На правах рукописи



МУСИНА ГУЛЬНАЗ РАФАИЛОВНА

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ И СРЕДСТВ ПОСТПРОИЗВОДСТВЕННОГО МОНИТОРИНГА ДЕФЕКТОВ МЕТАЛЛООБРАБОТКИ НА ОСНОВЕ CALS-ТЕХНОЛОГИЙ

2.5.22. Управление качеством продукции.
Стандартизация. Организация производства

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Казань – 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Казанский национальный исследовательский технологический университет»

Научный руководитель: **Шинкевич Марина Владимировна**
доктор экономических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Хаймович Ирина Николаевна**
доктор технических наук, профессор, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королева», профессор кафедры обработки металлов давлением;

Скобелев Кирилл Дмитриевич
кандидат технических наук, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «МИРЭА – Российский технологический университет», заместитель директора по проектной работе Института искусственного интеллекта.

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное учреждение «Научно-исследовательский институт «Центр экологической промышленной политики», г. Москва.

Защита состоится «18» декабря 2026 года в 14:00 на заседании диссертационного совета 24.2.312.08, созданного на базе ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет» (420015, г. Казань, ул. К. Маркса, д. 68, зал заседаний Ученого совета, А – 330).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет» и на сайте https://www.kstu.ru/servlet/contentblob?id=599816

Автореферат диссертации разослан «____»_____2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.312.08,
доктор экономических наук, доцент — Кудрявцева Светлана Сергеевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Качество продукции в промышленности является ключевым показателем эффективности производства и конкурентоспособности предприятия. В условиях цифровой трансформации экономики и перехода к новым технологическим укладам особую значимость приобретает внедрение интегрированных цифровых систем управления качеством, обеспечивающих сквозной контроль на всех этапах жизненного цикла изделия.

Значимость рассматриваемой проблемы подтверждается положениями стратегических документов государственной политики. Указ Президента РФ № 309 от 07.05.2024г. «О национальных целях развития РФ на период до 2030 года и на перспективу до 2036 года» определяет в качестве одной из национальных целей цифровую трансформацию экономики и социальной сферы, что непосредственно относится к ускоренному внедрению цифровых технологий в промышленности. Государственная программа «Развитие промышленности и повышение ее конкурентоспособности» предполагает автоматизацию транзакций в рамках единых отраслевых цифровых платформ и переход к модели управления на основе данных с учетом ускоренного внедрения технологий обработки больших объемов данных. Аналогичные приоритеты зафиксированы в Сводной стратегии развития обрабатывающей промышленности РФ до 2030 года и на период до 2035 года, где особое внимание уделяется цифровой трансформации обрабатывающих отраслей промышленности. Национальные стандарты также содержат требования к внедрению цифровых инструментов контроля качества на стадиях жизненного цикла продукции (ГОСТ Р ИСО 9001–2015, ГОСТ Р ИСО 9004–2019, ГОСТ Р 58771–2019 и др.).

Вместе с тем в современной российской промышленности цифровые технологии чаще всего используются на этапах проектирования и производства. Постпроизводственный мониторинг дефектов остается недостаточно развитым. Традиционные способы контроля качества не позволяют в полной мере учитывать динамику производственных процессов, осуществлять предиктивный анализ и комплексную диагностику. По данным Минпромторга России, более 70% предприятий машиностроения не имеют комплексных цифровых решений для контроля качества на стадии эксплуатации и сервисного сопровождения. При этом, до 16% дефектов выявляется в течение первого года эксплуатации продукции.

Решение данной проблемы требует формирования единой цифровой среды, объединяющей данные проектирования, производства, испытаний и эксплуатации изделий. Особую актуальность приобретает задача постпроизводственного мониторинга, который обеспечивает обратную связь от этапа эксплуатации к проектированию и производству. В отличие от традиционных методов управления качеством, ориентированных преимущественно на контроль готовой продукции, цифровая модель мониторинга позволяет отслеживать дефекты и отклонения в реальном времени, корректировать проектные и технологические решения на ранних этапах.

В этой связи существует объективная потребность в разработке методов и средств постпроизводственного мониторинга дефектов производственного процесса на основе CALS-технологий, что свидетельствует об актуальности выбранной темы исследования.

Степень разработанности темы исследования. Проблемам цифровизации промышленности, управления качеством и интеграции информационных систем на всех этапах жизненного цикла продукции посвящены многочисленные исследования отечественных и зарубежных ученых. Вместе с тем вопросы организации постпроизводственного мониторинга дефектов в рамках CALS-концепции остаются

недостаточно проработанными, что сдерживает формирование непрерывного цифрового контура управления качеством.

Концептуальные основы цифровизации промышленности представлены в исследованиях Гусевой Т. В., Колесникова С. Г., Ромашкиной О. В., Рудакова А. М., Чекмарева А. В., Фитермана М., Шваба К., Шинкевич М. В. и Яковлева Д. Е., где цифровизация рассматривается как ключевой фактор трансформации производственных систем, включая применение цифровых двойников и платформ промышленного интернета вещей.

Вопросы внедрения CALS-технологий и цифровых решений в управлении качеством отражены в трудах Галимулиной Ф. Ф., Доросинского Л. И., Клочкова В. В., Кудрявцевой С. С., Куликова В. Д., Петрова А. Н., Смирнова И. В., Татаринова В. М., Харитонова Д. В., Шинкевича А. И., а также зарубежных исследователей Дж. Цимциани, Д. Кирицис и др.

Проблемы управления качеством продукции, применения статистических методов анализа дефектов, теории надежности и организации постпроизводственного мониторинга рассмотрены в трудах Богдановой Л. В., Волкова В. М., Зайцева И. П., Коновалова Н. Н., Малышевой Т. В., Миронова А. А., Моисеевой Н. К., Окрепилова В. В., Орловой Т. Н., Петренко С. А., Садовской Т. Г., Скобелева К. Д., Хаймович И. Н., Шастовой Г. А., а также зарубежных авторов Дж. Ли, А. Парликад и др.

Несмотря на значительный объем научных исследований, остается недостаточно разработанным направление постпроизводственного мониторинга дефектов в рамках CALS-концепции. В научной литературе отсутствуют комплексные методические подходы, обеспечивающие интеграцию данных эксплуатационного контроля, гарантийного обслуживания и обратной связи в единую цифровую систему анализа качества и прогнозирования надежности продукции. Существующие решения, как правило, ограничиваются выявлением дефектов на производственных этапах, не обеспечивая замкнутого цикла управления качеством на основе данных реальной эксплуатации. Кроме того, недостаточно проработаны вопросы количественной оценки цифровой зрелости процессов мониторинга и формирования цифрового следа изделия, интегрирующего параметры предиктивной аналитики и неразрушающего контроля.

Цель диссертационного исследования состоит в разработке научно-организационных решений по развитию постпроизводственного мониторинга дефектов в процессе обработки металлических изделий на основе CALS-технологий.

Реализация поставленной цели предполагает формулировку и последовательное решение следующих научно-практических **задач**:

– предложить новый научный подход к организации постпроизводственного мониторинга дефектов на основе CALS-технологий, обеспечивающий непрерывный цифровой контур контроля на этапах эксплуатации;

– разработать алгоритм цифрового следа изделия с формированием «паспорта» по причинно-следственным связям параметров жизненного цикла;

– разработать методику организации постпроизводственного мониторинга дефектов, включающую оценку цифровой зрелости и прогнозирование срока службы изделий;

– провести апробацию разработанных методов и средств на машиностроительном предприятии с оценкой их влияния на управляемость дефектами и качество продукции.

Объектом диссертационного исследования являются процессы контроля качества продукции на машиностроительном предприятии.

Предметом исследования выступают методы и инструменты пост производственного мониторинга дефектов, реализуемые с применением CALS-технологий для повышения качества и надежности продукции.

Соответствие содержания диссертации избранной специальности. Область диссертационного исследования соответствует научной специальности 2.5.22 Управление

качеством продукции. Стандартизация. Организация производства в части пунктов: 6. Методы стандартизации и управления качеством в CALS-технологиях, автоматизированных, цифровых производственных системах; 9. Разработка и совершенствование научных инструментов оценки, мониторинга и прогнозирования качества продукции и процессов; 25. Разработка моделей описания, методов и алгоритмов решения задач проектирования производственных систем, организации производства и принятия управленческих решений в цифровой экономике.

Научная новизна заключается в разработке научно-технических решений по развитию постпроизводственного мониторинга дефектов в процессе обработки металлических изделий на основе CALS-технологий:

1. *Предложен* научно обоснованный подход к организации постпроизводственного мониторинга дефектов в рамках CALS-технологий, *отличающийся* распространением непрерывного цифрового контура контроля на этапы от завершения обработки до эксплуатации и сервисного сопровождения изделий, *позволяющий* формировать замкнутую систему управления качеством на основе интеграции данных систем управления ресурсами предприятия, производственными процессами, жизненным циклом продукции и аналитической обработки данных для реализации постпроизводственного мониторинга как самостоятельного функционального элемента цифрового управления качеством (п. 6 паспорта специальности 2.5.22).

2. *Разработан* алгоритм формирования цифрового следа изделия в системе постпроизводственного мониторинга, *отличающийся* от известных подходов цифрового моделирования реализацией сквозной обработки данных о качестве компонентов и технологических операций на основе параметров предиктивной аналитики и неразрушающего контроля с формированием «паспорта изделия» по причинно-следственным связям параметров жизненного цикла, *позволяющий* повысить достоверность диагностики дефектов и обоснованность управленческих решений на всех этапах жизненного цикла продукции (п. 25 паспорта специальности 2.5.22).

3. *Разработана* методика организации постпроизводственного мониторинга дефектов, *отличающаяся* от известных подходов реализацией замкнутого цикла управления качеством, включающего этапы сбора данных, вероятностного моделирования контрольных параметров изделия на основе статистических распределений, аналитической обработки, определения пороговых значений риска отказа и прогнозирования гарантийного срока, и *позволяющая* на основе системы показателей цифровой зрелости осуществлять количественную оценку уровня интеграции данных, формировать достоверный цифровой двойник и прогнозировать срок службы изделий (п. 9 паспорта специальности 2.5.22).

Методология и методы исследования. При проведении исследования использованы теоретические положения в области управления качеством продукции, CALS-технологий и цифрового сопровождения жизненного цикла изделий, теории надежности и статистического контроля, организации производственных систем машиностроительного профиля, а также основополагающие принципы системного анализа и моделирования сложных производственных процессов.

Для обоснования выдвинутых в диссертации положений применены такие общенаучные методы исследования, как системный и структурно-функциональный подход, методы анализа и синтеза, сравнения, формализации и визуализации, а также метод причинно-следственного анализа (диаграмма Исикавы). Среди методов математического и статистического моделирования применены методы теории вероятностей и математической статистики (нормальное распределение, распределение Вейбулла, закон Пуассона), методы генерации случайных чисел, методы оценки рисков с использованием кривых риска, методы регрессионного и корреляционного анализа, а также методы имитационного моделирования

в среде VBA Excel, позволившие построить вероятностную модель распределения контрольных параметров изделия и прогнозирования его срока службы.

Информационной базой исследования послужили данные, содержащиеся в трудах (монографиях, научных статьях, диссертациях) отечественных и зарубежных исследователей по вопросам цифровизации управления качеством, CALS-технологий, мониторинга производственных процессов и управления жизненным циклом продукции; законодательные акты и нормативные документы Российской Федерации, в том числе ГОСТ Р ИСО 9001–2015, ГОСТ Р 56020–2020 , ГОСТ Р 57315–2016, ГОСТ Р 58771–2019, а также положения национальных проектов «Цифровая экономика Российской Федерации» и «Производительность труда»; данные корпоративных информационных систем ERP, MES, PLM и BI-класса, используемые для анализа дефектов и формирования цифрового следа изделия; результаты обследования производственных процессов на участках пайки и обработки металлических изделий; материалы апробации и внедрения системы постпроизводственного мониторинга дефектов в АО «Производственное объединение «Завод имени Серго»».

Теоретическая значимость работы заключается в развитии научно-методических подходов к цифровому управлению качеством и постпроизводственному мониторингу дефектов наукоемких изделий машиностроения, разработке принципов формирования непрерывного цифрового контура контроля качества на всех этапах жизненного цикла продукции, а также в обосновании интеграции информационных систем в единую среду управления качеством.

В ходе исследования обобщены результаты отечественных и зарубежных ученых в части цифровизации процессов производства и управления качеством, концепции CALS-технологий. Выявлены тенденции и закономерности развития систем мониторинга дефектов, включая предиктивное управление на основе цифровых двойников, анализа больших данных и машинного обучения. Доказана целесообразность использования цифрового следа изделия, методов предиктивной аналитики и неразрушающего контроля для повышения достоверности оценки состояния продукции и прогнозирования ее эксплуатационных характеристик. Теоретически обоснована и развита концепция постпроизводственного мониторинга как функционального элемента замкнутой системы управления качеством в рамках CALS-технологий.

Практическая значимость исследования. Результаты диссертационного исследования имеют существенную практическую значимость для реализации проектов цифровой трансформации и повышения эффективности систем управления качеством на предприятиях машиностроительного профиля.

По итогам исследования разработаны и апробированы методика постпроизводственного мониторинга дефектов, включающая алгоритм формирования цифрового следа изделия и вероятностную модель распределения контрольных параметров; программное средство прогнозирования отказов изделий (свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2025689256); модуль постпроизводственного мониторинга в составе ИСУП, интегрируемый системы управления предприятием без существенной перестройки ИТ-инфраструктуры; организационно-технический план внедрения цифровой системы мониторинга качества с ключевыми метриками и принципами визуализации.

Положения, выносимые на защиту:

1. Модель организации постпроизводственного мониторинга дефектов на основе CALS-технологий с распространением непрерывного цифрового контура контроля на этапы эксплуатации и сервисного сопровождения изделий.

2. Алгоритм цифрового следа изделия с формированием «паспорта» по причинно-следственным связям параметров жизненного цикла на основе предиктивной аналитики и неразрушающего контроля.

3. Методика организации постпроизводственного мониторинга дефектов с замкнутым циклом управления качеством на основе вероятностного моделирования, оценки цифровой зрелости и прогнозирования срока службы изделий.

Степень достоверности и апробация результатов исследования. Достоверность научных результатов подтверждается соответствием их положениям фундаментальной научной литературы в области управления качеством, CALS-технологий, теории надежности и статистического контроля. Полученные теоретические результаты построены на известных научных положениях (теория вероятностей и математическая статистика, нормальное распределение, распределение Вейбулла, закон Пуассона, методы генерации случайных чисел и оценки рисков). Практические результаты достигнуты с применением признанных информационных технологий, а полученные в ходе апробации прогнозные показатели согласуются с опубликованными экспериментальными данными по эксплуатации оборудования машиностроительных предприятий.

Основные результаты диссертации представлены на следующих научно-практических конференциях: «Молодой ученый» (г. Пенза, 2025), «Молодые имена в науке – 2025» (г. Пенза, 2025), «Социально-экономические, политические и культурные измерения устойчивого развития России: вызовы и ответы» (г. Казань, 2024), «Актуальные тренды цифровой трансформации промышленных предприятий» (г. Казань, 2024), «Математические методы и модели в высокотехнологичном производстве» (г. Санкт-Петербург, 2024) и др.

Результаты диссертационной работы внедрены на предприятии по производству бытовой техники (АО «Производственное объединение «Завод имени Серго»») при развитии системы постпроизводственного мониторинга качества с использованием цифрового управления, что подтверждено актами о внедрении. Разработанные методические рекомендации по цифровой трансформации процессов управления качеством использованы при разработке образовательных программ ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет».

Публикации. По теме исследования опубликовано 14 научных работ общим объемом 6,87 п. л. (в т.ч. лично автора – 6,25 п. л.), из них 7 статей в журналах из перечня рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России – «Автоматизация в промышленности», «Информационно-экономические аспекты стандартизации и технического регулирования», «Вестник ИжГТУ им. М. Т. Калашникова», «Наука и бизнес: пути развития»; зарегистрирована программа для ЭВМ.

Структура и объем работы. Структура и объем работы. Диссертационное исследование состоит из введения, 4 глав, заключения и списка литературы. Работа содержит 41 рисунок и 22 таблицы. Список литературы включает 177 наименований. Общий объем диссертационной работы составляет 177 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении освещена актуальность предлагаемого исследования; определены цели и задачи работы; раскрыты основные положения, выносимые на защиту, и их научная новизна; определена теоретическая и практическая значимость результатов исследования; обобщены основные результаты, полученные в рамках исследования.

В первой главе «Анализ научно-технических разработок по цифровизации процессов управления качеством и мониторингу производственных процессов наукоемких изделий» рассмотрено современное состояние научных исследований в области цифровизации процессов мониторинга качества с учетом применения CALS-технологий в машиностроении.

Обоснована необходимость перехода от традиционных форм мониторинга качества к интегрированным цифровым системам для сквозного контроля изделия на всех этапах его

жизненного цикла. Сформулированы теоретические основы цифрового управления качеством, включающие автоматизацию мониторинга, построение цифровых моделей, регистрацию дефектов и организацию обратной связи. Систематизированы направления цифровой трансформации контроля качества, где наиболее перспективными выделены: применение искусственного интеллекта и машинного обучения, внедрение цифровых двойников, интеграция робототехники и автоматизации, использование виртуальной и дополненной реальности для повышения точности мониторинга.

Структурирована база научных работ, стандартов и нормативных документов, касающихся CALS-технологий и их применения в мониторинге качества. В российских стандартах термин «постпроизводственный мониторинг» используется только для медицинских изделий (ГОСТ Р 59768-2021, ГОСТ Р 70467-2022), устанавливающих требования к постпроизводственной информации и сбору данных. Для машиностроения и других отраслей наблюдение изделия в период эксплуатации регулируются в стандартах ГОСТ Р ИСО 9001-2015 (мониторинг удовлетворенности потребителей и обратная связь), ГОСТ Р 71487.11-2025 (мониторинг оборудования и проверка эксплуатационных измерений) и ГОСТ Р 53563-2009 (мониторинг, диагностирование и прогнозирование ресурса оборудования). Единый стандарт по постпроизводственному мониторингу в России отсутствует, что подтверждает актуальность диссертации.

Анализ уровня цифровизации предприятий РФ показал, что, несмотря на наличие защищенной ИТ-архитектуры для внедрения CALS-технологий у более чем половины компаний, лишь 22% предприятий внедряют цифровизацию последовательно с отслеживанием результатов (рисунок 1). Метрики цифровизации имеют менее 5% компаний, что свидетельствует о фрагментарном характере цифровой трансформации и отсутствии системного подхода к управлению качеством.

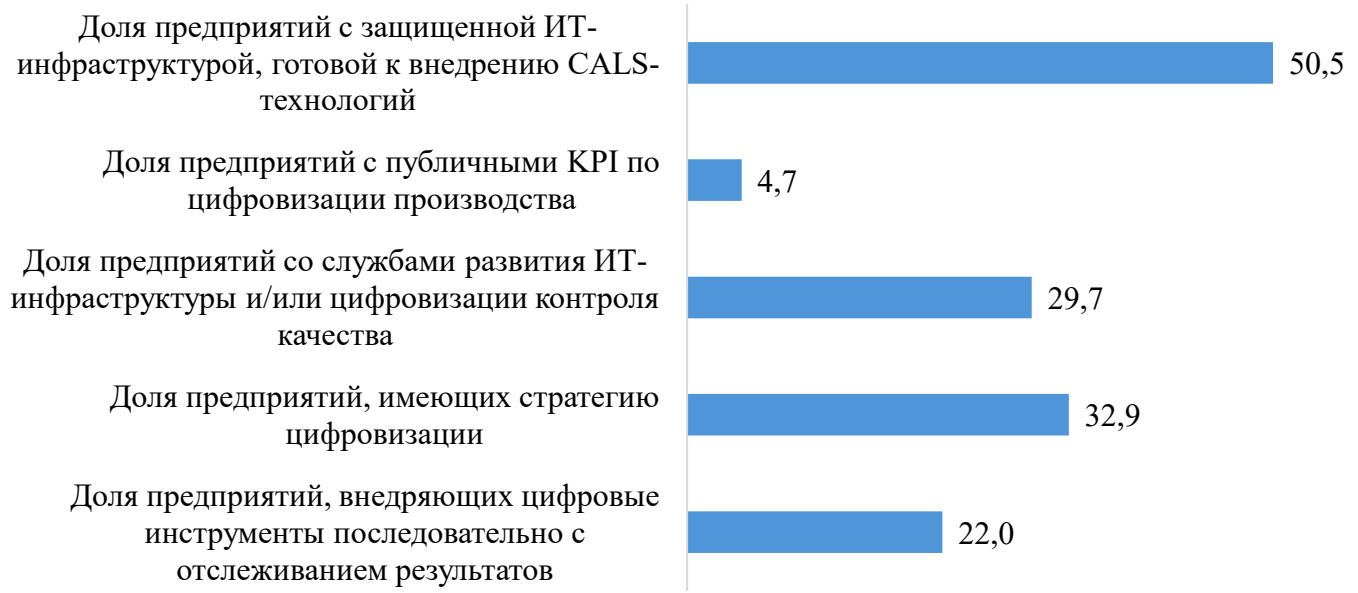


Рисунок 1 – Цифровая зрелость предприятий в части мониторинга производственных процессов и управления качеством (построена автором)

Анализ применения CALS-технологий в постпроизводственном мониторинге позволил выявить ключевые проблемы внедрения: интеграция с существующими процессами, необходимость обучения персонала и обеспечение безопасности данных. CALS-подходы в основном применяются на этапах проектирования и производства, тогда как послепроизводственные этапы и эксплуатация изделия мало связаны с общей системой качества, а обратная связь носит фрагментарный характер.

Разработана концептуальная модель постпроизводственного мониторинга дефектов.

Модель обобщает принципы сквозного информационного сопровождения изделия в рамках CALS-технологий и отражает замкнутый цикл управления качеством. В результате обратной связи данные о дефектах, выявленных на этапах эксплуатации и сервисного сопровождения, интегрируются в единую цифровую среду и возвращаются на этапы проектирования и производства для корректировки технологических процессов (рисунок 2).

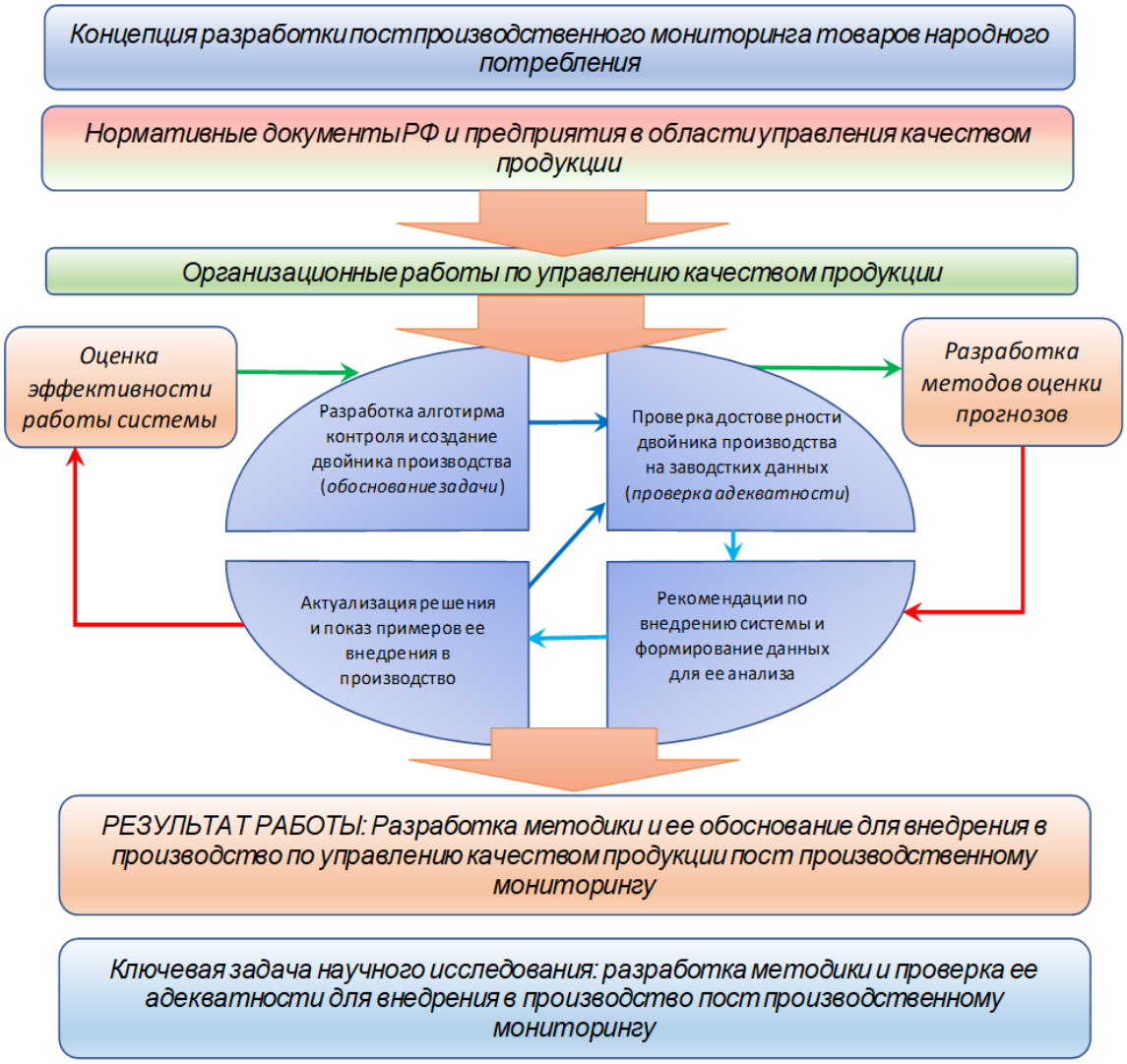


Рисунок 2 – Модель организации постпроизводственного мониторинга дефектов на основе CALS-технологий с непрерывным цифровым контуром контроля (разработана автором)

Таким образом, доказана целесообразность использования цифрового следа изделия, методов предиктивной аналитики и неразрушающего контроля для повышения достоверности оценки состояния продукции и прогнозирования ее эксплуатационных характеристик. Выявлена роль CALS-технологий как фундаментальной платформы для создания единого информационного пространства, обеспечивающего предиктивный анализ, цифровую прослеживаемость и адаптивность производственной системы.

Во второй главе «Интегрированная система управления качеством и мониторинга дефектов в рамках цифровой логистической поддержки жизненного цикла продукции» проведен анализ современных цифровых инструментов управления качеством, выполнена диагностика проблем системы контроля качества в «ПО «Завод имени Серго»», систематизированы дефекты, возникающие на участке пайки элементов холодильника, с учетом их влияния на жизненный цикл изделия.

Изучен практический опыт реализации проектов мониторинга дефектов на наукоемких предприятиях машиностроения ПАО «Туполев», АО «НПО Энергомаш», ПАО

«КАМАЗ», а также зарубежные практики. Систематизированы ключевые показатели цифрового мониторинга дефектов: уровень дефектности, время реакции, повторяемость, индекс цифрового следа и удельная стоимость устранения. Установлено, что их формирование и использование возможно только при сквозной интеграции информационных систем MES, PLM, ERP и BI, что позволяет оперативно выявлять отклонения, устранять причины брака и управлять качеством на уровне цифрового предприятия.

Автором предложена методика количественной оценки эффективности цифровых трансформаций в сфере управления качеством, основанная на принципах взвешенного вклада, позволяющая учитывать, как относительную значимость каждой метрики, так и фактические изменения при внедрении цифровых решений. На примере производственной системы POZIS (PPS) проведена диагностика проблем контроля качества (рисунок 3).

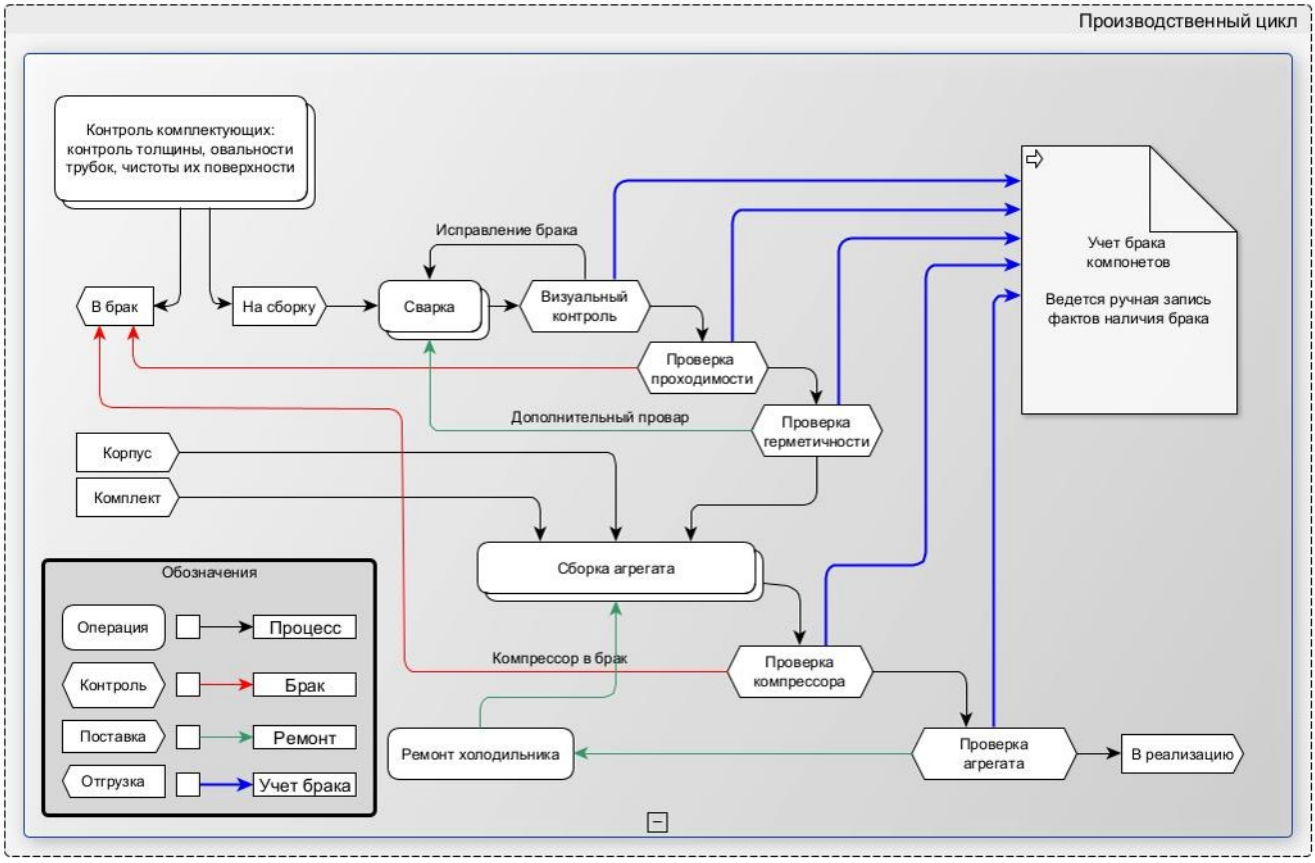


Рисунок 3 – Существующая система производственного контроля качества в АО «ПО «Завод имени Серго» (построена автором)

Установлено, что существующая система контроля в основном привязана к бумажному документообороту, данные по характеристикам комплектующих не собираются, а фиксируются только случаи брака, что не позволяет анализировать причины отказов на протяжении жизненного цикла изделия и ограничивает возможности для системной работы с отклонениями.

Путем построения диаграммы Исикавы систематизированы основные группы факторов, влияющих на возникновение дефектов на участке пайки: качество и условия хранения материалов, состояние оборудования, методы контроля, компетентность персонала, а также конструктивно-технологические параметры соединяемых элементов (рисунок 4).

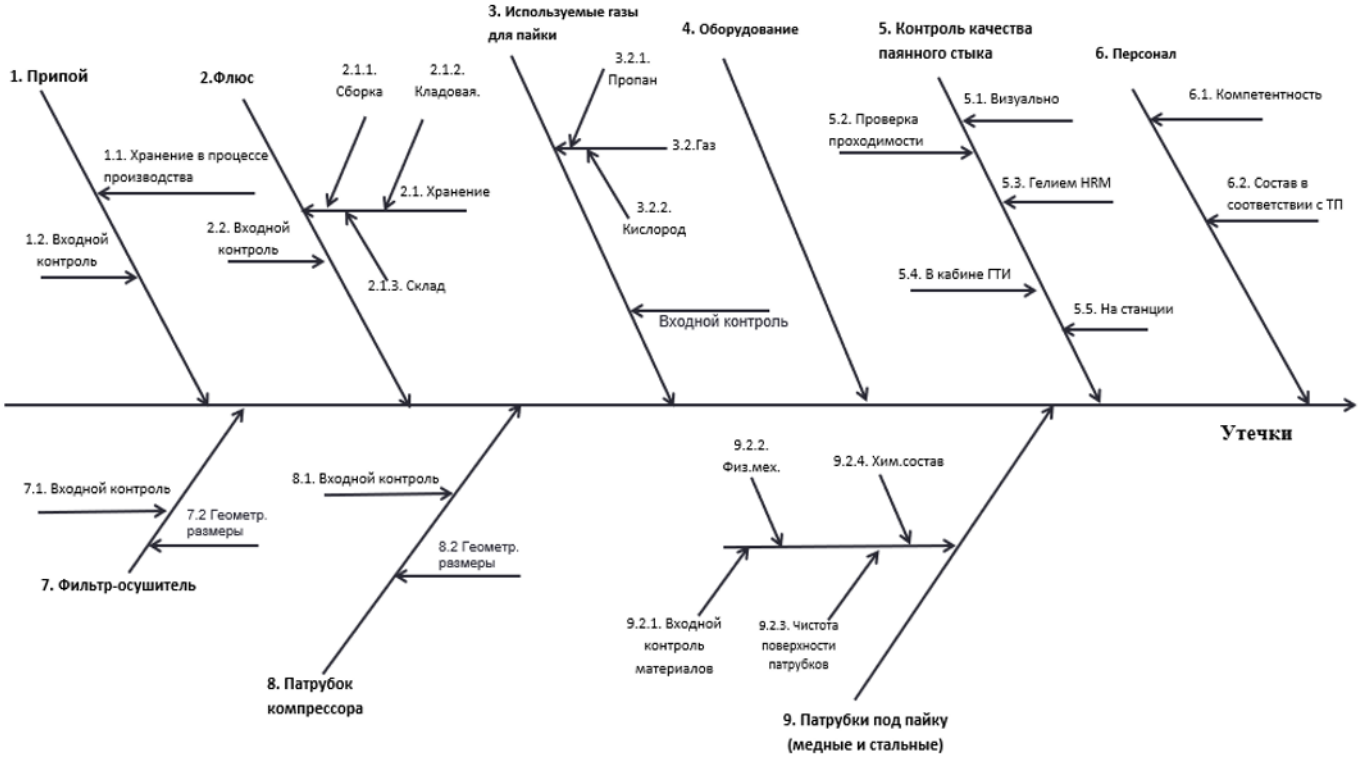


Рисунок 4 – Диаграмма Исикавы дефекта процесса пайки элемента холодильника (построена автором)

Выявлены критические контрольные точки на всех этапах технологического процесса, что позволило определить приоритетные направления совершенствования системы контроля качества.

На рисунке 5 представлена логическая схема замкнутого цикла постпроизводственного мониторинга.

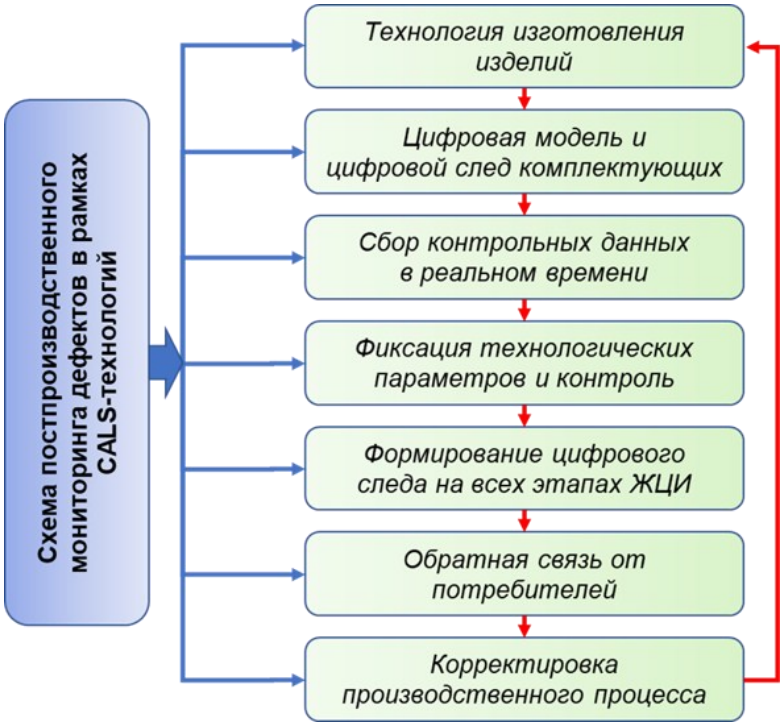


Рисунок 5 – Схема постпроизводственного мониторинга дефектов в рамках CALS-технологий (построена автором)

Схема показывает сквозной информационный контур, обеспечивающий непрерывное управление качеством продукции на основе данных эксплуатации и сервисного сопровождения. Обобщение подходов к взаимодействию ERP, MES, PLM и BI-систем показало, что их согласованное использование позволяет сформировать единую информационную среду, в рамках которой данные о дефектах используются на всех стадиях, включая эксплуатацию. Это создает основу для перехода к предиктивному управлению качеством и определяет необходимость разработки методов и средств постпроизводственного мониторинга.

В третьей главе «Разработка методов и средств управления качеством в рамках цифрового мониторинга дефектов изделия» представлены алгоритм функционирования цифровой системы постпроизводственного мониторинга в рамках CALS-технологий, вероятностная модель исследования процесса сборки, методика организации постпроизводственного мониторинга дефектов, а также программное средство прогнозирования отказов изделий.

Разработан алгоритм цифровой системы постпроизводственного мониторинга, реализующий два уровня контроля: на этапах сборки изделия – анализ причин возникновения брака комплектующих, и на этапе постпроизводственного мониторинга – анализ отказов изделий в процессе эксплуатации с поиском причин в зависимости от качества используемых компонентов (рисунок 6).

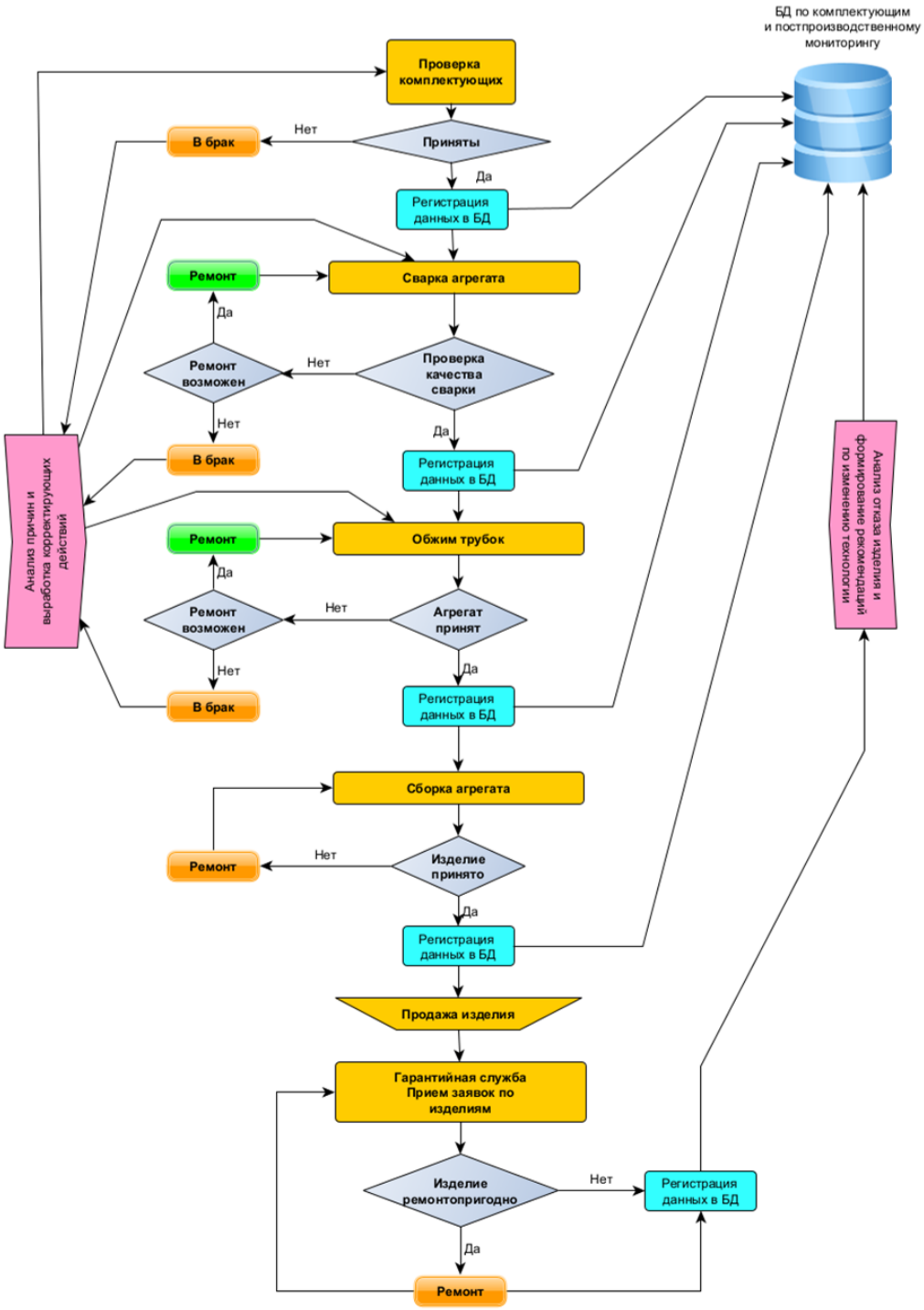


Рисунок 6 – Алгоритм формирования цифрового следа изделия в рамках постпроизводственого мониторинга (предложен автором)

Алгоритм формирует цифровой след изделия на основе сквозной обработки данных о качестве комплектующих и технологических операций, интегрируя параметры предиктивной аналитики и результаты неразрушающего контроля на всех этапах. Предложенный алгоритм устанавливает причинно-следственные связи между отклонениями параметров на этапе сборки, выявленными несоответствиями при неразрушающем контроле и последующими отказами в процессе эксплуатации, что позволяет сформировать структурированный «паспорт изделия», отражающий полную историю его качества. Реализация алгоритма в виде программного средства (свидетельство о регистрации № 2025689256) подтверждает его практическую применимость.

Предложена система контроля производства АО «ПО «Завод имени Серго»», реализующая схему взаимодействия компонентов постпроизводственного мониторинга (рисунок 7). В отличие от существующей модели, система контроля производства построена на принципах сквозной цифровой интеграции. Данные о комплектующих и технологических операциях фиксируются автоматически в MES-системе и передаются в ERP и PLM для анализа.

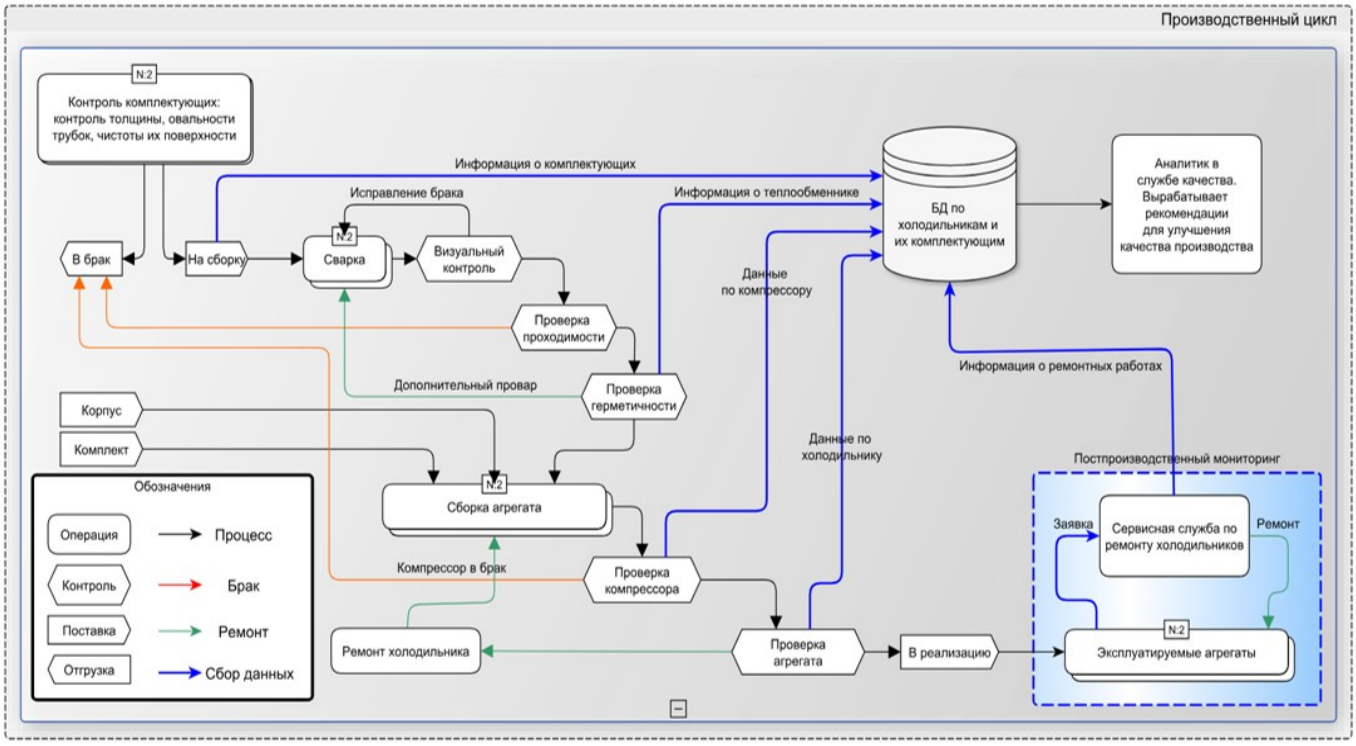


Рисунок 7 – Предлагаемая система контроля производства с элементами постпроизводственного мониторинга для АО «ПО «Завод имени Серго» (разработана автором)

Далее формируется цифровой профиль изделия, а выявленные в процессе эксплуатации дефекты через обратную связь возвращаются на этапы проектирования и производства для корректировки стандартов.

В рамках данной системы предложены ключевые показатели уровня качества: индекс постпроизводственной дефектности пайки, частота возврата холодильников на участок анализа и ремонта, индекс цифровой прослеживаемости пайки, коэффициент отклонений в теплотехнических испытаниях, частота выявления утечек после вакуумирования и автоматизированный индекс корректирующих действий. Разработка бот-приложения обеспечивает обратную связь с базой данных по проданным изделиям и позволяет отслеживать причины ремонтов.

Разработана методика постпроизводственного мониторинга дефектов, ориентированная на интеграцию систем управления производством, планирования ресурсов, жизненного цикла продукции и бизнес-аналитики (таблица 1).

Таблица 1 – Методика организации постпроизводственного мониторинга дефектов (предложена автором)

Этап	Задачи этапа
Этап 1. Сбор исходных данных и формирование цифрового профиля изделия	Сбор данных из информационных систем предприятия: MES, ERP, PLM, SCADA, BI, сервисной статистики. Идентификация изделия, партии, смены, оператора, материалов, приборных и визуальных показателей (присвоение ID)
Этап 2. Формирование системы показателей качества и надежности	Базовые показатели: индекс постпроизводственной дефектности пайки, возвраты, время устранения дефекта, индекс корректирующих действий, индекс цифровой прослеживаемости. Авторские показатели: $\varphi_o(x)$ – вероятность обнаружения дефекта, $\varphi_d(x)$ – достоверность контроля, $\varphi_r(x)$ – реальная дефектность изделия, $R_j(n)$ – надежность отдельного соединения, R_{sys} – интегральная надежность изделия, λ_{rep} – частота повторных дефектов, *DTRI* – индекс цифрового следа изделия
Этап 3. Математическая оценка надежности и риска отказа	Использование статистических распределений (нормальное, логнормальное, Вейбулла). Расчет вероятности сохранения изделия работоспособности в течение заданного числа циклов эксплуатации R_sys(n) и риска отказа r_T = 1 − R_sys(T)
Этап 4. Подготовка данных для анализа	Привязка измерений к ID изделия, проверка единиц измерения, фильтрация выбросов, дополнение сервисной информацией
Этап 5. Аналитические отчеты и панели аналитики	Извлечение, преобразование и загрузка данных. Расчет φ_r, λ_rep, R_sys, DTRI, r_T. Визуализация на панелях аналитики
Этап 6. Определение пороговых значений и принятие решений	Пределы: зеленый: r_T < 2% – стандартный контроль; желтый: 2% ≤ r_T < 5% – корректирующие действия; красный: r_T ≥ 5% – инженерный разбор, обновление СОП
Этап 7. Верификация и валидация модели	Повышение точности прогнозов путем тестирования накопленных данных, кросс-валидации, калибровки модели, обновления параметров модели
Этап 8. Распределение функций в системе	PLM-инженеры – цифровые модели; технологи – анализ параметров; BI-аналитики – KPI; ERP-менеджеры – экономика; сервисная служба – гарантийные данные
Этап 9. Оценка эффекта от внедрения постпроизводственного мониторинга	Расчет эффекта E = f(ΔD, ΔT, ΔQ), где ΔD – снижение числа дефектов, ΔT – сокращение времени на их устранение и анализ, ΔQ – прирост годной продукции. Визуализация в BI-системе.
Этап 10. Прогнозирование отказов и гарантийного срока	Определение частоты отказов λ, прогнозируемого срока службы l_pred, оптимального гарантийного срока t_gar

Методика включает десять этапов: сбор исходных данных и формирование цифрового профиля изделия; формирование показателей качества и надежности; математическую постановку и расчеты; сбор, очистку и калибровку данных; аналитическую обработку; определение пороговых значений и правил действий; верификацию и валидацию модели; регламент ролей и ответственности; экономическую интеграцию; прогнозирование отказов и гарантийного срока.

В рамках методики выполнена вероятностная модель оценки потери качества сварных соединений, учитывающая вероятность обнаружения дефектов, чувствительность

контроля и вероятность потери качества. Предложен алгоритм расчета модели, в котором для заданного количества изделий генерируются показатели каждого комплектующего и операции, при нарушении критического значения по браку деталь или операция отбрасываются, после чего для каждого готового изделия вычисляется прогнозный срок службы по закону Вейбулла.

Предложена структурно-функциональная схема программного комплекса «Система постпроизводственного мониторинга изделий народного потребления» (СППМ) на основе концепции постпроизводственного мониторинга и авторской программы для ЭВМ «Моделирование прогноза отказов изделия на основании статистических данных по контролируемым техническим и технологическим параметрам на этапе сборки». Структура СППМ включает сбора технологических параметров компонентов, блок контроля заявок на ремонт с обратной связью (на базе ботов), базу данных для хранения информации, а также блок анализа результатов, обеспечивающий в автоматическом режиме анализ критических ситуаций и выработку решений (рисунок 8).

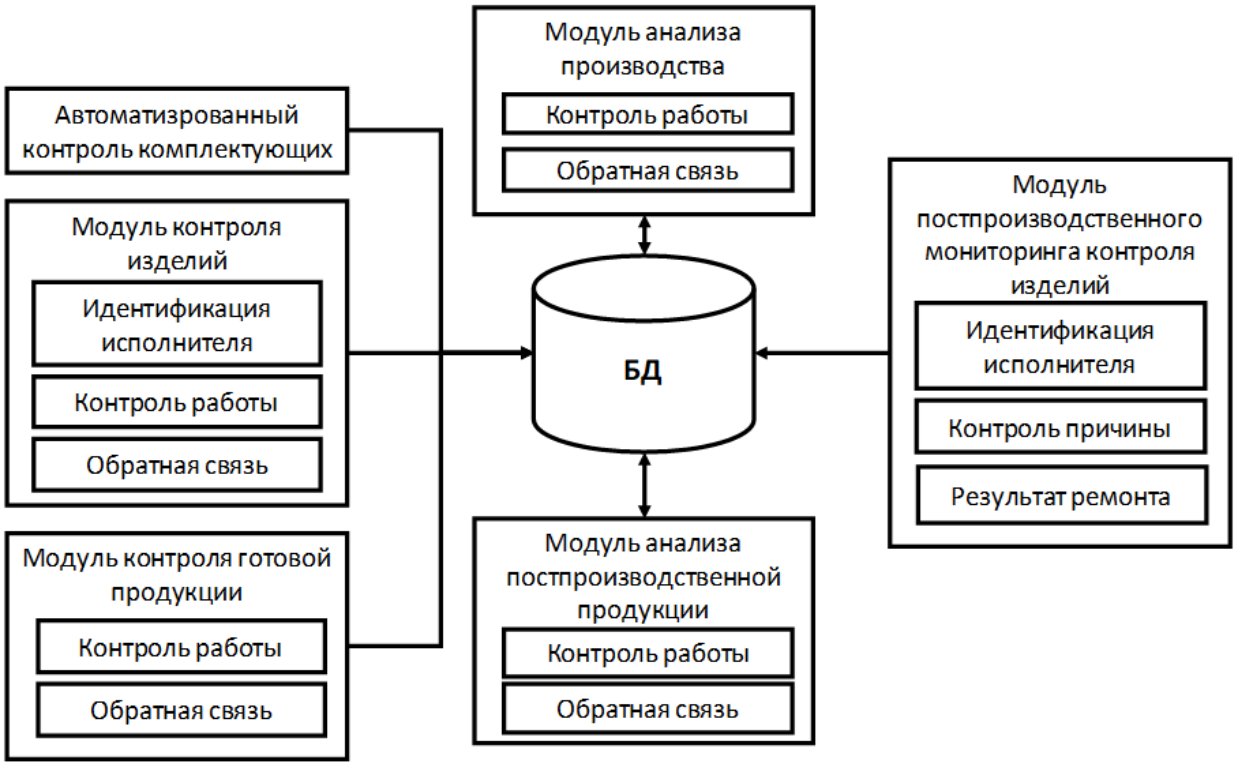


Рисунок 8 – Структурно-функциональная схема программного комплекса «Система постпроизводственного мониторинга изделий народного потребления» (СППМ) (разработана автором)

Программное средство в среде VBA Excel позволяет имитировать партию изделий, выявлять компоненты с отклонениями и оценивать риск отказа. Дальнейшее развитие модели предусматривает обучение нейронной сети на накопленных массивах производственных и сервисных данных для расчета вероятности отказа изделия на этапе эксплуатации, прогнозирования срока службы и оптимального гарантийного периода.

В четвертой главе «Практическая реализация научно-технических решений по постпроизводственному мониторингу дефектов» проведена апробация разработанных методов и средств на базе производственной площадки АО «ПО «Завод имени Серго»». Диагностика локальных информационных систем (MES, ERP, PLM, BI) подтвердила их способность к интеграции без создания новой инфраструктуры. По статистическим данным пилотных участков пайки и контроля герметичности сварных соединений осуществлено

прогнозирование отказов изделия.

Внедрение модуля постпроизводственного мониторинга в состав интегрированной системы управления предприятием (ИСУП) обеспечило автоматическую фиксацию данных из MES и приборов неразрушающего контроля (Ecotec E3000, AGRAMKOV HRM6). В рамках мониторинга сформирован цифровой профиль изделия с привязкой к сменам и операторам, произведен автоматизированный расчет индекса постпроизводственной дефектности пайки. При превышении установленного порога в 5% инициировались служебные задания на анализ причин и разработку корректирующих мероприятий. При этом архитектура модуля постпроизводственного мониторинга обеспечила отказоустойчивость, а резервное копирование исключило потери данных. Верификация результатов апробации подтвердила адекватность предложенной модели: фактические показатели сходимости математического ожидания и средних значений по всем этапам мониторинга свидетельствуют об устойчивости разработанной модели и незначительном разбросе случайных факторов.

Использование программы для ЭВМ в деятельности АО «ПО «Завод имени Серго» позволило прогнозировать отказы изделия по контролируемым техническим и технологическим параметрам на этапе сборки, что дает возможность корректировать критерии контроля качества и прогнозировать надежность продукции.

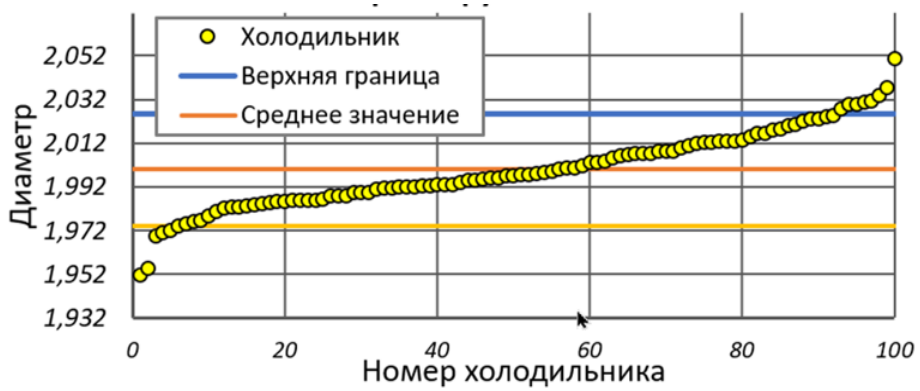


Рисунок 9 – Распределение контрольных параметров по проходимости капиллярной трубки для партии холодильников (построено автором)

Для визуализации результатов программа для ЭВМ строит графики распределений по выбранной операции с нанесением границ. Все результаты ниже границы контроля отбрасываются и фиксируется брак, остальные результаты учитываются в оценке качества изделия (рисунок 9).

Изменяя входные данные, можно строить прогнозные модели и проводить их анализ. Для визуализации прогноза работы изделия выводится график сроков службы холодильников (рисунок 10).

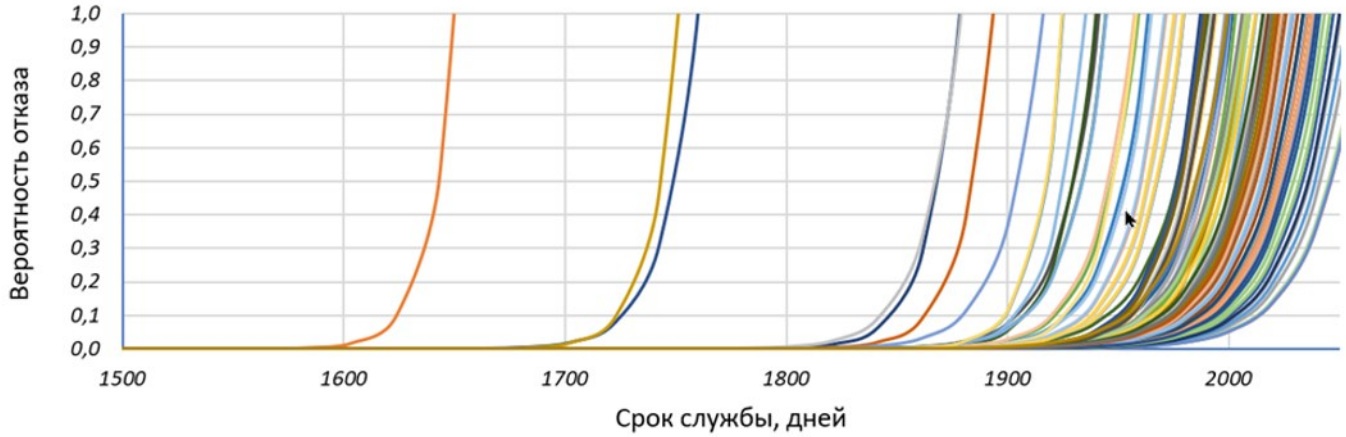


Рисунок 10 – Результаты прогнозирования сроков службы холодильников с помощью программного средства в среде VBA Excel (рассчитано и построено автором)

В целях апробации применения программы для ЭВМ и, в целом, программного комплекса «Система постпроизводственного мониторинга изделий народного потребления» были выполнены модельные расчеты на основании производственных данных предприятия за последние 5 лет по показателям: среднее значение контролируемой величины (утечка гелия), стандартное отклонение и контрольная граница брака (таблица 2).

Таблица 2 – Результаты моделирования брака холодильников в зависимости от параметров контроля (рассчитано автором)

Параметры моделирования	Среднее значение утечки гелия, г/год	Стандартное отклонение	Контрольная граница брака, г/год	Результат моделирования	
				Брак, шт.	Зона риска, шт.
1	1,94	0,032	2,00	6	5
2	1,94	0,032	1,98	10	14
3	1,94	0,030	1,98	10	12
4	1,90	0,030	1,98	0	1

Модельные расчеты показывают, что при смещении средней величины утечки гелия с 1,94 до 1,90 г/год и снижении стандартного отклонения с 0,032 до 0,030 количество изделий в зоне риска сократилось с 14 до 1, что подтверждает возможность оптимизации контрольных критериев. В рамках программного комплекса также возможен анализ работы сварщиков при наличии цифрового следа по компонентам и операциям, что позволяет предполагать возможный брак компонентов. Данный инструмент позволяет на этапе подготовки производства обоснованно корректировать критерии приемки, прогнозировать долю брака и предотвращать выпуск несоответствующей продукции.

Эффект от внедрения предложенных решений по построизводственному мониторингу на участке пайки медных труб холодильников с проверкой герметичности на оборудовании Ecotec E3000 и установке AGRAMKOV HRM6 представлен в таблице 3. Данные показывают сокращение времени реакции на 50%, трудозатрат – на 95,9%, снижение общего уровня брака на 57,1%.

Таблица 3 – Прогнозные показатели сокращения времени, ресурсов и брака при внедрении цифрового постпроизводственного мониторинга (рассчитано автором)

Показатель	До внедрения	После внедрения	Снижение показателя, %
Время реакции на отклонения, час.	2,50	1,25	50,0
Время обработки данных по дефектам, мин.	180	20	88,9
Трудозатраты персонала на анализ данных, чел.-час	12,25	0,50	95,9
Простой оборудования, % от времени смены	6	1	83,3
Общий уровень брака, %	7	3	57,1
Повторный брак, %	2,0	0,2	90,0

Полученные результаты подтверждают достижение цели диссертации – развитие постпроизводственного мониторинга дефектов в процессе обработки металлических изделий на основе CALS-технологий. Предложенные решения могут быть масштабированы на предприятия машиностроительной отрасли, осуществляющие обработку металлических изделий и имеющие аналогичную структуру производственных процессов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По итогам проведенного исследования получены важные научно-технические результаты в области организации постпроизводственного мониторинга дефектов в процессе обработки металлических изделий на основе CALS-технологий:

1. Предложен научно обоснованный подход к организации постпроизводственного мониторинга дефектов в рамках CALS-технологий, основанный на интеграции ERP-, MES-, PLM- и BI-систем в единую информационную среду. Разработана модель постпроизводственного мониторинга, реализующая непрерывный цифровой контур контроля на этапах от завершения обработки до эксплуатации и сервисного сопровождения изделий, что обеспечивает формирование замкнутой системы управления качеством на основе сквозной обработки данных на всех стадиях жизненного цикла продукции.

2. Разработан алгоритм формирования цифрового следа изделия, реализующий сквозную обработку данных о качестве компонентов и технологических операций на основе параметров предиктивной аналитики и неразрушающего контроля. Алгоритм обеспечивает формирование структурированного «паспорта изделия» с фиксацией причинно-следственных связей параметров на этапах проектирования, производства и эксплуатации, что позволяет повысить достоверность диагностики дефектов и обоснованность управленческих решений. Апробация алгоритма на предприятии АО «ПО «Завод имени Серго» позволила сократить время обработки данных по дефектам на 88,9% (с 180 до 20 минут).

3. Разработана методика организации постпроизводственного мониторинга дефектов, включающая этапы сбора данных, вероятностного моделирования контрольных параметров изделия на основе статистических распределений (нормального, Вейбулла, Пуассона), аналитической обработки, определения пороговых значений риска отказа и прогнозирования гарантийного срока. В методике реализована система показателей цифровой зрелости, включая индекс зрелости цифрового следа, что позволяет количественно оценивать уровень интеграции информационных потоков, формировать достоверный цифровой двойник изделия и прогнозировать его срок службы. Внедрение методики обеспечило снижение простоя оборудования на 83,3% (с 6% до 1% от времени смены).

4. Практическая реализация предложенных решений на предприятии по производству бытовой техники (АО «ПО «Завод имени Серго») подтвердила их адекватность и эффективность. Внедрение модуля постпроизводственного мониторинга в состав ИСУП обеспечило автоматическую фиксацию данных из MES и приборов неразрушающего контроля, формирование цифровых профилей изделий с привязкой к сменам и операторам, а также автоматизированный расчет индекса постпроизводственной дефектности пайки. Эффект от внедрения составил: сокращение времени реакции на отклонения на 50%, трудозатрат персонала на анализ данных – на 95,9%, общего уровня брака – на 57,1%, повторного брака – на 90%. Разработанное программное средство прогнозирования отказов изделий (свидетельство о регистрации № 2025689256) позволило на этапе подготовки производства обоснованно корректировать критерии приемки и предотвращать выпуск несоответствующей продукции. Предложенные решения могут быть масштабированы на предприятия машиностроительной отрасли, осуществляющие обработку металлических изделий и имеющие аналогичную структуру производственных процессов.

Рекомендуется использовать результаты исследования в практике машиностроительных предприятий при реализации проектов цифровой трансформации систем управления качеством; при формировании программ повышения эффективности производства на основе постпроизводственного мониторинга дефектов; при актуализации внутрикорпоративных стандартов в области управления качеством и разработке

регламентов сбора и обработки данных о дефектах на этапах эксплуатации и сервисного сопровождения изделий, а также при модернизации систем управления качеством продукции на основе предиктивной аналитики и цифрового сопровождения жизненного цикла изделий.

Перспективы дальнейшей разработки темы заключаются в развитии системы стандартов в области организации постпроизводственного мониторинга качества для машиностроительных производств, включая стандартизацию методов сбора и обработки данных об отказах в процессе эксплуатации, методик прогнозирования срока службы изделий на основе статистических распределений, а также требований к интеграции систем мониторинга с информационными системами предприятия на всех этапах жизненного цикла продукции.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в журналах, входящих в перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, рекомендованных ВАК Министерства науки и высшего образования РФ

1. Мусина, Г. Р. Математическая модель прогноза жизненного цикла изделия с использованием статистического анализа качества его комплектующих / Г. Р. Мусина, Е. С. Воробьев // Автоматизация в промышленности. – 2026. – № 10. – С. 46–51. – 0,58 п. л./0,43 п. л.

2. Мусина, Г. Р. Методологические основы постпроизводственного мониторинга качества изделий в контексте CALS-концепции / Г. Р. Мусина, Е. С. Воробьев // Вестник ИжГТУ им. М. Т. Калашникова. – 2026. – № 3. – Т. 29, № 3. – С.73–82. – 0,88 п. л./0,66 п. л.

3. Мусина, Г. Р. Цифровое моделирование и мониторинг в CALS-управлении изделием / Г. Р. Мусина // Информационно-экономические аспекты стандартизации и технического регулирования. – 2025. – № 5. – С. 110–116. – 0,81 п. л.

4. Мусина, Г. Р. Жизненный цикл изделия и система контроля качества / Г. Р. Мусина, М. В. Шинкевич // Вестник ИжГТУ им. М. Т. Калашникова. – 2025. – Т. 28, № 3. – С. 53–63. – 1,27 п. л./0,92 п. л.

5. Мусина, Г. Р. Управление качеством продукции на производственном предприятии / Г. Р. Мусина // Информационно-экономические аспекты стандартизации и технического регулирования. – 2025. – № 3. – С. 18–24. – 0,81 п. л.

6. Мусина, Г. Р. Разработка концепции модуля постпроизводственного мониторинга в составе ИСУП предприятия бытовой техники / Г. Р. Мусина // Информационно-экономические аспекты стандартизации и технического регулирования. – 2025. – № 6(87). – С. 573–580. – 0,92 п. л.

7. Мусина, Г. Р. Состояние и перспективы внедрения цифровых технологий на предприятиях машиностроения / Г. Р. Мусина, М. В. Шинкевич // Наука и бизнес: пути развития. – 2023. – № 12. – С. 137–140. – 0,46 п. л./0,35 п. л.

Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ:

8. Мусина, Г. Р. Моделирование прогноза отказов изделия на основании статистических данных по контролируемым техническим и технологическим параметрам на этапе сборки / Г. Р. Мусина // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025689256 от 27.10.2025г.

Публикации в других научных изданиях и сборниках материалов конференций

9. Мусина, Г. Р. Реализация мониторинга качества продукции на всех этапах жизненного цикла / Г. Р. Мусина // Молодой ученый: сб. ст. XV Междунар. науч.-практ. конф.: в 2 ч. – Пенза: Наука и Просвещение, 2025. – С. 107–110. – 0,23 п. л.

10. Мусина, Г. Р. Применение CALS-технологий в мониторинге дефектов производственных процессов / Г. Р. Мусина // Молодые имена в науке – 2025: сб. ст. Междунар. науч.-исслед. конкурса: в 2 ч. – Пенза: Наука и Просвещение, 2025. – С. 12–15. – 0,23 п. л.

11. Мусина, Г. Р. Формирование цифровой среды на предприятиях машиностроительной отрасли промышленности / Г. Р. Мусина // Социально-экономические, политические и культурные измерения устойчивого развития России: вызовы и ответы: сб. материалов Междунар. науч.-практ. конф. – Казань, 2024. – С. 241–245. – 0,29 п. л.

12. Мусина, Г. Р. Искусственный интеллект в управлении производственными операциями / Г. Р. Мусина, М. В. Шинкевич // Актуальные тренды цифровой трансформации промышленных предприятий: сб. ст. III Всерос. науч.-практ. конф. – Казань, 2024. – С. 193–196. – 0,40 п. л./0,29 п. л.

13. Мусина, Г. Р. Роль фундаментальной математики в развитии наукоемких технологий: от теории к практическим применениям / Г. Р. Мусина // Математические методы и модели в высокотехнологичном производстве: сб. тез. докл. IV Междунар. форума. – СПб., 2024. – С. 46–48. – 0,17 п. л.

14. Мусина, Г. Р. Методы и инструменты бережливого производства и синхронизации процессов / Г. Р. Мусина, И. А. Гусарова // Перспективы науки. – 2022. – № 7 (154). – С. 16–18. – 0,17 п. л./0,14 п. л.