

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Казанский национальный исследовательский
технологический университет»

На правах рукописи



МУСИНА ГУЛЬНАЗ РАФАИЛОВНА

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

2.5.22 Управление качеством продукции.
Стандартизации. Организация производства

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:

доктор экономических наук, профессор
Шинкевич Марина Владимировна

Казань – 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

СПИСОК АББРЕВИАТУР	5
ВВЕДЕНИЕ.....	7
1 АНАЛИЗ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИХ РАЗРАБОТОК ПО ЦИФРОВИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ И МОНИТОРИНГУ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ НАУКОЕМКИХ ИЗДЕЛИЙ	17
1.1 Обзор научных исследований в сфере цифрового управления качеством и информационного мониторинга производственных процессов.....	17
1.2 Применение CALS-технологий и методов стандартизации в системе мониторинга дефектов производственных процессов	38
1.3 Анализ существующих методов оценки и прогнозированию дефектов в системе постпроизводственного мониторинга	45
1.4 Подходы к оценке качества сварных изделий в постпроизводственном мониторинге.....	51
ВЫВОДЫ ПО ПЕРВОЙ ГЛАВЕ.....	54
2 ИНТЕГРИРОВАННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ И МОНИТОРИНГА ДЕФЕКТОВ В РАМКАХ ЦИФРОВОЙ ЛОГИСТИЧЕСКОЙ ПОДДЕРЖКИ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ПРОДУКЦИИ	56
2.1 Цифровые инструменты управления качеством в мониторинге дефектов в концепции Индустрии 4.0.....	56
2.2 Диагностика проблем системы контроля качества изделий в производстве электрических приборов.....	61
2.3 Систематизация дефектов на участке пайки и их влияние на жизненный цикл изделия	67
ВЫВОДЫ ПО ВТОРОЙ ГЛАВЕ.....	71
3 РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ И СРЕДСТВ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ В РАМКАХ ЦИФРОВОГО МОНИТОРИНГА ДЕФЕКТОВ ИЗДЕЛИЯ	73

3.1. Алгоритм цифровой системы постпроизводственного мониторинга дефектов на основе параметров предиктивной аналитики и неразрушающего контроля.....	73
3.2 Вероятностная модель исследования процесса сборки и постпроизводственного мониторинга	79
3.3 Методика организации постпроизводственного мониторинга дефектов с замкнутым циклом управления качеством	88
3.4 Программное средство прогнозирования отказов изделия по контролируемым техническим и технологическим параметрам на этапе сборки	99
ВЫВОДЫ ПО ТРЕТЬЕЙ ГЛАВЕ	104
4 ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ПО ПОСТПРОИЗВОДСТВЕННОМУ МОНИТОРИНГУ ДЕФЕКТОВ	107
4.1 Организационно-технический процесс интеграции цифровой системы мониторинга качества в производственную систему	107
4.2 Внедрение методики цифрового мониторинга дефектов на участке обработки металлических изделий.....	118
4.3 Оценка результативности и качества внедрения цифровой системы постпроизводственного мониторинга дефектов	128
4.4 Разработка плана мероприятий для внедрения системы постпроизводственного мониторинга изделий народного потребления (СППМ)	138
ВЫВОДЫ ПО ЧЕТВЕРТОЙ ГЛАВЕ	145
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	148
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	151
ПРИЛОЖЕНИЕ А	174
Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ	174
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	175

Перечень национальных и межгосударственных стандартов, регламентирующих процессы управления качеством, контроля и мониторинга на этапах жизненного цикла изделий.....	175
---	-----

СПИСОК АББРЕВИАТУР

- АСИХ – автоматизированная система испытаний холодильников
- АСУ ТП – автоматизированная система управления технологическим процессом
- ГСЧ – генератор случайных чисел
- ИСУП – информационная система управления производством
- ИЦСИ – индекс цифрового следа изделия
- КПСЦ – картирование потока создания ценности
- СОК – стандартная операционная карта
- BI – бизнес-аналитика (Business Intelligence)
- CALS – непрерывная информационная поддержка жизненного цикла изделия (Continuous Acquisition and Life-Cycle Support)
- ERP – планирование ресурсов предприятия (Enterprise Resource Planning)
- FMEA – анализ видов и последствий отказов (Failure Mode and Effects Analysis)
- KPI – ключевые показатели эффективности (Key Performance Indicators)
- LDAP – облегченный протокол доступа к каталогам (Lightweight Directory Access Protocol)
- MES – система управления производственными процессами (Manufacturing Execution System)
- MS SQL – сервер реляционных баз данных компании Microsoft (Microsoft Structured Query Language Server)
- OPC UA – открытая платформенная коммуникационная унифицированная архитектура (Open Platform Communications Unified Architecture)
- PDM – управление данными об изделии (Product Data Management)
- PLM – управление жизненным циклом изделия (Product Lifecycle Management)
- PPDI – индекс постпроизводственной дефектности пайки (Post-Production Defect Index)
- REST – передача состояния представления (Representational State Transfer)

RFID – радиочастотная идентификация (Radio-Frequency Identification)

SCADA – диспетчерское управление и сбор данных (Supervisory Control and Data Acquisition)

VBA – визуальный базовый язык для приложений (Visual Basic for Applications)

ВВЕДЕНИЕ

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 07.05.2024 «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., Ключкова В. В., Кудрявцевой С. С., Куликова В. Д., Петрова А. Н., Смирнова И. В., Татаринова В. М., Харитоновой 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**:

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

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

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

4) 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 постпроизводственного 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 стратегические ориентиры Национальной технологической инициативы, положения национальных проектов «Цифровая экономика Российской Федерации», 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 информационной системы управления производством (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.

1 АНАЛИЗ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИХ РАЗРАБОТОК ПО ЦИФРОВИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ И МОНИТОРИНГУ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ НАУКОЕМКИХ ИЗДЕЛИЙ

1.1 Обзор научных исследований в сфере цифрового управления качеством и информационного мониторинга производственных процессов

Развитие производственных процессов мониторинга качества в результате технологической революции заставляет производителей повышать эффективность управления производством. Решающим фактором повышения эффективности производства является цифровизация как самого процесса производства, так и постпроизводственного мониторинга качества изделий.

Цифровизация процессов мониторинга качества – это перевод всех процессов мониторинга качества как комплектующих и операций с ним на различных стадиях жизненного цикла изделий на цифровые технологии.

Рассмотрим развитие данного понятия в историческом контексте. В последние годы стремительное внедрение цифровой инженерии стало глобальным явлением, выходящим за рамки отрасли. Анализ динамики мирового рынка цифрового инжиниринга указывает на сохранение устойчивых темпов его масштабирования [2]. Внедрение передовых цифровых практик и моделей на основе цифровых двойников становится ключевым фактором технологического развития современных производственных систем. Затраты на цифровую трансформацию производственных процессов, составлявшие порядка 1,6 трлн долларов в 2022 году, к 2026 году прогнозируются на уровне 3,4 трлн долларов [79].

В отечественном промышленном секторе наблюдается переходный этап от базовой автоматизации к построению интегрированных цифровых систем [99]. При этом сохраняется структурный дисбаланс между растущими потребностями предприятий в сквозных цифровых инструментах и

фактическим уровнем зрелости предлагаемых платформенных решений. Несмотря на наличие базовой ИТ-инфраструктуры более чем у половины российских производств, последовательное внедрение цифровых технологий с постоянным отслеживанием результатов реализуют лишь 22% компаний, а четкие метрики цифровизации утверждены менее чем на 5% предприятий.

Существенный разрыв сохраняется и по этапам жизненного цикла продукции: цифровые инструменты традиционно сосредоточены в сферах проектирования и оперативного производства, тогда как постпроизводственный мониторинг и сервисный контроль остаются слабо интегрированными. Более 70% машиностроительных предприятий не располагают комплексными цифровыми решениями для фиксации отклонений на стадии эксплуатации, вследствие чего до 16% дефектов выявляется потребителями уже в гарантийный период. Преодоление этого разрыва требует построения цифрового контура управления качеством, сочетающего инструментарий бережливого производства [103], мониторинг жизненного цикла на базе CALS-технологий и предиктивный анализ эксплуатационной надежности [99].

Вопросы адаптации систем менеджмента качества к вызовам цифровой экономики, построения интеллектуальных распределенных СМК и внедрения сквозных платформенных решений рассмотрены в трудах Левченко Е. В. [69], Ковригина Е. А. [59], Иванов М. В. [54], Антиповой О. И. [1] и Савич Е. К. [113]. В то же время методический аппарат цифровизации частных процедур управления качеством, включая оценку зрелости поставщиков, метрологический контроль, стандартизацию и применение цифровых двойников технологических систем, обоснован в исследованиях Пантюхина О. В. [105], Ахматовой М.-С. С. [3], Иванова М. В. [54], Скобелева К. Д. [119] и Князева А. В. [58].

Теоретические основы интеграции CALS-концепции в процессы управления качеством наукоемкой продукции машиностроения, приборостроения и химических производств заложены в разработках

Глушко А. Н. [22], Дубровина А. В. [51], Медникова Д. А. [78], Судова Е. В. [127] или Норенкова И. П. [100], Порсева К. И. [107] и Охтилева П. А. [104]. Использование стандартизированных форматов описания производственных процессов является обязательным условием для сопряжения гетерогенных систем управления и построения многоуровневых классификаторов технологий [50]. Прикладные аспекты применения CALS/PLM-систем для моделирования жизненного цикла изделий, нормативного сопровождения и стандартизации цифровой трансформации производств раскрыты в диссертационных работах Самофеева И. А. [115], Кондусовой В. Б. [62], Князев А. В. [58], Бабенко Е. В. [4] и Скобелева К. Д. [119]. Определения цифровизации Российских авторов представлены в таблице 1.1.1.

Цифровизация процессов мониторинга качества затрагивает все аспекты производства, затрагивая не только процессы и производительность, но и людей. Харитонов Д. В. подчеркивает, что реализация постпроизводственного мониторинга на этапах эксплуатации и выходного контроля невозможна без интеграции механизмов параллельного инжиниринга в CALS-структуру предприятия [130]. Одним из ключевых подходов, обеспечивающих цифровую трансформацию управления качеством, является параллельный инжиниринг, получивший развитие в отечественной научной школе.

Сходные выводы представлены в работах Гродзенского С. Я., Овчинникова С. А., Калачевой Е. А. [47], а также Горина Д. С., Долженкова С. С. [23] и Струка П. В. [126], акцентирующих значение гибкой архитектуры цифрового производства для обеспечения непрерывного мониторинга качества.

В исследованиях Харитонova Д. В., Грошева А. В., Козлова А. В. и соавторов рассматривается интеграция интеллектуальных агентов человеко-машинного взаимодействия в процессы технического и постпроизводственного мониторинга, включая применение интеллектуальных технических агентов для анализа дефектов [60,129,132]. Классическое представление о CALS-технологиях как системе цифрового сопровождения

жизненного цикла изделия раскрыто в трудах Струк П.В., где подчеркивается их роль как сквозного механизма управления качеством, охватывающего в том числе постпроизводственные этапы [126].

Таблица 1.1.1 – Определения цифровизации современных авторов (систематизировано автором на основе [12,49,5,2,146,155,66,21])

№	Автор(ы)	Название источника	Определение цифровизации
1	Бородушко И. В.	Междисциплинарный подход в исследованиях процессов цифровизации	Цифровизация – это комплексный процесс преобразования социально-экономических систем с помощью ИКТ
2	Бабкин А. В., Буркальцева Д. Д. и др.	Формирование цифровой экономики в России: сущность, особенности, технико-технологические основы	Цифровизация рассматривается как внедрение цифровых технологий в управленческие и производственные процессы для роста эффективности
3	Афанасьев А. А	Цифровая трансформация: теория и практика	Цифровизация – это процесс интеграции цифровых технологий во все аспекты бизнеса, включая изменения бизнес-моделей
4	Гейсбауэр Р., Ведсо Й., Шрауф С.	Industrie 4.0: Построение цифрового предприятия (PwC)	Цифровизация – ключевой элемент индустрии 4.0, направленный на объединение физического и цифрового производства
5	Дмитриев О. В.	Стратегия развития контроллинга на предприятиях ОПК России	Цифровизация в ОПК – переход к цифровым методам учета и анализа, включая автоматизацию финансового и производственного мониторинга
6	Кагерманн Х., Вальстер В.	Итоговый отчет рабочей группы Industrie 4.0	Цифровизация – переход от аналоговых процессов к цифровым в рамках киберфизических систем
7	Куликова Д. С.	Цифровизация бизнес-моделей: глобальные тренды	Цифровизация – основа цифровой экономики, предполагающая использование ИКТ
8	Глухов В. В., Бабкин А. В.	Экономика и менеджмент в условиях цифровизации.	Цифровизация – вынужденное внедрение цифровых решений для обеспечения бизнес-процессов

Макроэкономические ориентиры и стратегические векторы структурной трансформации обрабатывающей промышленности задаются государственными программами и нормативными правовыми актами [110, 111]. Исследованию организационно-экономических механизмов адаптации предприятий к цифровым вызовам посвящены работы Садовской Т. Г. и соавторов [114], а также исследования Галимулиной Ф. Ф. в части укрепления технологического суверенитета [18].

Вопросы перехода к циркулярной экономике и гибким проектным структурам в наукоемких секторах детально раскрыты Галимулиной Ф. Ф., Шинкевич А. И. и Зарайченко И. А. [17, 19]. Вопросы влияния цифровой трансформации на технологическое развитие предприятий рассмотрены в работах Идрисова А. Э. и Шинкевича А. И. [136] Практические алгоритмы реализации теории ограничений и оптимизации производственных цепочек исследованы в трудах отечественных ученых [20, 137].

Тематика устойчивого развития производственных систем и применения специализированного инструментария качества (включая модифицированные диаграммы Парето) анализируется в публикациях Евлоевой М. В. и соавторов [52, 53]. Смежные аспекты модернизации технологического оборудования и повышения его эксплуатационной надежности в смежных отраслях рассмотрены Кибиревым Ю. В. [57] и Сахаповой Т. С. [116].

Существенный вклад в формирование методического базиса стандартизации и классификации технологических решений внесли Скобелев Д. О., Гусева Т. В. и Ежова О. С. [120, 121]. Особенности аудита СМК с применением компьютерных технологий и развитие риск-ориентированного мышления отражены в работах Казуровой Д. В. [56] и Скрипко Л. Е. [125]. Отраслевая специфика обеспечения эксплуатационной эффективности сложной бытовой техники раскрыта в диссертации Тихоновой О. Б. [128], а комплексная оценка показателей результативности СМК – в разработках Шинкевича А. И. [140].

Концептуальные основы четвертой промышленной революции заложены в фундаментальном труде К. Шваба [172] и исследованиях Х. Кагерманна [154]. Переход от традиционных систем всеобщего менеджмента качества к человекоцентричной парадигме и Индустрии 5.0 обоснован в работах С. Нахаванди [163] и П. Парвиайнена [166].

Специфика концепции Quality 4.0 в обрабатывающих отраслях анализируется А. Хассуном и Дж. Гарсиа-Гарсиа [145, 149]. В свою очередь, ключевые архитектурные принципы и методологию бездефектного производства (Zero Defect Manufacturing – ZDM) сформировал Д. Кирицис совместно с Ф. Псаромматисом [167, 168], определив барьеры и условия перехода к устойчивым самовосстанавливающимся системам [169, 170].

Зарубежный опыт внедрения предиктивной аналитики и промышленного интернета вещей обобщен Д. Кальветти [143]. Практические подходы к снижению производственных затрат и оптимизации металлообработки отражены в работах Д. Нгуена [164].

Вопросы непрерывного мониторинга физических параметров соединений с помощью датчиков сдвиговых усилий и нейросетевых моделей ультразвуковой сварки исследованы Э. Хелферсом [151] и А. Гестером [147]. Схожие решения для процессов дуговой и лазерной аддитивной обработки металлов представлены Ю. Го [148], Т. Герцогом [152] и Ф. Олаое [165].

Методики контроля геометрических характеристик деталей в процессах формоизменения предложены Х. Хэ [150], а применение машинного обучения для синтеза функциональных полимерных материалов обосновано И. Малашиным [161].

Особое внимание в прикладных исследованиях уделяется предиктивному анализу узлов трения и раннему обнаружению люфтов механических приводов станков с ЧПУ, что отражено в трудах П. Кунду и Дж. Тако [157, 174]. Создание цифровых двойников зданий, технологических комплексов и предиктивный мониторинг инфраструктуры развиваются в разработках К. Лу [159, 160] и Дж. Мерино [162]. Концепция виртуальной

метрологии для интегральной оценки качества изделий на базе сенсорных данных представлена П.-А. Дрейфусом [144].

В работах Козловой О. А., Харитоновой А. О. [61], а также Харитоновой Д. В. и Грошева А. В. [131] дополнительно акцентируется роль электронного документооборота, маршрутизации технологических процессов и встроенных модулей анализа качества для выявления как текущих, так и отложенных дефектов. Как обосновано в фундаментальных трудах Болотина В. В. [10] и Логаниной В. И. с соавторами [71], методы прикладной математики и вероятностного моделирования выступают базисом цифрового мониторинга качества, обеспечивая точность прогнозов и оценку риска возникновения дефектов на этапах жизненного цикла изделий.

В таблице 1.1.2 представлены систематизированы международные и национальные стандарты, которые непосредственно устанавливают требования, процедуры и организационные принципы постпроизводственного мониторинга качества. Критерием включения является прямое регулирование процессов сбора, анализа и использования эксплуатационных данных: рекламаций, отказов, инцидентов, параметров состояния изделий и оборудования, а также требований к цифровым двойникам и мониторингу надежности на постпроизводственной стадии жизненного цикла.

Представленные стандарты охватывают несколько ключевых направлений. Во-первых, они задают понятийный аппарат и классификацию постпроизводственных процессов, включая определения дефектов, отказов, инцидентов и рекламаций, что обеспечивает единство терминологии при построении систем мониторинга [25, 26, 32].

Во-вторых, они регламентируют организационные процедуры сбора и обработки эксплуатационных данных, устанавливая каналы поступления информации от потребителей и сервисных служб, порядок регистрации и учета отказов, а также требования к срокам и формам отчетности [30, 39, 44].

В-третьих, они определяют методические подходы к оценке рисков на постпроизводственной стадии, включая идентификацию опасных факторов,

количественную оценку вероятности возникновения несоответствий и анализ их последствий [29, 37, 38].

Таблица 1.1.2 – Нормативно-регламентные стандарты постпроизводственного мониторинга качества изделий (составлено автором) [30, 34, 36, 38, 39, 40, 44, 46])

№	Стандарт	Краткое содержание (аспекты, касающиеся постпроизводственного мониторинга)
1	ГОСТ Р 53563–2009 «Контроль состояния и диагностика машин. Мониторинг состояния оборудования опасных производств. Порядок организации»	Устанавливает организационно-технические принципы построения систем мониторинга оборудования опасных производств: категории опасности, выбор объектов и параметров контроля, прогнозирование ресурса.
2	ГОСТ Р 56606–2015 «Контроль технического состояния и функционирования медицинских изделий. Основные положения»	Устанавливает требования к контролю технического состояния и функционирования медицинских изделий в процессе эксплуатации.
3	ГОСТ Р 57700.37–2021 «Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения»	Регламентирует создание цифровых двойников, обеспечивающих синхронизацию цифровой модели с физическим изделием на этапах производства и эксплуатации.
4	ГОСТ Р 59768–2021 «Изделия медицинские. Менеджмент риска. Оценка риска на постпроизводственной стадии жизненного цикла продукции»	Регламентирует оценку риска на постпроизводственной стадии: сбор и анализ эксплуатационных данных, рассмотрение претензий и отчетов об инцидентах.
5	ГОСТ Р 70467–2022 «Изделия медицинские. Постпроизводственный надзор субъектами обращения»	Регламентирует постпроизводственный надзор, каналы сбора рекламаций от потребителей и методику анализа эксплуатационных отказов.
6	ГОСТ Р 71487.11–2025 «Цифровая промышленность. Качество промышленных данных. Часть 66. Управление качеством данных. Показатели оценки для обработки данных в производственных операциях»	Определяет показатели оценки зрелости процессов управления качеством промышленных данных, в том числе в обеспечении качества и управлении обслуживанием.
7	ГОСТ РВ 0015-002–2020 «СРПП ВТ. Системы менеджмента качества»	Расширяет требования СМК для предприятий ОПК, устанавливает регламент мониторинга эксплуатационной надежности, гарантийного надзора и рекламационной работы.
8	ГОСТ Р ИСО 10004–2020 «Менеджмент качества. Удовлетворенность потребителей. Руководящие указания по мониторингу и измерению»	Регламентирует методы постпроизводственного сбора информации, статистической обработки рекламаций и мониторинга ожиданий потребителей.

Особое место в данной группе занимают стандарты, регулирующие мониторинг технического состояния оборудования в процессе эксплуатации.

Они устанавливают категории опасности производственных объектов, принципы выбора контролируемых параметров, периодичность измерений и методы прогнозирования остаточного ресурса. Эти стандарты имеют критическое значение для отраслей, где отказ оборудования может привести к аварийным ситуациям и значительному ущербу.

Отдельно выделены стандарты, регламентирующие создание и функционирование цифровых двойников изделий. Они обеспечивают синхронизацию цифровой модели с физическим объектом на протяжении всего жизненного цикла, что позволяет в режиме реального времени отслеживать изменение характеристик изделия, выявлять отклонения от проектных параметров и прогнозировать наступление предельных состояний. Цифровые двойники выступают связующим звеном между этапами проектирования, производства и эксплуатации, обеспечивая замкнутость цифрового контура управления качеством.

Кроме того, в таблице представлены стандарты, устанавливающие требования к управлению качеством промышленных данных, включая показатели оценки зрелости процессов обработки данных, методы обеспечения их полноты, достоверности и своевременности. Эти стандарты приобретают особую актуальность в условиях цифровой трансформации, когда объем и разнородность эксплуатационной информации требуют применения специализированных инструментов управления.

Наконец, отдельные стандарты данной группы ориентированы на специфические отрасли – медицинскую промышленность и оборонно-промышленный комплекс. Они учитывают повышенные требования к надежности и безопасности изделий, устанавливая дополнительные процедуры надзора, гарантийного обслуживания и рекламационной работы.

Таким образом, стандарты, включенные в таблицу 1.1.2, образуют нормативное ядро постпроизводственного мониторинга, непосредственно определяющее его цели, содержание, процедуры и критерии результативности.

Представленная в таблице 1.1.3 совокупность стандартов формирует методико-инструментальный базис постпроизводственного мониторинга, обеспечивая его научную обоснованность, статистическую достоверность и информационно-технологическую реализуемость. Данные нормативные документы не устанавливают непосредственно требований к организации мониторинга, однако создают концептуальные и прикладные предпосылки для его функционирования в составе интегрированной системы управления качеством.

Содержательно стандарты охватывают ряд взаимосвязанных методологических направлений. К первому относится риск-ориентированная методология, задающая процедуры идентификации, анализа и количественной оценки вероятности возникновения несоответствий, что формирует основу для прогностических моделей предиктивной аналитики. Ко второму – статистические методы контроля и анализа процессов, обеспечивающие математический аппарат выявления технологической нестабильности и скрытых отклонений на ранних стадиях. К третьему – принципы информационной интеграции производственных систем, регламентирующие сквозной обмен данными и прослеживаемость характеристик изделия на всех стадиях жизненного цикла. К четвертому – требования к системам менеджмента качества, закрепляющие мониторинг удовлетворенности потребителей и анализ несоответствий в качестве обязательных элементов организационного управления. К пятому – стандарты представления данных об изделии, обеспечивающие платформенную независимость и семантическую совместимость информации в гетерогенной информационной среде.

В своей совокупности указанные стандарты образуют инструментальную среду, в рамках которой постпроизводственный мониторинг приобретает свойства воспроизводимости, измеримости и системной интеграции, что позволяет рассматривать его не как локальную процедуру, а как устойчивый функциональный элемент цифрового контура

управления качеством.

Таблица 1.1.3 – Нормативно-регламентные стандарты постпроизводственного мониторинга качества изделий (составлено автором) [27,28,29,31,37, 41, 42, 43, 45]

№	Стандарт	Краткое содержание (аспекты, касающиеся постпроизводственного мониторинга)
1	ГОСТ Р 51814.2–2001 «Системы качества в автомобилестроении. Метод анализа видов и последствий потенциальных дефектов»	Регламентирует методику анализ видов и последствий отказов (FMEA), использующую эксплуатационные данные о дефектах и рекламациях для динамического пересчета производственных рисков.
2	ГОСТ Р 54136–2010 «Системы промышленной автоматизации и интеграция. Руководство по применению стандартов, относящихся к процессам создания и управления сложными производственными структурами»	Определяет принципы интеграции информационных систем предприятия при сквозном контроле и прослеживаемости характеристик изделий.
3	ГОСТ Р 58771–2019 «Менеджмент риска. Технологии оценки риска»	Определяет методический инструментарий идентификации, анализа и количественной оценки рисков возникновения несоответствий.
4	ГОСТ Р 59793–2021 «Комплекс стандартов на автоматизированные системы. Автоматизированные системы. Стадии создания»	Регламентирует стадии жизненного цикла автоматизированных систем, включая ввод в действие, сопровождение и сбор эксплуатационных замечаний.
5	ГОСТ Р ИСО 10303-1–2022 «Системы автоматизации производства и их интеграция. Представление данных об изделии (STEP)»	Фундаментальный базис CALS: задает стандарты платформенно-независимого описания и обмена данными об изделии на всех стадиях его жизненного цикла.
6	ГОСТ Р ИСО 7870-2–2015 «Статистические методы. Контрольные карты Шухарта»	Описывает математический аппарат контрольных карт для выявления технологической нестабильности и предупреждения скрытого брака на ранних стадиях.
7	ГОСТ Р ИСО 9001–2015 «Системы менеджмента качества. Требования»	Национальный базовый стандарт СМК. Вводит обязательный сбор рекламаций, анализ удовлетворенности потребителей и контроль несоответствий при эксплуатации.
8	ГОСТ Р ИСО 9004–2019 «Менеджмент качества. Качество организации. Руководство по достижению устойчивого успеха организации»	Содержит руководящие указания по мониторингу среды, непрерывной оценке процессов и жизненного цикла для обеспечения долгосрочной результативности.
8	ГОСТ Р 56542–2019 «Контроль неразрушающий. Классификация видов и методов»	Классифицирует методы неразрушающего контроля, применимые для выходного приемочного контроля деталей и эксплуатационной дефектоскопии.

Полный перечень стандартов представлен в Приложении Б.

Представленная систематизация наглядно подтверждает выраженную неравномерность отечественной нормативной базы в отношении постпроизводственного этапа. Формально большинство приведенных стандартов имеют статус действующих и охватывают практически все стадии технологической подготовки и контроля. Однако при детальном рассмотрении их содержательной части обнаруживается серьезный методологический разрыв. В машиностроении до сих пор отсутствует единый нормативный документ, регламентирующий сквозной мониторинг дефектов от сборочного цеха до реальной эксплуатации изделий.

Сам термин «постпроизводственный мониторинг» на нормативном уровне закреплён исключительно в сфере обращения медицинских изделий. В частности, стандарты ГОСТ Р 59768–2021 и ГОСТ Р 70467–2022 детально описывают сбор эксплуатационных данных, процедуры расследования инцидентов и порядок учета претензий. Для продукции общего машиностроения подобные системные алгоритмы нормативно не прописаны. Предприятия вынуждены ориентироваться на разрозненные требования стандартов систем менеджмента качества либо регламенты технической диагностики опасных объектов.

Стандарты ГОСТ 3.1109–82 и ГОСТ 15467–79 закрепляют понятийный аппарат и классификацию брака, задают терминологический фундамент. Вместе с тем эти документы создавались в рамках дискретного подхода к контролю. Они фиксируют факт брака по свершившемуся факту и не содержат механизмов сквозной идентификации причинно-следственных связей отклонений в цифровой среде. Применительно к металлообработке действует ГОСТ 21014–2022, который каталогизирует дефекты поверхности, стали и сплавов. Он полезен для верификации визуального и инструментального контроля, но носит описательный характер. Стандарт не связывает микродефекты заготовок с рисками деградации соединений под эксплуатационной нагрузкой.

Стандарты дефектоскопии и статистического регулирования решают локальные задачи. Так, ГОСТ Р 56542–2019 классифицирует методы неразрушающего контроля, широко применяемые на приемочном контроле узлов. ГОСТ Р ИСО 7870-2–2015 дает математический аппарат карт Шухарта для предупреждения дрейфа технологического процесса. Однако на практике эти инструменты функционируют обособленно. Данные неразрушающего контроля оседают в цеховых журналах или изолированных базах данных контрольно-измерительных приборов. Они практически не участвуют в динамическом пересчете эксплуатационной надежности узлов.

В блоке стандартов цифровизации и сквозной интеграции ключевую роль играют следующие документы:

- комплекс стандартов ГОСТ Р ИСО 10303–1–2022 (STEP), ГОСТ Р 54136–2010 и ГОСТ Р 57700.37–2021, которые формируют фундамент для сквозной интеграции инженерных систем (CAD/CAM/PLM) и корпоративного контура управления (ERP/MES);
- стандарт ГОСТ Р 57700.37–2021, регламентирующий общие положения создания цифровых двойников изделий;
- новый ГОСТ Р 71487.11–2025, устанавливающий метрики оценки зрелости процессов управления качеством промышленных данных;
- серия стандартов по бережливому производству (ГОСТ Р 56020–2020, ГОСТ Р 56407–2023), ориентирующая производство на устранение скрытых потерь и предотвращение повторных дефектов.

Несмотря на наличие стандарта по цифровым двойникам ГОСТ Р 57700.37–2021, отечественные заводы используют такие модели преимущественно на этапах проектирования. Постпроизводственная стадия остается вне контура моделирования.

Особого внимания заслуживает ГОСТ Р 71487.11–2025. Он напрямую увязывает качество данных в производственных операциях с процессами обслуживания и ремонтов. Это принципиальный момент. Без верифицированных первичных данных с цеховых постов неразрушающего

контроля невозможно построить адекватную прогнозную модель.

Отраслевой автомобильный стандарт ГОСТ Р 51814.2–2001 формализует методику FMEA, предписывая пересчитывать потенциальные риски дефектов на основе рекламаций и сервисной статистики. Но стандарт не дает цифрового механизма для автоматического выполнения этой процедуры. На большинстве машиностроительных производств FMEA-анализ ведется вручную экспертными группами с огромными временными задержками.

Методология управления рисками ГОСТ Р 58771–2019 задает математическую базу идентификации несоответствий, а ГОСТ Р ИСО 10004–2020 определяет общие принципы сбора информации от потребителей. Проблема заключается в отсутствии непрерывного контура. Рекламационная информация поступает в службы сервиса с задержкой в несколько месяцев и практически не используется технологами для оперативной корректировки параметров сборки или пайки.

Применение ГОСТ Р 53563–2009 ограничено мониторингом состояния оборудования опасных производств. Стандарт не решает задачу прослеживаемости качества серийной продукции массового выпуска. Что касается ГОСТ Р 57315–2016, то его положения по открытым инновациям носят общеорганизационный характер и используются лишь как вспомогательный ориентир при декомпозиции и проектировании новых технологических цепочек.

Методические основы практической реализации инструментов бережливого производства, классификации видов брака и формализации технической документации в CALS-структурах дополнительно регламентируются положениями ГОСТ 3.1109–82 [24], ГОСТ Р 56407–2023 [33], ГОСТ Р 57315–2016 [35] и рекомендациями Малькова А. А. [74].

Сложившаяся нормативная картина показывает явное противоречие. Нормативная база регламентирует структуру данных об изделии (STEP-стандарты), порядок неразрушающего контроля и алгоритмы расчета рисков. При этом полностью отсутствует регламент, описывающий замкнутый

цифровой цикл контроля изделий металлообработки. Данные гарантийного ремонта и постпроизводственного надзора существуют изолированно от цеховых технологических параметров. Устранение этого барьера требует научно-методической разработки алгоритмов сквозной интеграции, связывающих цеховой цифровой след детали с ее поведением в гарантийный период.

На основе исследования научной литературы и действующих стандартов нами предлагается концепция постпроизводственного мониторинга дефектов в рамках CALS-технологий представлена на рисунке 1.1.1.

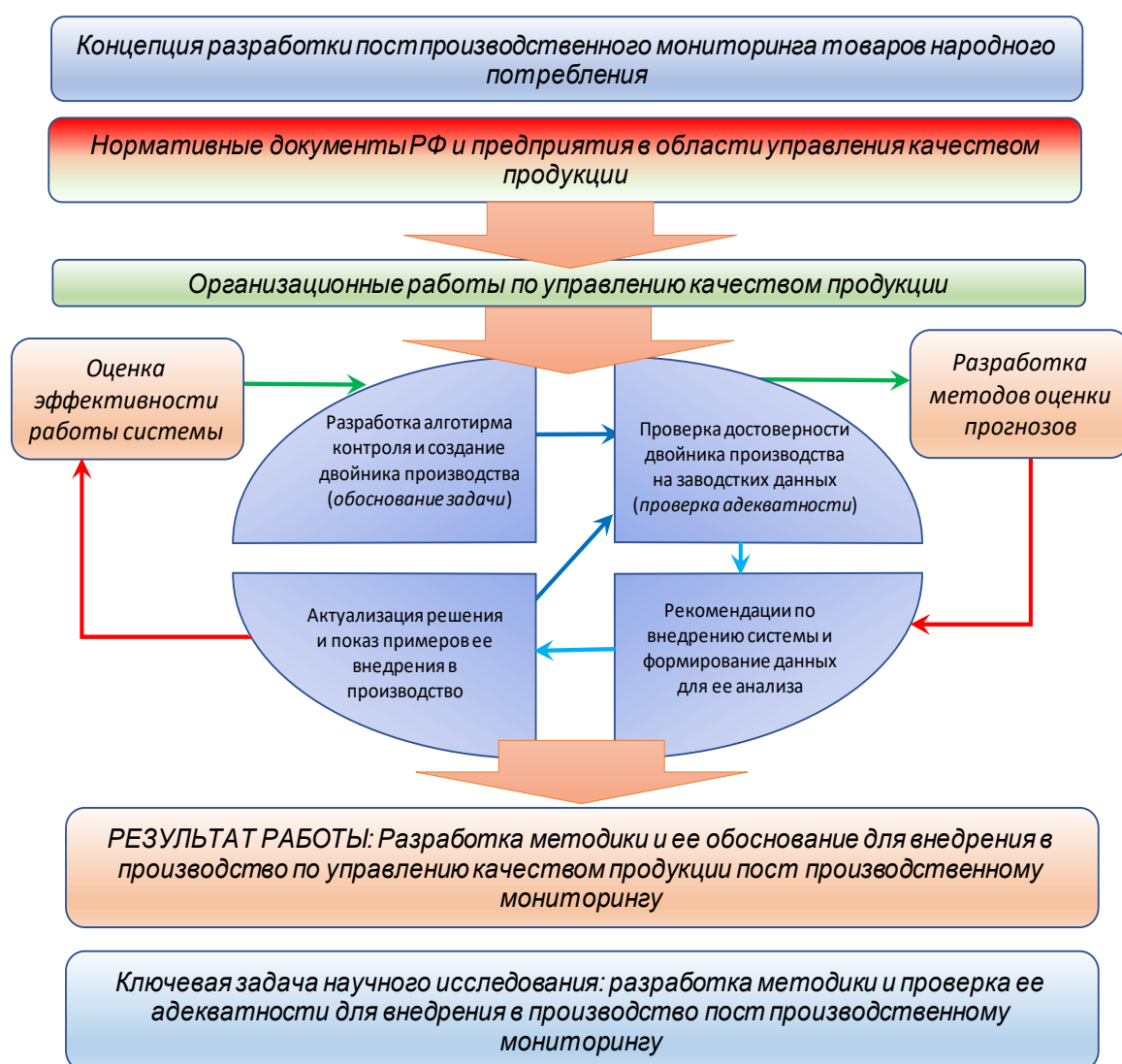


Рисунок 1.1.1 – Модель организации постпроизводственного мониторинга дефектов на основе CALS-технологий с непрерывным цифровым контуром контроля (составлено автором)

Представленная схема формализует методологическую логику построения модели организации постпроизводственного мониторинга дефектов, реализуемой на основе CALS-технологий и ориентированной на формирование непрерывного цифрового контура контроля. Схема отражает последовательную декомпозицию исследовательского процесса – от концептуального замысла через итерационную верификацию к практико-ориентированному результату – и включает несколько функционально обособленных уровней.

Верхний уровень образует нормативно-концептуальный базис модели. Концепция разработки постпроизводственного мониторинга задаёт целевую установку и содержательные границы исследования, тогда как совокупность нормативных документов РФ и предприятия в области управления качеством продукции формирует правовое и методическое поле, в рамках которого реализуется поставленная задача. Взаимодействие этих двух элементов создаёт предпосылки для перехода к организационным работам по управлению качеством продукции, на котором происходит операционализация исследовательских задач и определение прикладных направлений деятельности.

Центральный блок схемы представляет собой непрерывный цифровой контур, включающий четыре последовательно связанных этапа. Разработка алгоритма контроля и создание цифрового двойника производства обеспечивают обоснование задачи и формирование инструментальной базы мониторинга. Проверка достоверности цифрового двойника на заводских данных выполняет функцию верификации – подтверждения адекватности модели реальным производственным условиям. На основе результатов верификации формируются рекомендации по внедрению системы и определяется состав данных, необходимых для её аналитического обеспечения. Завершающий этап – актуализация решения и демонстрация примеров его внедрения – замыкает контур, обеспечивая непрерывность цикла и создавая предпосылки для последующей оценки результативности и

перехода к новому итерационному уточнению.

Периферийные блоки отражают две сквозные функции, сопровождающие процесс организации мониторинга на всём его протяжении. Оценка эффективности работы системы обеспечивает механизм обратной связи и корректировки промежуточных решений, а разработка методов оценки прогнозов задаёт критериальную базу достоверности и обоснованности прогнозных моделей. Обе функции связаны с центральным контуром двусторонними связями, что подчёркивает их интегральный характер по отношению к основному циклу.

Нижний уровень фиксирует итоговый результат. Им является разработка методики и её обоснование для внедрения в производство в части постпроизводственного мониторинга дефектов. Ключевая задача научного исследования формулируется как разработка методики и проверка её адекватности для последующего внедрения.

Таким образом, схема отражает полный цикл научно-практического исследования – от концептуальной постановки через итерационную разработку и верификацию к обоснованному практическому результату, готовому к внедрению в производственную практику в рамках непрерывного цифрового контура контроля.

В контексте настоящего исследования нами выявлено, что, постпроизводственный мониторинг следует понимать как систематизированную цифровую деятельность по выявлению, анализу и классификации дефектов, возникающих в производственном процессе, но проявляющихся или уточняемых после завершения операции обработки изделия, то есть на переходе к следующим стадиям жизненного цикла продукта (монтаж, сборка, тестирование, эксплуатация).

Современное управление качеством продукции на производственных предприятиях требует интеграции информационных систем, позволяющих собирать, анализировать и визуализировать данные о дефектах в реальном времени, что обеспечивает оперативное принятие решений и сокращает производственные потери [85].

Определено, что, постпроизводственный мониторинг трактуется как ключевой элемент цифровой трансформации управления качеством, направленный на:

- предиктивную аналитику отказов;
- прозрачность производственных процессов;
- повышение надежности и конкурентоспособности продукции машиностроения.

Таким образом, нами сделан вывод, что, CALS-подход можно рассматривать как основу построения непрерывной цифровой цепочки мониторинга, охватывающей как проектную документацию, так и результаты постпроизводственного мониторинга.

Представим обзор промышленных компаний России на предмет цифровизации производственных процессов и мониторинга качества (таблица 1.1.4).

Таблица 1.1.4 – Практические примеры внедрения цифровых решений для мониторинга качества в российской промышленности (систематизировано автором)

Год	Предприятие	Характеристика
2025	ПАО «КАМАЗ»	Масштабирование отечественной MES-системы и интеграция контура АСУ ТП для сквозного контроля технологических операций и цифровой прослеживаемости качества узлов
	ПАО «Северсталь»	Промышленный запуск собственной импортозамещенной MES-системы и внедрение роботизированных комплексов с цифровой аттестацией качества металлопродукции на ЧерМК
	Госкорпорация «Росатом»	Ввод в эксплуатацию отраслевой платформы цифровых двойников технологических процессов и предиктивного анализа оборудования на предприятиях машиностроительного профиля
2024	АО «РТ-Техприемка»	Представление первого российского умного комплекса предиктивной диагностики оборудования для производственных процессов машиностроительного предприятия, металлургии и ТЭК
	АО «Технониколь»	Применение AR-очков для выявления сбоев в оборудовании
	ПАО «Северсталь», ПАО «ГМК «Норникель»	Реализация 25 проектов импортозамещения промышленного ПО

По состоянию на октябрь 2025 года цифровая зрелость российских промышленных предприятий характеризуется пока хаотичным использованием отдельных цифровых решений, при этом для 52% компаний внедрение ИТ-инструментов не является приоритетом. Анализ цифровой зрелости предприятий РФ представлен на рисунке 1.1.2.

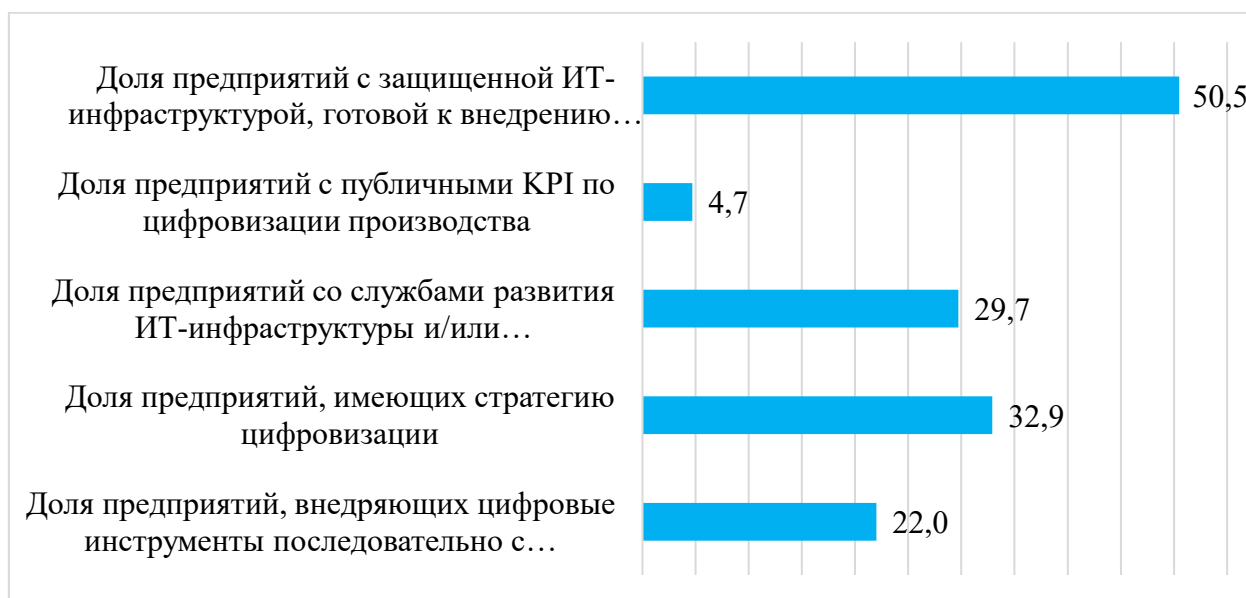


Рисунок 1.1.2 – Цифровая зрелость предприятий в части мониторинга производственных процессов и управления качеством (составлено автором)

Здесь актуально сказать о цифровой «безлюдности» – цифровые платформы несут потенциальную возможность полной автоматизации основных производственных процессов мониторинга качества [2]. Современное машиностроительное предприятие представляет собой сложную функциональную структуру, цель которой – упорядочить разнообразие отдельных процессов с помощью информационных технологий [27]. В таблице 1.1.5 представлены данные внедрения цифровизации на промышленных предприятиях РФ.

Таблица 1.1.5 – Удельный вес промышленных предприятий, внедряющих цифровизацию процессов мониторинга качества в производство по областям деятельности [89]

Показатель	Значение, %
Доля предприятий, внедряющих инструменты цифровизации последовательно, с отслеживанием результатов	22
Доля компаний, имеющих стратегию цифровизации	32,9
Доля компаний, где есть ответственные за цифровизацию процессов мониторинга качества /развитие ИТ-инфраструктуры	29,7
Доля компаний с четко обозначенными и транслируемыми метриками цифровизации на информационных ресурсах	4,7
Доля компаний, обладающих базой в виде защищенной ИТ-архитектуры для внедрения CALS-технологий	Более 50

Таким образом, цифровая среда производственных процессов машиностроительного предприятия должна быть организована таким образом, чтобы обеспечивать непрерывность информационных потоков, оптимизацию материальной логистики, а также повышать интеллектуальные возможности и прогнозируемость управления на всех этапах жизненного цикла изделий (таблица 1.1.6).

Цифровизация процессов мониторинга качества позволяет кардинально изменить конфигурацию процесса; например, объединение автоматизированного принятия решений с анализом показателей мониторинга процессов может устранить множество дефектов.

Цифровизация процессов мониторинга качества позволяет предприятиям иметь возможность быстро перестраивать технологические процессы в области управления качеством.

На основании результатов анализа подходов к управлению качеством [87] автором предлагается авторское определение цифровизации процессов мониторинга качества: Цифровизация процессов мониторинга качества – это процесс интеграции цифровых технологий в деятельность по управлению качеством продукции на всех стадиях производственного процесса, включая автоматизацию, улучшение производственных процессов мониторинга

дефектов производственных процессов и потерь и создание моделей управления качеством на различных стадиях цикла наукоемких изделий.

Таблица 1.1.6 – Принципы и цели процессов мониторинга качества производственных процессов машиностроительного предприятия [2]

№	Принцип	Описание
1	Информационная безразрывность	Обеспечение непрерывности информационных потоков на всех этапах производственного цикла выпуска продукции
2	Безлюдность	Полная автоматизация бизнес-процессов на всех уровнях, исключая участие человека в рутинных операциях
3	Гармоничность решений	Системная взаимосвязанность решений, интегрирующих все процессы и направления деятельности с помощью цифровых технологий, исключая разрывы в технологической цепи
4	Ориентация на лучшие практики	Использование эталонов, передовых мировых практик и референтных моделей для достижения оптимальных результатов
5	Интеллектуализация принятия решений	Внедрение кибер-интеллекта и предсказательной аналитики для эффективного управления знаниями и принятия решений
6	Технологическая дисциплина	Применение цифровых инструментов и нормативных регламентов для соблюдения технологических стандартов
7	Гарантированное качество	Обеспечение безошибочности конечного результата, включая конструкторскую и технологическую документацию (КД/ТД)
8	Сокращение сроков	Ускорение циклов ТПП и сокращение времени вывода новых продуктов на рынок
9	Открытость цифровой среды	Обеспечение возможности постоянных улучшений и адаптации функциональных модулей в зависимости от особенностей продукции и производства

Проведенное исследование опирается на системное объединение классических и современных подходов к управлению качеством. В его основе – концепции Э. Деминга, Дж. Джурана, К. Исикавы, Ф. Кросби и Г. Тагути, которые заложили фундамент управления качеством как многоуровневой и интегрированной системы, включающей статистические методы, непрерывное улучшение и вовлеченность персонала [50, 99, 101, 158].

В современных исследованиях показана органическая преемственность цикла Деминга (PDCA) и спирали качества Джурана при построении адаптивных сетцентрических систем управления качеством на базе цифровых платформ [1, 65, 72, 73, 117]. Анализ действующих стандартов

подтвердил отсутствие в машиностроении единых нормативных требований к постпроизводственному мониторингу, что делает необходимым создание замкнутого информационного контура на основе CALS-технологий, связывающего параметры сборочных операций, данные неразрушающего контроля и сервисную статистику.

Таким образом, научная основа работы формируется на стыке классических принципов управления качеством и современных цифровых инструментов, что позволяет выстраивать непрерывную, адаптивную и экономически обоснованную систему мониторинга дефектов в машиностроении.

1.2 Применение CALS-технологий и методов стандартизации в системе мониторинга дефектов производственных процессов

Рассмотрим историческое развитие процессов мониторинга качества продукции. Именно благодаря последовательному осуществлению идей Э. Деминга, Дж. Джурана и К. Исикавы, а также других ведущих специалистов в области управления качеством сформировался фундамент современных систем обеспечения надежности [141, 173]. К. Исикава ввел в практику "круг качества", предложил диаграмму "причина – следствие" (диаграмму Исикавы), а также разработал концепцию управления качеством с участием всего коллектива предприятия. Дж. Джуран обосновал принцип "триады качества". Вклад в развитие системы обеспечения качества внес и Г. Месинг, предложивший рассматривать "справочник по качеству" как основной документ предприятия [7, 8].

Т. Конти исследовал наиболее известные модели качества: от модели ИСО, на которой базируется система сертификации, до модели всеобщего управления на основе качества (TQM), и представил примеры их практического применения [8, 171]. Существенный вклад принадлежит и Г. Тагути, развившему идеи математической статистики применительно к

планированию экспериментов и мониторингу качества [63].

Невозможно говорить о концепции Индустрии 4.0 – «четвертой промышленной революции», основанной на цифровизации, автоматизации, использовании больших данных, интернета вещей (IoT) и интеллектуальных систем управления производством – не упомянув компанию Toyota. Этому японскому автопроизводителю приписывают рождение Toyota Production System (TPS).

Целью создания TPS, созданной С. Тойодой, было устранение отходов в производственном процессе. В настоящее время TPS известна как фундаментальная методология процессов мониторинга качества продукции.

В сегодняшнем быстро меняющемся технологическом ландшафте Применение CALS-технологий и методов стандартизации в системе мониторинга дефектов производственных процессов стала ключевым фактором трансформации различных отраслей. CALS-технологии позволяют создавать цифровые модели изделий и процессов, стандартизировать сбор и анализ данных о дефектах, а также интегрировать информацию между подразделениями предприятия» [83].

CALS-технологии (Continuous Acquisition and Life-cycle Support) – это комплекс цифровых методов и стандартов, обеспечивающих информационную поддержку изделия на всех этапах его жизненного цикла – от проектирования до утилизации [100, 108, 127].

Они направлены на интеграцию всех участников производственного процесса в едином цифровом пространстве, что повышает качество, сокращает сроки и снижает издержки производства. На основании исследования нами выявлена связь CALS-технологий и системы мониторинга качества и передачи этой информации в базу данных представлена на рисунке 1.2.1.

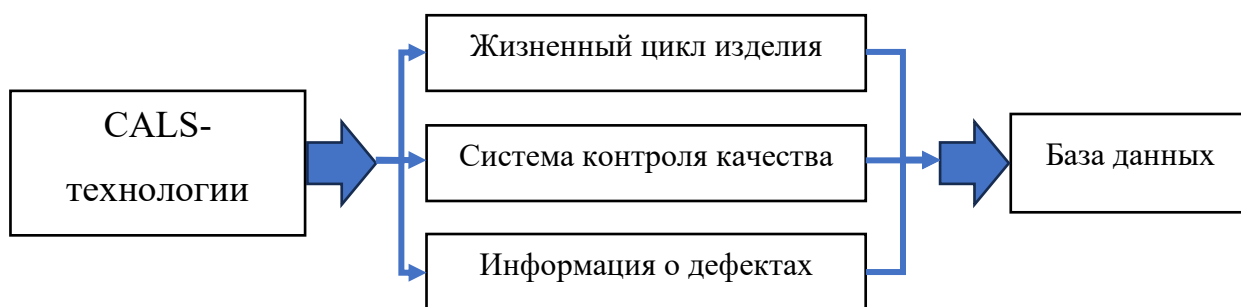


Рисунок 1.2.1 – Связь CALS-технологий и системы мониторинга качества и передачи этой информации в базу данных (составлено автором)

Использование CALS-технологий в мониторинге дефектов обеспечивает унификацию процессов контроля, ускоряет выявление отклонений и позволяет формировать цифровой след изделий для последующего анализа [138].

Традиционные методы мониторинга дефектов производственных процессов и потерь в машиностроении в значительной степени опирались на ручные процессы, которые отнимали много времени и были подвержены ошибкам. Инженеры создавали механические компоненты и системы, используя бумажные чертежи и ручные расчеты. Однако эти методы имели ограничения с точки зрения точности, эффективности и масштабируемости. Чтобы преодолеть эти проблемы, машиностроение осознало необходимость применения CALS-технологий в мониторинге дефектов производственных процессов и потерь.

Рассмотрим подробнее современные технологические подходы к постпроизводственному контролю. Одним из основных элементов CALS-технологий в мониторинге дефектов производственных процессов стал цифровой паспорт изделия. Цифровой паспорт изделия представляет собой структурированное электронное досье, содержащее чертежи, 3D-модели, сведения о материалах, допусках, режимах обработки (усилия, температура, скорость резания), а также результаты промежуточного и итогового мониторинга, данные об операторах и оборудовании [63, 90, 158]. В соответствии с Постановлением Правительства Российской Федерации от 29

июня 2024 г. № 896 «Об утверждении Правил формирования и использования цифровых паспортов промышленной продукции», цифровой паспорт закреплен как официальный инструмент управления качеством и стандартизации промышленной продукции. На АО «ОДК-Пермские моторы» цифровой паспорт формируется в единой информационной среде, где каждый обрабатываемый элемент газотурбинного двигателя сопровождается полным набором цифровых данных: параметры фрезеровки, отклонения по геометрии, результаты вихретоковой и УЗ-мониторинга. Все данные автоматически загружаются в PLM-систему Siemens Teamcenter.

На ПАО «КАМАЗ» паспорт внедрен для сварных рам: каждый шов отслеживается с использованием RFID-маркеров и данных с датчиков сварочных автоматов. Информация автоматически передается в ERP-систему SAP, где регистрируются все несоответствия и связываются с конкретными исполнителями и оборудованием.

С помощью технологий Big Data осуществляется предобработка, агрегация и очистка информации. Далее применяются алгоритмы статистического анализа (кластеризация, корреляционный анализ, PCA) и методы машинного обучения – в частности, градиентный бустинг, решающие деревья, нейросети – для выявления скрытых закономерностей и аномалий.

Например, на ПАО «Туполев» реализована цифровая CALS-платформа, в которой зафиксированы дефекты, возникающие при испытаниях и доработке летательных аппаратов. Все сведения синхронизируются в единой базе и анализируются с помощью модуля цифрового технического сопровождения.

Центральным элементом платформы является единое хранилище инженерных, производственных и эксплуатационных данных, синхронизированное с PLM-средой (Siemens Teamcenter), ERP и системами технического сопровождения.

Рассмотрим основное применяемое ПО и его значение в постпроизводственном мониторинге. Программное обеспечение САМ дополняет САПР, автоматизируя производственные процессы мониторинга

качества на различных стадиях цикла производства [97,175].

Программное обеспечение FEA позволяет создавать виртуальные копии компонентов и на основе законов физики прогнозировать их структурную целостность, распределение напряжений и эксплуатационные характеристики [14, 15]. PLM-системы обеспечивают оптимизацию процессов разработки за счет интеграции этапов проектирования, производства и технического обслуживания изделий [11, 142]. Технологии IoT и IIoT, основанные на подключении физических устройств для сбора и обмена данными, играют ключевую роль в цифровизации жизненного цикла изделия [6].

Интеграция цифровых датчиков и контроллеров [98], а также исполнительных механизмов в производственное оборудование позволяет осуществлять удаленный контроль. [90, 156]. Данные IIoT используются для формирования цифровых двойников изделий, что соответствует концепции CALS-технологий и обеспечивает сквозное информационное сопровождение продукции на всех этапах жизненного цикла – от проектирования до утилизации [105, 176].

Содержательная новизна представленной таблицы 1.2.1 заключается в разработке и систематизации авторского подхода к цифровому мониторингу качества продукции, который отличается от традиционных представлений о контроле качества не только расширением границ анализа, но и переосмыслением архитектуры мониторинга в условиях цифровой трансформации производственных систем.

Таблица 1.2.1 – Ключевые направления цифровой трансформации системы мониторинга качества продукции (составлено автором)

Направление цифровизации	Характеристика	Целевая функция в системе контроля качества
Интеграция	Объединение оборудования, систем, поставщиков, клиентов в цифровую экосистему на основе стандартов интероперабельности	Обеспечение единого информационного пространства для мониторинга качества в реальном времени
Автоматизация и автономность	Внедрение ИИ, машинного обучения, робототехники для автоматической диагностики и принятия решений	Снижение субъективности контроля, ускорение отклика на отклонения
Цифровые двойники и симуляция	Создание цифровых копий производственных объектов с возможностью прогнозирования дефектов	Предиктивный контроль качества на основе сценарного анализа
Гибкость и адаптивность	Адаптация к изменениям спроса и технологических условий за счет модульности	Минимизация времени реакции системы контроля на внешние изменения
Цифровые платформы и экосистемы	Интеграция участников цепочки поставок в единую цифровую среду	Повышение согласованности контрольных процедур между участниками
Устойчивое развитие	Энергоэффективность, экологичность и рациональное использование ресурсов	Контроль за соблюдением экологических параметров качества
Кибер-безопасность	Многоуровневая защита данных, защита цифрового следа продукции	Обеспечение достоверности и непрерывности данных контроля качества

В частности, предложенная концепция:

- ориентирована на интеграцию различных цифровых решений – от Интернета вещей (IoT), ERP/MES/PLM-систем до технологий предиктивной аналитики и цифровых двойников;

- объединяет физические и информационные потоки в едином контуре управления качеством на всех этапах жизненного цикла изделия;

- формирует замкнутую адаптивную цифровую среду, способную в

реальном времени отслеживать параметры производственных процессов, выявлять отклонения и формировать корректирующие действия без участия человека;

- опирается на принципы гибкости и модульности, что позволяет адаптировать архитектуру мониторинга к конкретным технологическим условиям;

- поддерживает реализацию принципов устойчивого развития, включая управление ресурсами, энергопотреблением и цифровой отчетностью;

- учитывает требования информационной безопасности и защищенности цифровых данных, что становится особенно актуальным в условиях межсистемной интеграции.

В логике CALS-технологий такая система позволяет не только отслеживать качество на отдельных этапах, но и обеспечивать его прослеживаемость на всем протяжении жизненного цикла изделия, включая постпроизводственные и эксплуатационные фазы. Это обеспечивает переход от реактивного контроля к преактивному управлению качеством, что и составляет концептуальное ядро предлагаемой систематизации.

Основы процессов мониторинга качества продукции направлены на создание интегрированных, гибких и адаптивных производственных систем, способных эффективно реагировать на вызовы современной экономики.

Таким образом, нами проанализировано применение CALS-технологий в постпроизводственном мониторинге качеств продукции. Изучение процессов применения CALS-технологий в постпроизводственном мониторинге позволяет нам сформулировать проблемы внедрения CALS-технологий:

- интеграция CALS-технологий с существующими процессами;
- необходимость непрерывного обучения и повышения квалификации инженеров-механиков;
- обеспечение безопасности данных и защиты интеллектуальной собственности.

На основании исследования можно сформулировать несколько будущих тенденций и возможностей:

- 1) искусственный интеллект (ИИ) и машинное обучение в машиностроении;
- 2) технология цифровых двойников для улучшения процессов мониторинга качества продукции;
- 3) интеграция робототехники и автоматизации;
- 4) включение в процессы виртуальной реальности (VR) и дополненной реальности (AR).

1.3 Анализ существующих методов оценки и прогнозированию дефектов в системе постпроизводственного мониторинга

Показатели мониторинга дефектов на производствах наукоемких изделий можно определить исходя из концепции инженерной логистики. Схема мониторинга дефектов и цифровых систем представлена на рисунке 1.3.1.

На схеме представлена архитектура постпроизводственного мониторинга качества на предприятиях, выпускающих наукоемкие изделия. Отображена взаимосвязь ПО (MES, PLM, ERP, BI) с цифровым двойником и пользователем через отчеты и алерты. На основании исследования нами определена схема мониторинга дефектов и цифровых систем. Информационные технологии обеспечивают замкнутый контур мониторинга, где каждый дефект отслеживается от момента возникновения до его устранения, с привязкой к цифровому двойнику изделия и логистической цепочке.

По мнению исследователя И. Н. Омельченко и Т. Г. Садовской, ключевым аспектом является интеграция логистических процессов с жизненным циклом продукции [102]. Это позволяет эффективно отслеживать и управлять качеством на различных стадиях производства, начиная от проектирования и заканчивая эксплуатацией.

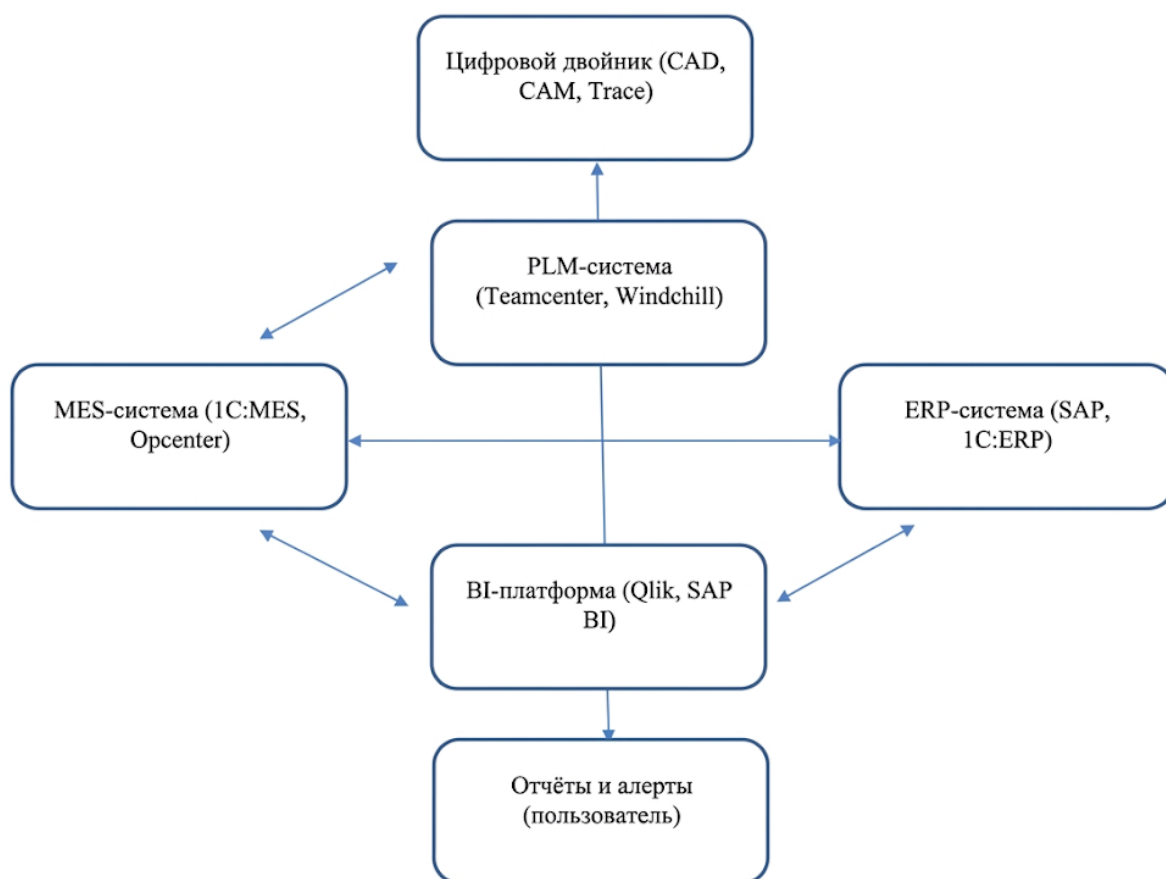


Рисунок 1.3.1 – Схема мониторинга дефектов и цифровых систем
(составлено автором)

Омельченко И.Н. подчеркивает, что применение инженерной логистики в мониторинге дефектов способствует созданию единой информационной среды, где данные о качестве продукции собираются, анализируются и используются для принятия обоснованных решений. Это включает в себя использование современных информационно-коммуникационных технологий для автоматизации процессов мониторинга и управления качеством [102].

Таким образом, формирование логистических систем промышленного производства начинается с классификации логистических процессов и их характеристик на предприятии, далее разрабатываются методы и модели оптимизации функционирования логистических систем [77, 106]. Разработка модуля постпроизводственного мониторинга обеспечивает непрерывный сбор данных с MES и оборудования, автоматизированный расчет индекса дефектности и прогнозирование вероятности отказа изделий на заданном

горизонте эксплуатации» [84].

Рассмотрим кейс успешного применения CALS-технологий в мониторинге дефектов производственных процессов менеджмента качества и потерь. Для эффективного внедрения CALS-технологий на предприятиях машиностроения, а также в области мониторинга дефектов и мониторинга качества, важно учитывать концепцию жизненного цикла изделия (ЖЦИ). Внедрение цифровых технологий и CALS (Computer Aided Logistics and Systems) позволяет интегрировать процесс управления качеством и дефектами на всех этапах производства. Рассмотрим это на примере крупнейшей российской компании СИБУР, активно применяющей такие технологии.

СИБУР, ведущий производитель в нефтехимической отрасли, реализует масштабную цифровизацию, включая автоматизацию процессов мониторинга качества и внедрение CALS-технологий.

Архитектура IIoT-решения СИБУР представлена на рисунке 1.3.2.

Архитектура IIoT Sibur Platform

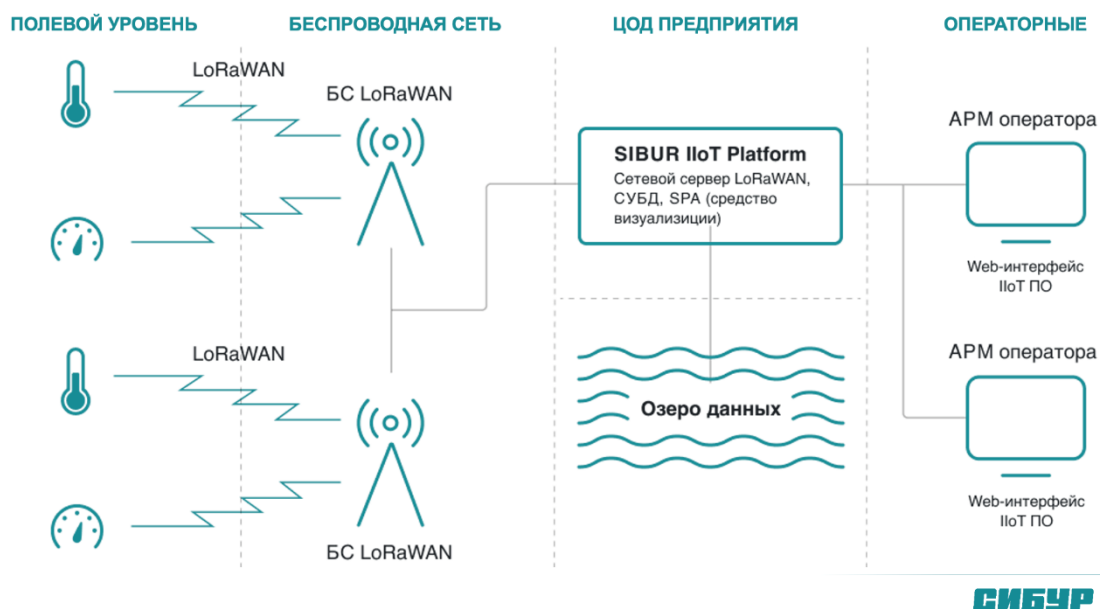


Рисунок 1.3.2 – Архитектура IIoT-решения СИБУР

(составлено автором по [22])

Кроме того, внедрение IIoT-платформы, которая может работать как в облачном хранилище, так и локально, значительно улучшает процессы

диагностики и мониторинга дефектов [64]. Системы, основанные на LoRaWAN, обеспечивают надежную передачу данных, не требующую лицензирования, что является важным аспектом для промышленных предприятий [67]. В 2024 году, благодаря применению CALS-технологий и цифровизации процессов мониторинга, компания достигла экономического эффекта в 13,2 млрд рублей [68].

По представленным данным, нами сделан вывод, что мониторинг дефектов производственных процессов и потерь направлен на повышение производительности, сокращение издержек, оптимизацию ресурсов и снижение простоев – ключевые принципы процессов мониторинга качества продукции.

В ходе проведенного исследования автором была сформирована система показателей, ориентированных на реализацию постпроизводственного мониторинга дефектов в условиях цифровой интеграции процессов:

- уровень дефектности (индекс постпроизводственной дефектности пайки);
- частота повторяющихся дефектов;
- время реакции на дефект (время устранения несоответствия);
- удельная стоимость устранения дефекта;
- индекс зрелости цифрового следа (индекс цифрового следа изделия).

Все перечисленные показатели тесно связаны между собой и реализуются в рамках интегрированной цифровой среды предприятия:

- MES фиксирует фактические параметры обработки и первичные дефекты;
- PLM хранит нормативную модель и карту отклонений;
- ERP организует работу с дефектами, ресурсами, исполнением предписаний;
- BI-платформы объединяют данные и визуализируют метрики в режиме реального времени.

Проанализируем особенности цифровизации процессов мониторинга качества продукции на предприятиях РФ (таблица 1.3.1).

Таблица 1.3.1 – Особенности цифровизации процессов мониторинга качества продукции на предприятиях РФ

Предприятие и цель внедрения	Количество и тип оборудования	Выполненные задачи	Результаты
АО «Контактор» Автоматизация процессов мониторинга качества продукции, снижение издержек	Термопласт-автоматы более 120	Автоматизация справочника мониторинга жизненного цикла пресс-форм	Сокращение простоев, соблюдение сроков отгрузки, снижение затрат на пресс-формы
ООО «Механоремонтный комплекс» Повышение производительности оборудования	Станки с ЧПУ (Heidenhain, Sinumerik, ЛИР, Маяк) более 50	Объединение станков в единую сеть, установка терминалов ввода-вывода, контроль энергопотребления на разных стадиях производственного цикла	Выявлено 3300 станко-часов резерва, 0,3 млн руб. дополнительной прибыли
ЭПО «Сигнал» Контроль и анализ работы станков, цеховая прослеживаемость	Автоматы продольного точения, фрезерные станки более 50	Подключение оборудования к системе Диспетчер MDC, внедрение системы прослеживаемости, контроль управляющих программ, постпроизводственный контроль качества продукции	Контроль и анализ отклонений, повышение эффективности работы оборудования
АО «РКЦ «Прогресс» Увеличение загрузки оборудования, контроль вибродиагностики	Универсальные станки, станки с ЧПУ более 190	Установка терминалов, интеграция с Windchill, получение данных вибродиагностики	Сокращение простоев, повышение эффективности, предотвращение поломок оборудования
ГК ЕВРАЗ Повышение производительности, сокращение времени простоев	Станки с ЧПУ Fanuc более 160	Внедрение системы «Диспетчер», интеграция с SAP ERP, контроль производства	Повышение эффективности оборудования на 20%, сокращение простоев на 34%, увеличение выпуска на 15%, снижение затрат за счет отказа от сторонних услуг
Филиал ПАО «Ил» – Авиастар Повышение производительности, сокращение брака и производственных циклов	Станки с ЧПУ (Fanuc, Sinumerik, Mazatrol) более 180	Контроль энергопотребления, оповещения о нештатных ситуациях, оптимизация передачи управляющих программ	Достижение показателя ОЕЕ 46,8%, годовая экономия 36 000 руб. на станок, сокращение времени реакции на останов оборудования в 10 раз

Таким образом, в рамках проведенного исследования автором обобщены общеизвестные показатели дефектности и разработана их адаптированная архитектура, ориентированная на использование в условиях цифрового мониторинга качества в логике CALS-технологий.

Ключевая особенность предложенного подхода заключается в интеграции системы показателей в единый сквозной цифровой контур, охватывающий все стадии жизненного цикла изделия – от проектирования до эксплуатации. В частности, осуществлено расширенное трактование ряда метрик, что позволяет перейти от традиционного постфактум-анализа к предиктивному управлению качеством.

Частота повторяющихся дефектов, в традиционной практике применяемая как средство оценки стабильности технологического процесса, в рамках предлагаемой модели дополнена механизмами интеграции с PLM-системами и аналитическими BI-платформами, что позволяет реализовывать предиктивную аналитику и выявлять скрытые закономерности возникновения дефектов в процессе эксплуатации.

Представленная система формирует новое содержание – показатели становятся элементами адаптивной цифровой архитектуры мониторинга, в которой каждая метрика обладает функциональной связью с информационными потоками MES, PLM, ERP и BI-сред, обеспечивая высокий уровень наблюдаемости, прослеживаемости и управляемости качества.

Таким образом, представленный подход отличается от существующих практик тем, что позволяет оперативно диагностировать причины отклонений, минимизировать повторяемость дефектов и формировать обратную связь между стадиями эксплуатации и проектирования изделия. Это обеспечивает не только повышение надежности выпускаемой продукции, но и оптимизацию затрат на доводку, тем самым подтверждая заявленную научную и практическую значимость предложенной модели мониторинга.

1.4 Подходы к оценке качества сварных изделий в постпроизводственном мониторинге

Прежде чем переходить к реализации решений, был выполнен обзор научно-технической литературы по теме надежности сварных соединений при их эксплуатации и пути моделирования таких процессов.

Применение статистических методов управления качеством продукции направлено на совершенствование системы контроля и его организации. Статистические методы не должны заменить другие методы и средства контроля, но могут в значительной степени повысить его эффективность, достоверность и экономичность [2]. Оценка качества сварных соединений должна базироваться на контроле параметров процесса, выявлении причин отклонений и интеграции данных в систему жизненного цикла изделия, что позволяет минимизировать повторный брак» [68].

Система контроля должна обеспечивать обратную связь от контролеров к технологам. Любой контроль, имеющий обратную связь с технологией, можно назвать активным контролем. Активный контроль качества сварных изделий должен быть функциональным – отвечать на вопросы: как, когда и кем выполнена контролируемая работа.

В работе И. В. Бородушко указывается, что с развитием вероятностных методов расчета пришло осознание, что и нагрузка, и свойства материалов имеют случайную природу, в связи с чем полностью исключить появление повреждений за срок службы объекта невозможно [12]. Поэтому концепцию недопустимости повреждений сменила концепция о недопустимой вероятности повреждения. Вероятностный подход проявился в двух направлениях – использовании статистических методов при расчете конструкций и применении теории надежности для прогноза безотказности сложных систем. При этом негативные последствия при возникновении отказа учитывались интуитивно, в неявном виде, путем принятия определенных значений вероятности безотказной работы или коэффициента запаса

прочности.

Применение теории риска в инженерной практике является логическим развитием вероятностного подхода, при котором уровень надежности выбирается в зависимости от возможных последствий при повреждении (отказе) элементов объекта. Оценка риска служит той мерой, которая еще на стадии предпроектной проработки из имеющихся вариантов технических решений позволяет осуществить оптимальный выбор с точки зрения минимизации затрат на создание объекта и возможных убытков при реализации данного решения на практике. При этом под риском R обычно понимают сочетание вероятности наступления нежелательного события P и возможного ущерба C от него, описываемое выражением:

$$R=P \cdot C, \quad (1.4.1)$$

где R – величина риска;

P – вероятность наступления нежелательного события;

C – величина возможного ущерба от риска.

Рухлин Г. В., в работе «Управление качеством промышленной продукции» указывает, что на каждой из стадий жизненного цикла продукции с использованием сварочного процесса (изготовление, обращение, эксплуатация, или потребление) взаимодействует живой и овеществленный труд [112].

Около 20% дефектов в сварочном производстве связаны с качеством живого труда (наладчики, операторы, сварщики, контролеры), а остальные 80% – с результатами прошлого труда (средствами труда и предметами труда, к которым в числе прочих относятся сварочные материалы, оборудование, приборы и т. п.)

В исследованиях выявлены характерные факторы, влияющие на дефектность сварных соединений. Выявлены причинно-следственные связи по цепочке «фактор–причина–дефект», доминирующими факторами, можно считать:

- подготовка и сборка под сварку – 28–34%;

- квалификация исполнителей – 19–31%;
- сварочные материалы – 14–26%;
- сварочные процессы – 11–19%;
- сварочное оборудование – 5–13%.

Виды продукции сварочного производства для выбора методов управления качеством конечной продукции можно классифицировать так:

1. Конечная продукция сварочного производства – сварные соединения, детали и узлы, входящие в состав (или являющиеся основой) машин, механизмов и сооружений;

2. Промежуточная продукция (сварочные материалы и оборудование), используемая на стадии изготовления конечной продукции сварочного производства. Она, как правило, изготавливается на специализированных предприятиях, не связанных с изготовлением конечной продукции сварочного производства;

3. Сырье и комплектующие изделия, используемые на стадии изготовления сварочных материалов и оборудования и также являющиеся продукцией специализированных предприятий и объединений;

4. Оборудование, применяемое для производства сварочных материалов на стадии изготовления, т. е. продукция специализированных предприятий.

Куликова Д.С. в работе «Цифровизация бизнес процессов: глобальные тренды и перспективы развития», указывает, что плотность распределения вероятностей глубины дефектов определяется по соответствующей плотности для обнаруженных дефектов и вероятности обнаружения дефектов[66].

Иванова С.П., Мясоедов А.И. в работе «Изменения в цифровой экономике и ее влияние на общество» предлагают вероятностный подход для оценки надежности процессов, который очень близок к стоящей в работе проблеме [55].

Для решения задачи оценки надежности сварных тонкостенных конструкций при статических и динамических нагрузках следует использовать стохастический характер прочности конструкций, обусловленный

дефектностью сварных соединений. В качестве критерия разрушения для поверхностных дефектов используется условие достижения максимальной величиной мембранной составляющей пластического раскрытия трещины критического значения. Методы кинетического моделирования усталостных поверхностных трещин за цикл нагружения развиты в работах Вансовича К. А. [13]. Комплексный контроль качества сварных конструкций и методы их дефектоскопии обобщены Волченко В. Н. [16], а подходы к оценке надежности и эффективности эксплуатации сложных электроэнергетических систем представлены в исследованиях Литвака В. В. с соавторами [70] и Миронова А. А., Волкова В. М. [81].

ВЫВОДЫ ПО ПЕРВОЙ ГЛАВЕ

Теоретический анализ подходов к управлению качеством подтвердил ограниченность традиционных процедур технического контроля. Локальная фиксация отклонений на операциях обработки разобщена с сервисным этапом. Требуется переход к интегрированным цифровым средам, объединяющим жизненный цикл изделия сквозными потоками данных.

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.

Исследование отрасли отечественного машиностроения выявило слабую системность процессов цифровизации. Базовой сетевой инфраструктурой располагают свыше 50% предприятий. При этом последовательное внедрение цифровых инструментов с оценкой их результативности выполняют только 22% заводов. Измеримые метрики цифровизации используют менее 5% производств.

Разработана концептуальная модель организации постпроизводственного мониторинга дефектов, замыкающая управленческий цикл качества за счет интеграции данных систем управления ресурсами, технологическими операциями и жизненным циклом изделия. Сведения об эксплуатационных сбоях транслируются назад – на рабочие места проектирования и сборки.

Внедрение концепции CALS-сопровождения сдерживается тремя барьерами: сложностью стыковки с унаследованными системами учета, дефицитом профильных инженерных компетенций и рисками утечки технологических данных. Применение математических моделей выявляемости дефектов и инструментов предиктивной аналитики создает условия для перехода от констатации брака к предупреждению отказов.

2 ИНТЕГРИРОВАННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ И МОНИТОРИНГА ДЕФЕКТОВ В РАМКАХ ЦИФРОВОЙ ЛОГИСТИЧЕСКОЙ ПОДДЕРЖКИ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ПРОДУКЦИИ

2.1 Цифровые инструменты управления качеством в мониторинге дефектов в концепции Индустрии 4.0

В исследовании рассмотрена реализация проектов мониторинга дефектов в Индустрии 4.0 на современных наукоемких предприятиях и их результативность. В рамках постпроизводственного мониторинга на АО «Производственное объединение «Завод имени Серго»» реализована цепочка от сборки и испытаний до автоматизированной генерации ключевых показателей эффективности (KPI) и отчетности. Информация сохраняется в централизованной БД.

Такой подход обеспечивает высокую скорость обработки данных и формирует базу для корректировки технологических карт и маршрутных листов. Показатели, формируемые в ERP (например, SAP или 1C:ERP), становятся ключевыми метриками в BI-среде: Индекс постпроизводственной дефектности пайки, Время устранения несоответствия, Удельные затраты на устранение несоответствия.

В ПАО «Туполев» цифровая модель (цифровой двойник) изделия получает данные с датчиков вибраций, температур и токов, формирует ядро системы пост процессного анализа параметров обработки. Показатели отклонений от эталонных значений сравниваются с нормативами, заложенными в PLM-среде, и используются для прогнозирования трендов дефектности и последующего технического обслуживания [68].

Переход к электронным протоколам неразрушающего мониторинга (НК) в АО «НПО Энергомаш», позволил отказаться от бумажной документации в пользу цифровых карточек дефекта, автоматически загружаемых в PLM-систему. Полученные данные обрабатываются в модуле

анализа отказов и дефектов, после чего влияют на обновление технической документации (CAD) и корректировку технологических процессов (ТК).

На уровне показателей такая система обеспечивает высокую степень прослеживаемости, снижает время реакции на отклонения, позволяет учитывать стоимость устранения дефектов в ERP и анализировать отклонения в BI-среде. Это пример полной интеграции цифровых решений на всех этапах жизненного цикла изделия [55].

Таким образом, цифровые показатели мониторинга дефектов – такие как уровень дефектности, время реакции, повторяемость, индекс цифрового следа и удельная стоимость устранения – играют ключевую роль в системах постпроизводственного мониторинга. Их формирование и использование становятся возможными только в условиях сквозной интеграции информационных систем: MES фиксирует первичные отклонения, PLM обеспечивает нормативную модель, ERP – исполнение, а BI – аналитическое сопровождение. Цифровые платформы на базе MES, ERP и BI обеспечивают замкнутый цикл контроля качества, позволяя объединить сбор данных, визуализацию и автоматизацию корректирующих действий» [8]. Такой подход позволяет оперативно выявлять отклонения, устранять причины брака и управлять качеством на уровне цифрового предприятия.

FedEx Express. Определение контрольных точек обеспечило более плавный рабочий процесс, что значительно сократило потери времени. Команда FedEx Express [153] в аэропорту Лос-Анджелеса прошла путь от выполнения 14 регламентных форм тяжелого технического обслуживания воздушных судов (C-check / форма ТО) в год до 30 в год. Экипаж также увеличил потребность в 32 715 человеко-часах для C-check до 21 535 (и уменьшается). Устранение такой потери времени приводит к огромной экономии средств, особенно в такой отрасли, как техническое обслуживание самолетов, где специализированные механики и техники обходятся довольно дорого. Следующий пример автоматизации мониторинга качества на наукоемком производстве от BMW Group [148], искусственный интеллект

становится все более распространенным в автомобилестроении. Применение искусственного интеллекта и алгоритмов машинного обучения в управлении производственными операциями позволяет прогнозировать дефекты, оптимизировать ресурсы и повышать надежность изделий [164]» Немецкий производитель специально разработал свою AI-платформу AIQX, что расшифровывается как Artificial Intelligence Quality Next.

Рассмотрим показатели эффективности внедрения AI-платформы AIQX (таблица 2.1.1).

Таблица 2.1.1 – Показатели эффективности внедрения AI-платформы AIQX

Показатель	До внедрения AIQX	После внедрения AIQX	Ожидаемое улучшение
Доля ошибок в процессе сборки автомобилей (%)	1,5	0,5	-66,7%
Время цикла проверки качества (мин.)	15	8	-46,7%
Объем выявленных дефектов на этапе сборки (%)	70	95	+35,7%
Стоимость мониторинга качества (на единицу, €)	300	200	-33,3%

Платформа использует камеры, сенсорные технологии и искусственный интеллект для автоматизации процессов мониторинга качества на конвейерной ленте.

Рассмотрим несколько примеров успешной реализации мониторинга дефектов производственного процесса на российских наукоемких предприятиях.

ПАО «КАМАЗ». На начальной стадии цифровизации основное внимание было сосредоточено на оптимизации процессов внутри производственных цехов. В рамках этого направления были внедрены методы бережливого производства: система «5С», картирование потоков создания ценности (КПСЦ) и концепция точно в срок. Они позволили системно сократить незапланированные простои, снизить излишние перемещения и управлять запасами сырья и полуфабрикатов в реальном времени.

Особое место в цифровой трансформации занимает постпроизводственный мониторинг дефектов. В этой области на предприятии используются интегрированные решения на базе отечественных MES-систем (в частности, модуль TMS6) и специализированных подсистем, объединяющих данные о результатах сборки, испытаний, приемки и выхода продукции. Информация о несоответствиях автоматически фиксируется в ERP-системе, привязывается к конкретным лотам и конфигурациям изделий, после чего поступает в PLM-среду для анализа причин возникновения отклонений. Такой подход обеспечивает высокий уровень прослеживаемости отклонений и их отражение в цифровом паспорте изделия [75, 76].

Информационное обеспечение цифрового мониторинга на КАМАЗе включает:

- САПР (CAD-системы) для формирования эталонных моделей продукции;
- PLM-систему для управления конфигурациями, изменениями и дефектами;
- ERP для учета затрат на доработку, возвраты, гарантийные случаи и логистику исправлений;
- MES-платформу для фиксации фактических параметров обработки и состояния оборудования;
- аналитические BI-модули, визуализирующие ключевые показатели качества, повторяемости дефектов и времени их устранения.

В рамках раздела обобщен отечественный и зарубежный опыт развертывания систем цифрового контроля брака на машиностроительных предприятиях. Изучена динамика операционных параметров после перехода производственных линий на стандарты Индустрии 4.0. На основе сопоставления производственных отчетов выявлено, что базовой проблемой остается фрагментарность данных. Большинство заводских систем фиксирует лишь факт появления бракованного узла. Глубинные причины потерь при этом не анализируются.

Предложенный в работе расчетный аппарат ориентирован на сквозную количественную оценку внедряемых решений. Стандартные методики обычно опираются на разрозненные коэффициенты без учета их взаимного влияния. Разработанная матричная схема устраняет этот пробел через механизм взвешенного вклада параметров. Инженер получает возможность одновременно отслеживать приоритетность отдельной операции и реальную динамику технологических сдвигов на конвейере.

Теоретико-методический вклад выполненного исследования и отличия предложенных решений от базовых аналогов сводятся к четырем ключевым положениям:

- классификация метрик по функциональным блокам (качество, операционная устойчивость, скорость реакции, экономическая отдача, зрелость ИТ-инфраструктуры, глубина аналитики и непрерывность контроля), что формирует целостную картину функционирования цеховых служб;
- экспертное шкалирование весовых коэффициентов с поправкой на жесткие технологические допуски наукоемкого приборостроения;
- введение расчетного критерия относительного изменения параметров (в процентах), который исключает экспертный субъективизм и опирается на прямые замеры цеховых контроллеров;
- формирование сводного показателя взвешенного вклада, позволяющего ранжировать участки модернизации по степени их влияния на снижение себестоимости брака.

Сквозная связка указанных критериев переводит CALS-инструменты из категории пассивных электронных архивов в контур прямого управления технологической дисциплиной. Заводские службы получают непрерывный поток данных об узких местах сборки. Технологические карты корректируются задолго до накопления критического объема рекламаций от сервисных центров. Число дефектов на выходном контроле закономерно падает.

2.2 Диагностика проблем системы контроля качества изделий в производстве электрических приборов

Основной упор предприятие сделало на системы бережливого производства и организации технологического процесса в области своевременной подачи комплектующих к рабочим местам.

В этих направлениях на базе методов реинжиниринга процессов [109] с 2021 года на предприятии создана и внедряется дорожная карта.

Целью развития производственной системы POZIS (PPS) – POZIS Production System – является создание уникальной производственной системы, основанной на поступательном, устойчивом, сбалансированном развитии с использованием современных методов организации производства и направленной на снижение себестоимости продукции, обеспечив качество, повышение удовлетворенности заказчиков, увеличение производительности труда, вовлечение сотрудников в процесс непрерывного улучшения и эффективное использование основных производственных фондов (из документа предприятия). Систематизация дефектов на участке пайки и применение инструментов бережливого производства позволяют минимизировать повторный брак и оптимизировать производственные операции» [103].

Поставленная цель обуславливает решение следующих задач:

- 1) создание организационной, методической и нормативной базы для развития производственной системы POZIS;
- 2) создание позитивной корпоративной культуры предприятия, основанной на принципах производственной системы POZIS;
- 3) создание структуры развития производственной системы POZIS, обеспечивающей вовлечение персонала в процесс непрерывных улучшений, постоянное стремление к совершенствованию;
- 4) разработка и реализация проектов, основанных на принципах развития и управления производственной системы POZIS, направленных на

достижение целевых показателей развития предприятия;

5) подготовка, переподготовка и повышение квалификации сотрудников компании, ориентированных на внедрение современных методик эффективного управления предприятием.

Все это можно представить в виде таблицы 2.2.1.

Таблица 2.2.1 – Дорожная карта развития производственной системы POZIS (PPS) (составлена автором)

№	Этап дорожной карты	Содержание этапа
1	Диагностика производственной системы	Анализ текущего состояния процессов, выявление потерь и проблемных зон
2	Формирование стратегии PPS	Разработка концепции производственной системы и целей повышения эффективности
3	Обучение персонала принципам Lean	Подготовка сотрудников по методам бережливого производства
4	Внедрение системы 5S	Организация рабочих мест, стандартизация и повышение производственной дисциплины
5	Развитие программы Kaizen	Вовлечение персонала в процесс непрерывных улучшений
6	Картирование потоков создания ценности	Анализ технологических потоков и оптимизация логистики производства
7	Стандартизация производственных процессов	Разработка стандартов операций и технологических карт
8	Цифровизация производственных процессов	Внедрение MES, PLM и систем мониторинга производственных процессов
9	Мониторинг KPI производственной системы	Оценка эффективности внедрения инструментов бережливого производства
10	Непрерывное совершенствование	Постоянное развитие производственной системы и распространение лучших практик

Основными направлениями совершенствования производства в 2024-2025 годах стали бережливое производство, стабильность поставок комплектующих и совершенствование технологий изготовления изделий. Для этих целей внедрялись лин-инструменты, направленные на оптимизацию производственных процессов.

Внедрение инструментов бережливого производства на предприятии

направлено на устранение пяти основных видов потерь [1]:

- избыточных запасов сырья, НЗП и канцелярского документооборота;
- ожидания, вызванного межфункциональной зависимостью, сбоями ПО и отсутствием регламентов;
- лишней логистики материалов и документации из-за нерациональной планировки участков;
- дефектов (ошибки в чертежах, некорректный ввод данных, брак деталей);
- нерациональных движений персонала при ручных перемещениях и поиске оснастки.

Для стабилизации трудовых операций на рабочих местах применяются стандартные операционные карты (СОК).

Синхронизация потоков организована посредством системы Kanban, опирающейся на правила бездефектной передачи, выпуска строго под заказ смежного участка и совпадения фактического количества деталей в таре с учетной карточкой. Непрерывная оптимизация данных процедур осуществляется в рамках методологии Kaizen [80, 94] (таблица 2.2.2).

Методология организации распределенных производственных систем и логистических экосистем в машиностроении получила развитие в трудах Сафаргалиева М. Ф. и Юсуповой И. В. [118], а также в исследованиях Хасанова Р. Ш. и Стяжкина М. Н. на примере производственно-логистического комплекса АО «ПОЗИС» [134, 135]. Смежные вопросы повышения производительности механообрабатывающих участков наукоемких производств ОПК рассмотрены Харитоновым Д. В. [133].

Стандарт системы менеджмента качества АО «ПОЗИС» разработан с целью повышения эффективности деятельности структурных подразделений, укрепления корпоративного духа, повышения заинтересованности работников в достижении высоких экономических, производственных, и иных показателей в работе, привлечения творческой инициативы работников, реализации оригинальных идей и мыслей по улучшению работы предприятия,

выявления и поощрения творчески активных работников, вовлечение персонала в процесс непрерывных улучшений.

Таблица 2.2.2 – Элементы системы оптимизации производственных процессов Kaizen в производственной системе POZIS (составлена автором)

№	Элемент системы	Содержание	Роль в СМК
1	Программа KAIZEN-POZIS	Система подачи предложений по улучшению производственных процессов	Вовлечение персонала в непрерывное совершенствование
2	Бланк предложения по улучшению	Документ установленного образца, где сотрудник описывает проблему и решение	Формализация предложений
3	Координатор улучшений	Ответственный сотрудник подразделения, собирающий и регистрирующий предложения	Организация работы с улучшениями
4	Экспертный совет	Комиссия, рассматривающая предложения и принимающая решение о внедрении	Оценка эффективности инициатив
5	Стандартизация процессов	Разработка стандартных операций и регламентов	База для дальнейших Kaizen-улучшений
6	Визуальное управление	Размещение информации о предложениях на стендах подразделений	Контроль реализации и прозрачность
7	Реализация предложений	Внедрение улучшений в технологические процессы	Повышение эффективности производства
8	Мониторинг результатов	Отслеживание экономического и производственного эффекта	Оценка результативности СМК

Вышеописанная система мониторинга внедрена в первую очередь с целью повышения качества изготовления комплектующих и совершенствования технологии производства. Вопросы постпроизводственного мониторинга в этих системах практически не рассматривались, а лишь констатировалось снижение брака во время гарантийного срока службы изделия, что связано с повышением качества культуры производства (таблица 2.2.3).

Таблица 2.2.3 – Активность реализации технологии Кайдзен и эффект от реализации Подача предложений по улучшению «Kaizen POZIS»

Показатель	2024		Выполнение, %
	План	Факт	
Подача предложений по улучшению «Kaizen POZIS»	191	201	105
Эффект от реализации мероприятий по устранению потерь производственных процессов	14000	16670	119,1

Фактический экономический эффект от реализации мероприятий программы Kaizen POZIS за 2024 г. достиг 16 670 тыс. руб. при плановом значении 14 000 тыс. руб., что соответствует 119,1% выполнения плана (прирост на 19,1%). Полученная динамика отражает прямую отдачу от вовлечения цехового персонала в выявление и ликвидацию производственных потерь.

Эффект от реализации мероприятий по устранению потерь производственных процессов по данным отчета предприятия представлен в таблице 2.2.4.

Таблица 2.2.4 – Эффект от реализации мероприятий по устранению потерь производственных процессов (рассчитано автором)

Показатели	План	Факт	Процент, %
Производительность труда, млн. руб./чел	4,695	4,796	97
Оборачиваемость запасов, дней	101,4	86,4	117
Кол-во рекламационных актов (по ГП), %	0,088	0,078	112
Общая эффективность оборудования	87,5 %	87,5 %	100
Количество полезных предложений по улучшениям на 1 сотрудника, штук	550	605	110

Функциональная схема существующая система производственного контроля качества представлена на рисунке 2.2.1. Основным недостатком

системы является большой бумажный оборот документов, отсутствие развернутой системы информационного обеспечения. Не собираются данные по характеристикам комплектующих, а отмечаются только случаи брака. Для формирования данных, которые могут позволить проанализировать связь качества изделия с качеством его комплектующих должна быть построена информационная система, которая создаст цифровой след каждого изделия по качеству его комплектующих и операций при его изготовлении.

Проведем оценку уровня эффективности производственных процессов мониторинга качества на АО «Производственное объединение «Завод имени Серго»» на этапе сварки и опрессовки комплектующих. По материалам, собранным на предприятии, надо сказать, что на нем существует система качества, которая функционирует на данном этапе повышение качества продукции. Данная система в основном привязана к бумажной системе учета и не позволяет анализировать причины выхода из строя агрегатов на протяжении всего ЖЦИ.

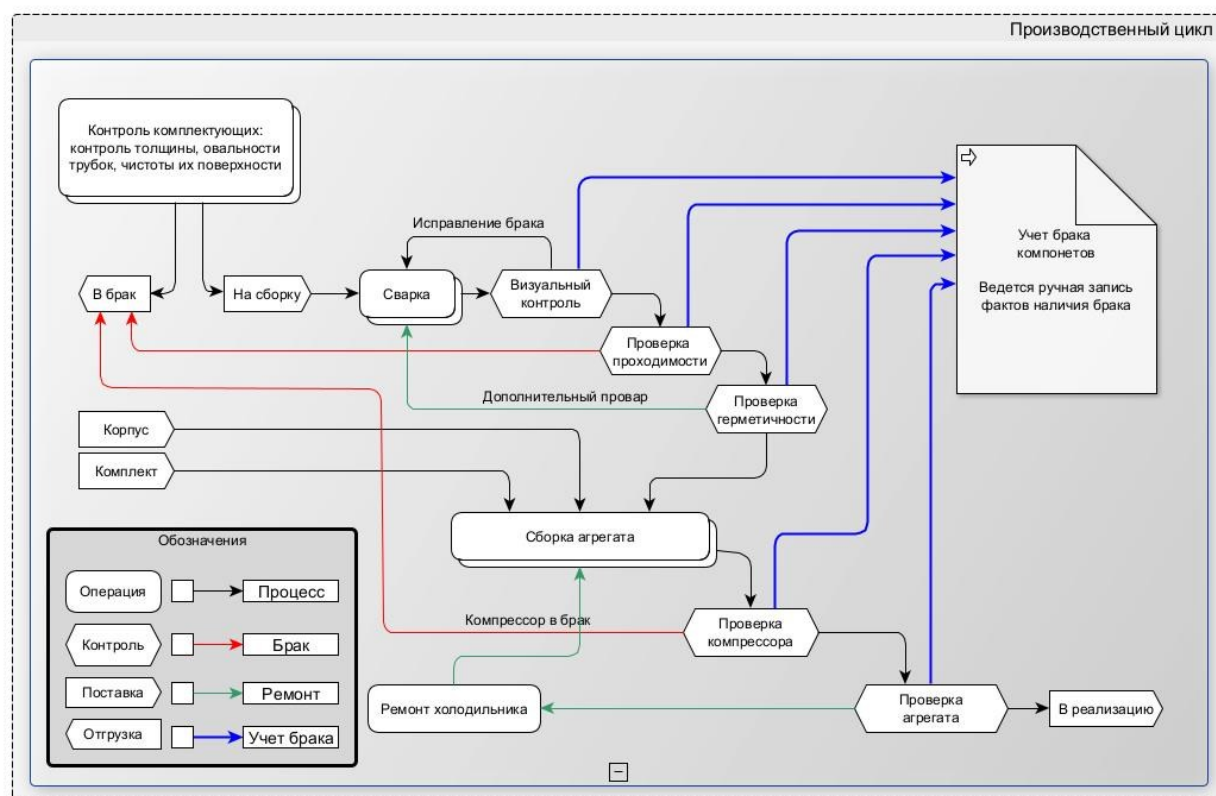


Рисунок 2.2.1 – Существующая система производственного контроля качества в АО «ПО «Завод имени Серго» (построена автором)

2.3 Систематизация дефектов на участке пайки и их влияние на жизненный цикл изделия

На стадии пайки выполняется соединение различных трубопроводов и элементов холодильников. Пайка проводится на стыках поверхностей, используя различные типы припоя в зависимости от материала стыков. Для медных труб используется припой, для соединений из серебра – более дорогой и эффективный припой, а для соединений из алюминия и меди пайка не проводится, вместо этого используются методы нагрева и обжима.

Рассмотрим все основные операции при мониторинге качества изделия:

1 стадия мониторинга: Самоконтроль. После пайки осуществляется самоконтроль, который включает визуальную проверку с помощью зеркала. На этом этапе проверяется наличие вогнутого паяного шва (галтели) (место пайки) и отсутствие непропаянных участков. Это первая стадия мониторинга, гарантирующая, что пайка выполнена качественно на начальном этапе, в противном случае выполняется дополнительная пропайка шва.

2 стадия мониторинга: Сканирование и проверка на утечку с использованием прибора Ecotec E3000, который контролирует утечку инертного газа (гелия). Это важный этап, который позволяет выявить наличие утечки и гарантировать герметичность стыков. Каждый стык проверяется с помощью этого прибора в течение 2-3 секунд, и результаты фиксируются в журналах. Если утечка превышает установленные параметры, холодильник отправляется на участок анализа и ремонта (УАР).

3 стадия мониторинга: Вакуумирование и использование гелиевого течеискателя (ГТИ). После пайки холодильник подвергается вакуумированию для удаления остаточного воздуха и достижения необходимого давления в системе. Если в процессе вакуумирования обнаруживается утечка (давление не снижается до нужного уровня за 15 минут, с дополнительной выдержкой 3 минуты), это указывает на проблему в системе. Далее используется гелиевый течеискатель Ecotec E3000 для детального мониторинга герметичности.

Прибор проверяет все элементы холодильника, в том числе сварные швы и стыки, и калибруется ежедневно для обеспечения точности измерений.

4 стадия мониторинга: Испытания теплоэнергетических параметров холодильники, которые проходят на автоматизированной станции испытаний холодильников (АСИХ). В процессе испытаний проверяются такие параметры, как температура в холодильной камере, потребляемая мощность компрессором, и энергопотребление за определенный период. Испытания проводятся в строгом соответствии с методиками, которые включают проверку параметров в разных температурных диапазонах окружающей среды, а также выполнение проверок на наличие самопроизвольных отключений холодильников.

На текущий момент в системе мониторинга качества на предприятии отсутствует отдельный этап постпроизводственного мониторинга. После завершения всех проверок изделие считается готовым к эксплуатации, а данные о дефектах не анализируются в долгосрочной перспективе. Это ограничивает возможности для системной работы с причинами отклонений и повторяющимися ошибками. Таким образом, внедрение модуля постпроизводственного мониторинга представляется необходимым элементом для повышения устойчивости и надежности производственных процессов. Формирование единой цифровой среды на предприятиях машиностроительной отрасли обеспечивает интеграцию всех информационных потоков, позволяя создавать предиктивные модели и управлять качеством изделий в реальном времени [95].

Производственный контроль пайки на предприятии осуществляется поэтапно на основании стандартизированных карт операций (СОК) и приборов неразрушающего мониторинга. Все результаты фиксируются в журналах учета.

На основании проведенного анализа научно-технической литературы по устойчивости сварных, паяные и обжимных соединений во время их эксплуатации были выявлены основные причины разрушения этих элементов.

Все они связаны с вибрациями и дефектами, которые приводят к выходу изделия из строя из-за разрушения самого соединения или металла рядом с ним [9]. Как показывают работы, их моделирование может быть проведено с использованием статистических данных, которые покажут, как далеко отклоняются показатели детали от заданных значений [12], что, к сожалению, пока не фиксируется на производстве.

Для определения всех контрольных точек воспользуемся диаграммой Исикавы по дефектам процесса пайки по стадиям ЖЦ изделия, которая представлена на рисунке 2.3.1.

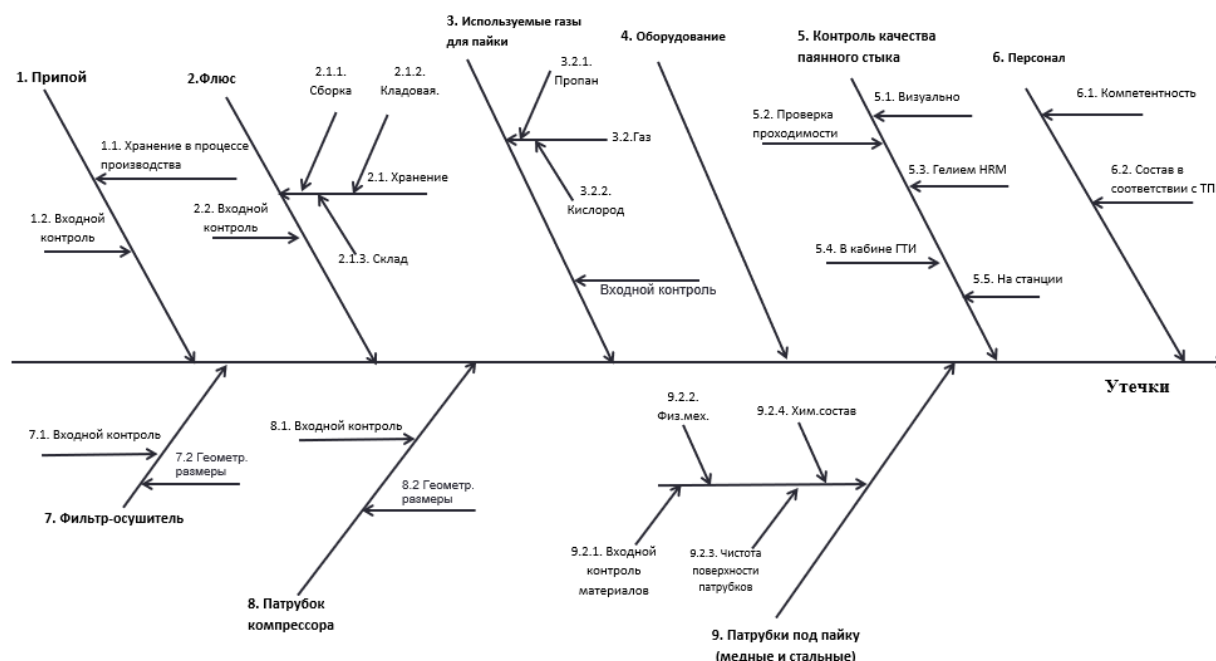


Рисунок 2.3.1 – Диаграмма Исикавы по дефектам процесса пайки элемента холодильника (построена автором)

На основании данной диаграммы были выбраны ряд контрольных точек в процессе изготовления и сварки элементов холодильника. Для анализа процесса изготовления теплообменника (набор трубок и их сварка) были выбраны две группы параметров для моделирования процесса:

Первая группа параметров:

- проверка проходимости теплообменника с использованием

ротаметра, с указанием только верхней границы;

- контролировать герметичность сварных и паяных соединений по утечке гелия, снова идет проверка по верхней границе;
- проверка холодильного прибора при работающем и неработающем компрессоре в кабине ГТИ (гелиевый течеискатель), опять же только по верхней границе предела;
- проверка температурно-энергетических параметров холодильного прибора согласно методике приемо-сдаточных испытаний.

Вторая группа параметров связана с контролем трубок:

- геометрия стыков №2 и №3 трубок;
- размеры, толщина и овальность трубок:
- капиллярная трубка диаметром $2\text{мм} \pm 0,05$;
- капиллярная трубка диаметром $2,1\text{мм} \pm 0,05$;
- медная трубка диаметром $4\text{мм} \pm 0,045$, овальность $0,14\text{мм}$, толщина $0,8\text{мм} \pm 0,08$;
- медная трубка диаметром $6\text{мм} \pm 0,045$, овальность $0,18\text{мм}$, толщина $0,75\text{мм} \pm 0,08$;
- медная трубка диаметром $8\text{мм} \pm 0,045$, овальность $0,24\text{мм}$, толщина $0,75\text{мм} \pm 0,08$;
- стальная трубка с наружным диаметром $4,76\text{мм} \pm 0,08$, толщиной стенки $0,7\text{мм} + 0,05/- 0,01$;
- временное сопротивление разрыву и относительное удлинение;
- капиллярная трубка не менее 250 МПа, не менее 4% соответственно;
- медная трубка не менее 215 МПа, не менее 40% соответственно;
- чистота поверхности трубок;
- капиллярная трубка не должна превышать 200 мг/м^2 ;
- медная трубка не должна превышать 38 мг/м^2 ;

Эти критерии и легли в основу методики. На основании данных производства были выбраны статистические характеристики для

моделирования заданного числа изделий.

Схема постпроизводственного мониторинга дефектов в рамках CALS-технологий представлена на рисунке 2.3.2 [93].

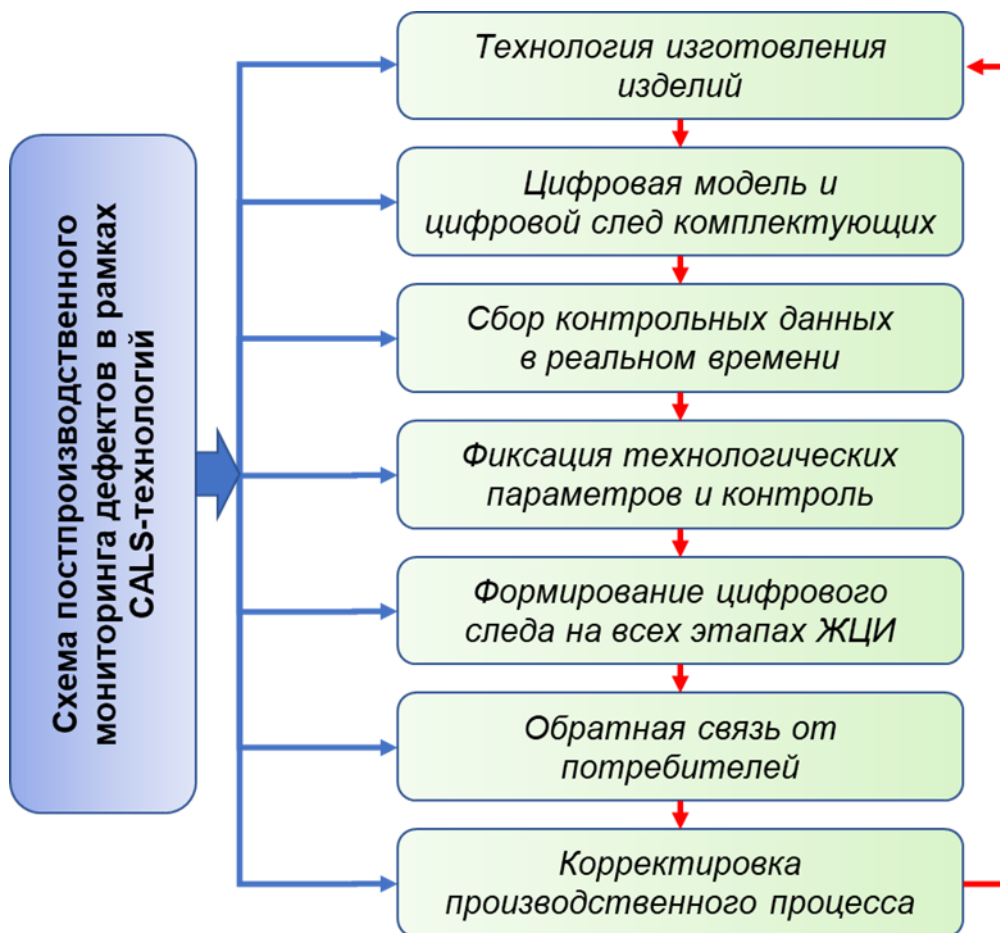


Рисунок 2.3.2 – Схема постпроизводственного мониторинга дефектов в рамках CALS-технологий (построена автором)

На втором этапе расчетов оценивались две характеристики всех комплектующих и их контрольных замеров, которые позволяли оценить потерю качества готового изделия, как сумму отклонений по качеству каждого из компонентов и число компонентов с параметрами, близкими к браку.

ВЫВОДЫ ПО ВТОРОЙ ГЛАВЕ

Анализ практики предприятий машиностроения (ПАО «КАМАЗ», АО «НПО Энергомаш», ПАО «Туполев») показал, что разрозненные программные

пакеты не дают сквозного эффекта. Полноценное управление качеством достигается только согласованным обменом информацией между модулями MES, PLM, ERP и BI.

Предложена расчетная методика оценки цифровых проектов контроля на основе взвешенного вклада показателей. Подход увязывает частные производственные критерии в общий индекс зрелости. Он позволяет сопоставлять затраты на внедрение средств с реальной динамикой сокращения дефектов.

Диагностика системы контроля АО «ПО «Завод имени Серго» выявила критические системные ограничения:

- учет брака ведется на бумажных носителях с ручной регистрацией инцидентов, без сохранения первичных геометрических и механических параметров годных деталей;
- контроль замыкается внутри цеховых переходов, а сведения о поломках бытовой техники в гарантийный период накапливаются в сервисных центрах изолированно;
- механизм обратной связи от эксплуатации к технологическим картам пайки отсутствует, что препятствует выявлению первопричин повторяющегося брака.

С помощью диаграммы Исикавы детализированы источники брака на участке пайки элементов холодильного контура. Установлены доминирующие группы факторов: геометрические отклонения медных и стальных трубок, погрешности температурных режимов, квалификация пайщиков и точность контрольного оборудования. На этой основе выделены 15 критических технологических параметров, подлежащих сквозной оцифровке для предиктивной оценки риска разгерметизации швов.

3 РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ И СРЕДСТВ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ В РАМКАХ ЦИФРОВОГО МОНИТОРИНГА ДЕФЕКТОВ ИЗДЕЛИЯ

3.1. Алгоритм цифровой системы постпроизводственного мониторинга дефектов на основе параметров предиктивной аналитики и неразрушающего контроля

В рамках выполнения диссертационной работы были выполнены следующие задачи:

- сбор и анализа контрольных статистических характеристик комплектующих и технологических операций;
- расчеты оценок вероятности брака комплектующих в зависимости от точности контрольных инструментов и заданных критериев контроля согласно техническим условия проведения процесса;
- оценки риска отказа готовой продукции во время ее эксплуатации в зависимости от вероятностных отклонений комплектующих изделия.

Для реализации решения с использованием статистических характеристик был взят MS Excel, который имеет как встроенные статистические функции, так и позволяет добавлять новые с использованием приемов программирования в среде VBA.

Ожидаемые результаты включают создание статистической модели, позволяющей предсказывать отказы техники в зависимости от заданной точности контроля данных и требований качества комплектующих на основании ТУ. Проведение моделирования могут позволить вырабатывать рекомендации по обоснованию оптимальных контрольных критериев в процессе сборки агрегатов.

Предлагается следующий алгоритм реализации решения поставленной задачи (Рисунок 3.1.1). Для решения этой задачи в рамках предлагаемой модели разрабатывается аналитический блок систематизации дефектов, интегрируемый в ИСУП как полноценный функциональный компонент.

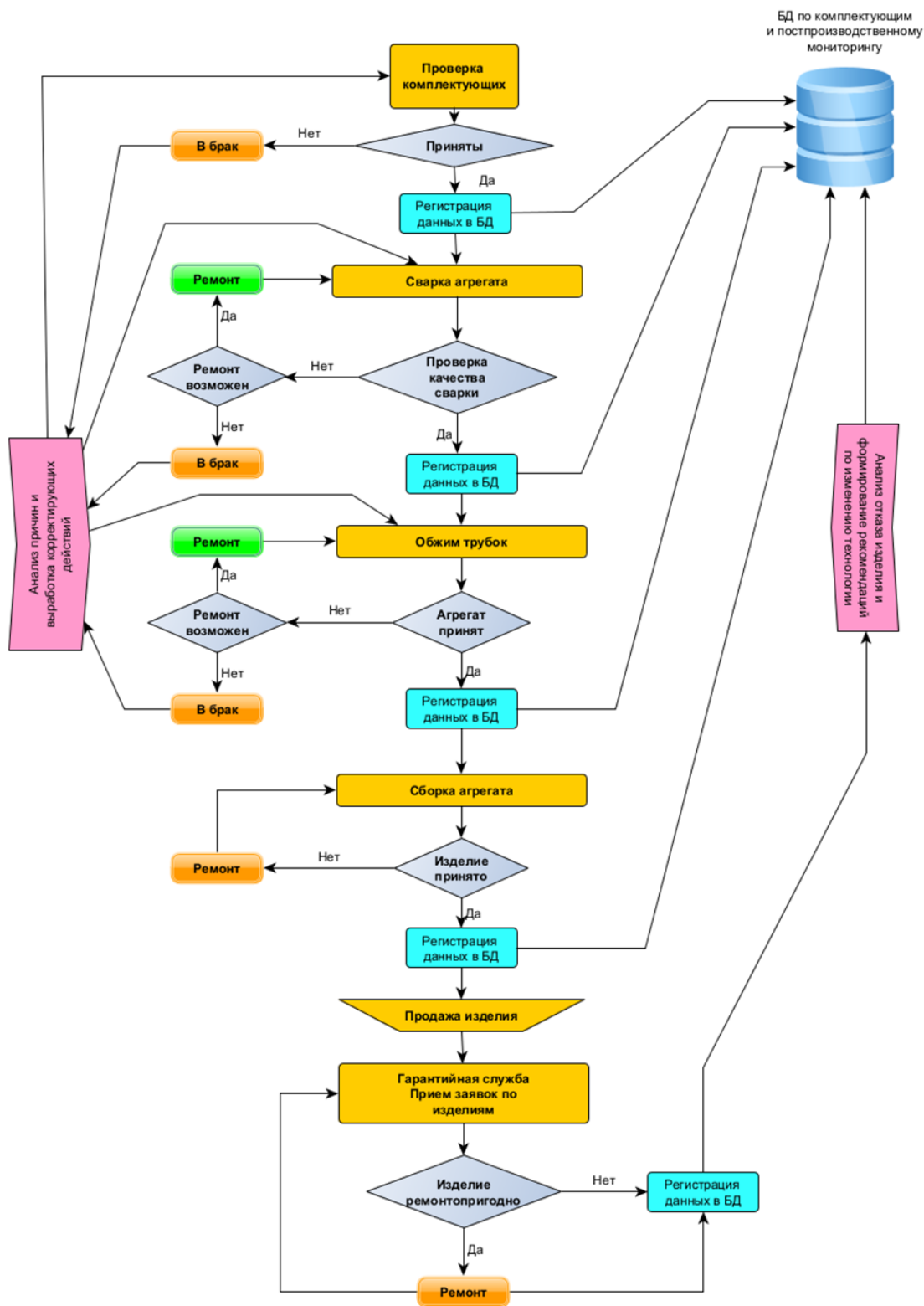


Рисунок 3.1.1 – Алгоритм формирования цифрового следа изделия в рамках постпроизводственного мониторинга (разработан автором)

1. Технологическая архитектура и программные уровни.

Информационная система управления производством (ИСУП)

формируется как многослойная структура, включающая следующие основные этапы контроля и точки принятия решений при возникновении брака и анализе результатов ремонта гарантийной техники. В системе имеются два уровня контроля – первый на всех этапах сборки изделия с анализом причин возникновения брака комплектующих, второй на этапе постпроизводственного мониторинга с анализом отказавших аппаратов и поиском причин в зависимости от качества используемых компонентов в нем.

На втором этапе при наборе достаточного количества рекламаций и их причин можно будет ставить задачу создания модели искусственного интеллекта для выработки рекомендаций по улучшению производства и повышению качества готовой продукции.

2. Механизм сбора и добавления данных аналитики по дефектам.

Этап 1. Анализ причин возникновения брака комплектующих (отклонение геометрических размеров трубок, их овальности и чистоты) и принятие решения по корректировке критериев контроля или смены поставщика.

Этап 2. Контроль сварки трубок с проверкой их герметичности и устойчивости к нагрузкам, обоснованное формирование контрольных значений и их достоверности.

Этап 3. Контроль собранного агрегата и его выпуск в продажу.

Этап 4. Связь с гарантийными службами и сбор данных по рекламациям (номер изделия, причина отказа, ремонт ли утилизация изделия). При возникновении рекламации возможны анализы причин ее возникновения на основе цифрового следа изделия и выработка предложений для исключения подобных отказов в будущем.

На основе собранных данных при наличии их достаточного объема возможно автоматическое формирование следующих рекомендаций:

- предложения по корректировке техпроцесса;
- задания на корректирующие действия;
- уведомления служб мониторинга качества.

3. Концептуальная схема взаимодействия компонентов:

Организационно-технологический эффект представлена на рисунке 3.1.2.

Такой подход позволяет перейти от регистрации дефектов к их профилактике и управляемому сокращению. Ключевое преимущество модели – отказ от финансовой оценки дефекта на этапе аналитики (например, в рублях), что устраняет влияние внешнеэкономических факторов, а анализ в натуральных показателях (доля, повторяемость, индекс связи с ЖЦИ).

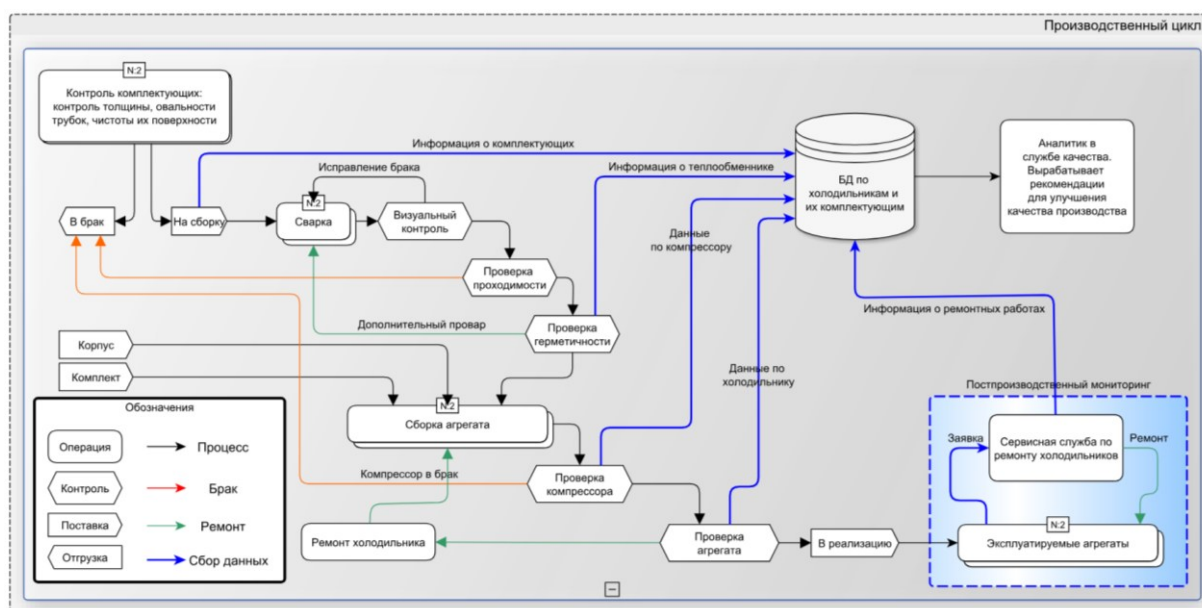


Рисунок 3.1.2 – Предлагаемая система контроля производства с элементами постпроизводственного мониторинга для АО «ПО «Завод имени Серго» (разработана автором)

В конечном счете ожидается, что цифровая модель станет комплексной компьютеризированной платформой для виртуального моделирования и анализа качества готовой продукции.

В ходе проведения теоретико-методологического анализа и структурирования подходов к мониторингу дефектов на постпроизводственном этапе в рамках CALS-парадигмы были обоснованы и систематизированы ключевые положения, раскрывающие возможности повышения качества и управляемости наукоемкого производства за счет

цифровизации процессов мониторинга

В рамках параграфа 2.2 была сформирована и предложена CALS-технология, ориентированная на постпроизводственный мониторинг. В отличие от традиционного этапного подхода, данная классификация фокусируется на функциональной роли компонентов в контексте жизненного цикла изделия: от цифровой фиксации параметров обработки до интеграционной логики и обратной связи в инженерные подсистемы.

В пункте 2.3 разработана и обоснована концептуальная модель систематизации дефектов, включающая в себя технологическую схему интеграции аналитического блока в ИСУП предприятия. Модель реализует принципы сквозного контроля/мониторинга качества и обеспечивает подключение блока аналитики к каждому этапу жизненного цикла продукции. Системная архитектура предполагает автоматизированную маршрутизацию данных от оборудования (MES/SCADA) в цифровое хранилище, последующую обработку средствами Big Data и машинного обучения, формирование управляющих решений в BI-среде и обратную интеграцию в ERP/PLM для коррекции техпроцессов. Тем самым формируется единый цифровой контур, способный не только реагировать на уже проявившиеся дефекты, но и прогнозировать потенциальные отклонения, снижая тем самым технологические потери.

Таким образом, автором предложено включение аналитических блоков в цифровую архитектуру предприятия как средства повышения адаптивности и технологической устойчивости.

Проведенное исследование и разработанная архитектура позволяют утверждать, что внедрение специализированного аналитического модуля постпроизводственного мониторинга в состав ИСУП является необходимым шагом к формированию замкнутого контура управления качеством.

Разработанная модель обеспечивает: автоматизированный сбор и структурирование данных о дефектах на архитектура предполагает автоматизированную маршрутизацию данных от оборудования

(MES/SCADA) в цифровое хранилище, последующую обработку средствами Big Data и машинного обучения, формирование управляющих решений в BI-среде и обратную интеграцию в ERP/PLM для коррекции без необходимости финансовых интерпретаций, что особенно важно на этапе оценки технической эффективности.

Функционально модуль включается в цифровую инфраструктуру предприятия через интерфейсы с MES, SCADA, ERP и BI-средами. Он становится частью архитектуры сквозного контроля/мониторинга, реализующего идею цифровой замкнутости жизненного цикла изделия. Внедрение предложенного решения не требует полной перестройки ИТ-среды, а предполагает добавление функционального блока в существующую архитектуру ИСУП, что делает его применимым на большинстве предприятий, находящихся в фазе цифровой трансформации.

Центральным аналитическим показателем, интегрирующим все уровни информации, может выступать показатель, отражающий степень соответствия параметров производства заданной эталонной модели и эксплуатационным откликам изделия. Он рассчитывается на основе отклонений, выявленных в процессе эксплуатации, и их корреляции с производственными характеристиками. Приближения к пороговым значениям показателей сигнализируют о необходимости вмешательства, в том числе на уровне инженерных решений и обслуживания.

Таким образом, предлагаемая модель не только расширяет границы постпроизводственного мониторинга, но и превращает предприятие в самообучающуюся систему, способную адаптировать производство в ответ на реальные эксплуатационные данные. Это создает основу для разработки и внедрения цифрового блока обратной связи в ИСУП, который замыкает цикл качества, снижает риски скрытых дефектов и формирует интеллектуальную основу для устойчивого производственного совершенствования.

3.2 Вероятностная модель исследования процесса сборки и постпроизводственного мониторинга

Для моделирования использовались генераторы случайных чисел. Актуальность такого подхода обусловлена стремительным развитием методов вероятностного моделирования производств, которые описываются статистическими моделями.

В данной задаче был принят нормальный закон распределения случайных показателей контролируемых критериев по комплектующим изделия и технологическим операциям с ними.

Нормальный закон описывается следующим уравнением:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2 \cdot \sigma^2}}, \quad (3.2.1)$$

где μ – среднее значение;

σ – среднеквадратичное отклонение для исследуемого распределения.

Нормальное распределение случайной величины (распределение Гаусса-Лапласа) является непрерывным распределением, которое можно считать основополагающим в математической статистике для описания различных событий, например:

- на исследуемый показатель оказывают влияние большое число случайных факторов;
- нормальное распределение обладает рядом математических свойств, обеспечивших его широкое применение в статистике, с помощью данного закона можно определить вероятность получения измерения в заданной области пространства;

Характерный вид кривой данного распределения показан на рисунке 3.2.1, здесь показано распределение для моделирования толщины медной трубки диаметром 6 мм.

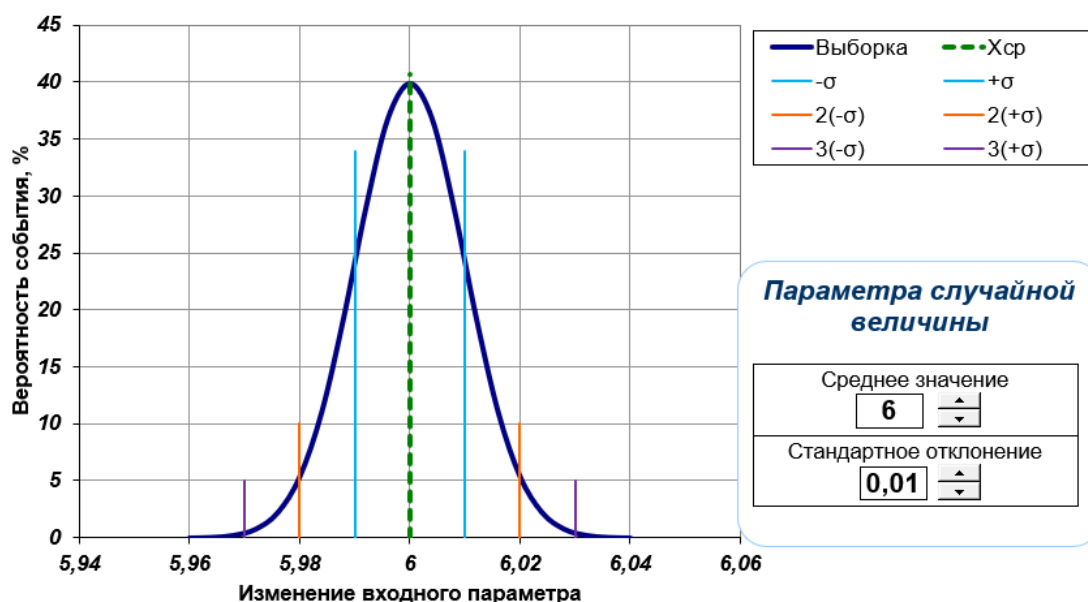


Рисунок 3.2.1 – Нормальное распределение с параметрами $\mu=6$ мм, $\sigma=0,01$ (построено автором)

Для определения критических значений параметра в зависимости от условий проведения исследований были использованы левый и правый интервалы погрешности (рисунок 3.2.2), которые определялись по следующим зависимостям:

- левый интервал = (заданная граница) $\leq X$;
- правый интервал = $X \leq$ (заданная граница).

Заданная граница представляет собой заданный критерий допуска изделия в работу, например утонение трубки не более 0,1 мм.

Значит ее наименьшая толщина должна быть больше 5,9 мм. Ясно, что толщина в 6 мм дает больше гарантий от разрушения при работе чем 5,91 мм, так как 5,9 мм будет отброшена при разбраковке.

Надо отметить, что ряд критериев необходимо рассматривать с центральным распределением, например толщина стенок трубок, так как толстая стенка сделает эту трубку менее устойчивой к вибрациям, которые имеют место при работе холодильника, что тоже будет приводить к его поломке. Однако при разработке модели на первом этапе мы остановились только на правом и левом интервалах, что несколько упрощает само решение. Так для

толщин трубок рассматривалось только их утонение, что может привести к преждевременной поломке.

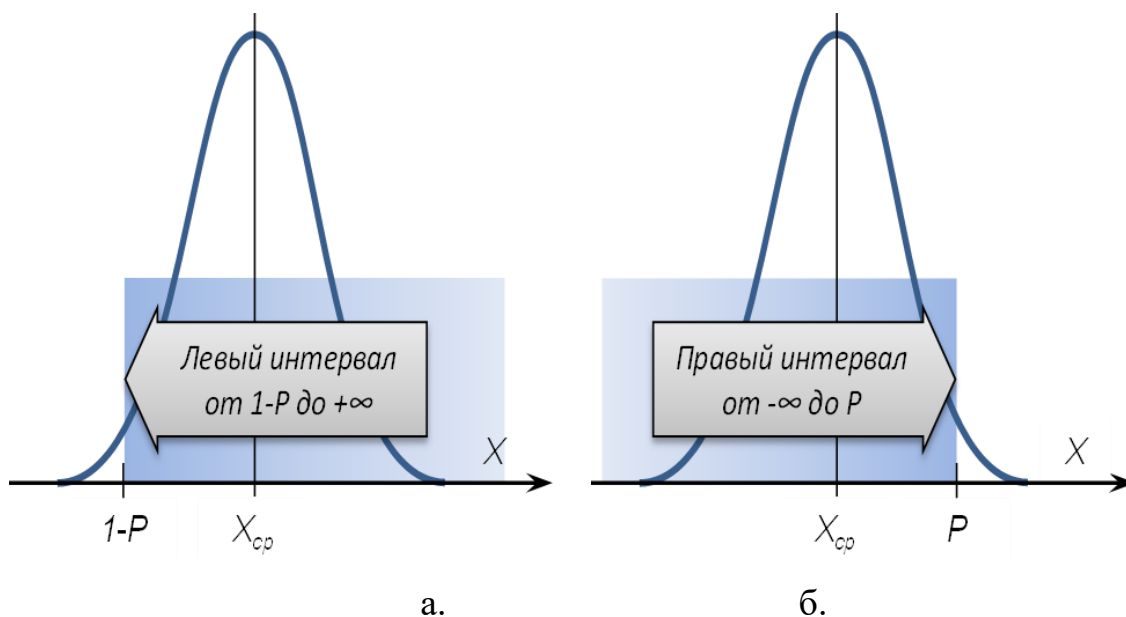


Рисунок 3.2.2 – Примеры левого (а.) и правого (б.) интервалов
(построено автором)

Основным расчетным методом в модели должен быть генератор случайных чисел (ГСЧ) с нормальным законом распределения, которого в пакете MS Excel нет, пути решения данных задач хорошо представлены здесь, где представлен хороший анализ возможностей Excel для решения статистических задач.

Существует достаточно много методик для реализации генераторов. предлагаются три варианта создания ГСЧ.

Первый метод строится на центральной предельной теореме:

$$x_{сч} = \sqrt{\frac{12}{n}} \cdot \sum_{i=1}^n (r_i - 0,5), \quad (3.2.2)$$

где $x_{сч}$ – равномерно распределенное число в интервале от 0 до 1 (стандартный ГСЧ из Excel);

n – количество используемых СЧ.

Для упрощения формулы нужно использовать $n = 12$:

$$x_{сч} = \sum_{i=1}^{12} r_i - 6. \quad (3.2.3)$$

Данный подход требует до 12 обращений к стандартной функции ГСЧ с равномерным распределением, что требует определенного машинного времени.

Второй способ построен на известном факте, что распределение произведения двух независимых случайных величин, когда одна из них имеет распределение Релея, а другая распределена по закону арксинуса, является нормальным. Данное решение описывается следующей формулой:

$$x_{сч} = \sqrt{-2 \cdot \ln(x_1)} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot x_2), \quad (3.2.4)$$

где x_1 и x_2 – два случайных числа с равномерным распределением в интервале от 0 до 1.

В этом методе требуется только два обращения к стандартной функции ГСЧ с равномерным распределением.

Третий способ так же использует два независимых равномерно распределенных от 0 до 1 случайных числа x_1 и x_2 (они определяют координаты случайных точек на плоскости от 0 до 1). Преобразуем эти числа в область от –1 до 1 следующим образом:

$$x_1 = 2x_1 - 1; \quad x_2 = 2x_2 - 1, \quad (3.2.5),$$

где x_1, x_2 – случайные числа.

Далее вычислим величину d (допустимая область для начальных значений параметров дефектов).

$$d = x_1^2 + x_2^2. \quad (3.2.6)$$

Если $d \leq 1$, то вычисляются величины двух СЧ с нормальным законом распределения:

$$c = \frac{\sqrt{-2 \cdot \ln(d)}}{d}; \quad x_{сч_1} = c \cdot x_1; \quad x_{сч_2} = c \cdot x_2. \quad (3.2.7)$$

В этом подходе могут возникать циклы поиска значения d , что приводит к увеличению времени расчета.

На основании описанных выше алгоритмов были созданы

подпрограммы генераторов и проведены их исследования. Результаты исследований показали, что два первых алгоритма дают близкие результаты по качеству создания ГСЧ, но первый генерирует наборы с достаточно большой асимметрией. Третий способ показал явное увеличение времени расчета и худшие результаты в сравнение с двумя первыми методами и был отброшен. Примеры распределений показаны на рисунке 3.2.3.

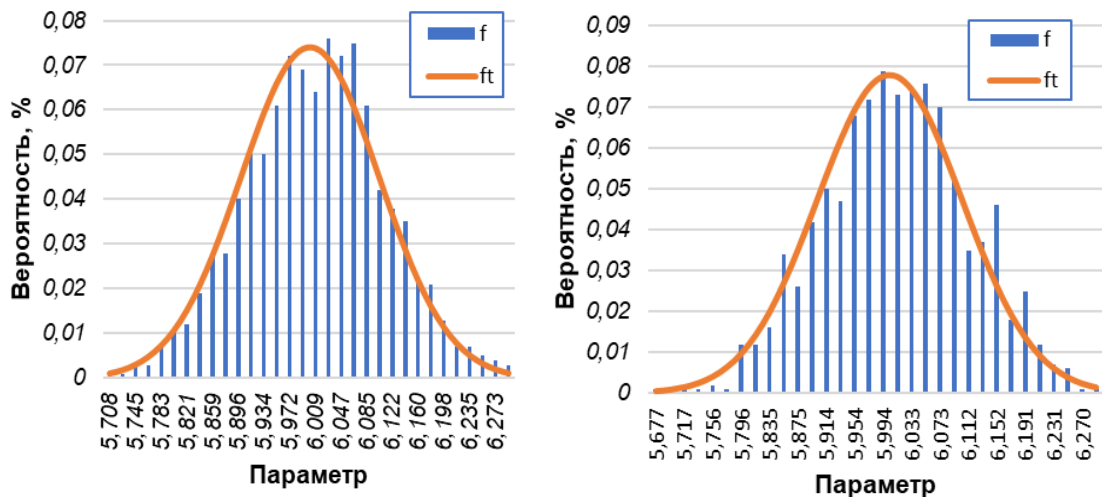


Рисунок 3.2.3 – Результаты моделирования СЧ (построено автором)

На основании проведенных исследований для моделирования был использован второй алгоритм ГСЧ.

Начальные параметры набора дефектов характеризуются случайным вектором $v = \{v_1, \dots, v_n\}$. На основании этих данных определяются плотности распределения вероятностей параметров дефектов $f_i(v_i)$:

$$R_1(n) = \iint_{[D(n)]} f_1(v_1) \cdot f_2(v_2) \cdot \dots \cdot f_n(v_n) \cdot dv_1 \cdot dv_2 \cdot \dots \cdot dv_n, \quad (3.2.8)$$

где $[D(n)]$ – допустимая область для начальных значений параметров дефектов;

v_i – параметр i -ого дефекта.

Параметр вероятности обнаружения дефекта (ВОД) позволяет перейти от плотностей распределения параметров обнаруженных дефектов к плотностям распределения всех дефектов, которые имеются в изделии.

Общая надежность всех соединений будет определяться по следующей формуле:

$$R_j(k, n) = \prod_{i=0}^k R_{ij}(n), \quad (3.2.9)$$

где k – число одинаковых дефектов.

Предполагая, что распределение случайной величины числа одинаковых дефектов может быть описано законом Пуассона [3]:

$$\Pi_{kj}(x) = \frac{(\lambda_j \cdot x)^k \cdot \exp(-\lambda_j \cdot x)}{k!}. \quad (3.2.10)$$

Используя данное выражения получаем формулу полной вероятности надежности изделия:

$$R_j(k, n) = \sum_{k=0}^{\infty} \Pi_{kj}(x) \cdot \prod_{i=0}^k R_{ij}(n). \quad (3.2.11)$$

которая в упрощенном виде может быть представлена так:

$$R(n) = \prod_j R_j(n), \quad (3.2.12)$$

где $R_j(n)$ – надежность соединения для j -ого дефекта после n нагружений.

Анализ отказов. В общем случае упрощенная (качественная) модель оценки вероятности $\Delta\varphi(x)$ потери качества для данного вида и размера дефектов в интервале от x до $x + \Delta x$ может быть представлена следующим образом:

$$\Delta\varphi = \varphi_p \cdot \varphi_\varepsilon, \quad (3.2.13)$$

где φ_p – вероятность наличия реальных дефектов в соединении;

φ_ε – вероятность влияния дефектов на потерю работоспособности.

В то же время вероятность обнаружения дефектов $\varphi_o(x)$, полученная по результатам контроля, связана с реальной дефектностью $\varphi_p(x)$ функцией выявляемости дефектов или достоверности контроля швов $F_o(x)$. Для конкретных значений $\varphi_o(x)$ имеем:

$$\varphi_o = \varphi_p \cdot \varphi_o. \quad (3.2.14)$$

Как показывает теория и подтверждает эксперимент, плотность распределения реальных дефектов $f_p(x)$ часто выражается экспонентой. Плотность $F_d(x)$ для обнаруженных дефектов оказывается при малых x как бы «усеченной» за счет кривой выявляемости $F_d(x)$. Например, при линейном законе выявляемости, когда $F_d(x) = ax$, плотность $f_0(x)$ близка к закону Вейбулла.

Если при данных значениях параметра дефектности x , характеризующего вид, интенсивность и размеры дефектов, выявляемость $\varphi_d=1$, то $\varphi_p = \varphi_o$ и можно говорить сразу о плотности вероятности появления дефектов $\varphi_p(x)$.

Это соответствует ступенчатому варианту функции $F_d(x)$. Функция плотности вероятностей потери качества из-за наличия дефектов, получается, как сочетание $\varphi_p(x)$ и $F_s(x)$. По форме она также оказывается близкой к распределению типа Вейбулла.

Для оценки рисков использовались кривые риска $\lambda(x)$:

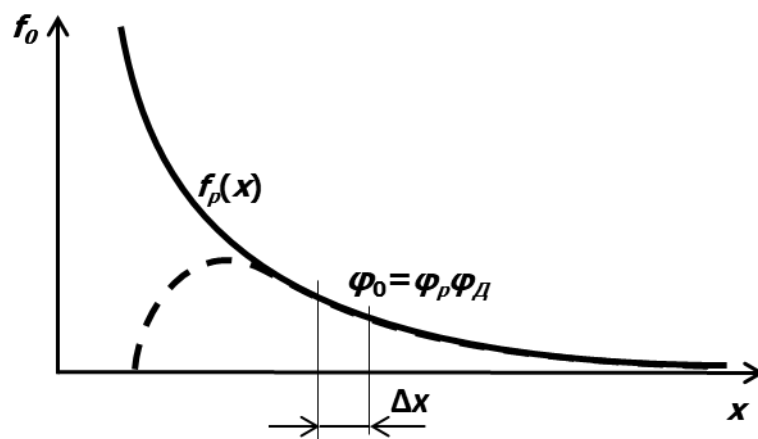
$$\lambda(x) = \frac{f(x)}{1 - F(x)}, \quad (3.2.15)$$

где $f(x)$ – плотность распределения случайной величины;

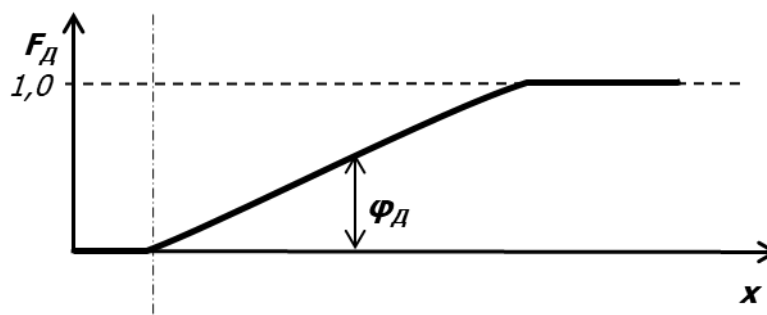
$F(x)$ – кривая накопления случайной величины.

Данные кривые использовались для определения вклада бракованных комплектующих в надежность работы аппарата и для расчета прогнозного времени его работы.

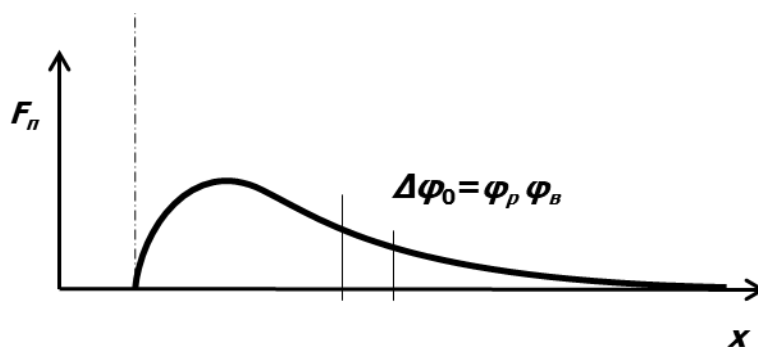
Алгоритм расчета модели представлен на рисунке 3.2.4. На первом этапе формируется набор компонентов и контрольных данных по операциям согласно заданному набору изделий.



а.



б.



в.

Рисунок 3.2.4 – Вероятностная модель оценки потери качества сварных соединений (а – обнаружение дефектов; б – чувствительность контроля; в – вероятность потери качества) (составлено автором)

Исходными данными для этого являются:

- заданное число готовых изделий для потребителя;
- статистические характеристики измерительной и контрольной аппаратуры;
- контрольное значение по браку.

В цикле по заданному количеству изделий генерируются показатели каждого комплектующего или операции. При нарушении критического значения по браку, деталь или операция отбрасываются и фиксируется брак для учета. Данная деталь не попадает в готовый набор для сборки изделия. Алгоритм расчета модели представлен на рисунке 3.2.5.

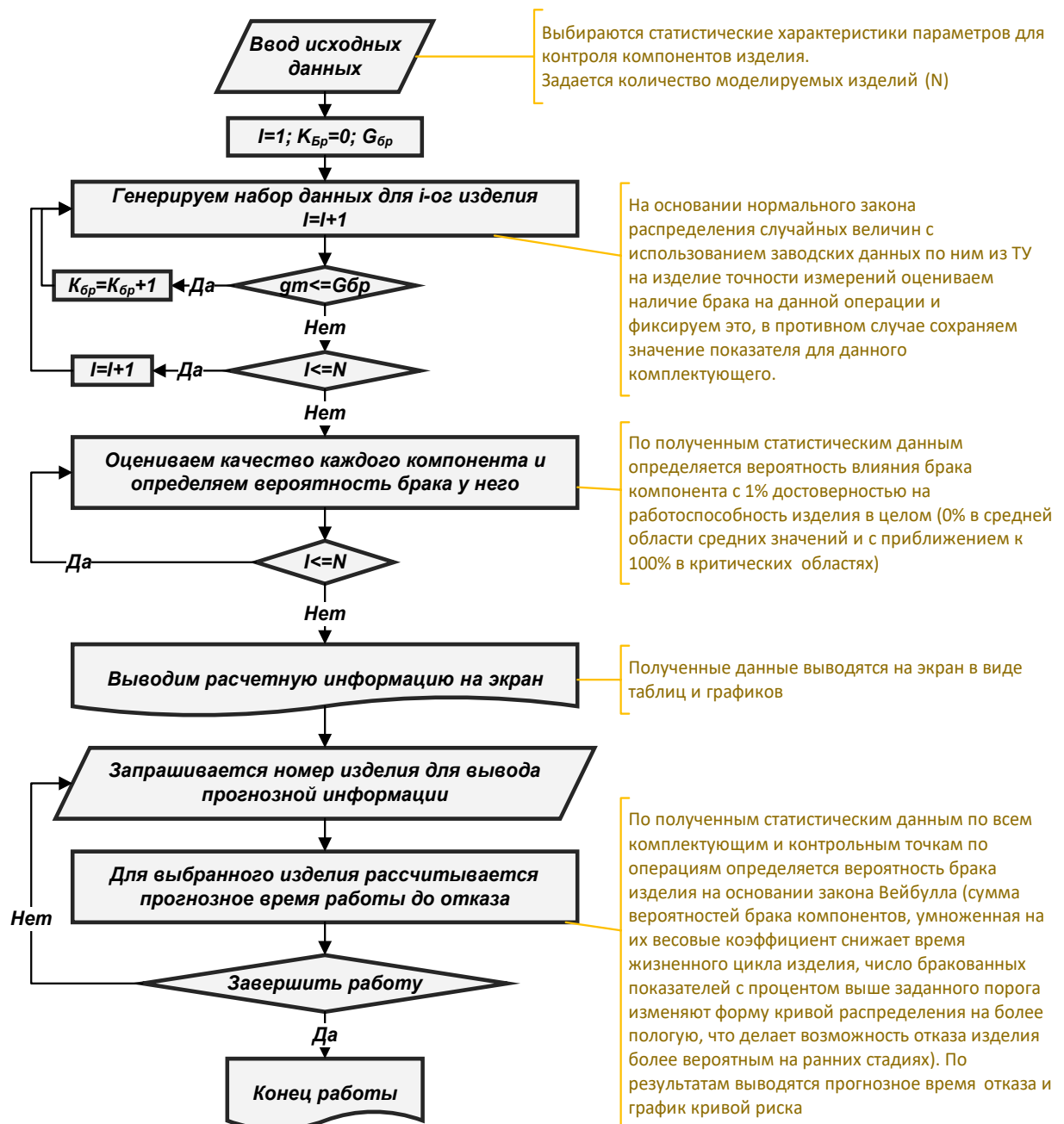


Рисунок 3.2.5 – Алгоритм расчета модели (разработан автором)

Затем для каждого изделия на основании имеющихся данных по компонентам и операциям определяем отклонение от качественного компонента, который соответствует среднему значению показателя. Для каждого изделия вычисляются суммарное отклонение качества компонентов и операций от их средних значений и общее число компонентов и операций, имеющих отклонение от среднего значения более чем на заданный процент. На основании этих данных по закону Вейбулла вычисляется прогнозный срок службы изделия [92].

Повышением требований к надежности изделий в различных отраслях промышленности, что делает важным создание универсальных инструментов моделирования жизненного цикла для профилактики отказов и оптимизации технического обслуживания. Методы исследования включают статистический анализ данных о качестве компонентов, применение современных генераторов случайных чисел и разработку функций риска, позволяющих оценивать вероятность отказа на различных этапах эксплуатации изделия.

3.3 Методика организации постпроизводственного мониторинга дефектов с замкнутым циклом управления качеством

Для повышения эффективности системы управления качеством на АО «Производственное объединение «Завод имени Серго»» предлагается внедрение дополнительного модуля постпроизводственного мониторинга в состав интегрированной системы управления предприятием (ИСУП) [84]. Основная цель такого модуля – обеспечить цифровую обратную связь на основе фактических данных о дефектах, выявленных во время эксплуатации изделия. Это позволит перейти от реактивного к преактивному управлению качеством, с акцентом на предотвращение повторяемых ошибок и повышение устойчивости производственных процессов.

Для реализации полноценного модуля пост мониторинга в составе ИСУП предприятия целесообразно построить систему гарантийного обслуживания изделий с хорошо настроенной обратной связью от ремонтников.

Как вариант, предлагается создание бот-приложения в Telegram, которое обеспечит связь с базой данных по проданным холодильникам по их номерам и обратную связь с информацией по причинам ремонта. Для удобства заполнения информации ремонтниками и ее универсальности предлагается следующая классификация дефектов и их причин, по которым исполнитель будет заполнять ответную форму.

Классификатор строится на основании критериев контроля качества изделий на предприятии, например, список из заводских данных:

- утечка хладагента из системы;
- трещина по шву (какому указать);
- трещина по трубке (какой указать);
- расхождение элемента обжима.
- замена шкафа изделия из-за его дефектов или теплозащиты;
- регулировка двери;
- неплотное прилегание уплотнения на двери;
- дефект двери (трещина, накладки, деформация).

На рисунке 3.3.1. показан график поломок по годам и категориям, представленным выше. Как видно, проблемы с качеством холодильного агрегата (утечка) стоят на первом месте. По годам имеется тенденция по снижению брака, что, по-видимому, связано с внедрением систем бережливого производства и повышения качества продукции.

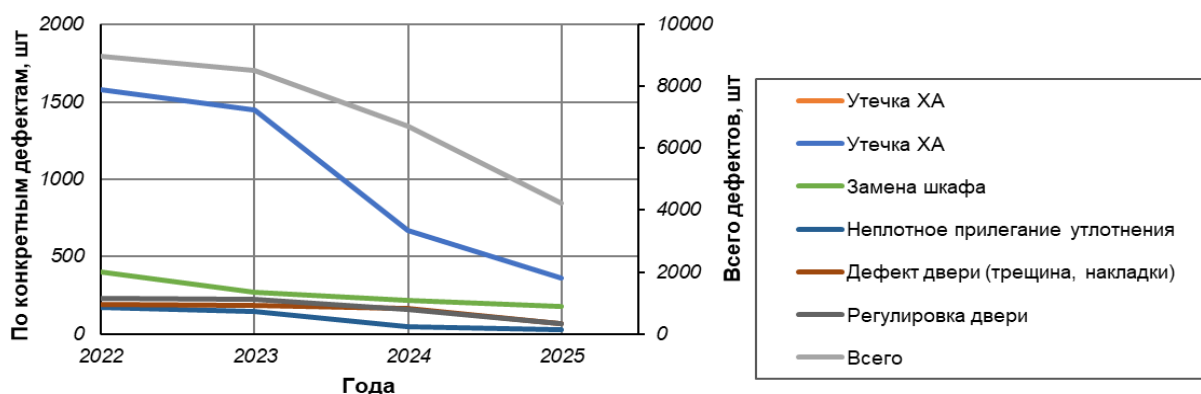


Рисунок 3.3.1 – Диаграмма зарегистрированных отказов по годам
(построена автором)

Разработана методика постпроизводственного мониторинга дефектов, ориентированная на интеграцию систем управления производством, планирования ресурсов, жизненного цикла продукции и бизнес-аналитики (таблица 3.3.1).

Таблица 3.3.1 – 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: $2\% \leq r_T < 5\%$ – корректирующие действия; красный: $r_T \geq 5\%$ – 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 $E = f(\Delta D, \Delta T, \Delta Q)$, 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.

При оценке внедрения предлагаемой методики на основе постпроизводственного мониторинга могут быть построены следующие метрики, отражающие качество, стабильность процессов и эффективность обратной связи (таблица 3.3.2).

Таблица 3.3.2 – Ключевые метрики, отражающие уровень качества, стабильность процессов и эффективность обратной связи (предложены автором)

№	Наименование метрики	Сущность	Технологии и системы	Назначение и применение
1	Индекс постпроизводственной дефектности пайки (PPDI)	Процент изделий, не прошедших этап мониторинга герметичности	Ecotec E3000,	Корректировка критерия герметичности
2	Частота возврата холодильников на УАР (участок анализа и ремонта)	Доля продукции, возвращенной на доработку после герметизации	MES, PLM, RFID, штрихкодирование	Корректировка СОК и технологических карт
3	Индекс цифровой прослеживаемости пайки (Weld Trace Index)	Полнота контроля на всех этапах пайки и мониторинга	MES, PLM, BI	Юридическая и технологическая реконструкция
4	Коэффициент отклонений в теплотехнических испытаниях	Процент брака на АСИХ	АСИХ, PLM, MES	Контроль качества по параметрам
5	Частота выявления утечек после вакуумирования	Доля скрытых дефектов пайки	Ecotec E3000, протоколы испытаний	Профилактика повторяемых дефектов
6	Коэффициент автоматизации корректирующих действий	Доля дефектов с корректирующими мерами	BI, MES, PDM	KPI зрелости обратной связи

Предлагаемое решение (система постпроизводственного мониторинга) будет интегрироваться с уже существующими цифровыми платформами предприятия: MES 1C, ERP 1C:ERP, а также PLM-системами. Сбор и обработка информации будут обеспечиваться автоматически на всех этапах пайки, от первичной фиксации до анализа отклонений при испытаниях. Принцип работы предлагаемого модуля построен на отслеживании ключевых метрик.

Логическая схема решения представлена на рисунке 3.1.2. Она предполагает размещение на всех рабочих постах автоматизированные системы контроля исполнения операций с передачей данных в общую базу.

При получении рекламации с данными холодильника, аналитик должен провести анализ причин и определить бракованные элементы сборки, а потом сформулировать пути исключения повторных отказов изделий. Данный подход обеспечит циклическую обратную связь: от выявления дефекта – к обновлению технологических регламентов, формируя замкнутый контур повышения качества продукции предприятия.

По результатам проведенного исследования можно сказать, что на АО «Производственное объединение «Завод имени Серго»» существует определенная система мониторинга качества продукции на основных этапах ее жизненного цикла – от планирования и проектирования производства до реализации готовой продукции. На предприятии описаны и стандартизированы основные этапы мониторинга качества. Однако изучение данного процесса показало, что отсутствует полноценный производственный контроль качества как комплектующих, так и самих изделий, который мог бы оптимизировать критерии контроля компонентов и привести к обоснованному сокращению брака изделий. Основным недостатком системы контроля является слабый учет отказов изделий во время их эксплуатации, поэтому предлагается дополнить систему модулем постпроизводственного мониторинга изделий.

Последовательность постпроизводственного мониторинга дефектов на предприятии машиностроительного профиля с интеграцией ERP-, MES-, PLM-

и BI-систем представлена на рисунке 3.3.2.

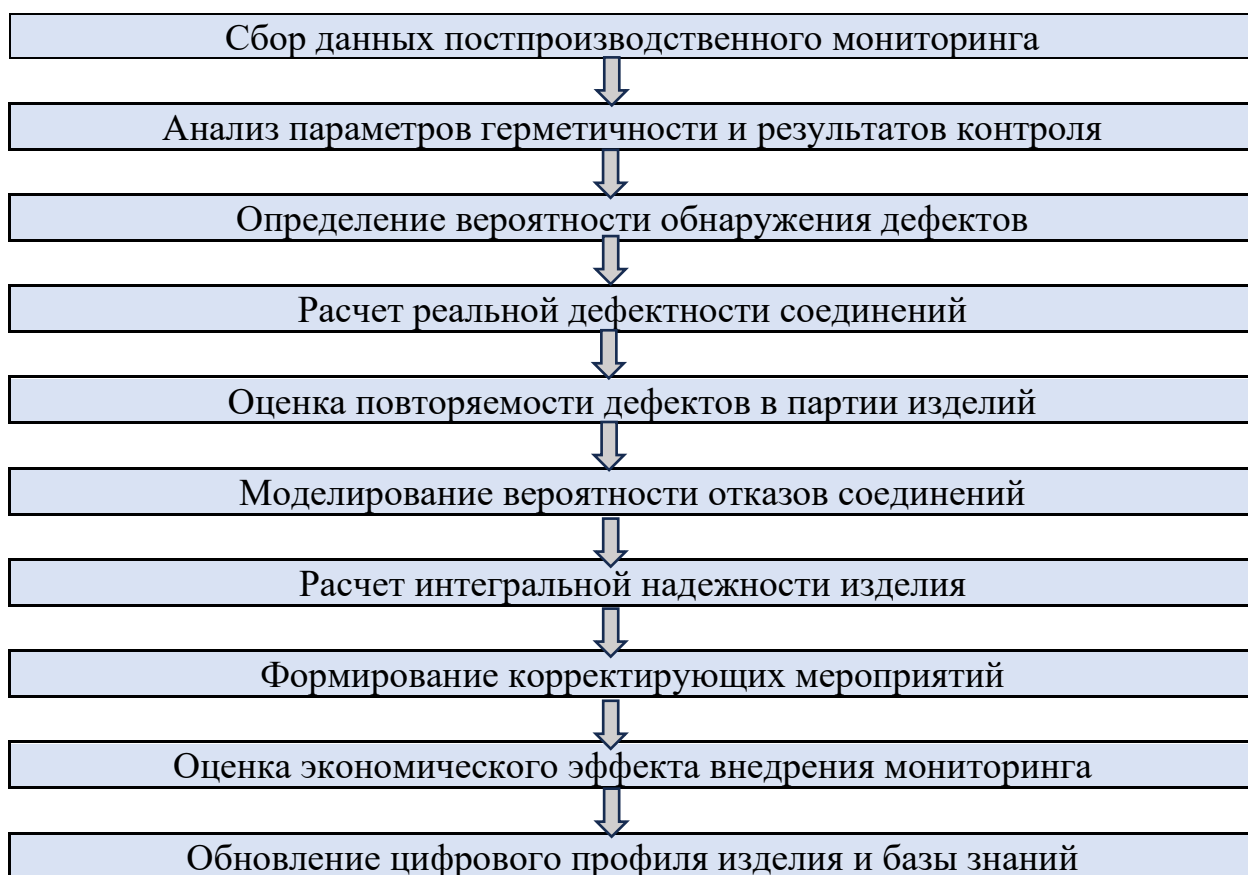


Рисунок 3.3.2 – Последовательность постпроизводственного мониторинга дефектов на предприятии машиностроительного профиля с интеграцией ERP-, MES-, PLM- и BI-систем (предложено автором)

Целью методики является организация постпроизводственного мониторинга дефектов на предприятии машиностроительного профиля с интеграцией ERP-, MES-, PLM- и BI-систем. Методика направлена на автоматизацию сбора данных, формирование цифрового профиля изделия, оценку показателей качества и надежности, вычисление экономического эффекта и прогнозирование отказов продукции.

Шаг 1. Сбор исходных данных и формирование цифрового профиля изделия. На данном этапе осуществляется сбор исходной информации о каждой партии изделий:

- источники данных: MES, ERP, PLM, SCADA, BI, сервисная статистика;

- фиксируются: ID изделия, партия, смена, участок, оператор, материалы, приборные и визуальные показатели, фотофиксация;
- формируется цифровой профиль изделия (рисунок 3.3.3), включающий все параметры производственного процесса и контроль качества.

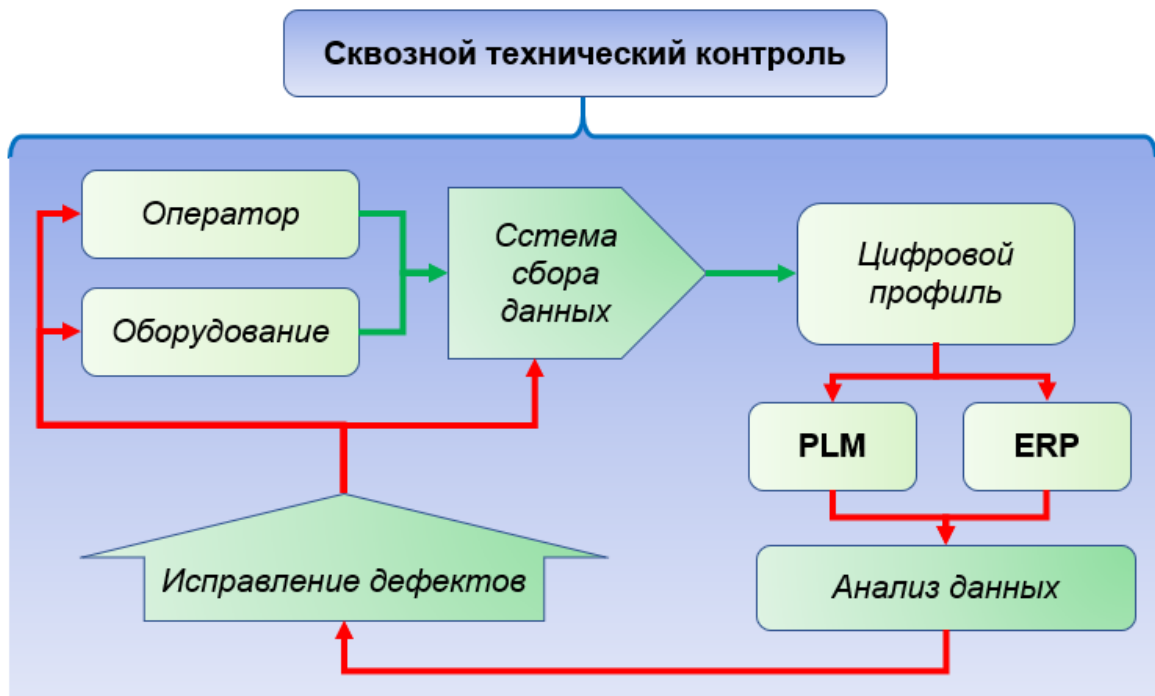


Рисунок 3.3.3 – Создание и ведение цифрового профиля продукции на этапе пайки (построено автором)

Шаг 2. Формирование показателей качества и надежности:

- классические KPI: PPDI, возвраты;
- время устранения несоответствия;
- ASCAI;
- индекс цифровой прослеживаемости.

Авторские показатели надежности:

- $\varphi_o(x)$ – 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;
- ИЦСИ – индекс цифрового следа изделия.

Шаг 3. Математическая постановка и расчеты:

- для анализа параметров дефектов используются статистических распределений: нормальное, логнормальное, Вейбулла;
- надежность соединений $R_j(n)$ рассчитывается как вероятность сохранения работоспособности, а интегральная надежность изделия:

$$R_{sys}(n) = \prod_{j=1}^m R_j(n)^{k_j}. \quad (3.3.1)$$

Моделирование применяется для оценки вероятности отказов изделия и расчета риска:

$$r_T = 1 - R_{sys}(T). \quad (3.3.2)$$

Шаг 4. Сбор, очистка и калибровка данных, привязка измерений к ID изделия, проверка единиц измерения, фильтрация выбросов:

- обогащение данных сервисной информацией о ремонтах и гарантийных случаях.

Шаг 5. Аналитика. Аналитическая обработка данных:

- процедура сбора, очистки и трансформации массивов информации (ETL);
- визуализация данных и KPI с помощью BI-дэшбордов.

Шаг 6. Определение и обоснование пороговых значений и правил действий:

- допустимый уровень (зеленый сектор);
- предупредительный уровень (желтый сектор);
- критический уровень (красный сектор).

Шаг 7. Верификация и валидация модели:

- кросс-валидация, калибровка вероятность обнаружения дефектов;
- регулярное обновление параметров модели для повышения точности прогнозов.

Шаг 8. Регламент ролей и ответственности:

- PLM-инженеры: контроль и обновление цифровых моделей изделий;

- технологи: анализ производственных параметров;
- аналитики BI: расчет и визуализация KPI;
- ERP/финансы: контроль экономического эффекта и затрат;
- сервис: информация о гарантийных и ремонтных случаях.

Шаг 9. Экономическая интеграция:

- рассчитываются экономические показатели:

$$\text{ЭЭ} = f(\Delta D, \Delta T, \Delta Q),$$

где ΔD – снижение дефектности;

ΔT – сокращение времени на ремонт;

ΔQ – повышение качества;

ЭЭ – общий экономический эффект.

Результаты визуализируются в BI-дэшбордах.

Шаг 10. Прогнозирование отказов и гарантийного срока:

- определяется частота отказов λ и прогнозируемый срок службы изделия l_{pred} ;

- рассчитывается оптимальный гарантийный срок t_{gar} , исходя из надежности r_{sys} и экономической эффективности;

Ключевыми метриками, подлежащими автоматизированному отслеживанию, являются:

- процент изделий, не прошедших контроль герметичности после пайки;
 - частота возвратов продукции на участок анализа и ремонта (УАР)
- доля изделий, потребовавших доработку;
- среднее время устранения дефекта (время устранения несоответствия) – временной промежуток от регистрации проблемы до ее полного устранения;
 - доля выявленных дефектов, по которым были предприняты меры по устранению и недопущению повторения;

– индекс цифровой прослеживаемости – полнота и актуальность документирования параметров пайки и связанных контрольных мероприятий.

Таблица 3.3.3 – Основные обозначения методики постпроизводственного мониторинга и оценки вероятности отказа (предложено автором)

Обозначение	Наименование	Характеристика
$\varphi_o(x)$	Вероятность обнаружения дефекта при контроле	Определяется по данным системы контроля (MES/НК). Показывает долю дефектов, выявленных при проверке
$\varphi_d(x)$	Достоверность контроля (вероятность выявляемости дефекта)	Задается характеристиками приборов и методов НК; оценивается по эталонным образцам и результатам проверок
$\varphi_r(x)$	Реальная дефектность соединений	Вычисляется делением вероятности обнаруженных дефектов $\varphi_o(x)$ на вероятность выявляемости $\varphi_d(x)$. Отражает фактическую долю дефектов, включая пропущенные при контроле
$R_j(n)$	Надежность j-го соединения при n циклах нагружения	Рассчитывается как вероятность сохранения работоспособности соединения на заданное число циклов. Определяется по статистическим законам распределения (чаще всего экспоненциальному или Вейбулла)
R_{sys}	Интегральная надежность изделия	Получается умножением вероятностей сохранения работоспособности всех соединений. Отражает совокупный риск отказа всего изделия
k	Число одинаковых дефектов	Моделируется по закону Пуассона. Зависит от средней повторяемости дефектов в партии
λ_{rep}	Частота повторяющихся дефектов	Рассчитывается как доля повторно возникающих отклонений в серии изделий. Определяется по данным PLM и сервисной статистики
ΔD	Сокращение количества дефектов	Разница между числом дефектов до внедрения методики и после нее
ΔT	Экономия трудозатрат	Определяется как произведение разницы во времени устранения дефектов «до» и «после» на количество устраненных дефектов
ΔQ	Прирост годной продукции	Рассчитывается по снижению индекса дефектности после внедрения мониторинга и умножению на общее количество изделий
<i>ИЦСИ</i>	Индекс зрелости цифрового следа	Оценивает полноту цифровой информации об изделии (данные MES, ERP, PLM). Рассчитывается как доля изделий с полностью заполненным цифровым профилем
<i>ЭЭ</i>	Экономический эффект	Итоговый показатель, складывающийся из трех компонентов: сокращения дефектов (ΔD), экономии трудозатрат (ΔT) и прироста годной продукции (ΔQ), умноженных на их стоимостные коэффициенты

Для реализации данного функционала используются цифровые

решения, представленные в таблице 3.3.4

Таблица 3.3.4 – Состав программного обеспечения системы мониторинга и контроля качества (предложен автором)

ПО/система	Назначение и функция
MES (например, 1C:MES)	Фиксация результатов операций в реальном времени (пайка, контроль, возврат, доработка)
ERP (например, 1C:ERP)	Расчет всех ключевых метрик на основе данных MES и PLM. Управление заданиями, производственными циклами
SCADA / OPC-сервер	Получение и передача параметров пайки от оборудования (Ecotec E3000, AGRAMKOV HRM6)
PostgreSQL / MS SQL	Централизованное хранилище метрик и технических параметров
BI-системы (Power BI, Qlik)	Визуализация метрик в виде дашбордов: тренды, отклонения, сравнение по сменам, участкам, изделиям
ECM (электронный архив)	Документирование корректирующих действий, отчеты, служебные записки

Таким образом, методика постпроизводственного мониторинга дефектов, ориентированная на интеграцию ERP-, MES-, PLM- и BI-систем, обеспечивающая автоматизацию сбора данных, формирование цифрового профиля изделий, оценку показателей качества и надежности, расчет экономического эффекта и прогнозирование отказов продукции, реализуется в десяти последовательных шагах:

- 1) сбор исходных данных и формирование цифрового профиля изделия;
- 2) формирование показателей качества и надежности;
- 3) математическая постановка и расчеты;
- 4) сбор, очистка и калибровка данных.
- 5) аналитическая обработка данных;
- 6) определение пороговых значений и правил действий;
- 7) верификация и валидация модели;
- 8) регламент ролей и ответственности;
- 9) экономическая интеграция;
- 10) прогнозирование отказов и гарантийного срока.

Ключевыми метриками, подлежащими автоматизированному контролю, являются:

- доля изделий, не прошедших контроль герметичности после пайки;
- частота возвратов на участок анализа и ремонта; среднее время устранения дефекта (время устранения несоответствия); доля выявленных дефектов, по которым предприняты корректирующие меры;
- индекс цифровой прослеживаемости (индекс цифрового следа изделия).

Для реализации мониторинга используются цифровые решения MES, ERP, SCADA, PLM, BI-системы и централизованные базы данных, что обеспечивает единый цифровой профиль изделия и интеграцию всех этапов контроля.

3.4 Программное средство прогнозирования отказов изделия по контролируемым техническим и технологическим параметрам на этапе сборки

Для реализации этого решения, с учетом требований к тестированию программных средств [48], была создана программа в среде VBA Excel, которая моделирует вероятностные распределения указанных выше контрольных параметров с использованием статистических данных о контрольных точках с предприятия. Для них строились нормальные распределения. Согласно требованиям ГОСТ, использовались уровни достоверности (1 – вероятность) для производства 0,01. Алгоритмическая основа и структура программного средства базируются на зарегистрированной программе для ЭВМ № 2025689256 [82]. Организационно-информационная модель и методология автоматизации аналитических процедур опираются на исследования Скобелева К. Д. по цифровым системам поддержки решений и моделям повышения качества работы испытательных лабораторий [122, 123, 124], а также методы математического мониторинга [139, 91].

Исходными данными являются контрольные параметры для указанных точек контроля (фрагмент таблицы программного продукта показан на рисунке 3.4.1).

Исходные данные										
Открыть форму	Контрольные точки					Геометрия компонентов				
	Проверка проходимости	Герметичность по утечке гелия	Проверка ХП с компрессором	Проверка температурно-энергетических параметров	Стыки №2 и №3	Капиллярная трубка d=2 мм	Капиллярная трубка d=2,1 мм	Медная трубка d=4 мм	Медная трубка d=6 мм	
	Объект	КТ_01	КТ_02	КТ_03	КТ_04	КТ_05	КТ_06	КТ_07	КТ_08	КТ_09
	Дисперсия	0,0009	0,0001	0,1600	0,0025	0,0001	0,0001	0,0001	0,0004	0,0009
	Среднее	6	2	80	10	2	2	2,1	4	6
	Достоверность	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
	Область	Левая	Правая	Средняя	Средняя	Левая	Средняя	Средняя	Средняя	Средняя

Рисунок 3.4.1 – Фрагмент первых девяти параметров контроля

Программа генерирует заданное число холодильников для каждого из них строит распределения по дефектам с использование нормального закона распределения случайных величин, для визуализации результатов выводятся графики распределений по каждому из возможных дефектов. Моделирование процессов показало, что в каждой точке контроля возможны выходы за допустимые пределы из-за погрешностей контрольного прибора или по другим причинам, что видно из графика (рисунок 3.4.2).

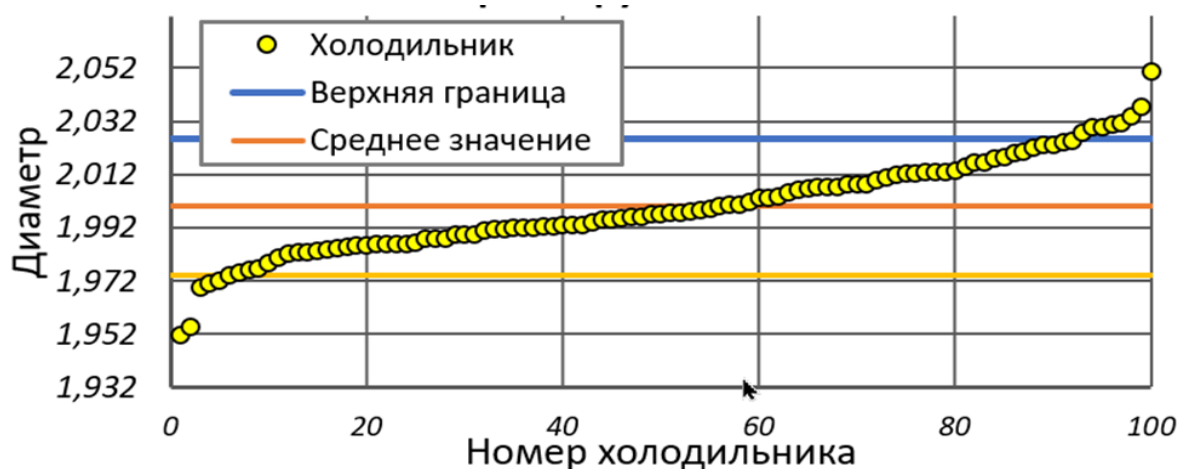


Рисунок 3.4.2 – Распределение контрольных параметров по размеру капиллярной трубки для всего набора холодильников (построено автором)

Изменяя входные данные (дисперсию и достоверность) можно достичь желаемых результатов, которые имеются на предприятии и затем дополнив эти данные результатами постпроизводственной работы холодильника можно строить прогнозные модели и проводить их анализ.

На основании расчетов по всем холодильникам строятся общие вероятности влияния дефектов на работу аппарата.

В общем случае упрощенная (качественная) модель оценки вероятности $\Delta\varphi(x)$ потери качества для данного вида и размера дефектов в интервале от x до $x + \Delta x$ может быть представлена следующим образом:

$$\Delta\varphi = \varphi_p \cdot \varphi_\phi, \quad (3.4.1)$$

где φ_p – вероятность наличия реальных дефектов в соединении (рисунок 3.4.1);

φ_ϕ – вероятность влияния дефектов на потерю работоспособности.

В то же время вероятность обнаружения дефектов $\varphi_o(x)$, полученная по результатам контроля, связана с реальной дефектностью $\varphi_p(x)$ функцией выявляемости дефектов или достоверности контроля швов $F_o(x)$. Для конкретных значений $\varphi_o(x)$ имеем:

$$\varphi_o = \varphi_p \cdot \varphi_d. \quad (3.4.2)$$

Как показывает теория и подтверждает эксперимент, плотность распределения реальных дефектов $f_p(x)$ часто выражается экспонентой. Плотность $f_o(x)$ для обнаруженных дефектов оказывается при малых x как бы «усеченной» за счет кривой выявляемости $F_o(x)$. Например, при линейном законе выявляемости, когда $F_o(x) = ax$, плотность $f_o(x)$ близка к закону Вейбулла (рисунок 3.2.4).

Если при данных значениях параметра дефектности x , характеризующего вид, интенсивность и размеры дефектов, выявляемость $\varphi_o \approx 1$, то $\varphi_p = \varphi_o$ и можно говорить сразу о плотности вероятности появления дефектов $\varphi_p(x)$. Это соответствует ступенчатому варианту функции $F_o(x)$. Функция плотности вероятностей потери качества из-за наличия дефектов, получается, как сочетание $\varphi_p(x)$ и $F_\phi(x)$. По форме она также оказывается близкой к распределению типа Вейбулла.

Для удобства выполнения расчетов программа была переведена в оконный вариант работы (рисунок 3.4.3)

При необходимости можно изменить число анализируемых холодильников (по умолчанию их 100 штук). Ниже расположен блок исходных данных, который можно корректировать, изменяя среднее значение контролируемого параметра, его дисперсию и достоверность.

По кнопке «Рассчитать» выполняется расчет статистических данных для каждого холодильника и заполняется таблица по каждому из них (рамка «Результаты расчета»). Над каждой контрольной точкой (КТ_00) расположена радиокнопка, которая выводит график вероятностного распределения для данного параметра по всем холодильникам.

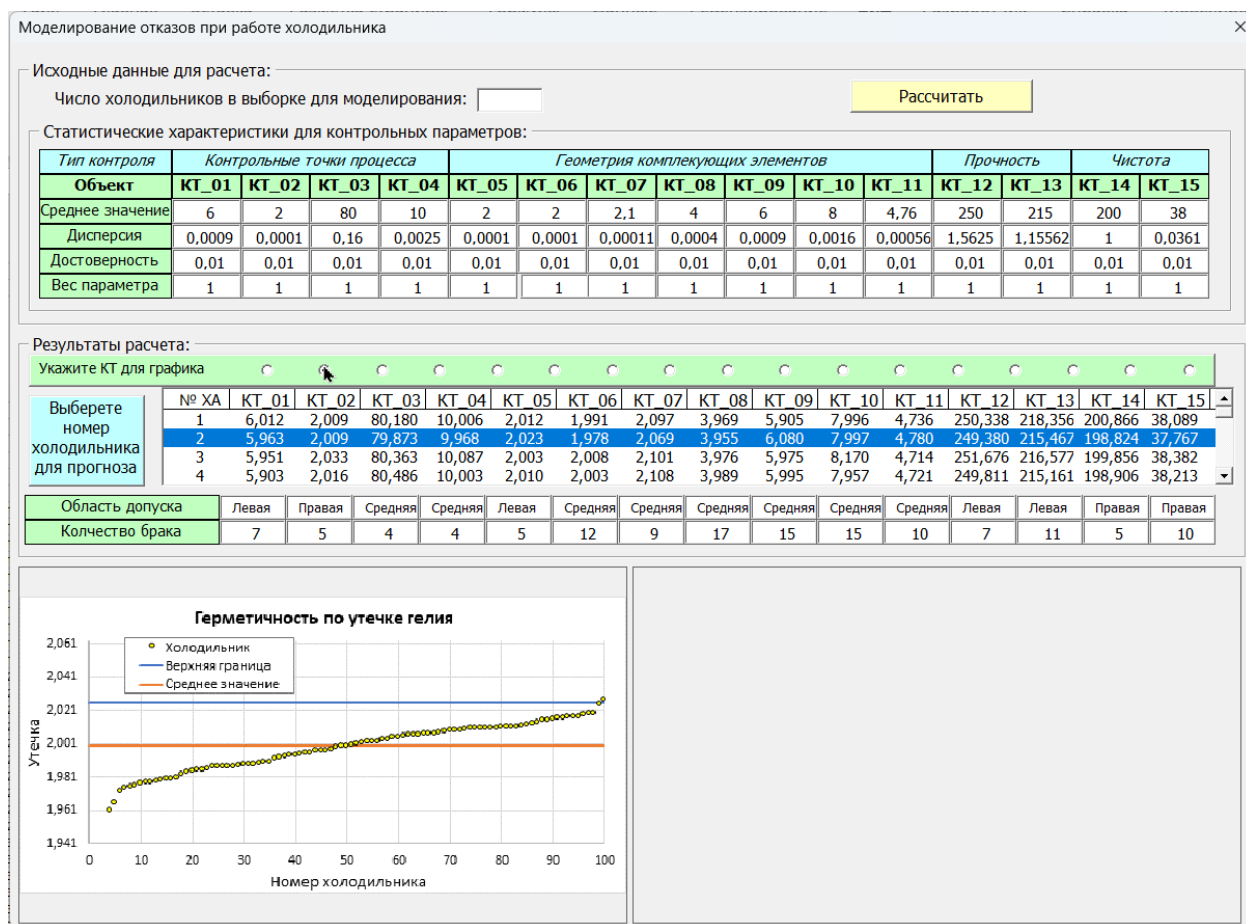


Рисунок 3.4.3 – Вид рабочего окна программы (разработан автором)

В таблицах с расчетными данными имеются два поля, где первое показывает область проверки:

– левая – все что ниже этой границы является браком, сама граница определяется из обратного нормального распределения с достоверностью 0,01 согласно исходным данным;

– средняя – область допустимых значений лежит внутри интервала от 0,005 до 0,0095 (0,01 деленное пополам);

– правая – область ниже границы в 0,99.

Второе поле сообщает о числе бракованных изделий или действий на основании этой контрольной точки.

Согласно показанных выше формул вычисляет критерий надежности холодильника. На основании полученных данных вероятность поломки аппарата имеет следующие значения (рисунок 3.4.4).

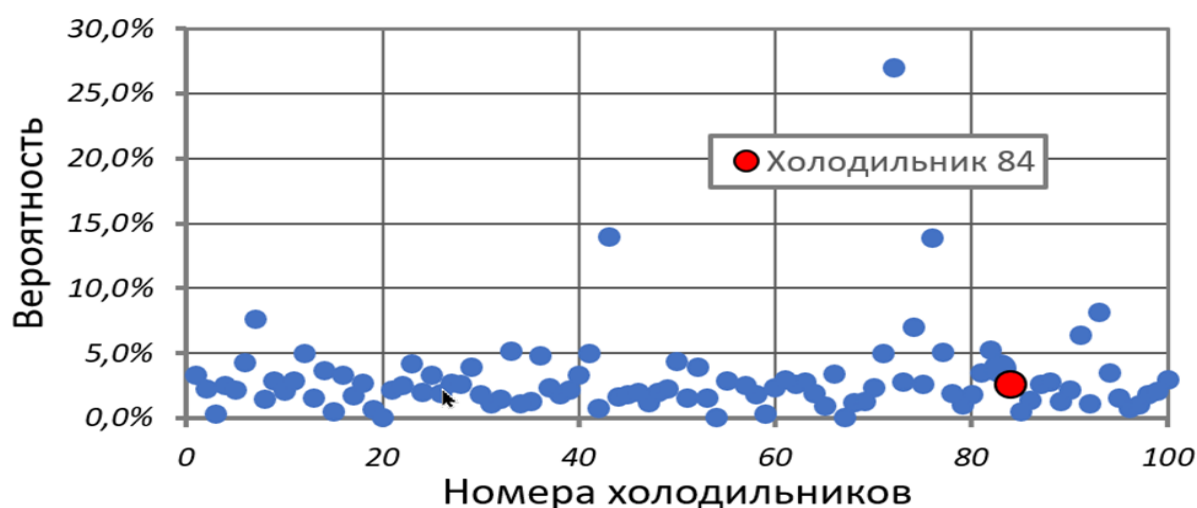


Рисунок 3.4.4 – Обобщенные вероятности поломок холодильников
(рассчитано автором)

Как видим в исследуемой серии имеются более 3х холодильников с высокой вероятностью отказа, есть еще несколько холодильников с повышенной вероятностью отказа, а остальные имеют хорошие показатели.

По этим данным возможен расчет прогноза возможных поломок каждого из холодильников (рисунок 3.4.5).

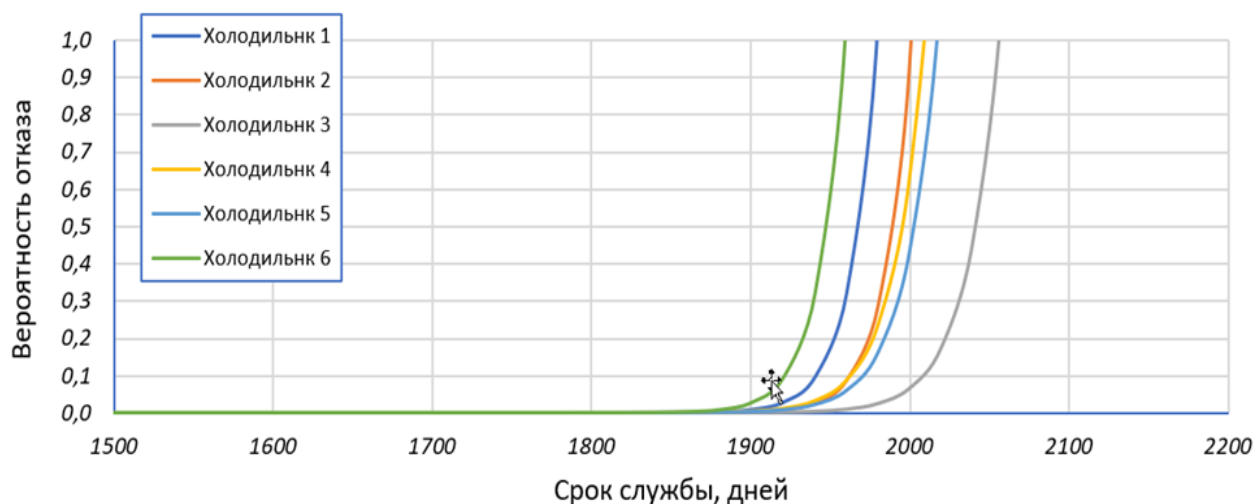


Рисунок 3.4.5 – Прогнозные сроки службы первых 6 холодильников
(построено автором)

Для получения более достоверных данных необходимы заводские данные по результатам ремонта холодильников за несколько лет.

В настоящее время есть договоренность с предприятием о расширении контрольных мероприятий, созданию большой базы данных по контрольным точкам для каждого холодильника и построение обратной связи от ремонтников по причинам ремонта каждого холодильника.

Таким образом, можно достичь желаемых результатов качества и дополнив эти данные результатами постпроизводственной работы холодильника построить прогнозные модели и проводить их анализ. Наличие этих данных в последствии позволит построить нейронную сеть, которая будет предугадывать время работы холодильника до его отказа.

ВЫВОДЫ ПО ТРЕТЬЕЙ ГЛАВЕ

В работе 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.

Предложена система контроля производства АО «ПО «Завод имени Серго»», реализующая схему взаимодействия компонентов постпроизводственного мониторинга. В отличие от существующей модели, система контроля производства построена на принципах сквозной цифровой интеграции. 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. 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».

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.

4 ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ПО ПОСТПРОИЗВОДСТВЕННОМУ МОНИТОРИНГУ ДЕФЕКТОВ

4.1 Организационно-технический процесс интеграции цифровой системы мониторинга качества в производственную систему

С учетом проведенного анализа производственных процессов мониторинга качества на АО «Производственное объединение «Завод имени Серго»» становится очевидной необходимость реализации системного подхода к внедрению мероприятий, направленных на повышение их эффективности. Основным направлением оптимизации предлагается признать внедрение модуля постпроизводственного мониторинга качества с интеграцией в действующую информационную среду предприятия.

План внедрения и организационный процесс представлен на рисунке 4.1.1.

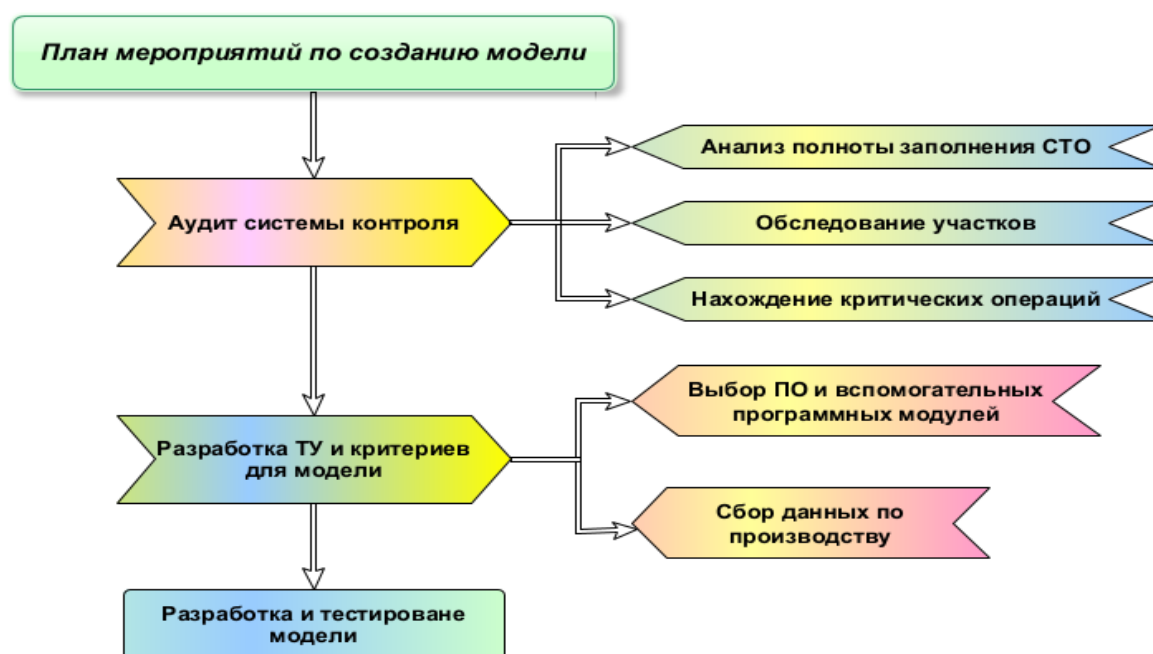


Рисунок 4.1.1 – План мероприятий по внедрению модели процесса
(предложен автором)

Указанный модуль позволит реализовать концепцию замкнутого цикла качества, обеспечив устойчивую цифровую обратную связь между производственными этапами и аналитическими процедурами. План внедрения модуля охватывает несколько этапов, каждый из которых содержит конкретные задачи, сроки и ответственных исполнителей.

Ключевым элементом усовершенствованной системы управления качеством становится интеграция постпроизводственного мониторинга с цифровыми платформами предприятия, такими как PLM, MES и ERP-среды. Это позволяет наладить постоянный сбор данных о качестве продукции в условиях ее реальной эксплуатации, а также систематизировать отклонения, возникающие за пределами производственной площадки.

Особое внимание уделяется гарантийному и постгарантийному периоду, в течение которого АО «ПО «Завод имени Серго»» отслеживает техническое состояние изделий на протяжении до 10 лет.

Таблица 4.1.1 – Основные источники получения информации о качестве продукции в условиях ее реальной эксплуатации (обобщено автором)

Источник информации	Выявляемые дефекты
Обращения в сервисные центры	Нарушения герметичности пайки, нестабильная работа компрессора, самопроизвольные отключения, преждевременный износ элементов циркуляции хладагента, сбои в работе управляющей электроники, шум или вибрации при работе устройства
Регистрация случаев отказов через техническую поддержку	Нестабильная работа компрессора, самопроизвольные отключения, сбои в работе электроники
Онлайн-формы по гарантии на сайте	Нарушения герметичности пайки, преждевременный износ элементов циркуляции хладагента, сбои в работе управляющей электроники
Анализ отзывов и рекламаций от розничных партнеров и конечных пользователей	Шум или вибрации при работе устройства, самопроизвольные отключения, нестабильная работа компрессора
Данные, собранные при плановых проверках или ремонтах	Нарушения герметичности пайки, преждевременный износ элементов циркуляции хладагента, сбои в работе электроники, нестабильная работа компрессора

Все собранные данные в автоматизированном режиме направляются в единое цифровое хранилище и анализируются с применением инструментов бизнес-аналитики (BI). Это позволяет:

- выявлять повторяющиеся неисправности;
- ранжировать дефекты по частоте и критичности;
- вырабатывать корректирующие меры не только на уровне производства, но и при проектировании;
- формировать профили риска для каждой модели изделия.

Таким образом, постпроизводственный мониторинг становится важнейшим звеном системы управления качеством, позволяя реализовать принципы преактивного реагирования и постепенного повышения надежности выпускаемой продукции на протяжении всего жизненного цикла.

Это позволит выявлять повторяющиеся ошибки, формировать корректирующие мероприятия, адаптировать стандартные операционные процедуры и производственные маршрутные карты. Таким образом, постпроизводственный мониторинг становится логическим продолжением системы управления качеством, обеспечивая как контроль на ранних стадиях, но и системное повышение надежности изделий во времени.

Эффективная реализация такой модели требует внедрения инструментов цифровой прослеживаемости, включая уникальную идентификацию изделий, фиксацию контрольных точек в производственном процессе, а также использование интернета вещей (IoT/IIoT) для сбора параметров эксплуатации. Это позволит формировать полноценный цифровой профиль изделия, который будет дополняться на каждом этапе его жизненного цикла, включая этап реального использования.

Таким образом, акцент на постпроизводственном мониторинге обеспечивает не только снижение уровня рекламаций, но и создает условия для превентивного управления качеством, укрепляя доверие потребителей и устойчивость бизнес-процессов.

Для корректной интеграции указанного модуля в действующую

цифровую инфраструктуру предприятия необходимо сформировать детализированную техническую спецификацию, охватывающую функциональные, технические, информационные и программные аспекты.

1. Цель разработки.

Основная задача модуля – обеспечить сбор, агрегацию, анализ и визуализацию данных о дефектах, выявленных после выполнения операций пайки, с последующей фиксацией корректирующих действий. Модуль должен обеспечивать работу в режиме реального времени, поддерживать интеграцию с измерительными приборами, корпоративными системами управления (ERP, MES, PLM) и BI-платформами.

2. Функциональные требования.

Модуль должен включать следующие функции:

- автоматический сбор данных от оборудования мониторинга герметичности (например, Ecotec E3000, AGRAMKOV HRM6);
- фиксация показателей по каждой единице продукции (штрих-код с информацией номер детали, смена, участок, оператор и др.);
- отслеживание частоты возвратов продукции на участок доработки;
- отображение информации в виде дашбордов, таблиц и диаграмм;
- формирование отчетов по периодам, сменам, участкам, моделям;
- генерация служебных заданий на корректировку СОК при выявлении повторяющихся отклонений;
- поддержка уведомлений для ответственных специалистов при превышении контрольных параметров.

3. Технические требования.

- поддержка протоколов обмена данными с приборами (Modbus, OPC UA, TCP/IP);
- возможность развертывания на локальных серверах предприятия;
- минимальные требования к производительности: CPU не ниже Intel i5, RAM от 16 ГБ, SSD-диск от 512 ГБ;

- совместимость с Windows Server 2016/2019, PostgreSQL или MS SQL;
- надежная работа при наличии периодических отключений сетевого соединения (буферизация данных);
- резервное копирование данных согласно политике ИБ предприятия.

4. Информационные требования.

- формирование структуры базы данных, включающей:
- таблицу измеренных параметров пайки;
- сведения об изделии (ID, партия, модель);
- данные о смене и участке;
- зафиксированные отклонения;
- сведения об устранении дефектов;
- историю обновлений СОК;
- хранение истории изменений с возможностью восстановления записей;
- возможность экспорта данных в форматах XLSX, CSV, PDF.

5. Программное обеспечение.

Модуль должен быть совместим со следующими системами предприятия:

- MES 1С – для интеграции с производственным процессом и фиксации сменной информации;
- ERP 1С:ERP – для мониторинга за ресурсами, операциями и формализации корректирующих действий;
- PLM Windchill / Teamcenter – для взаимодействия с технической документацией (СОК, маршрутные карты);
- Qlik / Power BI – для построения аналитических дашбордов;
- PDM/ECM-системы – для управления актуальностью технологических документов.

6. Требования к интерфейсу:

- интуитивно понятный веб-интерфейс на русском языке;
- наличие панели фильтров (по дате, участку, смене, модели);
- отображение метрик в виде интерактивных графиков и таблиц;
- доступ к интерфейсу по ролям (технолог, мастер, инженер по качеству, руководитель);
- адаптация под планшеты/ПК.

7. Механизмы интеграции:

- API-интерфейсы REST/JSON для обмена данными с внешними системами;
- подключение к базе данных оборудования мониторинга;
- поддержка односторонней и двусторонней синхронизации с ERP и MES;
- протоколирование всех операций в журнале аудита.

8. Безопасность и доступ:

- авторизация по индивидуальным логинам с разграничением прав;
- шифрование передаваемых данных по протоколу HTTPS;
- поддержка LDAP-авторизации при наличии корпоративного сервера;
- логирование всех действий пользователей с возможностью последующего аудита.

9. Этапы внедрения:

- анализ текущих потоков данных;
- разработка прототипа интерфейса и отладка ПО;
- пилотное развертывание на одном участке;
- корректировка на основе обратной связи от сотрудников;
- масштабирование на все производство;
- подключение к ВІ-панелям и запуск автоматизированной отчетности.

Для понимания применимости предлагаемой модели необходимо разработать ее аналог на основе вероятностных характеристик с их привязкой

к конкретным заводским параметрам по контролю за комплектующими и операциями с ними. Для этих целей был выбран этап изготовления холодильного агрегата на этапе его сборки и пайки.

Для реализации модельного решения был использован пакет MS Excel с использованием программных модулей VBA для написания внутренних подпрограмм и оконного интерфейса для удобного наблюдения за результатами моделирования.

Реализация моделирования случайных чисел описана выше. По ним строились нормальные распределения. Согласно требованиям ГОСТ, использовались уровни достоверности (P – вероятность = 99%) для производства 0,01.

Программа генерирует заданное число холодильников для каждого из них строит распределения по дефектам с использованием нормального закона распределения случайных величин, для визуализации результатов выводятся графики распределений по каждому из возможных дефектов.

Исходными данными являются контрольные параметры для указанных точек контроля по данным АО «ПО «Завод имени Серго»» (фрагмент таблицы показан на рисунке 4.1.2).

Исходные данные	Утечка	Утечка	Утечка	Норма	Размер	Диаметр	Диаметр	Диаметр	Диаметр
	Контрольные точки				Геометрия компонентов				
Объект	Проверка проходимости	Герметичность по утечке гелия	Проверка ХП с компрессором	Проверка температурно-энергетических параметров	Стыки №2 и №3	Капиллярная трубка d=2 мм	Капиллярная трубка d=2,1 мм	Медная трубка d=4 мм	Медная трубка d=6 мм
Код КТ	КТ_01	КТ_02	КТ_03	КТ_04	КТ_05	КТ_06	КТ_07	КТ_08	КТ_09
Среднее	6	1,93	78,5	10	2,00	2	2,11	4	6
Станд.отклон.	0,3500	0,0300	0,4000	0,4000	0,0085	0,0100	0,0105	0,0200	0,0300
Достоверность	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Область	Левая	Правая	Правая	Левая	Левая	Левая	Левая	Левая	Левая
Левая гр.	5,18577824	#Н/Д	#Н/Д	9,069461	1,980326	1,97673652	2,0855733	3,95347304	5,93020956
Правая гр.	#Н/Д	1,99161247	79,43054	#Н/Д	#Н/Д	#Н/Д	#Н/Д	#Н/Д	#Н/Д
Брак	2	0	0	3	0	0	0	0	0
Граница брака	5,300	2,000	80,000	9,200	1,975	1,960	2,075	3,900	5,850
Вес параметра	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Подозрение	0,000	2,000	5,000	1,000	21,000	0,000	6,000	0,000	0,000

Рисунок 4.1.2 – Фрагмент первых 9-ти параметров контроля
(составлено автором)

Рассмотрим показатели, представленные на рисунке 4.1.2 более подробно:

- стандартное отклонение определяется характеристиками измерительной аппаратуры;
- среднее значение получаем из характеристик компонентов или условий проведения операций с ними;
- достоверность определяет какой процент возможного брака учитывается в моделировании;
- область показывает какое отклонение для данного параметра оценивается;
- левая и правая границы определяют границы показателя для заданной достоверности;
- брак – во время формирования компонентов и операций возможно возникновение брака, который, как и в реальном производстве, отбрасывается. данный показатель является критерием возникновения брака на производстве;
- граница брака определяется техническими условиями ведения процесса;
- вес параметра используется для суммарной оценки брака для готовой продукции;
- подозрение указывает на число компонентов в партии, которые возможно были пропущены при контроле.

Моделирование этих процессов показало, что в каждой точке контроля возможны выходы за допустимые пределы из-за погрешностей контрольного прибора или по другим причинам, что видно из графика (Рисунок 4.1.3).

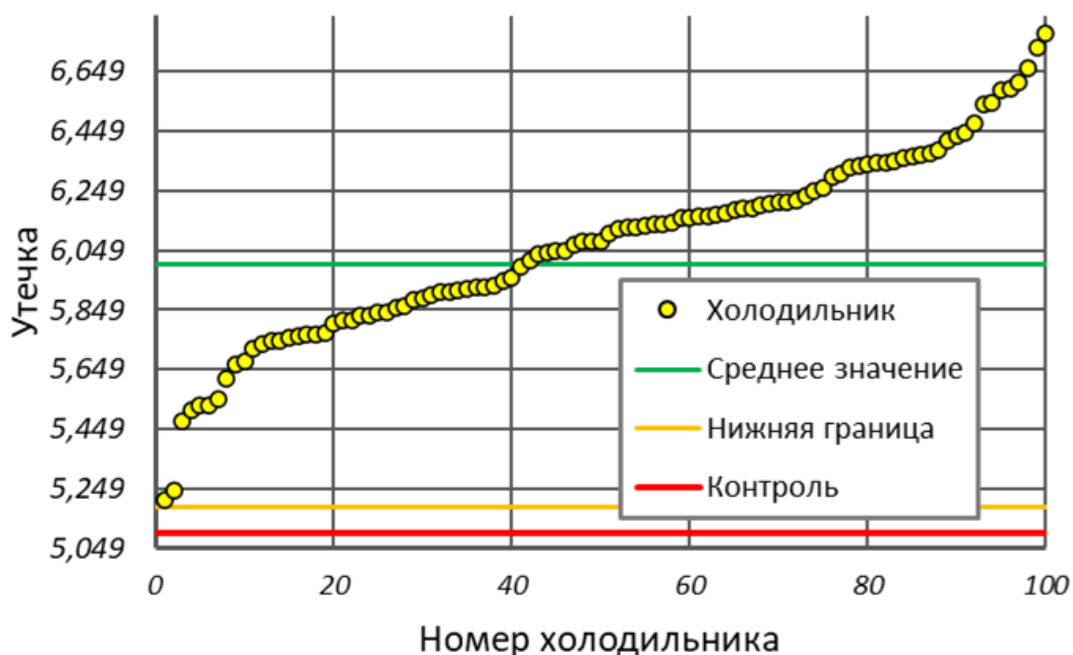


Рисунок 4.1.3 – Распределение контрольных параметров по проходимости капиллярной трубки для партии холодильников (построено автором)

Изменяя входные данные (дисперсию и достоверность) можно достичь желаемых результатов, которые имеются на предприятии и затем дополнив эти данные результатами постпроизводственной работы холодильника можно строить прогнозные модели и проводить их анализ.

При необходимости можно изменить число анализируемых холодильников (по умолчанию их 100 штук). Ниже расположен блок исходных данных, который можно корректировать, изменяя среднее значение контролируемого параметра, его дисперсию и достоверность.

По щелчку мышки на заголовке объекта выполняется расчет статистических данных для всех холодильников по данному показателю и заполняется таблица по рассчитанным параметрам по числу брака и подозрений на брак.

Согласно показанных выше формул вычисляет критерий надежности холодильника. Для его визуального представления выводится следующий график (рисунок 4.1.4).

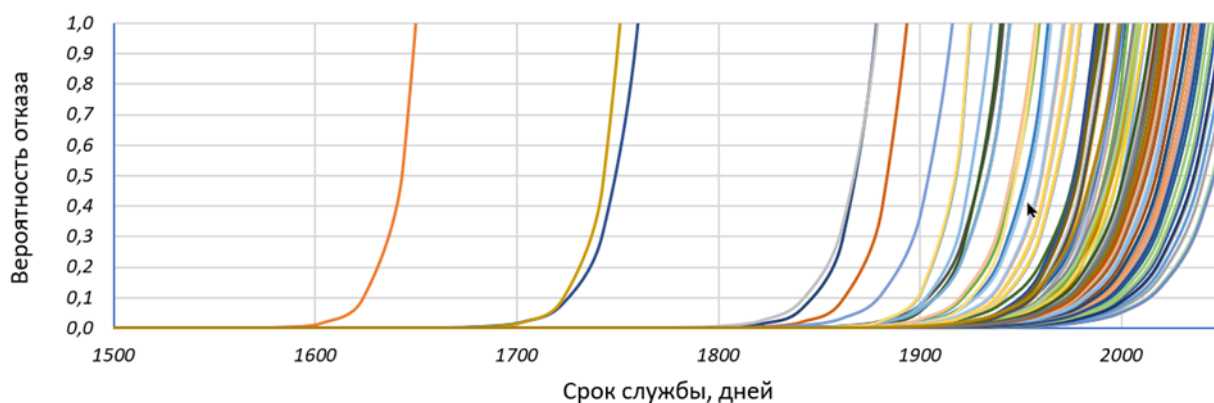


Рисунок 4.1.4 – Результаты прогнозирования сроков службы холодильников с помощью программного средства в среде VBA Excel (построено автором)

В данном случае расчеты велись по критерию работы в 2000 дней. На графике показаны все сто холодильников, из них один имеет максимальное число дефектов (2 компонента возможного брака и суммарный брак 23,13%) и предположительно откажет через 1524 дней. Далее в исследуемой серии имеется группа холодильников с высокой вероятностью отказа в интервале от 1650 дней и выше. Основная масса холодильников должна доработать до заданного срока.

В случае приема данного предложения на предприятии работы могут быть продолжены согласно плану мероприятий.

Далее требуется разработка и тестирование прототипа модуля, а также его интеграция с уже функционирующими платформами. Организационный процесс внедрения предусматривает активное участие технологических служб предприятия.

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 4.1.2).

Таблица 4.1.2 – 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.

Все перечисленные мероприятия предполагают тесную координацию между службами качества, технологическими подразделениями, IT-отделом и производственными участками. На завершающем этапе планируется проведение обучения персонала по работе с обновленным программным обеспечением, а также инструктаж по заполнению и актуализации СОК с учетом новых требований. Кроме того, предполагается регулярный пересмотр внедренных процедур на основе полученных данных и KPI, зафиксированных в модуле постпроизводственного мониторинга.

Таким образом, предлагаемый план внедрения и организационный процесс обеспечивают структурированный переход к более зрелой системе мониторинга качества. Интеграция новых инструментов в существующую архитектуру управления производством позволит АО «ПО «Завод имени

Серго»» повысить устойчивость производственных операций, минимизировать уровень брака и сформировать предпосылки для последующего расширения практики управления качеством на другие участки и линейки продукции.

4.2 Внедрение методики цифрового мониторинга дефектов на участке обработки металлических изделий

Для доказательства возможного применения предлагаемой методики были выполнены ряд модельных расчетов в сравнении с производственными данными предприятия за последние 3–5 лет.

Для апробации предлагаемой модели были выполнены расчеты с подбором показателей брака, какой был на предприятии за 5 лет (рисунок 4.2.1). В примере показаны первый и второй показатели, которые имели некоторую статистику.

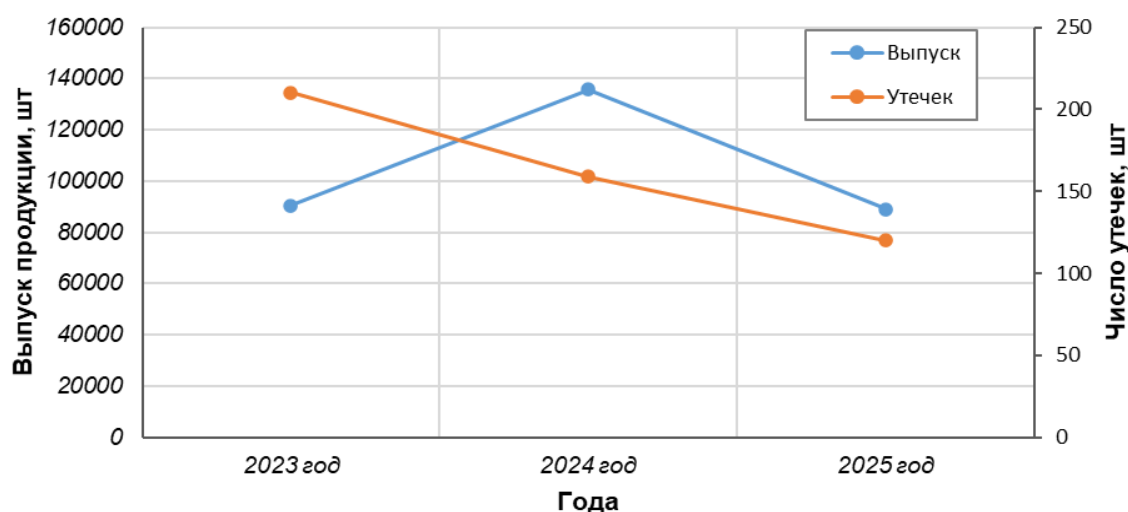


Рисунок 4.2.1 – Статистика по числу утечек на стадии пайки соединения за три года (построено автором)

По данным производства имеется статистика по числу утечек на стадии пайки соединения за три года (рисунок 4.2.2), которые показывают определенную тенденцию к снижению числа брака.

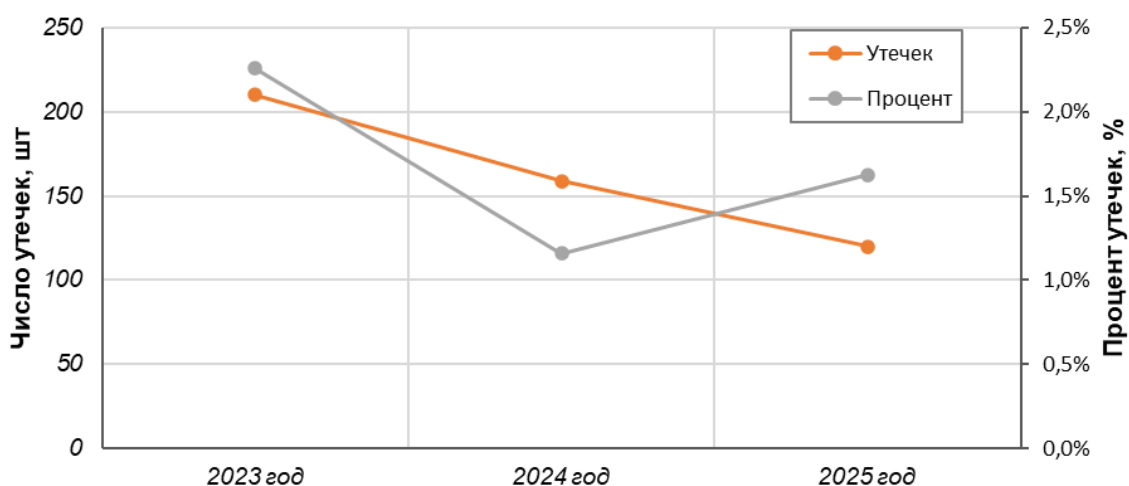


Рисунок 4.2.2 – Графики по выпуску продукции, дефектам утечек и их проценту (построено автором)

Как видим из рисунка 4.2.2, увеличение выпуска все равно приводит к повышению качества, что связано с усилением работ по ИСМК. Это связано с внедрением стандарта качества и проводимых мероприятий по повышению производительности и улучшению условий труда, а также с переходом на более совершенные системы контроля.

Попробуем учесть эти факты в нашей модели. Для настройки у нас имеются три характеристики:

- среднее значение контролируемой величины, данный показатель при контроле комплектующих должен быть постоянной величиной, например, стандартной диаметр трубки или ее толщина. Но при контроле результатов операций, например, утечка гелия, среднее значение может меняться в зависимости от точности прибора и контрольных границ;
- стандартное отклонение в первую очередь определяется точностью измерений и соответствующего инструментария;
- контрольная граница брака задается техническими условиями и может меняться согласно изменениям по технологии, измерительным инструментам и другим причинам.

Параметр «контрольная граница брака» должен стать определяющим, когда предлагаемая модель будет внедрена. Он должен будет определяться на

основании анализа отказов и причин каждого из отказов в зависимости от дефектов, которые оказались в данном изделии.

На рисунке 4.2.3 представлены распределения утечек по холодильникам при разных параметрах моделирования (с рабочего окна программы), значения используемых параметров можно видеть левее графиков.

Проанализируем эти данные более подробно, наиболее характерная кривая представлена на (г.), где хорошо видны хвосты данных слева и справа, это связано с тем, что среднее значение сильно сдвинуто вниз и контрольное значение в результате уходит за допустимые границы разброса СВ. По прогнозу имеем отсутствие брака и два изделия с подозрением на брак.

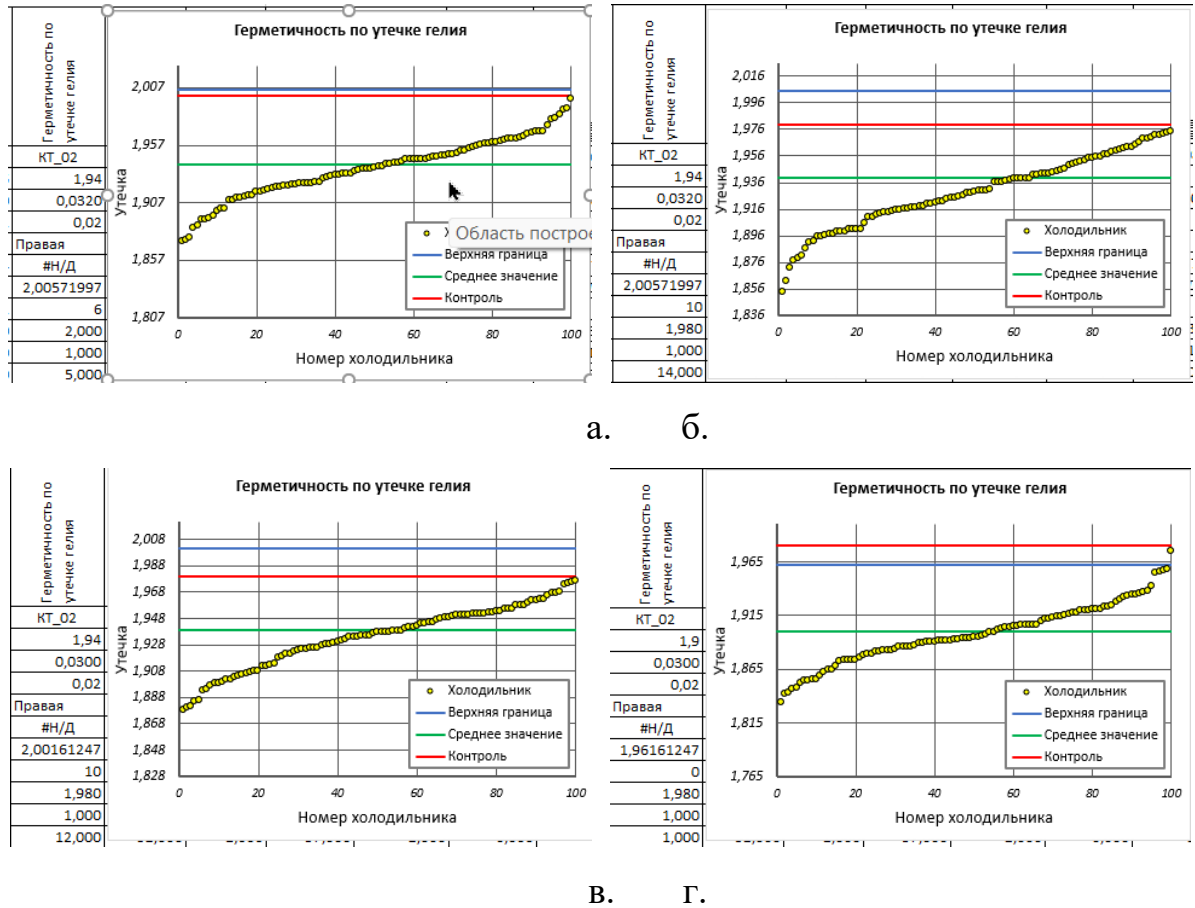


Рисунок 4.2.3 – Распределения утечек по холодильникам при разных параметрах моделирования (построено автором)

График (а.) показывает наиболее естественное моделирование процесса с данными, близкими производственным. Имеется 6 единиц брака и 5

подозрений на него. Графики показывают, как меняются параметры по браку при уменьшении границы контроля (б.), что приводит к увеличению брака и подозрения на него и уменьшению стандартного отклонения (в.), что также изменяет количество бракованных изделий.

На ряду с подбором критериев для расчета статистических данных, возможен анализ работы отдельных сварщиков при наличие цифрового следа по компонентам и операциям, а также и ряд характеристик работы самих сварщиков (скорость работы, качество, время выполнения и другие примеры).

По данным предприятия имеются следующие данные (рисунок 4.2 4), из которого видно, что сварщики не равноценны по свои возможностям. Используя приемы статистического анализа, можно вскрывать эти причины.

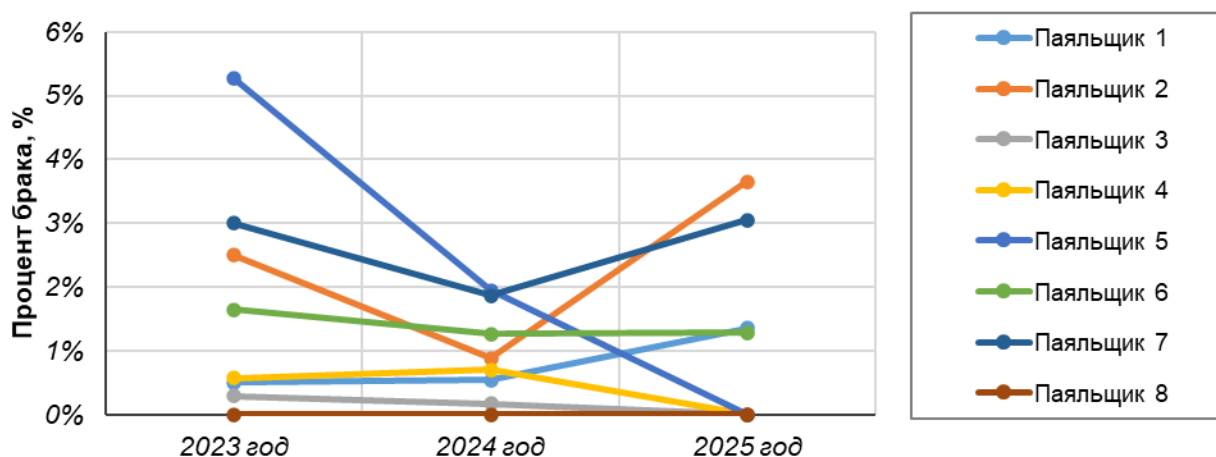


Рисунок 4.2.4 – Анализ эффективности работы сварщиков
(построено автором)

Например, предположим, что все заготовки для наших холодильников делали 4 сварщика. Разделим наш экспериментальный набор 4 не равные группы и проведем их анализ.

Выполним два статистических анализа – дисперсионный и корреляционный, которые покажут наличие взаимосвязей между параметрами и их вид. Например, для первого критерия были получены следующие данные по дисперсионному анализу (рисунок 4.2.5, а).

Однофакторный дисперсионный анализ					
ИТОГИ					
Группы	Счет	Сумма	Среднее	Дисперсия	СКО
КТ_01_Св1	22	133,3929	6,063316	0,097071	0,6106634
КТ_01_Св2	31	185,5101	5,984195	0,09745	0,6118515
КТ_01_Св3	25	148,508	5,940321	0,162463	0,790011
КТ_01_Св4	22	133,7841	6,081094	0,143186	0,741662
Дисперсионный анализ					
Источник вариации	SS	df	MS	F	P-Значение
Между группами	0,315374	3	0,105125	0,850351	0,4697553
Внутри групп	11,868	96	0,123625		
Итого	12,18337	99			

Однофакторный дисперсионный анализ					
ИТОГИ					
Группы	Счет	Сумма	Среднее	Дисперсия	СКО
КТ_01_Св1	22	303,1658	13,78026	0,501402	1,38787145
КТ_01_Св2	31	299,2098	9,651928	0,253511	0,9868572
КТ_01_Св3	25	297,016	11,88064	0,649851	1,58002196
КТ_01_Св4	22	304,0547	13,82067	0,739596	1,68559535
Дисперсионный анализ					
Источник вариации	SS	df	MS	F	P-Значение
Между группами	313,8058	3	104,6019	203,8415	1,6862E-41
Внутри групп	49,26272	96	0,513153		
Итого	363,0685	99			

а. б.

Рисунок 4.2.5 – Результаты дисперсионного анализа (рассчитано автором)

Результаты показывают отсутствие взаимосвязи со сварщиками, что и понятно, так как все данные были смоделированы по одному закону. Они идентичны. Но предположим, что оценивать их надо и по производительности труда, предполагая, что всю работу они сделали за одно время, внесем эти коррективы в данные и получим совсем другой результат (рисунок 4.2.5 б). Здесь имеет место сильное влияние сварщиков, что также хорошо видно на графике (рисунок 4.2.6)

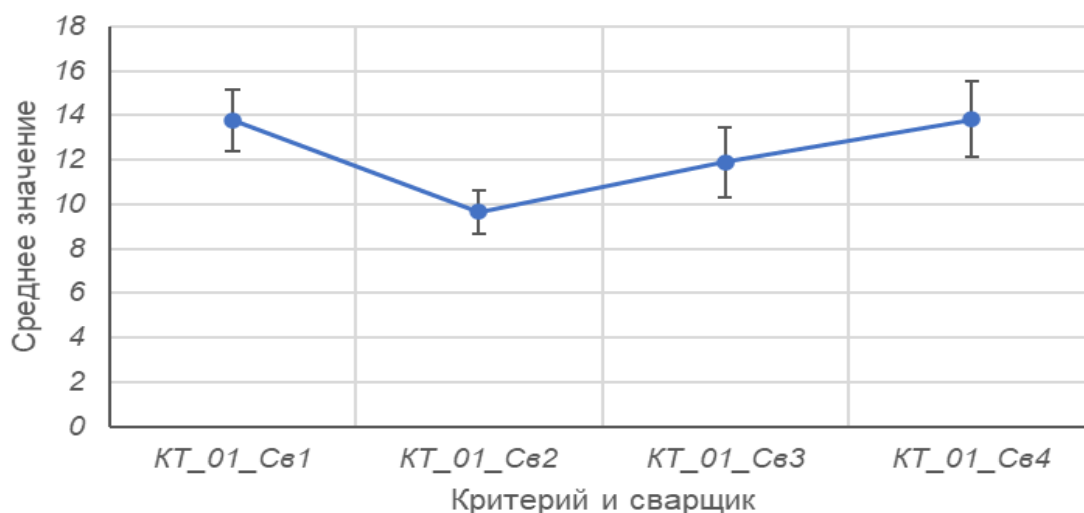


Рисунок 4.2.6 – Среднее значение производительности по сварщикам с планками пределов с 95% вероятности (составлено автором)

Если будут данные по качеству выполнения работ для каждого исполнителя, то такой подход позволит получить анализы по эффективности работы сотрудников. Однако, данные вопросы здесь проходят краем, так как

основное направление – постпроизводственный мониторинг.

Имея цифровой след деталей с помощью данной модели, можно предполагать возможный брак компонентов. Хотя более интересен подход анализа постпроизводственного мониторинга, когда глубокий анализ причин отказа техники во время ее эксплуатации позволит обосновать критерии контроля компонентов и операций. Этот подход сделает систему контроля более открытой и понятной.

Рассмотрим структуру дефектов. Структура дефектов по ретроспективному анализу за 5 лет представлена на рисунке 4.2.7.

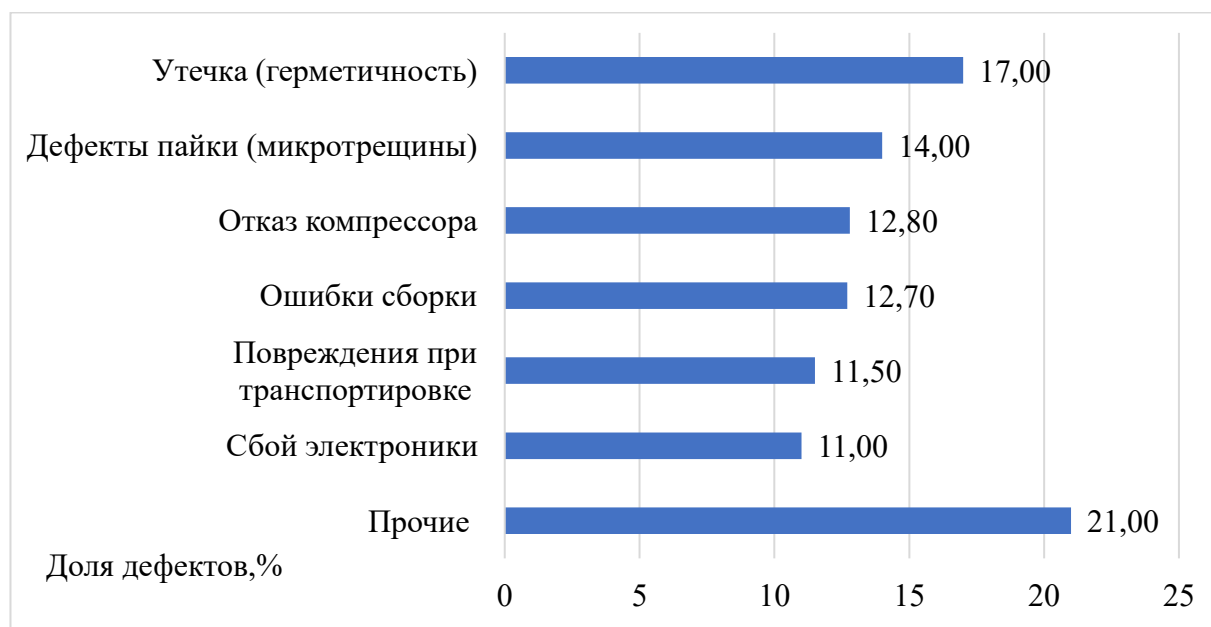


Рисунок 4.2.7 – Структура дефектов по ретроспективному анализу за 5 лет (построено автором)

К сожалению, представленные данные (рисунок 4.2.7) не позволяют строить связи между качеством компонентов и отказами готовых изделий из-за отсутствия на данный момент цифрового следа по комплектующим.

В модели исследуются 15 критериев контроля комплектующих и операций с ними. По каждому из них моделируется набор конкретных значений на основании вероятностного закона с использованием заданных вероятностных критериев (среднее значение и среднеквадратичное

отклонение). Каждая стока соответствует конкретному холодильнику – то есть возникает цифровой след изделия.

Согласно работам Рухлина Г.В., известно, описание ЖЦИ хорошо описывается законом распределения Вейбулла, как уже было сказано ранее, на основании двух статистических параметров (срок жизни и форма кривой) [112].

По результатам работы модели имеется прогнозный цифровой след и на его анализе строить процент потери качества основного изделия по следующему схеме (рисунок 4.2.8), в зависимости от интервала (левый, центральный и правый) кривая риска смещается в соответствующую сторону.

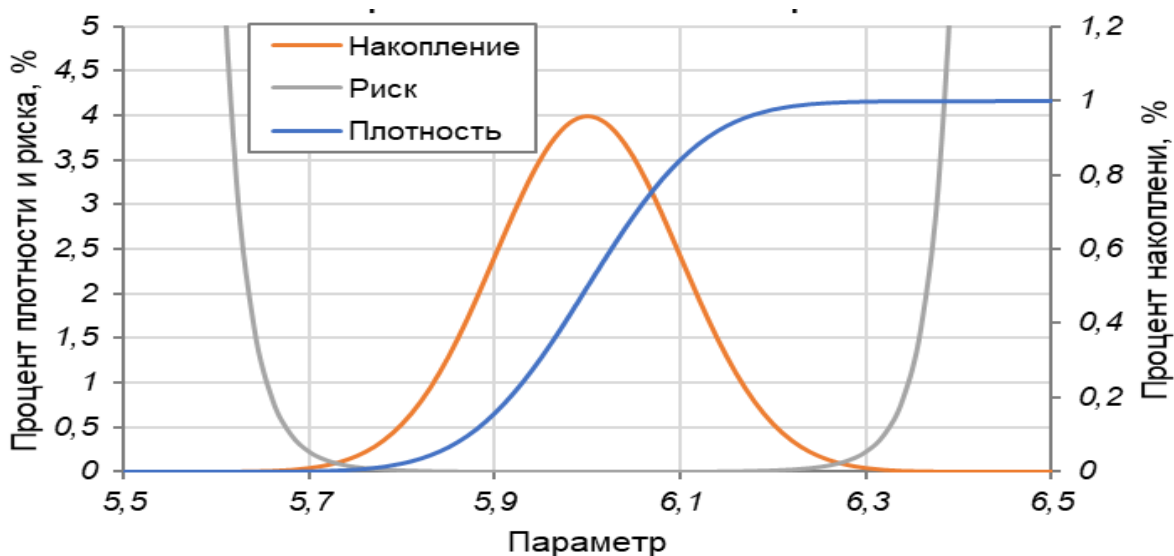


Рисунок 4.2.8. – Оценка уровня брака для компонента или операции (рассчитано и построено автором)

Задавшись уровнем брака (достоверность в 1-5%) через кривую риска находим вероятностный процент в суммарном браке. График с прогнозами по срокам службы для этих холодильников показан в таблице 4.2.1. Справа показаны число компонентов и операций с процентом брака более 1% и суммарный процент брака по всем критериям. Цветом выделены ячейки с бракованными компонентами и в нижней части их проценты брака.

Таблица 4.2.1 – Фрагмент сгенерированных данных по первым 6 холодильникам

№	КТ_01	КТ_02	КТ_03	КТ_04	КТ_05	КТ_06	КТ_07	КТ_08	КТ_09	КТ_10	КТ_11	КТ_12	КТ_13	КТ_14	КТ_15	Кбр	Σбр
1	6,315	1,9070	78,982	9,277	2,005	2,011	2,106	4,037	5,986	7,983	4,753	250,01	214,24	190,36	31,636	1,00	4,34%
2	6,223	1,9118	78,343	10,246	2,007	2,008	2,104	3,992	5,969	7,903	4,757	248,70	214,35	190,22	32,345	0,00	6,00%
3	5,915	1,8604	78,707	9,903	2,002	1,988	2,109	4,000	5,985	8,082	4,757	250,13	215,27	191,18	31,978	0,00	0,78%
4	6,824	1,9400	78,448	9,664	1,997	1,995	2,105	4,022	5,979	7,993	4,742	249,91	212,56	191,41	30,541	1,00	16,86%
5	5,308	1,8827	78,496	10,234	1,997	1,988	2,115	3,981	5,954	7,973	4,750	250,01	214,36	190,33	30,493	1,00	4,01%
6	6,202	1,9404	78,359	10,079	2,002	2,010	2,124	4,023	5,955	8,004	4,729	249,36	214,38	188,29	31,701	0,00	3,44%
	0,000%	0,000%	0,532%	1,832%	0,000%	0,000%	0,007%	0,000%	0,021%	0,000%	0,017%	0,000%	0,982%	0,602%	0,344%	1	4,336%
	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,008%	0,012%	0,034%	0,000%	0,016%	4,230%	0,898%	0,000%	0,805%	1	6,004%
	0,220%	0,000%	0,276%	0,228%	0,000%	0,013%	0,006%	0,000%	0,021%	0,000%	0,016%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0	0,779%
	0,000%	0,019%	0,000%	0,346%	0,005%	0,007%	0,007%	0,000%	0,024%	0,000%	0,021%	0,353%	15,474%	0,603%	0,000%	1	16,860%
	1,731%	0,000%	0,000%	0,000%	0,005%	0,013%	0,000%	0,019%	0,075%	0,000%	0,018%	0,000%	0,892%	0,886%	0,370%	1	4,008%
	0,000%	0,019%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,067%	0,000%	0,034%	0,611%	0,875%	0,927%	0,906%	0	3,440%

Как видно из таблицы, прогнозный срок службы имеет хорошую корреляцию с суммарным процентом брака, что доказывает правильность такого подхода. Однако надо отметить, что эти данные являются расчетами, основанными на ретроспективных данных, а реальные результаты могут дать совсем другие зависимости. Для их корректировки в расчетах имеются весовые коэффициенты по каждому критерию и масштабные множителя, которые должны учитывать вклад каждого элемента.

Эти данные можно будет получить только на реальных значениях, которые будут собраны после внедрения системы контроля и создания цифрового следа и через 2-4 года, когда появится достаточно данных по отказам холодильников.

Кроме того, планируется внедрение системы автоматической привязки дефектов к конкретным операциям и технологическим шагам. Для этого потребуется обеспечить интеграцию ERP с MES-системой, фиксирующей хронометраж выполнения операций, и с PLM-системой, содержащей регламентированные последовательности технологических процессов. Структура взаимосвязей систем представлена на рисунке 4.2.9.

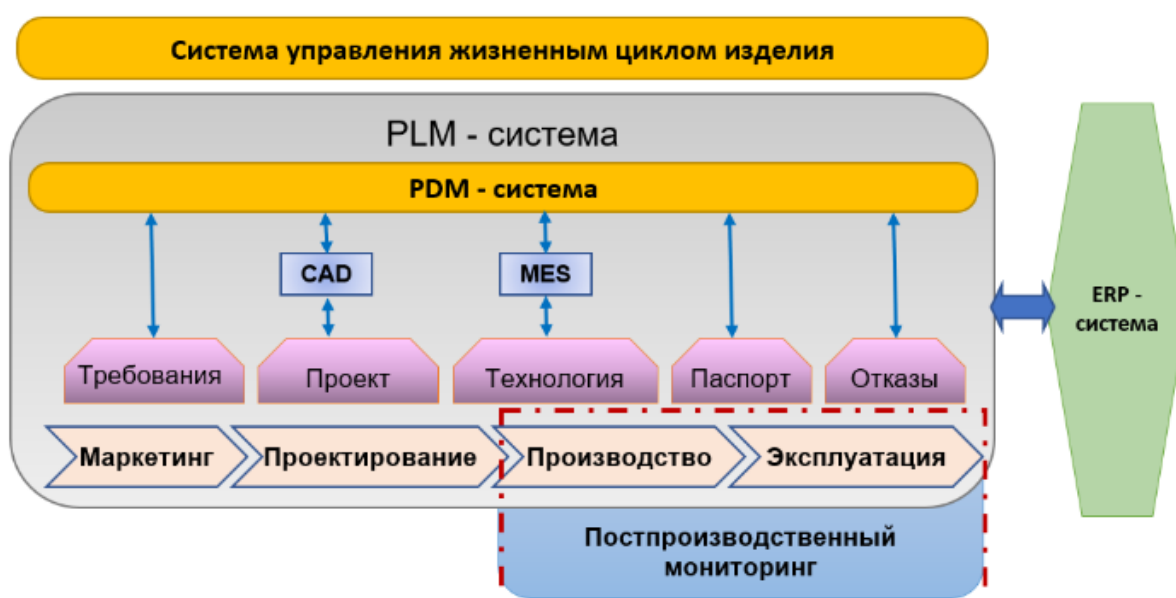


Рисунок 4.2.9 – Структура взаимосвязей систем (построена автором)

Такая связка позволит определить, на каком именно этапе возникают отклонения, и своевременно корректировать производственные инструкции. Для полноценной цифровой синхронизации производственных процессов необходимо обеспечить двустороннюю интеграцию между тремя ключевыми системами:

- ERP-система – служит центральным узлом, в котором происходит анализ, принятие решений и регистрация корректирующих действий.
- MES-система – передает в ERP информацию о фактическом ходе

операций: хронометраж, отклонения, производственные события.

Пример данных: длительность пайки, смена, участок, исполнитель.

– PLM-система – предоставляет в ERP актуальные регламентированные технологические процессы и СОК.

Пример данных: последовательность операций, параметры пайки, маршруты.

Интеграция позволяет:

- связывать реальные данные с нормативами;
- определять на каком этапе возникло отклонение;
- автоматически инициировать обновление сок;
- повышать прозрачность и управляемость производственных

процессов.

Еще одним мероприятием в рамках цифровой модернизации является обеспечение электронной прослеживаемости изменений. Каждое действие в модуле постпроизводственного мониторинга должно фиксироваться в цифровом журнале событий.

Таким образом, перечисленные мероприятия обеспечивают создание цифровой экосистемы, позволяющей замкнуть контур управления качеством в пределах единой ERP-среды. Это способствует минимизации бумажного документооборота, ускорению реакции на дефекты, упрощению коммуникации между участниками процесса и формированию основ для предиктивного управления качеством. В долгосрочной перспективе такая интеграция позволит перейти от фрагментарного к целостному контролю технологических процессов, существенно повысив их эффективность и устойчивость.

4.3 Оценка результативности и качества внедрения цифровой системы постпроизводственного мониторинга дефектов

Для оценки реализуемости предложенных мероприятий по цифровой трансформации процессов мониторинга качества была проведена апробация разработанной модели на базе производственной площадки АО «ПО «Завод имени Серго»».

Активный контроль качества сварных изделий должен быть функциональным, т. е. давать ответы на вопрос: как, когда и кем выполнена контролируемая работа (рисунок 4.3.1).

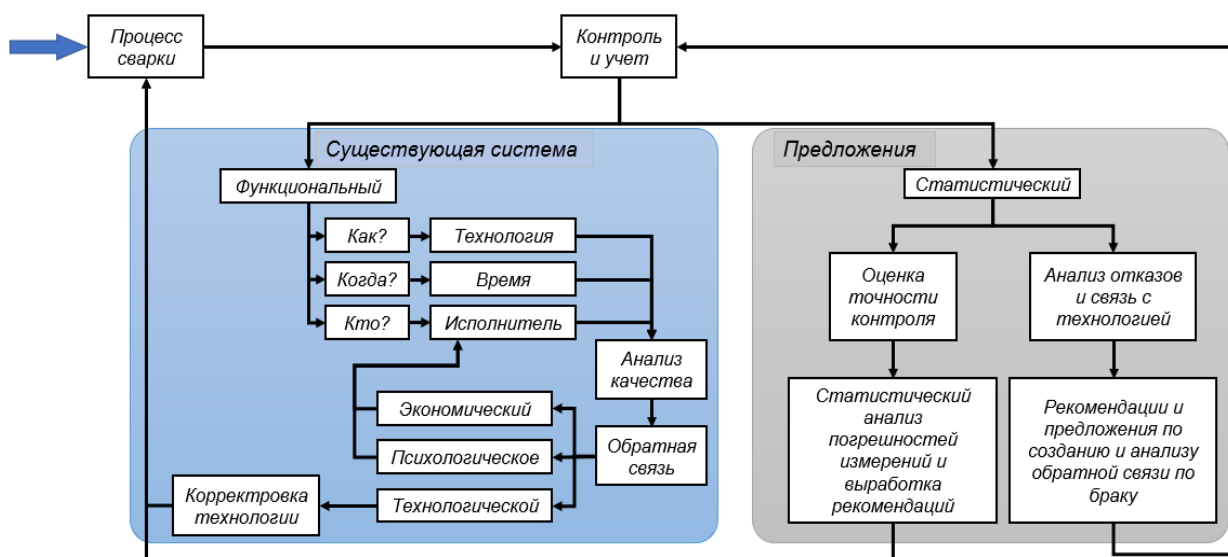


Рисунок 4.3.1 – Схема применения статистического регулирования технологического процесса сварки (построена автором)

Первый блок – контроль измеряемых параметров, существующий на предприятии, второй – анализ отказов холодильников и выявление их причин предлагается к внедрению.

Апробация проходит на участке, где осуществляется пайка медных труб холодильников, а также проводится проверка герметичности с использованием оборудования Ecotec E3000 и установки AGRAMKOV HRM6. Данные процессы были выбраны в качестве ключевых для апробации,

поскольку именно на этих операциях чаще всего фиксируются отклонения, влияющие на конечное качество продукции.

По данным предприятия имеются ряд контрольных точек в процессе изготовления и сварки элементов холодильника.

Этап внедрения модуля постпроизводственного мониторинга. После подготовки информационной среды и утверждения перечня контрольных метрик можно начать основной этап апробации. Для реализации концепции замкнутого цифрового цикла качества на пилотном участке надо последовательно задействовать все элементы предложенной модели.

ERP-система, интегрированная с BI-инструментами, обеспечивала автоматический расчет значений индекса постпроизводственной дефектности пайки (PPDI) по каждой смене. При превышении установленного порога (5 %) инициировалось служебное задание на анализ причин и разработку корректирующих мероприятий. Поручение поступало ответственному специалисту по качеству, который, в случае подтверждения системного отклонения, передавал информацию в PLM-систему для внесения изменений в СОК.

На завершающем этапе должна быть включена возможность визуализации метрик через BI-панель. Инженеры по качеству и мастера смен получили доступ к интерактивному дашборду, на котором в реальном времени отображались ключевые показатели: доля дефектов, количество возвратов, среднее время устранения несоответствий, частота обновлений СОК и индекс прослеживаемости данных. Это позволило персоналу оперативно реагировать на критические отклонения и принимать решения в рамках своей зоны ответственности.

Для получения более достоверных данных необходимы заводские данные по результатам ремонта холодильников за несколько лет.

Результаты апробации позволяют утверждать, что предложенная модель цифрового постпроизводственного мониторинга обладает высоким потенциалом устойчивости при условии соблюдения ряда организационных и

технических условий.

Дальнейшее развитие модели после станет ее обучение нейронной сети на накопленных массивах производственных и сервисных данных. Задачей алгоритма будет расчет интегральной вероятности отказа изделия на заданном горизонте эксплуатации, а также прогнозирование срока службы и оптимального периода гарантийного обслуживания.

Для этого в качестве входных признаков будут использоваться как исходные метрики производственного процесса, а также частота возвратов, время исправления, индекс корректирующих действий), так и новые показатели надежности и зрелости цифрового следа.

Такой подход позволит формировать предиктивные сценарии для каждой серии изделий и учитывать влияние производственных факторов на вероятность отказа.

Практическая реализация данного направления будет заключаться в интеграции модуля машинного обучения в существующую ERP-среду, где нейросеть сможет автоматически обновлять прогнозы при поступлении новых данных из MES, PLM и BI-платформ.

В заключении представим произведенные действия в процессе апробации методики и их результаты:

- проведена диагностика текущих информационных систем (MES, ERP, PLM, BI). Установлена готовность предприятия к интеграции без создания новой инфраструктуры;
- выбраны пилотные участки пайки и контроля герметичности. Определены ключевые параметры для мониторинга и анализа;
- предлагается автоматическая фиксация данных из MES и приборов Ecotec E3000 и AGRAMKOV HRM6. Для формирования цифровых профилей изделий с привязкой к сменам и операторам;
- ERP позволит обеспечить автоматический расчет Индекс дефектности пайки (Идп) и фиксацию возвратов. При превышении порога инициировались корректирующие задания;

– архитектура на базе Microsoft SQL и REST-API обеспечила отказоустойчивость. Резервное копирование исключило потери данных.

Итог апробации: модель доказала реализуемость. Внедрение возможно без значительных изменений структуры предприятия.

Для расчета прогнозной оценки результативности внедрения модуля постпроизводственного мониторинга использовались производственные показатели, отражающие стабильность технологических процессов и эффективность обратной связи. Все расчеты проводились по данным, автоматически полученным из MES, ERP и PLM-систем, а также визуализировались в BI-платформах.

Для количественной оценки эффекта от внедрения модели предлагается использовать следующие показатели:

1. Повышение операционной эффективности за счет оцифровки.
2. Сокращение ресурсов: уменьшение трудозатрат персонала, снижение переработки и возвратов, сокращение простоев оборудования.
3. Снижение количества брака.

По первому показателю – повышение операционной эффективности за счет оцифровки. Прогнозный расчет основан на измерении текущего времени обработки информации о дефектах на предприятии (3–4 часа на смену) и времени реакции на отклонения (2–3 часа).

Прогнозные показатели после внедрения цифрового мониторинга определены с учетом автоматизации процессов сбора данных, визуализации через BI-дэшборд и автоматического создания служебных заданий.

До внедрения цифровой системы инженер по качеству узнает о проблеме после ручной проверки, оформление документов и передача задания на корректирующие действия занимает несколько часов. Среднее время реакции (от выявления отклонения до запуска корректирующих действий) – примерно 2–3 часа. После внедрения цифрового мониторинга: BI-дэшборд и автоматическая система уведомлений позволяют сразу видеть превышение порогов и создавать служебное задание. Время реакции сокращается до 1–1,5

часа.

Расчет процентного ускорения:

- среднее время «до»: $(2 + 3)/2 = 2,5$ часа;
- среднее время «после»: $(1 + 1,5)/2 = 1,25$ часа;
- снижение времени = $2,5 - 1,25 = 1,25$ часа;
- процент сокращения = $1,25 / 2,5 \times 100 \% = 50 \%$.

Таким образом, прогнозный расчет с применением измерения времени работы на производстве и расчетах с учетом автоматизации, позволяет сделать вывод, что изменения времени на сбор и обработку данных по дефектам составит: с текущих 3–4 часов на смену до 15–20 минут при автоматизированной фиксации и визуализации. Ускорение принятия решений по корректирующим мероприятиям: снижение времени реакции на отклонения на 40–50 %.

По второму показателю – сокращение ресурсов, прогнозный расчет основан на анализе текущего потребления ресурсов на производстве и расчетах с учетом автоматизации и цифровизации. Расчеты выполнены на основании измерений времени работы персонала и анализа исторических данных по браку и производственным операциям.

До внедрения цифровой системы: инженеры по качеству и технологи вручную фиксируют результаты контроля, анализируют дефекты и формируют служебные задания. Для этого задействовано 3–4 человека на смену, каждый тратит около 3–4 часов на сбор и обработку данных. Расход материалов увеличен из-за повторного брака и возвратов (примерно 2–3 % от партии). Простой оборудования при выявлении дефектов на этапе пайки – до 5–7 % сменного времени.

После внедрения цифрового мониторинга: Сбор и обработка данных автоматизированы через MES и BI, количество задействованных сотрудников сокращается до 1–2 человек. Время на обработку данных снижается до 15–20 минут на смену. Материальные потери уменьшаются за счет снижения брака на 4–6 % (меньше возвратов и переработки). Простой оборудования снижается

на 5 % благодаря своевременной корректировке операций.

Далее произведем расчет сокращения ресурсов.

Человеческие ресурсы:

- до: $3,5 \text{ человека} \times 3,5 \text{ часа} = 12,25 \text{ человеко-часов}$;
- после: $1,5 \text{ человека} \times 0,33 \text{ часа} = 0,5 \text{ человеко-часов}$;
- сокращение = $12,25 - 0,5 = 11,75 \text{ человеко-часов}$;
- величина сокращения = $11,75 / 12,25 \times 100 \% = 96 \%$ (эффективное

перераспределение задач).

Материальные ресурсы:

- до: 2–3 % брака от партии;
- после: 4–6 % уменьшение дефектных изделий;
- величина экономии материала = $2-3 \% \times 4-6 \% = 0,08-0,18 \%$

(эффект прямо зависит от партии, точнее при расчете на конкретные объемы).

Простой оборудования:

- до: 5–7 % сменного времени;
- после: 0–2 % сменного времени;
- сокращение = 5 %;
- величина улучшения использования оборудования = 70–100 % от

ранее потерянного времени;

Прогнозный расчет показывает, что внедрение цифрового постпроизводственного мониторинга и автоматизации:

- сокращает трудозатраты персонала почти в 2–3 раза на ключевых этапах контроля;
- уменьшает расход материалов за счет снижения брака и возвратов;
- повышает эффективность использования оборудования, сокращая простой и увеличивая производительность смены.

По третьему направлению – снижение количества брака. Прогноз базируется на исторической статистике дефектных изделий за последние 3–5 лет, распределении брака по компонентам и операциям, а также моделировании раннего выявления отклонений.

Прогнозный расчет основан на анализе исторических данных предприятия и моделировании влияния автоматизации и цифровизации на контроль качества. Используются параметры цифрового следа изделия: контрольные показатели комплектующих, результаты операций, вероятностные критерии (среднее значение, стандартное отклонение) и показатель повторного брака ($\lambda_{\text{пер}}$). Процент снижения брака рассчитан как разница между текущим уровнем дефектных изделий и прогнозируемым после внедрения мониторинга, с учетом влияния раннего выявления проблем на этапах производства.

До внедрения цифровой системы:

- дефектные изделия фиксировались только на этапе выхода готовой продукции, раннее выявление брака было ограничено.
- средний процент брака составлял примерно 6–8 % от выпускаемой партии.
- повторный брак ($\lambda_{\text{пер}}$) возникал из-за недостаточного контроля комплектующих и операций, что приводило к дополнительной переработке и возвратам.

После внедрения полной методики постпроизводственного мониторинга:

- автоматический сбор данных по каждой операции и компоненту позволяет выявлять отклонения на раннем этапе;
- ВІ-панель и цифровой профиль изделия фиксируют все несоответствия, что позволяет оперативно корректировать процессы;
- прогнозное снижение дефектных изделий составляет 4–6 %, за счет раннего выявления проблем на этапе контроля комплектующих;
- минимизации повторного брака ($\lambda_{\text{пер}}$) путем анализа цифрового следа и автоматической генерации корректирующих действий.

Далее рассчитаем прогноз эффекта.

Снижение общего брака:

- до: 6–8 % дефектных изделий;

- после: 2–4 % дефектных изделий;
- сокращение = $(6-8) - (2-4) \% = 4 \%$;
- процентное снижение = $4 / 6 \times 100 \% = 66 \%$ (верхняя граница – до 50–70 % в зависимости от партии).

Снижение повторного брака ($\lambda_{\text{пер}}$):

- до: повторный брак составлял 1–2 % от партии;
- после: за счет раннего выявления дефектов и корректировок – около 0,2–0,5 %;
- сокращение = 0,8–1,5 %;
- процентное снижение повторного брака = 70–80 %.

Представим сводные данные в таблице 4.3.1.

Таблица 4.3.1 – 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

Эффект от внедрения предложенных решений по построению производственного мониторингу на участке пайки медных труб холодильников с проверкой герметичности на оборудовании Ecotec E3000 и установке AGRAMKOV HRM6 представлен в таблице 4.3.1. Данные показывают сокращение времени реакции на 50%, трудозатрат – на 95,9%, снижение общего уровня брака на 57,1%.

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.

Таким образом, прогнозные расчеты показали, что применение цифрового постпроизводственного мониторинга позволяет:

- снизить общее количество дефектных изделий на 4–6 %;
- минимизировать повторный брак ($\lambda_{\text{пер}}$) на 70–80 %;
- обеспечить более стабильное качество продукции;
- сократить переработку, возвраты и потери материала.

Проведенная апробация методики цифрового постпроизводственного мониторинга на АО «Производственное объединение «Завод имени Серго»» показала ее практическую реализуемость и значительный потенциал повышения эффективности производственных процессов. Внедрение системы автоматизированного сбора, обработки и анализа данных по дефектам позволяет:

- сократить время обработки информации с 3–4 часов на смену до 15–20 минут;
- ускорить принятие корректирующих решений на 40–50 %;
- оптимизировать использование человеческих и материальных ресурсов, снизив трудозатраты персонала почти в 2–3 раза, уменьшив переработку и возвраты,
- сократить простой оборудования на 5 %;
- снизить количество брака, включая повторный брак, на 4–6 % благодаря раннему выявлению отклонений на этапе контроля комплектующих и операций.

Таким образом, интеграция ERP-, MES-, PLM- и BI-систем в рамках единой цифровой среды создает замкнутый цикл управления качеством,

позволяя перейти от фрагментарного контроля к предиктивному управлению производственными процессами, повышая надежность изделий и устойчивость предприятия. Данные представлены на рисунке 4.3.2.

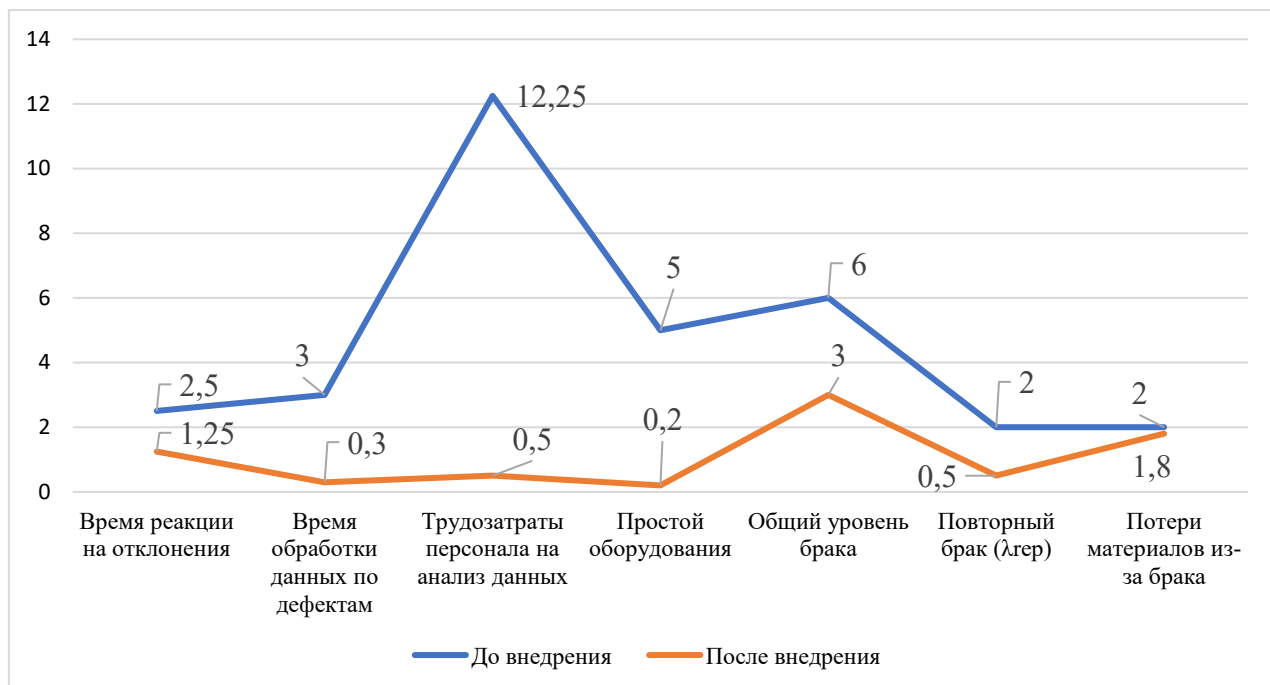


Рисунок 4.3.2 – Показатели сокращения времени, ресурсов и брака при до и после внедрения цифрового постпроизводственного мониторинга
(составлено автором)

На основании расчетов можно сделать вывод, что:

- модель цифрового постпроизводственного мониторинга доказала свою реализуемость и корректность прогнозов;
- внедрение позволит создать замкнутый цифровой контур контроля качества, объединяющий сбор данных, анализ, корректирующие действия и прогнозирование;
- дальнейшее развитие модели с использованием нейросетей позволит формировать предиктивные сценарии отказов, прогнозировать сроки службы и оптимальные гарантийные периоды, повышая надежность продукции и устойчивость производственных процессов.

Таким образом, предложенный подход обеспечивает комплексную

цифровую трансформацию контроля качества, позволяя не только реагировать на дефекты оперативно, но и планировать улучшения процессов на основе предиктивной аналитики и накопленных данных.

4.4 Разработка плана мероприятий для внедрения системы постпроизводственного мониторинга изделий народного потребления (СППМ)

Проведенный анализ технологий производства холодильников на АО «ПОЗиС» позволил построить структуру системы постпроизводственного контроля изделий. Для ее реализации требует постоянный учет множества технологических показателей, относящихся к различным компонентам изделия. Нельзя упускать и другие критерии качества производства и его эффективности: экология и энергопотребление. Надо отметить, что, эти показатели имеют различные размерности, степень неопределенности своего вклада и различное влияние на итоговый результат. Все это затрудняет их интерпретацию и практическое использование при принятии управленческих решений. Применение вероятностного анализа этих данных позволяет обеспечить обоснованную оценку эффективности их влияния на готовую продукцию, однако его использование на практике требует достаточно большой объем собранной информации и выполнение расчетов с привлечением систем искусственного интеллекта из-за большого числа входных параметров.

Таким образом, разработка программного комплекса «Система постпроизводственного мониторинга изделий народного потребления» (СППМ) (рисунок 4.4.1) повышает прикладную значимость диссертационного исследования и обеспечивает воспроизводимость и наглядность полученных результатов.



Рисунок 4.4.1. – Система постпроизводственного мониторинга изделий народного потребления (предложена автором)

В связи с этим была разработана программа-модель для ЭВМ, предназначенная для демонстрации возможности данных расчетов и принятия управленческих решений при возникновении отказов изделий по этапе их эксплуатации. Ее реализация обладает следующими преимуществами:

- доступность и универсальность – приложение легко устанавливается и не требует специального программного обеспечения;
- удобство использования – пользовательский интерфейс обеспечивает наглядный ввод исходных данных (набор показателей и их вероятностные характеристики), удобный графический интерфейс для представления расчетных данных.

Реальная реализация задачи на производстве должна иметь совершенно другую структуру, и ее реализация требует определенных внедренческих

решений, но ее эффективность легко доказывается результатами работы модели. Построим архитектуру и состав программного комплекса.

Архитектура и состав программного комплекса. Разработанный программный комплекс должен иметь клиент–серверную архитектуру и включает следующие основные компоненты:

- блок сбора технологических параметров компонентов (backend), который должен быть реализован в рамках системы PLM средствами, которые она представляет. Здесь возможно потребуются новые контрольно-измерительные компоненты, имеющие интерфейс с выходом в локальные сети предприятия для передачи собранных данных;
- блок контроля заявок на ремонт изделий с обратной связью (идентификатор изделия, причина отказа, действия по ее исправлению), построенная на системе ботов для мобильных устройств;
- базу данных, предназначенную для хранения собранной информации о технологических показателях компонентов изделия, так и о самом изделии, контрольные показатели качества компонентов, результаты постпроизводственного мониторинга изделия и построенную в рамках EDR или другой системы, функционирующей на предприятии. Это может упростить создание данного комплекса и снизить его экономические затраты;
- блок анализа результатов (frontend), который в автоматическом режиме выполняет анализ возникающих критических ситуаций в производственном процессе (брак на производстве комплектующих и поиск его причины с сообщением на рабочее место исполнителю и его непосредственному руководителю) и при возникновении ситуаций отказа изделий во время постпроизводственного мониторинга (анализ причин в связи с параметрами используемых компонентов и выявлением возможных путей исключения данных дефектов через корректировки критериев контроля).

Организация потока данных в СППМ представлена на рисунке 4.4.2.

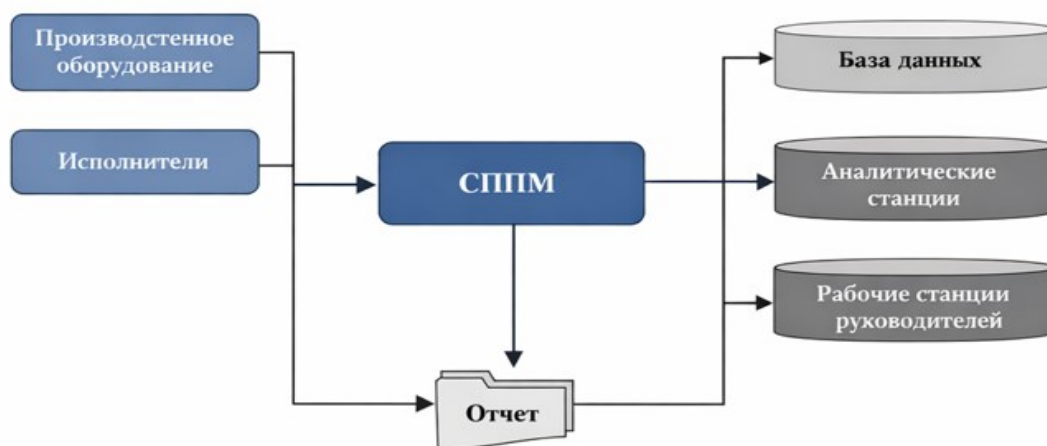


Рисунок 4.4.2 – Поток данных в системе постпроизводственного мониторинга (составлено автором)

Выбор программных средств. Должен определяться имеющимися у предприятия возможностями и уже внедренными программными средствами, которые можно адаптировать к данной задаче. В противном случае можно рекомендовать следующие варианты реализации блоков:

В качестве системы управления базами данных можно применить MySQL, что обусловлено ее надежностью, поддержкой реляционной модели данных, высокой скоростью обработки запросов и совместимостью с разными средами программирования. Применение MySQL обеспечивает хорошее структурированное хранение данных по всем указанным выше показателям и обеспечивает быстрые расчеты для анализа критических ситуаций, а также возможность последующего расширения базы данных.

Фронтэнд-часть может быть реализована с использованием различных программных сред и должна создавать удобный, наглядный и адаптивный пользовательский интерфейс. Данный блок обеспечивает быстрое обновление данных, упрощает обработку пользовательского ввода и повышает эргономичность программного комплекса, что особенно важно при работе с большим количеством параметров и показателей.

Функциональные возможности программного комплекса. Программный комплекс поддерживает:

- идентификацию исполнителей (рабочие, контролеры, руководители, ремонтники и аналитики);
- сбор и анализ контрольных данных на этапе изготовления изделия;
- сбор данных по заявкам потребителей и результаты действий по ним;
- выработку управленческих решений на основании выполненных анализов на этапе изготовления компонентов изделия с выводом их результатов на рабочие места исполнителей для их информации;
- анализ причин отказов изделий, выявление причин отказов и принятие управленческих решений для исключения их в будущем или снижения вероятности их появления вновь.

Реализация программы. На первом этапе необходимо установить необходимое контрольно-измерительное оборудование и привязать его показания к базе данных (БД) предприятия.

На следующем этапе система должна функционировать по следующему алгоритму:

- контроль комплектующих выполняется в автоматическом режиме, все комплектующие получают свой QR-код, который заносится в БД;
- для контроля выполнения операций исполнитель должен зарегистрироваться в системе и получить свой QR-код на текущую смену и затем маркировать им все подготовленные изделия;
- каждое изделие проходит контроль и в БД заносится степень его качества, если результат оказывается плохим (брак или низкое качество), то изделие возвращается на ремонт и рабочий на своем дашборде получает об этом уведомление, так же там выводится информация о числе сделанных изделий и их качестве;
- на выходе готовый товар (холодильник) получает свой QR-код для идентификации при продаже и заявках на ремонт.

По данной схеме можно следить за качеством выполненных работ и контролировать исполнителей. Программа может делать анализ

эффективности каждого работника и выдавать рекомендации по улучшению качества изделий. Проработав по такой схеме около года и заполнив БД данными, можно подключать систему постпроизводственного мониторинга:

- все мастера и организации регистрируются как сертифицированные мастера в заводской системе гарантийного ремонта и получают программный продукт на свой смартфон;
- диспетчерская получает заявку или претензию по изделию и передает ее исполнителю;
- исполнитель фиксирует на смартфоне QR-код изделия и вводит информацию по причинам заявки и выполненным работам.

По каждой заявке система должна делать анализ причин отказа товара и вырабатывать критерии для его улучшения.

На рисунке 4.4.3. представлена упрощенная структурно-функциональная схема программного комплекса, отражающая логику ввода исходных данных, обработки информации и формирования результирующего анализа.

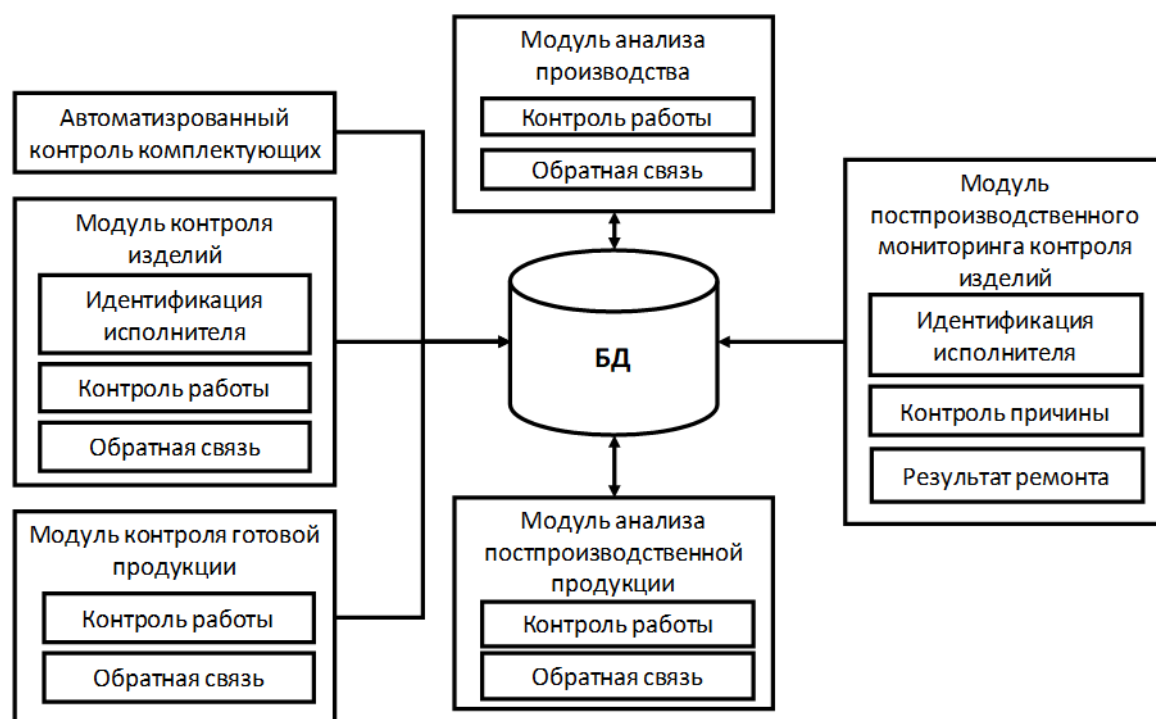


Рисунок 4.4.3 – Структурно-функциональная схема программного комплекса «Система постпроизводственного мониторинга изделий народного потребления» (СППИМ) (разработана автором)

В таблице 4.4.1 представлены этапы работы программного комплекса «СППМ».

Таблица 4.4.1 – Этапы работы программного комплекса «СППМ» и обработка данных (предложены автором)

Этап работы	Входные данные	Обработка	Выходные данные / результат
1. Выбор изделия и определение контрольных показателей	Перечень изделий, параметры компонентов, ключевые технологические показатели	Пользователь выбирает изделие, задает набор показателей для анализа	Структура анализа и набор данных, занесенные в базу «СППМ»
2. Сбор технологических данных	Сигналы с контрольно-измерительного оборудования, идентификаторы компонентов	Автоматический сбор данных, присвоение QR-кодов, регистрация показателей	Полная база технологических показателей изделий для анализа
3. Ввод данных о выполнении операций	Данные о действиях исполнителей: рабочие, контролеры, ремонтники	Ввод информации о выполненных операциях, фиксация дефектов и качества	База данных операций и качества изделий, сопоставление с параметрами компонентов
4. Анализ заявок и отказов	Заявки потребителей, данные о браке, технологические показатели компонентов	Обработка и сопоставление причин отказов, выявление закономерностей	Рекомендации по корректировке процессов, выявленные проблемные участки
5. Формирование управленческих решений	Результаты анализа заявок и брака, показатели качества	Выработка предложений по улучшению качества и снижению вероятности отказов	Управленческие рекомендации, отображение на рабочие места исполнителей и руководителей
6. Документирование результатов	Все собранные и обработанные данные, рекомендации	Формирование отчета автоматически	Отчет в формате Microsoft Word с результатами анализа, исходными данными и предложениями для улучшений

Предлагаемый программный комплекс является инструментом, обеспечивающим практическую реализацию методического подхода,

предложенного в диссертационной работе. Его использование повышает качество готовой продукции и дает обоснованные выводы по ее улучшению.

ВЫВОДЫ ПО ЧЕТВЕРТОЙ ГЛАВЕ

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 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. 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.

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

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.

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 построению производственного мониторингу на участке пайки медных труб холодильников с проверкой герметичности на оборудовании Ecotec E3000 и установке AGRAMKOV HRM6 представлен в таблице 4. Данные показывают сокращение времени реакции на 50%, трудозатрат – на 95,9%, снижение общего уровня брака на 57,1%.

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 ЛИТЕРАТУРЫ

1. Антипова, О. И. Методология и инструментарий создания распределенных систем менеджмента качества предприятий автомобильной промышленности: дисс. ... докт. техн. наук: 2.5.22 / Антипова Ольга Ивановна. – Самара, 2024.
2. Афанасьев, А. А. Цифровая трансформация машиностроения России в контексте четвертой промышленной революции / А. А. Афанасьев // Вопросы инновационной экономики. – 2024. – Т. 14. – № 1. – С. 221–240.
3. Ахматова, М.-С. С. Модель и методики управления цифровой зрелостью процессов оценки поставщиков для наукоемких производств: дисс. ... канд. техн. наук: 2.5.22 / Ахматова Малика-Софи Сафидиевна. – Санкт-Петербург, 2025.
4. Бабенко, Е. В. Стандартизация процессов цифровой трансформации машиностроительных производств: дисс. ... канд. техн. наук: 2.5.22 / Бабенко Елена Владимировна. – Москва, 2025.
5. Бабкин, А. В. Формирование цифровой экономики в России: сущность, особенности, технико-технологические основы / А. В. Бабкин, Д. Д. Буркальцева, Д. Г. Костень, Ю. Н. Воробьев // Научно-технические ведомости СПбПУ. Экономические науки. – 2017. – Т. 10, № 3. – С. 9–25
6. Балдина, А. С. Интегрированные системы бережливого производства и управления качеством на российских предприятиях оборонно-промышленного комплекса / А. С. Балдина // Вестник НГУЭУ. – 2022. – № 3. – С. 140–153.
7. Баурина, С. Б. Обеспечение качества: промышленное производство, сельское хозяйство, сфера услуг: монография / С. Б. Баурина. – Москва: Русайнс, 2024. – 104 с.
8. Баурина, С. Б. Процессное управление в системе менеджмента качества предприятия: монография / С. Б. Баурина. – Москва: Русайнс, 2024. – 102 с.

9. Блинков, Е. В. Применение CALS-технологий в условиях разработки и постановки на производство изделий ракетно-космической техники / Е. В. Блинков, А. М. Шишаев, В. П. Назаров // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. – 2014. – Т. 1, № 10. – С. 42–43.
10. Болотин, В. В. Прогнозирование ресурса машин и конструкций / В. В. Болотин. – Москва: Машиностроение, 1984. – 312 с.
11. Боровков, А. И. Цифровые двойники в высокотехнологичной промышленности: краткий доклад / А. И. Боровков, А. А. Гамзикова, К. В. Кукушкин, Ю. А. Рябов. – Санкт-Петербург: Политех-Пресс, 2019. – 61 с.
12. Бородушко, И. В. Управление развитием информационно-коммуникационных технологий в Российской Федерации с учетом закономерностей функционирования ИТ-отрасли / И. В. Бородушко // Вестник Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России. – 2022. – № 1. – С. 119–128.
13. Вансович, К. А. Модель роста усталостных поверхностных трещин за цикл нагружения «нагрузка–разгрузка» / К. А. Вансович // Омский научный вестник. – 2017. – № 3 (153). – С. 49–53.
14. Волков, В. М. Построение модели надежности сварных конструкций в условиях усталости по данным неразрушающего контроля / В. М. Волков, А. А. Миронов // Вестник Нижегородского университета им. Н. И. Лобачевского. – 2011. – № 4-5. – С. 2082–2084.
15. Волков, В. М. Объединенная модель образования и роста усталостных трещин в концентраторах напряжений / В. М. Волков, А. А. Миронов // Проблемы прочности и пластичности: межвуз. сб. – Нижний Новгород: Изд-во Нижегород. гос. ун-та, 2005. – Вып. 67. – С. 20–25.
16. Волченко, В. Н. Контроль качества сварки / В. Н. Волченко. – Москва: Машиностроение, 1975. – 327 с.
17. Галимулина, Ф. Ф. Развитие концептуального подхода к моделированию проектных организационных структур в условиях цифровизации и перехода к циркулярной модели производства / Ф. Ф.

Галимулина, А. И. Шинкевич, Д. Р. Алимова // Современные наукоемкие технологии. – 2022. – № 9. – С. 53–57.

18. Галимулина, Ф. Ф. Цифровые инструменты управления промышленным предприятием в условиях укрепления технологического суверенитета / Ф. Ф. Галимулина // Вестник Белгородского университета кооперации, экономики и права. – 2022. – № 4 (95). – С. 65–72.

19. Галимулина, Ф. Ф. Agile и Scrum – эффективные инструменты повышения качества нефтехимической продукции и экологизации производств / Ф. Ф. Галимулина, А. И. Шинкевич, И. А. Зарайченко // Современные наукоемкие технологии. – 2021. – № 9. – С. 42–46.

20. Галимулина, Ф. Ф. Методика автоматизированной реализации теории ограничений в функционировании нефтехимического предприятия / Ф. Ф. Галимулина // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2021. – Т. 23, № 4. – С. 5–11.

21. Глухов, В. В. Экономика и менеджмент в условиях цифровизации: состояние, проблемы, форсайт / В. В. Глухов, А. В. Бабкин. – Санкт-Петербург: Изд-во Политехн. ун-та, 2017. – 564 с.

22. Глушко, А. Н. Проблемно ориентированные CALS системы компьютерного менеджмента качества химических противогололёдных материалов и дорожных пропиток: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации / А. Н. Глушко. – Иваново, 2013. – 149 с.

23. Горин, Д. С. Научно-методические основы управления качеством продукции на основе CALS-технологий / Д. С. Горин, С. С. Долженков // Вестник Академии права и управления. – 2021. – № 3 (64). – С. 55-60.

24. ГОСТ 3.1109–82 Единая система технологической документации. Термины и определения основных понятий. – Москва: Стандартинформ, 2012. – 15 с.

25. ГОСТ 15467–79 Управление качеством продукции. Основные понятия. Термины и определения. – Москва: Стандартинформ, 2009. – 21 с.

26. ГОСТ 21014–2022 Металлопродукция из стали и сплавов. Дефекты поверхности. Термины и определения. – Москва: Российский институт стандартизации, 2022. – 88 с
27. ГОСТ 34.601–90 Информационная технология. Комплекс стандартов на автоматизированные системы. Автоматизированные системы. Стадии создания. – Москва: ИПК Издательство стандартов, 2002. – 8 с.
28. ГОСТ Р 56542–2019 Контроль неразрушающий. Классификация видов и методов. – Москва: Стандартинформ, 2019. – 12 с.
29. ГОСТ Р 51814.2–2001 Системы качества в автомобилестроении. Метод анализа видов и последствий потенциальных дефектов. – Москва: Российский институт стандартизации, 2021. – 28 с.
30. ГОСТ Р 53563–2009 Контроль состояния и диагностика машин. Мониторинг состояния оборудования опасных производств. Порядок организации. – Москва: Стандартинформ, 2010. – 14 с.
31. ГОСТ Р 54136–2010 Системы промышленной автоматизации и интеграция. Руководство по применению стандартов, относящихся к процессам создания и управления сложными производственными структурами. – Москва: Стандартинформ, 2012. – 72 с.
32. ГОСТ Р 56020–2020 Бережливое производство. Основные положения и словарь. – Москва: Стандартинформ, 2020. – 20 с.
33. ГОСТ Р 56407–2023 Бережливое производство. Основные инструменты и методы их применения. – Москва: Российский институт стандартизации, 2023. – 22 с.
34. ГОСТ Р 56606–2015 Контроль технического состояния и функционирования медицинских изделий. Основные положения. – Москва: Стандартинформ, 2016. – 18 с.
35. ГОСТ Р 57315–2016 Инновационный менеджмент. Руководящие принципы для осуществления открытого инновационного подхода. – Москва: Стандартинформ, 2017. – 32 с.
36. ГОСТ Р 57700.37–2021 Компьютерные модели и моделирование.

Цифровые двойники изделий. Общие положения. – Москва: Российский институт стандартизации, 2021. – 16 с.

37. ГОСТ Р 58771–2019 Менеджмент риска. Технологии оценки риска. – Москва: Стандартинформ, 2020. – 92 с.

38. ГОСТ Р 59768–2021 Изделия медицинские. Менеджмент риска. Оценка риска на постпроизводственной стадии жизненного цикла продукции. – Москва: Российский институт стандартизации, 2021. – 28 с.

39. ГОСТ Р 70467–2022 Изделия медицинские. Постпроизводственный надзор субъектами обращения. – Москва: Российский институт стандартизации, 2022. – 18 с.

40. ГОСТ Р 71487.11–2025 Цифровая промышленность. Качество промышленных данных. Часть 66. Управление качеством данных. Показатели оценки для обработки данных в производственных операциях. – Москва: Российский институт стандартизации, 2025. – 30 с.

41. ГОСТ Р ИСО 7870-2–2015 Статистические методы. Контрольные карты. Часть 2. Контрольные карты Шухарта. – Москва: Стандартинформ, 2016. – 46 с.

42. ГОСТ Р ИСО 9001–2015 Системы менеджмента качества. Требования. – Москва: Стандартинформ, 2018. – 32 с.

43. ГОСТ Р ИСО 9004–2019 Менеджмент качества. Качество организации. Руководство по достижению устойчивого успеха организации. – Москва: Стандартинформ, 2019. – 48 с.

44. ГОСТ Р ИСО 10004–2020 Менеджмент качества. Удовлетворенность потребителей. Руководящие указания по мониторингу и измерению. – Москва: Стандартинформ, 2020. – 38 с.

45. ГОСТ Р ИСО 10303-1–2022 Системы автоматизации производства и их интеграция. Представление данных об изделии и обмен этими данными. Часть 1. Общие представления и основополагающие принципы. – Москва: Российский институт стандартизации, 2022. – 26 с.

46. ГОСТ РВ 0015-002–2020 Система разработки и постановки на

производство военной техники. Системы менеджмента качества. Общие требования. – Москва: Стандартинформ, 2020. – 44 с.

47. Гродзенский, С. Я. CALS-технологии в интегрированной информационной среде / С. Я. Гродзенский, С. А. Овчинников, Е. А. Калачева // Стандарты и качество. – 2014. – № 3. – С. 38–41.

48. Дастин, Э. Автоматизированное тестирование программного обеспечения: Внедрение, управление и эксплуатация / Э. Дастин, Дж. Рэшка, Дж. Пол. – Москва: ЛОРИ, 2003. – 567 с.

49. Дмитриев, О. В. Стратегия развития контроллинга на предприятиях оборонно-промышленного комплекса России: монография / О. В. Дмитриев; под ред. В. В. Бандурина. – Москва: Граница, 2005. – 375 с.

50. Дмитриев, О. Н. Управление качеством продукции в наукоемких отраслях промышленности / О. Н. Дмитриев. – Москва: Доброе слово, 2014. – 256 с.

51. Дубровин, А. В. Методика совершенствования информационной поддержки управления качеством жизненного цикла машиностроительной продукции: дисс. ... канд. техн. наук: 05.02.23 / Дубровин Алексей Викторович. – Москва, 2019.

52. Евлоева, М. В. Диаграмма Парето как инструмент управления качеством для системы устойчивого развития / М. В. Евлоева, П. А. Лонcich, А. В. Федотова, Е. Ю. Головина, Н. П. Лонcich // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2024. – Т. 26, № 4. – С. 118–123.

53. Евлоева, М. В. Определение алгоритма реализации процессов жизненного цикла продукции при достижении целей устойчивого развития в промышленном производстве / М. В. Евлоева // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2024. – № 9. – С. 105–110.

54. Иванов, М. В. Модели и методики цифровизации систем менеджмента качества наукоемкого производства: дис. ... канд. техн. наук: 2.5.22 / Иванов Максим Викторович; [Место защиты: ФГАОУ ВО «Санкт-

Петербургский гос. ун-т аэрокосм. приборостроения»]. – Санкт-Петербург, 2025. – 157 с.

55. Иванова, С. П. Изменения в цифровой экономике и ее влияние на общество / С. П. Иванова, А. И. Мясоедов // Экономика. Социология. Право. – 2023. – № 1 (29). – С. 14–23.

56. Казурова, Д. В. Особенности проведения аудита системы менеджмента качества использованием компьютерных технологий / Д. В. Казурова, С. В. Чекайкин // Тенденции развития науки и образования. – 2022. – № 85-1. – С. 22–26.

57. Кибирев, Ю. В. Реализация требований достижения цели устойчивого развития в процессе повышения качества оборудования, предназначенного для производства асфальтобетонных смесей / Ю. В. Кибирев [и др.] // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2024. – № 9. – С. 171–175.

58. Князев, А. В. Модели и алгоритмы цифровизированного управления качеством процесса стандартизации наукоемкой продукции: дисс. ... канд. техн. наук: 2.5.22 / Князев Александр Васильевич. – Москва, 2025. – 169 с.

59. Ковригин, Е. А. Интеграция современных цифровых технологий в систему менеджмента качества высокотехнологичных предприятий: дисс. ... канд. техн. наук: 05.02.23 / Ковригин Евгений Александрович. – Санкт-Петербург, 2020-144 с.

60. Козлова, А. В. Разработка порядка проверки пригодности процесса измерения для реализации эффективной системы аналитического управления технологическими процессами / А. В. Козлова // Вестник МГТУ «Станкин». – 2021. – № 1 (56). – С. 51–58.

61. Козлова, О. А. Автоматизация управления жизненным циклом продукции посредством создания хранилища электронной технической документации предприятия / О. А. Козлова, А. О. Харитонов // Успехи в химии и химической технологии. – 2017. – Т. 31. – № 5 (186). – С. 22–25.

62. Кондусова, В. Б. Повышение эффективности функционирования САПР на основе разработки методологии информационной поддержки жизненного цикла наукоемких изделий: специальность 05.13.12 «Системы автоматизации проектирования (по отраслям)»: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Кондусова Валентина Борисовна ; Оренбургский государственный университет. – Оренбург, 2019. – 418 с.

63. Костандян, А. В. Интеллектуальная система мониторинга измерений в системах управления технологическими процессами / А. В. Костандян, С. С. Горбунов, А. Ф. Егоров, В. В. Сидоров // Математические методы в технологиях и технике. – 2022. – № 1. – С. 21–25.

64. Кузнецова, Л. В. Методика внедрения CALS-технологий на предприятиях автомобилестроения / Л. В. Кузнецова, А. В. Олейник, М. Е. Ставровский // Известия МГТУ «МАМИ». – 2010. – № 2 (10). – С. 225–236.

65. Кунаков, Е. П. Адаптация методов и моделей проектного управления к усовершенствованному циклу PDCA / Е. П. Кунаков, П. А. Лончих, А. В. Кокшаров, А. Е. Гулов // Качество. Инновации. Образование. – 2021. – № 4 (174). – С. 42–48.

66. Куликова, Д. С. Цифровизация бизнес-моделей: глобальные тренды и перспективы развития / Д. С. Куликова // Инновации и инвестиции. – 2022. – № 4. – С. 54–58.

67. Кучкаров, З. А. Роль и место стратегического планирования в управлении / З. А. Кучкаров // Управленческое консультирование. – 2005. – № 4. – С. 130–163.

68. Лазарев, М. С. Анализ проблем и методик внедрения цифровых двойников в сборочном производстве в условиях ограниченных данных и устаревшего оборудования / М. С. Лазарев, В. В. Елшин // Современные наукоемкие технологии. – 2025. – № 12. – С. 114–121.

69. Левченко, Е. В. Совершенствование инструментария оценки и развития системы менеджмента качества в условиях цифровизации экономики: дисс. ... канд. экон. наук: 08.00.05 / Левченко Елена Владимировна.

– Москва, 2019 – 162 с.

70. Литвак, В. В. Разработка методов и средств повышения надежности и эффективности эксплуатации электроэнергетических объектов и систем / В. В. Литвак, Р. А. Вайнштейн, Ю. В. Хрущев [и др.] // Известия Томского политехнического университета. – 2000. – Т. 303, вып. 1. – С. 270–285.

71. Логанина, В. И. Применение методов математической статистики при оценке качества поставщика продукции: монография / В. И. Логанина, М. В. Зайцева, Е. И. Куимова. – Москва: Русайнс, 2024. – 96 с.

72. Лонcich, П. А. Связь цикла Деминга и спирали качества Джурана в задачах развития цикла PDCA и создания сетецентрической системы менеджмента / П. А. Лонcich, Е. П. Кунаков, Н. П. Лонcich, А. В. Федотова // Качество. Инновации. Образование. – 2023. – № 1 (183). – С. 3–10.

73. Лонcich, П. А. Совершенствование деятельности машиностроительных предприятий на основе применения современных цифровых технологий / П. А. Лонcich, И. И. Лившиц, Е. П. Кунаков, Н. П. Лонcich // Качество. Инновации. Образование. – 2018. – № 5 (156). – С. 39–47.

74. Мальков, А. А. Методы построения классификатора технической документации / А. А. Мальков // Colloquium-journal. – 2019. – № 6-2 (30). – С. 14–16.

75. Малышева, Т. В. Контроль качества производства отечественных автокомпонентов на основе процедуры одобрения новых поставщиков (PPAP) стандарта IATF 16949 / Т. В. Малышева // Контроль. Диагностика. – 2025. – Т. 28, № 6 (324). – С. 31–38.

76. Малышева, Т. В. Развитие системы управления качеством на основе предиктивной аналитики предупреждения рисков несоответствия продукции / Т. В. Малышева, А. И. Лысенков // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2024. – Т. 26, № 2. – С. 39–47.

77. Малышева, Т. В. Разработка алгоритма классификации производств по типу внутризаводского кооперирования основных и

вспомогательных процессов методом машинного обучения / Т. В. Малышева // Омский научный вестник. – 2024. – № 1 (189). – С. 12–19.

78. Медников, Д. А. CALS-технологии и их реализация на этапах жизненного цикла изделия / Д. А. Медников, Е. В. Абызова, О. В. Медникова // Вестник Академии знаний. – 2018. – № 4 (27). – С. 155–157.

79. Мельниченко, Т. Ю. Цифровая экономика: аспекты влияния цифровизации на экономическое развитие / Т. Ю. Мельниченко // Экономические исследования и разработки. – 2024. – № 11. – С. 92–104. – URL: (дата обращения: 30.11.2024). – Текст: электронный.

80. Мефодьев, В. Ю. О применении методов бережливого производства и менеджмента качества в организации производственных процессов на АО «Казанский вертолетный завод» / В. Ю. Мефодьев, М. Ф. Сафаргалиев, О. Е. Зилянева // Вестник Казанского государственного технического университета им. А. Н. Туполева. – 2023. – Т. 79, № 3. – С. 38–48.

81. Миронов, А. А. Оценка надежности сварных соединений тонкостенных конструкций по результатам их неразрушающего контроля / А. А. Миронов, В. М. Волков // Проблемы прочности и пластичности. – 2009. – Вып. 71. – С. 45–51

82. Мусина, Г. Р. Моделирование прогноза отказов изделия на основании статистических данных по контролируемым техническим и технологическим параметрам на этапе сборки: свид. о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2025689256 Рос. Федерация / Мусина Г. Р. – № 2025689256 ; заявл. 20.10.2025 ; опубл. 27.10.2025.

83. 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.

84. Мусина, Г. Р. Разработка концепции модуля постпроизводственного мониторинга в составе информационной системы

управления производством предприятия по промышленному производству бытовой техники / Г. Р. Мусина // Информационно-экономические аспекты стандартизации и технического регулирования. – 2025. – № 6 (87). – С. 573 – 580.

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

86. 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. – Санкт-Петербург, 2024. – С. 46–48.

87. Мусина, Г. Р. Управление качеством продукции на производственном предприятии / Г. Р. Мусина // Информационно-экономические аспекты стандартизации и технического регулирования. – 2025. – № 3 (84). – С. 18–24.

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

89. Мусина, Г. Р. Цифровое моделирование и мониторинг в CALS-управлении изделием / Г. Р. Мусина // Информационно-экономические аспекты стандартизации и технического регулирования. – 2025. – № 5 (86). – С. 110–116.

90. 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.

91. 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.

92. 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.

93. 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.

94. Мусина, Г. Р. Методы и инструменты бережливого производства синхронизации в производственных системах, оптимизации процессов и рабочих мест / Г. Р. Мусина, И. А. Гусарова // Перспективы науки. – 2022. – № 7 (154). – С. 16–18.

95. Мусина, Г. Р. Состояние и перспективы внедрения цифровых технологий на предприятиях в машиностроительной отрасли промышленности / Г. Р. Мусина, М. В. Шинкевич // Наука и бизнес: пути развития. – 2023. – № 12 (150). – С. 137–140.

96. Национальная технологическая инициатива [Электронный ресурс] // Режим доступа: <https://nti2035.ru>

97. Невиницын, В. Ю. Программно-технический комплекс для автоматизированного проектирования алгоритмов управления технологическими объектами / В. Ю. Невиницын, А. Н. Лабутин, Е. В. Макарова // Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение. – 2021. – № 4 (68). – С. 56–62.

98. Неделько, А. Ю. Контроллеры цифровых датчиков температуры в промышленных сетях / А. Ю. Неделько // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. – 2010. – № 4. – С. 70–72.

99. Новикова, Т. А. Эволюция подходов к управлению качеством продукции машиностроения / Т. А. Новикова, Е. В. Ляпунцова // Известия

Тулского государственного университета. Технические науки. – 2024. – № 2. – С. 571–575.

100. Норенков, И. П. Информационная поддержка наукоемких изделий. CALS-технологии: монография / И. П. Норенков, П. К. Кузьмик. – Москва: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. – 319 с.

101. Окрепилов, В. В. Менеджмент качества в условиях цифровой экономики / В. В. Окрепилов // Экономика качества. – 2018. – № 3 (23). – С. 4–11.

102. Омельченко, И. Н. Инструменты обеспечения качества процессов в интегрированных цепях поставок / И. Н. Омельченко, Т. Г. Садовская // Экономика и управление в машиностроении. – 2017. – № 3. – С. 45–50.

103. Орлов, А. И. Бережливое производство: оптимизация запасов и управление качеством / А. И. Орлов // Научный журнал КубГАУ. – 2022. – № 183. – С. 164–177.

104. Охтилев, П. А. Алгоритмы и онтологические модели информационно-аналитической поддержки процессов создания и применения космических средств: дисс. ... канд. техн. наук: 05.13.01 / Охтилев Петр Александрович. – Санкт-Петербург, 2019.

105. Пантюхин, О. В. Разработка методологии управления качеством продукции ответственного назначения на основе цифровых двойников технологических процессов и изделий (на примере изготовления гильз для высокоэффективных патронов): дисс. ... докт. техн. наук: 05.02.23 / Пантюхин Олег Викторович. – Тула, 2021. – 272 с.

106. Платонов, Д. Е. Разработка методов оценки и повышения производительности технологических сетей на основе компьютерного моделирования и системной оптимизации производственных процессов: дис. ... канд. техн. наук: 2.5.22 / Платонов Дмитрий Евгеньевич. – Санкт-Петербург, 2026. – 169 с.

107. Порсев, К. И. Управление качеством информационного обеспечения предприятий электронного приборостроения на основе CALS-

технологий: дисс. ... канд. техн. наук: 05.02.23 / Порсев Константин Игоревич. – Москва, 2020. – 149 с.

108. Пospelова, Е. А. Применение CALS-технологий в управлении качеством / Е. А. Пospelова, В. А. Здесенко // Экономика. Инновации. Управление качеством. – 2015. – № 1 (10). – С. 76–80.

109. Робсон, М. Практическое руководство по реинжинирингу бизнес-процессов / М. Робсон, Ф. Уллах ; пер. с англ. под ред. Н. Д. Эриашвили. – Москва: ЮНИТИ, 1997. – 224 с.

110. Российская Федерация. Президент (2024 – ; В. В. Путин). О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года и на перспективу до 2036 года: Указ Президента Российской Федерации от 07.05.2024 г. № 309 // Собрание законодательства Российской Федерации. – 2024. – № 20. – Ст. 2634.

111. Российская Федерация. Правительство. Сводная стратегия развития обрабатывающей промышленности Российской Федерации до 2030 года и на период до 2035 года: утв. распоряжением Правительства Российской Федерации от 06.06.2020 г. № 1512-р (в ред. от 28.09.2023 г. № 2623-р) // Собрание законодательства Российской Федерации. – 2023. – № 41. – Ст. 7378.

112. Рухлин, Г. В. Управление качеством продукции в цепях поставок промышленного предприятия / Г. В. Рухлин // Вестник РГГУ. Серия «Экономические науки». – 2012. – № 12. – С. 211–217.

113. Савич, Е. К. Методология создания и функционирования интеллектуальной цифровой системы менеджмента качества: дисс. ... докт. техн. наук: 2.5.22 / Савич Екатерина Константиновна. – Самара, 2025. – 327 с.

114. Садовская, Т. Г. Организационно-экономический анализ бизнеса: учеб. пособие / Т. Г. Садовская, В. А. Дадонов, П. А. Дроговоз ; МГТУ им. Н. Э. Баумана. – Москва: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. – 67 с.

115. Самофеев, И. А. Управление развитием высокотехнологичной промышленной корпорации на основе бизнес-модели жизненного цикла изделий: дисс. ... канд. экон. наук: 08.00.05 / Самофеев Илья Александрович. –

Челябинск, 2022. – 184 с.

116. Сахапова, Т. С. Цифровой двойник производства как этап новой цифровой бизнес-модели промышленного предприятия / Т. С. Сахапова, Т. Ш. Исмагилов, В. А. Тихонов // Горная промышленность. – 2023. – № 2. – С. 62–68.

117. Сафаргалиев, М. Ф. К вопросу об организации и развитии распределённых производственных систем / М. Ф. Сафаргалиев // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2023. – Т. 25, № 2. – С. 34–44.

118. Сафаргалиев, М. Ф. О поддержке и современных подходах к созданию промышленных кластеров как экосистем организации распределённых производств / М. Ф. Сафаргалиев, И. В. Юсупова, Д. К. Селезнев // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2023. – Т. 25, № 6. – С. 60–67.

119. Скобелев, К. Д. Совершенствование системы управления качеством испытательной лаборатории в условиях цифровой трансформации: дис. ... канд. техн. наук: 2.5.22 / Скобелев Кирилл Дмитриевич. – Казань, 2025. – 166 с.

120. Скобелев, Д. О. О подходе к классификации технологий / Д. О. Скобелев, Т. В. Гусева // Компетентность. – 2024. – № 6. – С. 28–32.

121. Скобелев, Д. О. Трансформация российской промышленности на основе документов по стандартизации / Д. О. Скобелев, Т. В. Гусева, О. С. Ежова // Стандарты и качество. – 2026. – № 3. – С. 52–57.

122. Скобелев, К. Д. Цифровая система поддержки принятия управленческих решений в области проведения испытаний / К. Д. Скобелев // Качество. Инновации. Образование. – 2025. – № 4 (198). – С. 3–8.

123. Скобелев, К. Д. Цифровая модель повышения качества работы испытательных лабораторий / К. Д. Скобелев // Контроль качества продукции. – 2025. – № 7. – С. 26–31.

124. Скобелев, К. Д. Организационно-информационная модель обеспечения контроля качества продукции / К. Д. Скобелев // Компетентность. – 2026. – № 4. – С. 12–17.

125. Скрипко, Л. Е. Мышление сквозь призму рисков: связь менеджмента рисков, качественного менеджмента и общего управления организацией / Л. Е. Скрипко // Методы менеджмента качества. – 2017. – № 6. – С. 26–33.

126. Струк, П. В. Обеспечение единообразного описания и интерпретации данных на различных этапах жизненного цикла изделий (CALS-технологии) / П. В. Струк // Теория и практика современной науки. – 2019. – № 7 (49). – С. 149–155.

127. Судов, Е. В. Модели, методы и средства управления и интегрированной информационной поддержки процессов жизненного цикла наукоемкой продукции: дисс. ... докт. техн. наук: 05.13.06 / Судов Евгений Владимирович. – Москва, 2004. – 310 с.

128. Тихонова, О. Б. Разработка системы интерактивных средств обеспечения эксплуатационной эффективности бытовых холодильных приборов: дисс. ... канд. техн. наук: 05.02.13 / Тихонова Ольга Борисовна; [Место защиты: Юж.-Рос. гос. ун-т экономики и сервиса]. – Шахты, 2012. – 197 с.

129. Харитонов, Д. В. Цифровая трансформация оборонно-промышленного комплекса: на примере наукоемкого производства керамических изделий / Д. В. Харитонов, А. В. Грошев // Современные наукоемкие технологии. – 2022. – № 7. – С. 93–99.

130. Харитонов, Д. В. Роль параллельного инжиниринга в развитии предприятий оборонно-промышленного комплекса в условиях цифровизации / Д. В. Харитонов // Управление устойчивым развитием. – 2022. – № 6 (43). – С. 25–31.

131. Харитонов, Д. В. Оценка производственной эффективности участка формования наукоемких керамических изделий посредством

цифровой трансформации процесса учета движения изделий / Д. В. Харитонов, А. В. Грошев // Современные наукоемкие технологии. – 2022. – № 6. – С. 71–77.

132. Харитонов, Д. В. Сокращение потерь при входном контроле / Д. В. Харитонов, А. И. Амосов, А. Н. Блинов, А. В. Грошев, Д. А. Анашкин // Стандарты и качество. – 2019. – № 11. – С. 36–41.

133. Харитонов, Д. В. Повышение производительности участка механической обработки керамических изделий в ОПК / Д. В. Харитонов, А. Н. Блинов, Д. А. Анашкин // Современные наукоемкие технологии. – 2022. – № 1. – С. 114–120.

134. Хасанов, Р. Ш. К вопросу о роли логистического центра в комплексном развитии и цифровизации производства бытовой холодильной техники и медицинского холодильного оборудования / Р. Ш. Хасанов, М. Н. Стяжкин, М. Ф. Сафаргалиев // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2024. – Т. 26, № 6. – С. 76–85.

135. Хасанов, Р. Ш. Практическая реализация современных методов организации производства и логистики на АО «ПОЗИС» / Р. Ш. Хасанов, М. Н. Стяжкин, М. Ф. Сафаргалиев // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2025. – Т. 27, № 3 (2). – С. 360–371.

136. Шинкевич, А. И. Роль цифровой трансформации в обеспечении уровня технологического развития отраслей и предприятий / А. Э. Идрисов, А. И. Шинкевич // Вестник Самарского университета. Экономика и управление. – 2024. – Т. 15, № 3. – С. 126–134.

137. Шинкевич, А. И. Исследование тенденций использования искусственного интеллекта на уровне управления проектами промышленного развития / А. И. Шинкевич, А. А. Лубнина // π -Economy. – 2025. – Т. 18, № 5. – С. 9–22.

138. Шинкевич, А. И. Проектирование продукции на платформе PLM: метод структурирования функции качества QFD / А. И. Шинкевич, Т. В. Малышева, Д. В. Харитонов // Компетентность. – 2023. – № 3. – С. 50–54.

139. Шинкевич, А. И. Мониторинг процессов энергосбережения в производственных системах на основе математической статистики / А. И. Шинкевич, Т. В. Малышева, Л. Н. Иванова // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2021. – Т. 23, № 4. – С. 57–64
140. Шинкевич, А. И. Методика оценки ключевых показателей эффективности системы менеджмента качества организаций / А. И. Шинкевич, Д. Р. Алимова, Ф. Ф. Галимулина // Информационно-экономические аспекты стандартизации и технического регулирования. – 2025. – № 3 (84). – С. 25–31.
141. Antony, J. Benefits, challenges, critical success factors and motivations of Quality 4.0 – A qualitative global study / J. Antony, M. Sony, O. McDermott, R. Jayaraman, D. Flynn // Total Quality Management & Business Excellence. – 2023. – Vol. 34, no. 7–8. – P. 827–846.
142. Antonino, P. O. A Quality 4.0 Model for architecting industry 4.0 systems / P. O. Antonino, R. Capilla, P. Pelliccione, F. Schnicke, D. Espen, T. Kuhn, K. Schmid // Advanced Engineering Informatics. – 2022. – Vol. 54, art. 101801.
143. Calvetti, D., Ferreira, A. Innovative approaches to productivity monitoring: Integrating work sampling and electronic performance monitoring / D. Calvetti, A. Ferreira // Work. – 2025. – Vol. 80, No. 2. – P. 437–450. Chen, C. The advance of digital twin for predictive maintenance: The role and function of machine learning / C. Chen, H. Fu, Y. Zheng, F. Tao, Y. Liu // Journal of Manufacturing Systems. – 2023. – Vol. 71. – P. 581–594.
144. Dreyfus, P.-A. Virtual metrology as an approach for product quality estimation in Industry 4.0: a systematic review and integrative conceptual framework / P.-A. Dreyfus, F. Psarommatis, G. May, D. Kiritsis // International Journal of Production Research. – 2022. – Vol. 60, no. 2. – P. 742–765.
145. Garcia-Garcia, G. Business process re-engineering to digitalise quality control checks for reducing physical waste and resource use in a food company / G. Garcia-Garcia, G. Coulthard, S. Jagtap, M. Afy-Shararah, J. Patsavellas, K. Salonitis // Sustainability. – 2021. – Vol. 13, no. 22, art. 12341.
146. Geissbauer, R. Industry 4.0: Building the digital enterprise: 2016

Global Industry 4.0 Survey / R. Geissbauer, J. Vedsø, S. Schrauf. – Frankfurt am Main: PricewaterhouseCoopers, 2016. – 36 p.

147. Gester, A. Development of a process monitoring method for ultrasonic metal welding of automotive wires based only on machine sensor data / A. Gester [et al.] // *Welding in the World*. – 2026. – P. 1–22.

148. Guo, Y. Recent progress of sensing and machine learning technologies for process monitoring and defects detection in wire arc additive manufacturing / Y. Guo [et al.] // *Journal of Manufacturing Processes*. – 2024. – Vol. 119. – P. 69–91.

149. Hassoun, A. Food quality 4.0: From traditional approaches to digitalized automated analysis / A. Hassoun, S. Jagtap, G. Garcia-Garcia, H. Trollman, M. Pateiro, J. M. Lorenzo, M. Trif, A. Rusu, R. Aadil, V. Šimat, J. Cropotova, J. S. // *Journal of Food Engineering*. – 2022. – Vol. 337, art. 111216.

150. He, X. In-process monitoring strategies and methods in metal forming: A selective review / X. He [et al.] // *Journal of Manufacturing Processes*. – 2025. – Vol. 138. – P. 100–128.

151. Helfers, E. Shear force sensors for process monitoring in ultrasonic metal welding—design, calibration, and validation / E. Helfers [et al.] // *Welding in the World*. – 2025. – P. 210–215.

152. Herzog, T. Process monitoring and machine learning for defect detection in laser-based metal additive manufacturing / T. Herzog [et al.] // *Journal of Intelligent Manufacturing*. – 2024. – Vol. 35, No. 4. – P. 1407–1437.

153. Hutchinson, R. L. II. Case Study: Maintenance Planning at FedEx Express: Today and the Future / R. L. II Hutchinson, E. Margul // *Aircraft IT MRO*. – 2023. – Vol. 12, Iss. 1. – P. 56–65.

154. Kagermann, H. Ten Years of INDUSTRIE 4.0 – Germany Driving Industrial AI as the Means to Future Value Creation / H. Kagermann, W. Wahlster // *at – Automatisierungstechnik*. – 2022. – Vol. 70, no. 1. – P. 12–24.

155. Kagermann, H. Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0: Final report of the Industrie 4.0 WG / H. Kagermann,

W. Wahlster, J. Helbig ; National Academy of Science and Engineering (acatech). – Frankfurt am Main, 2013. – 84 p.

156. Khan, T. Data-driven digital twin framework for predictive maintenance of smart manufacturing systems / T. Khan, U. Khan, A. Khan, C. Mollan, I. Morkvenaite-Vilkonciute, V. Pandey // *Machines*. – 2025. – Vol. 13, no. 6, art. 481.

157. Kundu, P. Detection of inception of preload loss and remaining life prediction for ball screw considering change in dynamics due to worktable position / P. Kundu, M. Miller, P. Gore, X. Jia, J. Lee // *Mechanical Systems and Signal Processing*. – 2023. – Vol. 189, art. 110075.

158. Liu, H. C. From total quality management to Quality 4.0: A systematic literature review and future research agenda / H. C. Liu, R. Liu, X. Gu, M. Yang // *Frontiers of Engineering Management*. – 2023. – Vol. 10, no. 2. – P. 191–205.

159. Lu, Q. Developing a digital twin at building and city levels: case study of West Cambridge campus / Q. Lu, A. K. Parlikad, P. Woodall, G. Don Ranasinghe, X. Xie, Z. Liang, E. Konstantinou, J. Heaton, J. M. Schooling // *Journal of Management in Engineering*. – 2020. – Vol. 36, no. 3, art. 05020004.

160. Lu, Q. Digital twin-enabled anomaly detection for built asset monitoring in operation and maintenance / Q. Lu, X. Xie, A. K. Parlikad, J. M. Schooling // *Automation in Construction*. – 2020. – Vol. 118, art. 103277.

161. Malashin, I. Machine Learning in 3D and 4D Printing of Polymer Composites and Metamaterials / I. Malashin [et al.] // *Polymers*. – 2024. – Vol. 16. – No. 22. – Art. 3125.

162. Merino, J. Quality-aware data pipelines for digital twins / J. Merino, N. Moretti, M. Herrera, P. Woodall, A. K. Parlikad // *SSRN Electronic Journal*. – 2024.

163. Nahavandi, S. Industry 5.0 – A Human-Centric Solution / S. Nahavandi // *Sustainability*. – 2019. – Vol. 11. – No. 16. – Art. 4371.

164. Nguyen, D., Morgan, P., Dey, P., Adams, R. Great South Metals Processing Cost Optimization / D. Nguyen // *Senior Design Project Reports*. – Kennesaw: Kennesaw State University, 2024. – 42 p.

165. Olaoye, F., Gracias, A., Brooklyn, P. In-Situ Monitoring and Quality Control in Metal Additive Manufacturing / F. Olaoye, A. Gracias, P. Brooklyn // EasyChair Preprints. – 2024. – No. 14210. – P. 1–21.
166. Parviainen, P. Tackling the digitalization challenge: How to benefit from digitalization in practice / P. Parviainen, M. Tihinen, J. Kääriäinen, S. Teppola // International Journal of Information Systems and Project Management. – 2017. – Vol. 5. – No. 1. – P. 63–77.
167. Psarommatis, F. A hybrid decision support system for automating decision making in the event of defects in the era of zero defect manufacturing / F. Psarommatis, D. Kiritsis // Journal of Industrial Information Integration. – 2022. – Vol. 26, art. 100263.
168. Psarommatis, F. Product quality improvement policies in Industry 4.0: characteristics, enabling factors, barriers, and evolution toward zero defect manufacturing / F. Psarommatis, S. Prouvost, G. May, D. Kiritsis // Frontiers in Computer Science. – 2020. – Vol. 2, art. 6.
169. Psarommatis, F. Zero defect manufacturing: state-of-the-art review, shortcomings and future directions in research / F. Psarommatis, G. May, P.-A. Dreyfus, D. Kiritsis // International Journal of Production Research. – 2020. – Vol. 58, no. 1. – P. 1–17.
170. Psarommatis, F. Zero-defect manufacturing: the approach for higher manufacturing sustainability in the era of Industry 4.0 / F. Psarommatis, J. Sousa, J. P. Mendonça, D. Kiritsis // International Journal of Production Research. – 2022. – Vol. 60, no. 1. – P. 73–91.
171. Saihi, A. Quality 4.0: Leveraging Industry 4.0 technologies to improve quality management practices – a systematic review / A. Saihi, M. Awad, M. Ben-Daya // International Journal of Quality & Reliability Management. – 2023. – Vol. 40, no. 2. – P. 628–650.
172. Schwab, K. The Fourth Industrial Revolution / K. Schwab. – Geneva: World Economic Forum, 2016. – 184 p.
173. Sony, M. Quality 4.0 and its impact on organizational performance: An

integrative viewpoint / M. Sony, J. Antony, J. A. Douglas, O. McDermott // The TQM Journal. – 2022. – Vol. 34, no. 6. – P. 2069–2084.

174. Taco, J. A novel technique for multiple failure modes classification based on deep forest algorithm / J. Taco, P. Kundu, J. Lee // Journal of Intelligent Manufacturing. – 2023. – Vol. 34. – P. 1–15.

175. Wang, B. Smart manufacturing and intelligent manufacturing: A comparative review / B. Wang, F. Tao, X. Fang, C. Liu, Y. Liu, T. Freiheit // Engineering. – 2021. – Vol. 7, no. 6. – P. 738–757.

176. Zheng, X. A quality-oriented digital twin modelling method for manufacturing processes based on a multi-agent architecture / X. Zheng, F. Psarommatis, P. Petrali, C. Turrin, J. Lu, D. Kiritsis // Procedia Manufacturing. – 2020. – Vol. 51. – P. 309–315.

177. Zheng, X. RMPFQ: A quality-oriented knowledge modelling method for manufacturing systems towards cognitive digital twins / X. Zheng, F. Psarommatis, P. Petrali, C. Turrin, J. Lu, D. Kiritsis // Frontiers in Manufacturing Technology. – 2022. – Vol. 2, art. 901364.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2025689256

Моделирование прогноза отказов изделия на основании
статистических данных по контролируемым
техническим и технологическим параметрам на этапе
его сборки

Правообладатель: *Мусина Гульназ Рафаиловна (RU)*

Автор(ы): *Мусина Гульназ Рафаиловна (RU)*



Заявка № 2025688357

Дата поступления 20 октября 2025 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 27 октября 2025 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Перечень национальных и межгосударственных стандартов, регламентирующих процессы управления качеством, контроля и мониторинга на этапах жизненного цикла изделий

№	Стандарт	Краткое содержание (аспекты, касающиеся постпроизводственного мониторинга)
1	ГОСТ 3.1109–82 «ЕСТД. Термины и определения основных понятий»	Формализует базовый понятийный аппарат технологических процессов, правила фиксации контрольных операций и регистрации отклонений.
2	ГОСТ 15467–79 «Управление качеством продукции. Основные понятия. Термины и определения»	Закрепляет нормативный базис понятий дефектов, брака, показателей надежности, сохраняемости и эксплуатационной пригодности.
3	ГОСТ 21014–2022 «Металлопродукция из стали и сплавов. Дефекты поверхности. Термины и определения»	Систематизирует поверхностные дефекты, возникающие при изготовлении и проявляющиеся в процессе последующей сборки и эксплуатации изделий.
4	ГОСТ Р 59793–2021 «Комплекс стандартов на автоматизированные системы. Автоматизированные системы. Стадии создания»	Регламентирует стадии жизненного цикла автоматизированных систем, включая ввод в действие, сопровождение и сбор эксплуатационных замечаний.
5	ГОСТ Р 56542–2019 «Контроль неразрушающий. Классификация видов и методов»	Классифицирует методы неразрушающего контроля, применимые для выходного приемочного контроля деталей и эксплуатационной дефектоскопии.
6	ГОСТ Р 51814.2–2001 «Системы качества в автомобилестроении. Метод анализа видов и последствий потенциальных дефектов»	Регламентирует методику FMEA, использующую эксплуатационные данные о дефектах и рекламациях для динамического пересчета производственных рисков.
7	ГОСТ Р 53563–2009 «Контроль состояния и диагностика машин. Мониторинг состояния оборудования опасных производств. Порядок организации»	Устанавливает организационно-технические принципы построения систем мониторинга оборудования опасных производств: категории опасности, выбор объектов и параметров контроля, прогнозирование ресурса.
8	ГОСТ Р 54136–2010 «Системы промышленной автоматизации и интеграция. Руководство по применению стандартов, относящихся к процессам создания и управления сложными производственными структурами»	Определяет принципы интеграции информационных систем предприятия при сквозном контроле и прослеживаемости характеристик изделий.
9	ГОСТ Р 56020–2020 «Бережливое производство. Основные положения и словарь»	Закрепляет понятийный аппарат устранения потерь (включая переделки и брак), связывая цеховые дефекты с качеством готовой продукции.

№	Стандарт	Краткое содержание (аспекты, касающиеся постпроизводственного мониторинга)
10	ГОСТ Р 56407–2023 «Бережливое производство. Основные инструменты и методы их применения»	Описывает инструменты стандартизации, визуализации и предупреждения дефектов (5S, картирование потока создания ценности, Рока-Yoke).
11	ГОСТ Р 56606–2015 «Контроль технического состояния и функционирования медицинских изделий. Основные положения»	Устанавливает требования к контролю технического состояния и функционирования медицинских изделий в процессе эксплуатации.
12	ГОСТ Р 57315–2016 «Инновационный менеджмент. Руководящие принципы для осуществления открытого инновационного подхода»	Устанавливает принципы формализованного описания и декомпозиции процессов для построения систем мониторинга качества.
13	ГОСТ Р 57700.37–2021 «Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения»	Регламентирует создание цифровых двойников, обеспечивающих синхронизацию цифровой модели с физическим изделием на этапах производства и эксплуатации.
14	ГОСТ Р 58771–2019 «Менеджмент риска. Технологии оценки риска»	Определяет методический инструментарий идентификации, анализа и количественной оценки рисков возникновения несоответствий.
15	ГОСТ Р 59768–2021 «Изделия медицинские. Менеджмент риска. Оценка риска на постпроизводственной стадии жизненного цикла продукции»	Регламентирует оценку риска на постпроизводственной стадии: сбор и анализ эксплуатационных данных, рассмотрение претензий и отчетов об инцидентах.
16	ГОСТ Р 70467–2022 «Изделия медицинские. Постпроизводственный надзор субъектами обращения»	Регламентирует постпроизводственный надзор, каналы сбора рекламаций от потребителей и методику анализа эксплуатационных отказов.
17	ГОСТ Р 71487.11–2025 «Цифровая промышленность. Качество промышленных данных. Часть 66. Управление качеством данных. Показатели оценки для обработки данных в производственных операциях»	Определяет показатели оценки зрелости процессов управления качеством промышленных данных, в том числе в обеспечении качества и управлении обслуживанием.
18	ГОСТ Р ИСО 7870-2–2015 «Статистические методы. Контрольные карты Шухарта»	Описывает математический аппарат контрольных карт для выявления технологической нестабильности и предупреждения скрытого брака на ранних стадиях.
19	ГОСТ Р ИСО 9001–2015 «Системы менеджмента качества. Требования»	Национальный базовый стандарт СМК. Вводит обязательный сбор рекламаций, анализ удовлетворенности потребителей и контроль несоответствий при эксплуатации.
20	ГОСТ Р ИСО 9004–2019 «Менеджмент качества. Качество организации. Руководство по достижению устойчивого успеха»	Содержит руководящие указания по мониторингу среды, непрерывной оценке процессов и жизненного цикла для обеспечения долгосрочной результативности.

№	Стандарт	Краткое содержание (аспекты, касающиеся постпроизводственного мониторинга)
	организации»	
21	ГОСТ Р ИСО 10004–2020 «Менеджмент качества. Удовлетворенность потребителей. Руководящие указания по мониторингу и измерению»	Регламентирует методы постпроизводственного сбора информации, статистической обработки рекламаций и мониторинга ожиданий потребителей.
22	ГОСТ Р ИСО 10303-1–2022 «Системы автоматизации производства и их интеграция. Представление данных об изделии (STEP)»	Фундаментальный базис CALS: задает стандарты платформенно-независимого описания и обмена данными об изделии на всех стадиях его жизненного цикла.
23	ГОСТ РВ 0015-002–2020 «СРПП ВТ. Системы менеджмента качества»	Расширяет требования СМК для предприятий ОПК, устанавливает регламент мониторинга эксплуатационной надежности, гарантийного надзора и рекламационной работы.