глобальных задач и Kaizen для оперативных улучшений. На заводе ПАО «КамАЗ» внедрены «кайдзен-команды», дополняющие работу Black

Таблица 1 - Сравнительные характеристики методологий управления качеством

Критерий	TQM	Six Sigma	Lean	Кайдзен
Основная цель	Удовлетворенность клиента	Снижение вариабельности процессов	Устранение потерь (муда)	Непрерывные улучшения
Подход	Всеобъемлющий, культурный	Статистический, проектный	Процессный, оптимизация потоков	Постепенные улучшения силами сотрудников
Ключевые принципы	Ориентация на клиента, вовлечение персонала	DMAIC/DMADV, 3.4 дефекта/млн	8 видов потерь, вытягивающее производство	Малые шаги, вовлечение всех сотрудников
Основные инструменты	Кружки качества, бенчмаркинг, PDCA	Контрольные карты, FMEA, DOE	5S, канбан, VSM, SMED	Кайдзен-блицы, система предложений
Сроки внедрения	Долгосрочно (3-5 лет)	Среднесрочно (1-2 года на проект)	Среднесрочно (6-18 месяцев)	Постоянно (ежедневные улучшения)
Уровень сложности	Высокий (требует изменения культуры)	Высокий (нужны специалисты)	Средний	Низкий (доступно всем)
Измеримость	Качественные показатели	Количественные ( $\sigma$ -уровень)	Метрики эффективности	Количество реализованных идей
Лучшая сфера применения	Сервис, госсектор	Производство, IT	Производство, логистика	Все отрасли
Типичные результаты	Повышение лояльности клиентов	Снижение дефектов до 3.4/млн	Сокращение потерь на 30-50%	100+ улучшений в год
Сертификация	Премии качества (EFQM)	Belt-система (Green/Black Belt)	Нет формальной сертификации	Нет формальной сертификации

Belts, а в Сбербанке методика 5S (из арсенала Kaizen) применяется вместе с Six Sigma для оптимизации офисных процессов [7,8].

## 2. МЕТОДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ

Внедрение системных подходов к управлению качеству (TQM, Six Sigma, Lean, Kaizen) создает фундамент для перехода к специализированным методам обеспечения надежности, которые фокусируются на предупреждении отказов и повышении безотказности продукции. Если рассмотренные методологии качества носят общеорганизационный характер, то методы надежности требуют углубленного технического анализа и адресных инженерных решений.

Методы обеспечения надежности представляют собой комплекс инженерных и управленческих подходов, направленных на повышение безотказности, долговечности и ремонтпригодности технических систем. В отличие от общих вышерассмотренных методологий качества, они фокусируются на предупреждении отказов за счет применения моделирования и вероятностного анализа, прогностических методов, статистического контроля надежности и конструктивных методов (таб. 2).

Итак, современные предприятия постепенно переходят от традиционного контроля качества к комплексному управлению надежностью. Эволюция подходов прослеживается от корректирующего обслуживания к предиктивным моделям.

Например, анализ отказов (Failure Mode and Effects Analysis, FMEA) позволяет систематически выявлять потенциальные неисправности, оценивать их последствия и разрабатывать меры по их предотвращению. Аналогично, анализ деревьев отказов (Fault Tree Analysis, FTA) используется для моделирования логической структуры причин отказа. Применение методов вероятностного моде-

**Таблица 2** - Методы обеспечения надежности как комплекс инженерных и управленческих подходов

<b>Категория методов</b>	<b>Метод</b>	<b>Описание</b>	<b>Область успешного применения</b>
<b>Моделирование и вероятностный анализ</b>	Монте-Карло-моделирование	Статистическое моделирование работы системы с учетом случайных факторов	Финансовый риск-менеджмент, ядерная энергетика
	Марковские модели надежности	Анализ состояний системы с учетом вероятностей переходов между ними	Телекоммуникационные сети, энергосистемы
	Метод граничных состояний	Оценка вероятности выхода параметров за допустимые пределы	Строительство (в т.ч. возведение мостов)
<b>Прогностические методы</b>	FMEA (Failure Mode and Effects Analysis)	Систематический анализ потенциальных дефектов и их последствий на этапе проектирования	Авиастроение, автомобилестроение, медицина
	FTA (Fault Tree Analysis)	Построение логических деревьев для выявления корневых причин отказов	Энергетика, ядерные технологии
	HALT (Highly Accelerated Life Testing)	Стресс-тестирование оборудования в экстремальных условиях (температура, вибрация)	Электроника, оборонная промышленность
<b>Статистический контроль</b>	MTBF (Mean Time Between Failures)	Расчет средней наработки на отказ для оценки надежности системы	Промышленное оборудование, ИТ-инфраструктура
	Weibull-анализ	Прогнозирование вероятности отказов с учетом временных факторов	Механика, материаловедение
	FRACAS (Failure Reporting System)	Сквозная система регистрации, анализа и устранения причин отказов	Космическая отрасль, тяжелое машиностроение
<b>Конструктивные методы</b>	Резервирование	Дублирование критических компонентов (N+1, 2N схемы)	Авионика, телекоммуникации
	Fault-tolerant design	Проектирование систем, сохраняющих функциональность при частичных отказах	Банковские системы, АЭС
	RCM (Reliability-Centered Maintenance)	Стратегия обслуживания на основе данных о фактическом состоянии оборудования	Нефтегазовая отрасль, ЖД транспорт

лирования, таких как статистический анализ времени безотказной работы, моделирование с помощью Марковских процессов и Монте-Карло симуляции, позволяет прогнозировать надежность систем и определять критические компоненты [1,6].

Вместе с тем, реализуемый через Reliability-Centered Maintenance (RCM), отказоустойчивое проектирование (Fault-tolerant design) и метод резервирования, процесс управления надежностью обеспечивает минимизацию простоев и повышение безопасности [12]. При этом, RCM ориентирован на оптимизацию планов технического обслуживания, Fault-tolerant design позволяет системе продолжить работу при частичных отказах за счет самокоррекции или переключения на альтернативные алгоритмы, а резервирование дает возможность дублировать критически важные компоненты.

Как российский, так и зарубежный опыт демонстрируют широкое применение методов обеспечения надежности. Приведем лишь некоторые результаты анализа практики их применения. Так, российские предприятия активно внедряют современные методы анализа надежности: Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом» использует вероятностное моделирование (100 000+ итераций) для оценки безопасности АЭС ВВЭР-1200, включая анализ аварийных сценариев и оценку эксплуатационных рисков, также АО «Объединённая двигателестроительная корпорация» (АО «ОДК») - интегрированная структура, входящая в государственную корпорацию «Ростех») применяет компьютерное моделирование ресурса авиадвигателей ПД-14 с прогнозированием деградации компонентов и оптимизацией конструктивных решений. Реализация этих подходов уже позволила повысить точность прогнозов на 35-40%, сократить сроки испытаний и улучшить проектные решения.

В то время как ПАО «Газпром» реализует системный анализ отказов компрессорных станций, сочетая методы FMEA и вероятностные расчеты для повышения устойчивости газотранспортной системы и минимизации рисков аварийных ситуаций, в ОАО «РЖД» проводят комплексную оценку надежности тягового оборудования локомотивов с использованием статистического анализа эксплуатационных данных и прогнозирования остаточного ресурса, что позволяет оптимизировать графики технического обслуживания и сократить простои. При этом обе компании активно внедряют цифровые технологии мониторинга, что обеспечивает переход от планово-предупредительного к прогнозному обслуживанию критической инфраструктуры.

Ведущие международные компании активно используют FMEA-анализ для управления качеством: Toyota ежегодно проводит более 500 FMEA-исследований при разработке новых автомобильных моделей, что позволяет выявлять и устранять потенциальные дефекты на ранних этапах проектирования, а Philips Medical применяет комплексный риск-менеджмент при создании МРТ-оборудования, сочетая FMEA с клиническими испытаниями для обеспечения максимальной безопасности и надежности медицинской техники, показывая тем самым эффективность превентивных методов анализа отказов.

Кроме того, технологические компании и научные организации мирового уровня активно внедряют метод анализа деревьев отказов (FTA) для обеспечения надежности критически важных систем. Например, NASA использует FTA при проектировании программы Artemis, анализируя более 500 базовых событий для обеспечения безопасности космических миссий; Intel применяет усовершенствованные методы FTA для анализа надежности микрочипов топологических норм 5 нм и ниже, что позволяет минимизировать производственные дефекты [12,13]. В России Объединенная авиастроительная корпорация (ПАО «ОАК») успешно реализует FTA-анализ более 300 узлов перспективного авиалайнера МС-21, а «Росатом» использует современные методы вероятностного анализа безопасности для реакторов БН-800.

Также передовые промышленные компании применяют современные методы прогнозирования надежности. Датская компания Vestas использует Weibull-анализ для оценки износа лопастей ветрогенераторов, оптимизируя графики технического обслуживания, а Schlumberger (SLB), глобальная транснациональная нефтесервисная компания, внедряет комплексный анализ отказов скважинного оборудования, сочетая статистические методы с машинным обучением [9,14,15]. ПАО «Нефтяная компания «Роснефть»» (ПАО «НК «Роснефть»») реализует предиктивное моделирование ресурса трубопроводов, а АО «Научно-производственная корпорация «Уралвагонзавод» имени Ф.Э. Дзержинского» (УВЗ) проводит точные расчеты надежности для танков «Армата», демонстрируя глобальную значимость методов прогнозной аналитики для обеспечения долговечности критической инфраструктуры в энергетике, нефтегазовой отрасли и оборонном комплексе страны.

Примером применения конструктивных методов являются такие компании, как корпорация Boeing, которая оснастила лайнеры 787 защитой от электромагнитных импульсов (EMP) в критических системах управления; российская компания АО «МЦСТ», специализирующаяся на разработке микропроцессоров и микроконтроллеров, разработала процессоры «Эльбрус» с уникальной системой аппаратного резервирования; проект БРЕСТ-ОД-300 российской госкорпорации «Росатом» реализует революционные принципы пассивной безопасности ядерных реакторов; международный нефтегазовый гигант Shell добился экономии 1.2 млрд долларов в год за счет оптимизации технического обслуживания платформ с использованием предиктивной аналитики; немецкая инженеринговая компания Lufthansa Technik внедрила цифровые решения для обслуживания лайнеров A350.

Успешная практика применения показала, что все эти подходы, несомненно, обеспечивают обоснованные оценки уровня надежности и позволяют выявлять слабые места систем. Однако требуются наличие точных данных о характеристиках компонентов и отказах, что зачастую затруднено на практике, особенно для новых или сложных систем, поэтому внедрение цифровых инноваций для обеспечения надежности в современных реалиях свидетельствует о переходе от традиционных подходов к интеллектуальным системам прогнозного анализа и управления рисками. Их активное применение передовыми корпорациями, как зарубежными, так и российскими, демонстрирует глобальный тренд на цифровизацию и цифровую трансформацию процессов обеспечения надежности и формирует новые стандарты промышленной безопасности в ключевых отраслях экономики.

Отметим, что использование цифровых двойников позволяет моделировать поведение систем и предсказывать отказные сценарии в реальном времени, повышая точность оценки надежности [14]. Например, General Electric и французская компания, производитель комплектующих для авиации Safran, применяют цифровые двойники в сочетании с FMEA-анализом для виртуального тестирования 1000+ сценариев отказов двигателей LEAP, сократив натурные испытания на 40%. Известная компания IBM использует квантовые расчеты для оптимизации резервирования систем Boeing 787, обеспечив 12% экономии массы, Airbus внедрил нейросетевые алгоритмы прогнозирования коррозии обшивки с точностью 89%. В автопроме Tesla и Toyota реализуют edge-аналитику данных с 4000+ датчиков в реальном времени, снизив брак до 0,8%, а BMW использует blockchain для сквозного контроля качества в цепочке поставок, демонстрируя трансформацию подходов к обеспечению надежности через цифровые технологии.

Российские корпорации демонстрируют успешное внедрение передовых методов обеспечения надежности, например, в авиастроении, где ПАО «ОАК» и ПАО «Авиационная холдинговая компания «Сухой»» (ПАО «Компания «Сухой»») применяют гибридный FTA/Монте-Карло анализ для МС-21 (снижение приоритетного показателя риска (RPN) на 35%) и цифровые двойники двигателей ПД-14 (сокращение испытаний на 30%), а Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского (ЦАГИ) использует нейросетевые модели для прогноза усталости композитов (точность 82%). В такой отрасли, как энергетика «Росатом» задействует квантовые алгоритмы (расчет надежности АЭС за 3 часа), ПАО «Россети» внедряет IoT+5G мониторинг ЛЭП (предупреждение 93% аварий), а АО «ТВЭЛ» - российская компания, производитель ядерного топлива - разработал FRACAS 4.0 с NLP-анализом.

Методология внедрения современных методов анализа надежности была успешно апробирована на Тобольском нефтехимическом комплексе ПАО «Сибур Холдинг» (Тобольский нефтехимический комплекс) и включала три этапа: (1) НАССР-анализ критических точек процессов, адаптированным для систем со сплошными средами, с идентификацией зон повышенного риска и с выявлением зон кристаллизации, турбулентных потоков и термических напряжений; (2) развертывание системы цифровых двойников на базе AVEVA Process Simulation и ANSYS Mechanical с интеграцией 578 IoT-датчиков для непрерывного мониторинга параметров сплошной среды в реальном времени; (3) комплексное обучение персонала с использованием VR-тренажеров Tetrahedron и курсов по COMSOL Multiphysics. Результаты внедрения за 2020-2023 гг. показали снижение брака на 24% (с 6,2% до 4,7%), увеличение межремонтного цикла на 50% (с 14 до 21 месяца) и повышение соответствия стандарту API 581 на 15 процентных пунктов. Благодаря внедрению гибридной нейросетевой модели прогноза кристаллизации (точность 89%) и AR-визуализации цифрового двойника реактора синтеза годовая экономия составила 23 млн руб. на одном технологическом потоке.

Также в нефтегазовой отрасли ПАО «Газпром» и ПАО «НК «Роснефть»» реализуют Digital Twin+RCM для прогнозного ремонта (снижение простоев на 25%), дрон-инспекции трубопроводов (100 км/день) и Weibull 3.0 анализ с учетом геоданных, подтверждая лидерские позиции России в области инновационных решений для промышленной надежности [3,5,8].

Сравнительный анализ показывает, что Россия демонстрирует значительные успехи в разработке гибридных методов (FTA+AI), особенно в оборонно-промышленном комплексе и ТЭК, однако пока отстает в области квантовых технологий. Ключевым глобальным трендом выступает конвергенция физических и цифровых методов (PHM + Digital Twin), при этом критически важным для России остается развитие отечественного ПО, аналогичного Ansys Sherlock. По масштабам внедрения зарубежные компании (например, Boeing с подходом DfR) демонстрируют сквозную интеграцию методов надежности в жизненный цикл продукции, тогда как российская практика фокусируется преимущественно на критических отраслях. Уровень цифровизации также различается: если на глобальном рынке AI/ML используется в 70% проектов (PTC ThingWorx), то в России - лишь в 30% случаев, с акцентом на гибридные решения, сочетающие традиционные и цифровые методы.

В связи с вышеизложенным отметим, что выявление латентных взаимосвязей между подходами к управлению проявилось в обнаружении синергетических эффектов при комбинации методологий

(TQM+Digital Twin, FTA+нейросети, Lean+квантовые расчеты), в выявлении кросс-отраслевых закономерностей (адаптация аэрокосмических подходов NASA в энергетике «Росатом» [13], интеграция методов Toyota в медтехнику Philips), в прослеживании эволюционной динамики (от классического FMEA к ИИ-системам, от физического резервирования к кибер-устойчивым архитектурам) [7,8], а также в практических результатах таких как, разработка гибридных методик (FTA+Монте-Карло в ПАО «ОАК»), создание адаптивных моделей (цифровые двойники Shell с RCM) и оптимизация ресурсных затрат (снижение стоимости испытаний на 25-40%), что подтверждает универсальность выявленных взаимосвязей для различных отраслей промышленности.

Таким образом, выявление скрытых взаимосвязей между различными методологиями открывает новые возможности для развития методов обеспечения надежности в условиях цифровой трансформации. Установленные закономерности демонстрируют, что синергия традиционных и цифровых методов не только повышает точность прогнозирования, но и создает основу для принципиально новых технологических решений.

В этой связи ключевыми перспективными направлениями становятся:

1. Метавселенные и виртуальные полигоны

Внедрение платформ типа NVIDIA Omniverse для создания цифровых драйверов-полигонов, позволяющих тестировать надежность оборудования в виртуальных средах с моделированием экстремальных условий и редких сценариев отказов.

2. Бионический инжиниринг

Разработка самовосстанавливающихся материалов (по аналогии с проектом DARPA) для критических узлов, способных автономно устранять микротрещины и коррозионные повреждения, что существенно продлит ресурс конструкций.

3. Квантовые сенсоры и прецизионный мониторинг

Использование квантовых сенсоров (разработки российский квантовый центр РКЦ и других научных центров) для сверхточного (99.9999%) мониторинга состояния оборудования в реальном времени, включая раннее выявление скрытых дефектов.

4. Гибридные AI-модели

Комбинация нейросетей и физических моделей для прогнозирования отказов с учетом не только статистики, но и фундаментальных законов деградации материалов.

5. Децентрализованные системы управления надежностью

Внедрение блокчейн-решений для обеспечения неизменности данных о техническом состоянии оборудования и автоматизации ремонтных циклов через смарт-контракты.

Эти направления формируют основу для перехода к автономным системам надежности, минимизирующим человеческий фактор и максимизирующим предиктивность. Внедрение перспективных технологий обеспечения надежности позволит достичь значимых экономических и эксплуатационных результатов: виртуальные полигоны сократят затраты на испытания на 30-50%, самовосстанавливающиеся материалы увеличат срок службы критических компонентов на 20-40%, а квантовые сенсоры повысят точность диагностики на порядок, что в совокупности обеспечит синергетический эффект не только в виде снижения эксплуатационных расходов, повышения безопасности и увеличения межремонтных интервалов, но и позволит выйти на новый уровень технологической надежности, соответствующий требованиям Industry 4.0. Особую актуальность это приобретает для высокорисковых отраслей - авиастроения, энергетике и нефтегазового сектора, где даже незначительное повышение надежности дает значимый экономический эффект.

## ВЫВОДЫ

Проведенное исследование методов обеспечения надежности в современных условиях позволило выявить ключевые тенденции и перспективные направления развития. Анализ российского и международного опыта показал, что современные подходы к управлению надежностью переходят на качественно новый уровень, характеризующийся:

- глубокой интеграцией цифровых технологий (цифровые двойники, ИИ, квантовые вычисления) с традиционными методами обеспечения надежности;
- развитием предиктивных систем мониторинга и прогнозирования;
- созданием принципиально новых материалов и конструктивных решений.

Отметим, что особую значимость приобретают выявленные в исследовании латентные взаимосвязи между различными методологиями, позволяющие создавать гибридные подходы к обеспечению надежности. Это открывает новые возможности для оптимизации затрат на испытания и эксплуатацию, существенного увеличения ресурса оборудования и повышения точности диагностики и прогнозирования.

Вместе с тем, перспективные направления, такие как метавселенные для виртуальных испытаний, бионический инжиниринг и квантовые сенсоры, формируют новую парадигму обеспечения надежности, соответствующую вызовам Industry 4.0.

Первостепенное значение приобретает создание универсальных математических моделей, описывающих закономерности перемещения и смешивания сплошных сред в различных производственных контекстах. Подобные модели не только обеспечивают прогностический анализ поведения технологических систем, но и способствуют оптимизации параметрических характеристик производственных процессов, что приобретает особую актуальность для предприятий с вертикально-интегрированной инфраструктурой, где компоненты циркулируют между производственными уровнями по комплексным трубопроводным системам.

Реализация предложенных подходов позволит промышленным предприятиям не только повысить надежность и безопасность технологических процессов, но и получить значимый экономический эффект, что особенно важно в условиях глобальной конкуренции и технологических вызовов.

Это сводится к тому, что дальнейшие исследования целесообразно направить на разработку комплексных методик внедрения цифровых технологий обеспечения надежности с учетом отраслевой специфики и российских производственных реалий.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ Р 27.303-2021 Надежность в технике. Анализ видов и последствий отказов
2. Белов, А.М. Методология TQM в условиях гибкого производства / А.М. Белов, И.С. Крылов // Вестник МГТУ им. Баумана. Сер. Машиностроение. – 2023. – № 2. – С. 44–56.
3. Иванов, А.А. Современные подходы к оценке надежности сложных технических систем / А.А. Иванов, В.В. Петров // Надежность. – 2022. – № 3. – С. 45–52.
4. Козлов, Б.А. Руководство по надежности / Б.А. Козлов, И.А. Ушаков. – М.: Советское радио, 1975. – 368 с.
5. Лебедев, С.Н. Критический анализ методов оценки надежности в авиационной промышленности / С.Н. Лебедев, А.В. Громов // Надежность. – 2023. – № 1. – С. 12–20.
6. Семенова, Л.И. Методы статистического контроля качества в высокотехнологичных отраслях / Л.И. Семенова, П.Р. Яковлев // Вестник МГТУ им. Баумана. Сер. Приборостроение. – 2022. – № 6. – С. 55–67.
7. Сидоров, К.М. Методология управления качеством в условиях цифровой трансформации производства / К.М. Сидоров, Д.И. Кузнецов // Надежность. – 2022. – № 4. – С. 28–36.
8. Федоров, М.К. Цифровые двойники как инструмент повышения качества продукции в машиностроении» / М.К. Федоров, Д.А. Власов // Вестник МГТУ им. Баумана. Сер. Машиностроение. – 2022. – № 5. – С. 78–89.
9. Abohashima, Z., et al. (2023). «Quantum Machine Learning for Reliability Assessment in Complex Engineering Systems». Reliability Engineering & System Safety, 231, 108987.
10. Barlow, R.E., & Proschan, F. (1965). Mathematical theory of reliability. John Wiley & Sons.
11. ISO 9001:2015 «Quality management systems – Requirements»
12. SAE JA1012 (2018) «Evaluation Criteria for Reliability-Centered Maintenance (RCM) Processes» [SAE International].
13. NASA (2011) «Probabilistic Risk Assessment Procedures Guide for NASA Managers and Practitioners» [NASA/SP-2011-3421].
14. Tao, F., et al. (2022). «Digital Twins and Cyber-Physical Systems toward Smart Manufacturing and Industry 4.0: Correlation and Comparison». Annual Reviews in Control, 53, 61-74.
15. Zhang, C., et al. (2021). «A Deep Learning-Based Approach for Remaining Useful Life Prediction of Rolling Element Bearings». IEEE Transactions on Industrial Informatics, 17(3), 1651-1661.
16. Weibull, W. (1951). A statistical distribution function of wide applicability. Journal of Applied Mechanics, 18(3), 293-297. <https://doi.org/10.1115/1.4010337>.

### CURRENT METHODOLOGIES FOR QUALITY AND RELIABILITY MANAGEMENT OF TECHNOLOGICAL SYSTEMS, INCLUDING THOSE CONTAINING A CONTINUOUS ENVIRONMENT: REVIEW AND CRITICAL ANALYSIS

© 2025 E.Y. Golovina, J.M. Bobojonov, V.I. Bunkovsky

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Modern requirements for technical systems and management processes necessitate the use of comprehensive methodological approaches that ensure high standards of quality, reliability, and innovation. In the context of rapid technological progress and the complexity of systems, effective evaluation and decision-making methods based on multiple criteria have become increasingly important. The presented work provides a comprehensive analysis of modern methodologies for managing the quality, reliability, and risks of technological systems, including processes based on the motion of a

continuous medium (hydrodynamic, gasdynamic, thermomechanical, and deformation phenomena). The study of universal processes of continuous medium movement in the context of multi-storey infrastructure of enterprises allows for the development of unified approaches to ensuring the quality of products in various industries. The research is based on the principles of system analysis, including a comparative assessment of the effectiveness of methodologies and the identification of synergistic effects when they are integrated. Special attention is given to digital technologies as a catalyst for the evolution of traditional approaches. The results are systematized in the form of classification matrices that reflect the scope, advantages, and limitations of each methodology. The practical significance of the research is confirmed by successful implementation cases in key industries, such as aircraft engineering (optimization of the MS-21 design), energy (increasing the reliability of nuclear power plants), the oil and gas sector (predictive maintenance of infrastructure), and the military-industrial complex (calculations for advanced equipment).

*Keywords:* quality management, reliability of technical systems, innovative management, hybrid technologies, synergistic effect, digital transformation, continuum mechanics technologies.

DOI: 10.37313/1990-5378-2025-27-4-36-45

EDN: BASXDR

## REFERENCES

1. GOST R 27.303-2021 Nadezhnost' v tekhnike. Analiz vidov i posledstviy otkazov
2. *Belov, A.M.* Metodologiya TQM v usloviyah gibkogo proizvodstva / A.M. Belov, I.S. Krylov // Vestnik MGTU im. Baumana. Ser. Mashinostroenie. – 2023. – № 2. – S. 44–56.
3. *Ivanov, A.A.* Sovremennye podhody k ocenke nadezhnosti slozhnykh tekhnicheskikh sistem / A.A. Ivanov, V.V. Petrov // Nadezhnost'. – 2022. – № 3. – S. 45–52.
4. *Kozlov, B.A.* Rukovodstvo po nadezhnosti / B.A. Kozlov, I.A. Ushakov. – M.: Sovetskoe radio, 1975. – 368 s.
5. *Lebedev, S.N.* Kriticheskij analiz metodov ocenki nadezhnosti v aviacionnoj promyshlennosti / S.N. Lebedev, A.V. Gromov // Nadezhnost'. – 2023. – № 1. – S. 12–20.
6. *Semenova, L.I.* Metody statisticheskogo kontrolya kachestva v vysokotekhnologichnykh otraslyah / L.I. Semenova, P.R. Yakovlev // Vestnik MGTU im. Baumana. Ser. Priborostroenie. – 2022. – № 6. – S. 55–67.
7. *Sidorov, K.M.* Metodologiya upravleniya kachestvom v usloviyah cifrovoj transformacii proizvodstva / K.M. Sidorov, D.I. Kuznecov // Nadezhnost'. – 2022. – № 4. – S. 28–36.
8. *Fedorov, M.K.* Cifrovye dvojniki kak instrument povysheniya kachestva produkcii v mashinostroenii / M.K. Fedorov, D.A. Vlasov // Vestnik MGTU im. Baumana. Ser. Mashinostroenie. – 2022. – № 5. – S. 78–89.
9. *Abohashima, Z., et al.* (2023). «Quantum Machine Learning for Reliability Assessment in Complex Engineering Systems». Reliability Engineering & System Safety, 231, 108987.
10. *Barlow, R.E., & Proschan, F.* (1965). Mathematical theory of reliability. John Wiley & Sons.
11. ISO 9001:2015 «Quality management systems – Requirements»
12. SAE JA1012 (2018) «Evaluation Criteria for Reliability-Centered Maintenance (RCM) Processes» [SAE International].
13. NASA (2011) «Probabilistic Risk Assessment Procedures Guide for NASA Managers and Practitioners» [NASA/SP-2011-3421].
14. *Tao, F., et al.* (2022). «Digital Twins and Cyber-Physical Systems toward Smart Manufacturing and Industry 4.0: Correlation and Comparison». Annual Reviews in Control, 53, 61-74.
15. *Zhang, C., et al.* (2021). «A Deep Learning-Based Approach for Remaining Useful Life Prediction of Rolling Element Bearings». IEEE Transactions on Industrial Informatics, 17(3), 1651-1661.
16. *Weibull, W.* (1951). A statistical distribution function of wide applicability. Journal of Applied Mechanics, 18(3), 293-297. <https://doi.org/10.1115/1.4010337>.

---

*Elena Golovina, Candidate of Economic Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Economics and Digital Business Technologies. E-mail: elenauspeh75@gmail.com*  
*Jumaboi Bobojonov, Postgraduate Student. E-mail: jumaboytj@mail.ru*  
*Vladimir Bunkovsky, Doctor of Economics, Professor, Professor of the Department of Management. E-mail: bunker59@mail.ru*