

УДК 658.562:004.9

DOI: 10.22213/2413-1172-2026-3-73-82

Методологические основы постпроизводственного мониторинга качества изделий в контексте CALS-концепции

Г. Р. Мусина, Казанский национальный исследовательский технический университет, Казань, Россия

Е. С. Воробьев, кандидат технических наук, Казанский национальный исследовательский технический университет, Казань, Россия

Эксплуатационная надежность машиностроительной продукции напрямую определяет уровень ее конкурентоспособности и величину гарантийных издержек завода-изготовителя. Аналитические данные Минпромторга показывают, что более 70 % отечественных предприятий до сих пор не имеют цифровых систем для контроля качества на этапе сервисного обслуживания. В связи с этим до 16 % критических дефектов проявляется только в первый год работы техники. В подобных условиях становится жизненно необходимо создавать замкнутые цифровые контуры управления качеством на базе действующих стандартов ИСО. Статья посвящена научно-методической организации постпроизводственного мониторинга дефектов металлических изделий. Главный акцент сделан на интеграции эксплуатационных сведений с этапами проектирования и производства внутри единой среды CALS-технологий. Данный подход устраняет разрыв между цехом и сервисной службой. Для решения поставленных задач предложен алгоритм формирования сквозного цифрового следа изделия. Он объединяет платформы ERP, MES и PLM. Авторами разработана вероятностная модель оценки остаточного ресурса на основе закона распределения Вейбулла. Практическая апробация методологии проходила в цеховых условиях машиностроительного завода. Исследование охватывало процессы пайки медных трубопроводов и дальнейшую проверку герметичности узлов гелиевыми течеискателями. В ходе работы создана модель сквозного контроля, связывающая методы неразрушающего контроля с алгоритмами предиктивной аналитики. Внедрение предложенных решений дало ощутимый экономический результат. Время реакции на производственные отклонения сократилось в два раза. Уровень повторного брака на участке пайки снизился на 78,5 %, а точность прогнозирования наработки на отказ выросла до 95,8 %.

Ключевые слова: управление качеством, CALS-технологии, постпроизводственный мониторинг, цифровой след изделия, жизненный цикл изделия, предиктивная аналитика, закон Вейбулла.

Введение

Цифровая трансформация промышленного сектора предъявляет жесткие требования к гибкости производственных систем. Внимание разработчиков традиционно сосредоточено на этапах механической обработки и сборки. Однако эксплуатационная стадия остается оторванной от общего контура управления качеством [1]. Отсутствие системной обратной связи не позволяет вовремя корректировать технологические регламенты [2].

Сектор отечественного машиностроения сохраняет высокую уязвимость перед дефектами, проявляющимися уже после передачи готовой продукции потребителю [3]. По аналитическим сводкам Минпромторга России, более 70 % промышленного комплекса до сих пор не имеют цифровых инструментов для сквозного контроля качества на всех этапах жизненного цикла. Отсутствие единых каналов передачи данных приводит к ощутимым потерям. Отраслевая статистика показывает, что от 12 до 16 % дефектов выявляется именно в первый год использования изделий. Это провоцирует рост гарантийных расходов. Такая ситуация требует пересмотра базовых подходов к мониторингу.

Проблема усугубляется фрагментарностью внедрения цифровых решений. Различные производственные участки часто используют автономные информационные системы. По данным аналитических отчетов по цифровизации промышленности, более 60 % машиностроительных заводов ограничивают

применение PLM- и MES-платформ рамками цеха. Данные о ремонтпригодности и реальных отказах техники практически не возвращаются к разработчикам. Методическая база для интеграции эксплуатационных сведений в единый цифровой контур предприятия пока остается недостаточно проработанной.

Гармонизация отечественной нормативной базы с международными стандартами ИСО 9001 и ИСО 55000 требует непрерывного контроля состояния продукции [4]. На практике сервисные службы фиксируют отказы разрозненно. Данные гарантийного ремонта практически не поступают инженерным подразделениям. Это создает слепое пятно в системе менеджмента качества.

Снижение эксплуатационной надежности приводит к внеплановым затратам на гарантийное обслуживание. Возникает необходимость в методическом инструменте, способном агрегировать сигналы об отклонениях на всех этапах жизненного цикла. CALS-концепция предоставляет необходимый базис для такой интеграции [5, 6]. Но ее практическое воплощение на постпроизводственной стадии требует адаптации под конкретные технологические процессы.

Цель исследования состоит в разработке методологии постпроизводственного мониторинга дефектов металлических изделий на основе CALS-технологий, обеспечивающей формирование замкнутого цифрового контура качества и повышение точности прогнозирования эксплуатационного ресурса.

Методологическая база и теория исследования

Для решения данной задачи сформирована концептуальная схема организации контроля дефектов, обеспечивающая замкнутый цикл управления качеством в цифровой среде. Наглядно этапы разработки и проверки адекватности методики представлены на рисунке 1.

Предложенный концептуальный базис связывает нормативные требования с практической процедурой создания цифровых двойников и оценки эффективных решений на производстве.

Методологическая база исследования формировалась с учетом специфики наукоемких машиностроительных производств. В основу работы легли принципы концепции замкнутого жизненного цикла продукции (Closed-loop PLM) [7] и базовые положения Индустрии 4.0 [8]. Нормативную платформу исследования составили национальные стандарты ГОСТ Р ИСО 9001–2015, ГОСТ Р 56020–2014, а также ГОСТ Р 57315–2016. Указанные документы определяют ориентиры при построении цифровых систем управления.

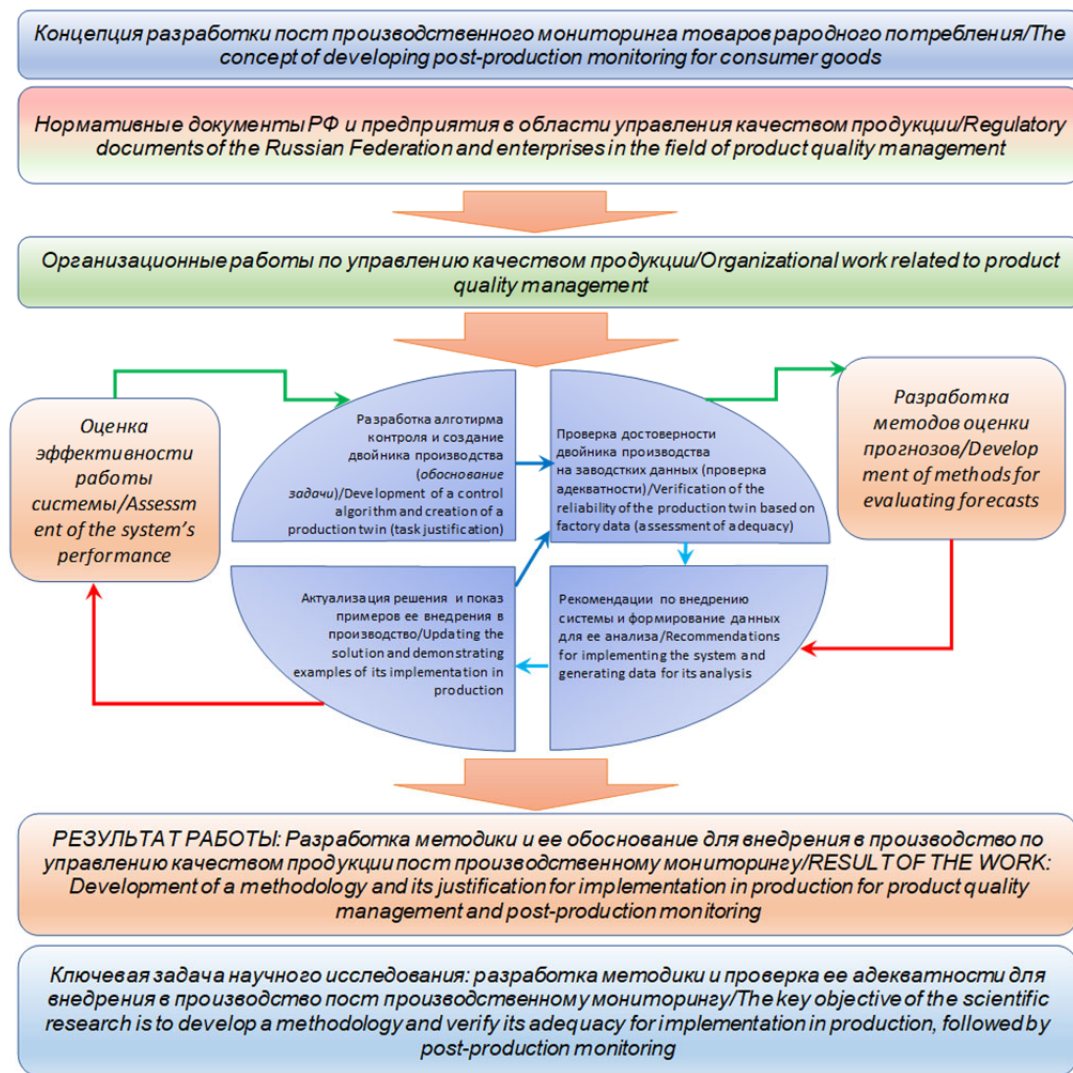


Рис. 1. Концепция постпроизводственного мониторинга дефектов в рамках CALS-технологий

Fig. 1. Concept of post-production defect monitoring within CALS technologies framework

Теоретический фундамент опирается на работы отечественных и зарубежных ученых в сфере автоматизации производственных процессов и CALS-технологий.

Эмпирической основой работы стали массивы производственных данных, полученные на базе предприятия по производству бытовой техники [9]. Исследование охватывало технологические процес-

сы пайки медных трубопроводов холодильников и дальнейшей оценки герметичности узлов.

Систематизация ключевых факторов риска, способствующих возникновению утечек на участке пайки, выполнена с использованием причинно-следственного анализа. Структурированное распределение возможных причин возникновения дефектов по стадиям жизненного цикла изделия отражено на рисунке 2.

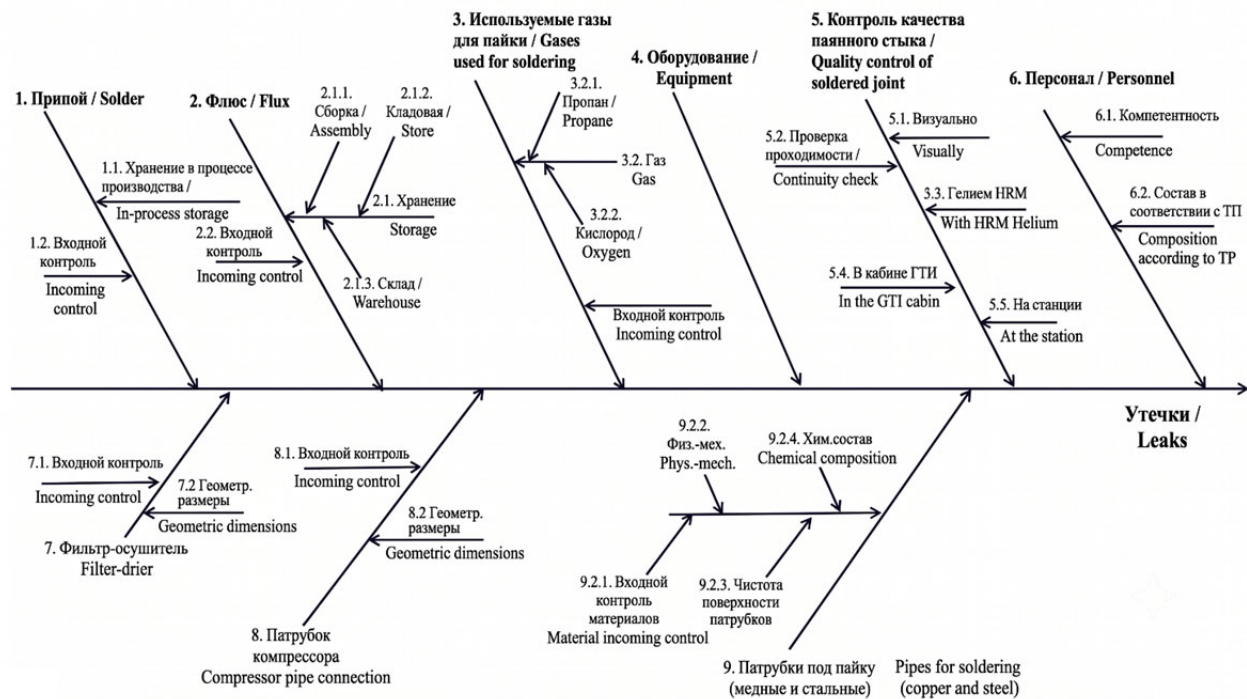


Рис. 2. Диаграмма Исикавы по дефектам процесса пайки по стадиям ЖЦ изделия

Fig. 2. Ishikawa diagram of soldering process defects by product lifecycle stages

Установление множественных факторов влияния служит основой для настройки параметров контрольных границ и алгоритмов предиктивного анализа в цифровом следе.

Наблюдение велось на базе данных предприятия за последние 3–5 лет. За этот период удалось сформировать репрезентативную выборочную совокупность, отражающую динамику возникновения технологических аномалий.

Для анализа эксплуатационной надежности применялся комплекс измерительных и статистических средств [10, 11]. Регистрация дефектов на этапе сборки осуществлялась с помощью оборудования Ecotec E3000 и установок серии AGRAMKOV HRM6. Полученные сигналы передавались в аналитический блок. Сбор сведений о постпроизводственном поведении изделий организовывался через специализированное бот-приложение обратной связи, отслеживающее причины гарантийных ремонтов и фиксирующее данные о проданной продукции. Архитектурно бот-приложение представляет собой кроссплатформенный сервис с REST API-интерфейсом. Он напрямую связывает рабочие места мастеров сервисных центров с центральной базой ERP. Пользователь выбирает тип поломки из стандартизированного справочника и прикрепляет фото дефекта. Информация проходит валидацию и автоматически попадает в аналитический модуль BI. Ввод данных занимает меньше двух минут, что существенно повышает полноту поступающей рекламационной статистики.

Информационная инфраструктура эксперимента включала четыре ключевые системы [12, 13]. Данные MES фиксировали первичные отклонения техно-

логических операций. PLM-модуль предоставлял нормативную спецификацию и 3D-модель изделия. ERP-система контролировала исполнение и учет ресурсов. Наконец, BI-платформа агрегировала потоки данных для сквозной аналитики.

Начальные параметры набора дефектов задавались случайным вектором:

$$v = \{v_1, \dots, v_n\},$$

где v_i – параметр i -го дефекта.

На основании этих данных определялись плотности распределения вероятностей параметров дефектов $f_i(v_i)$ в допустимой области $[D(n)]$. Для перехода от плотностей распределения параметров обнаруженных дефектов к плотностям всех имеющихся в изделии дефектов использовался параметр вероятности обнаружения дефекта (ВОД).

Общая надежность соединений рассчитывалась с учетом числа выявленных дефектов k . По своей форме полученное распределение оказалось близким к распределению типа Вейбулла [14], что обосновало применение данного математического закона. Для оценки отказов и определения вклада бракованных комплектующих в надежность работы аппарата применялись кривые риска $\lambda(x)$. На их основе выполнялся расчет прогнозного времени работы оборудования.

Оценка эффективности цифровой трансформации проводилась с помощью авторской методики, основанной на расчете матричных показателей взвешенного вклада. Индекс цифровой зрелости учитывал степень интеграции информационных потоков и от-

носительную значимость каждой метрики контроля качества.

Машинное моделирование выполнялось на выборках объемом 100 изделий. В цикле генерировались показатели каждого комплектующего или операции. При нарушении критического значения деталь отбраковывалась и не попадала в комплект для сборки. Программа рассчитывала средние отклонения качества и строила визуальные графики распределения параметров.

Архитектура замкнутого цифрового контура мониторинга дефектов и интеграция данных

Традиционная концепция технического контроля на машиностроительных предприятиях имеет существенный системный изъян. Она завершается в момент приемки готовой продукции отделом технического контроля и отправки изделий на склад. Дальнейшая судьба узлов и агрегатов выпадает из поля зрения заводских специалистов.

Проведение анализа действующих производственных регламентов позволяет наглядно проиллюстрировать локальный и замкнутый характер традиционного технического контроля. На рисунке 3 представлена схема традиционного учета брака и контроля на предприятии, где постпроизводственные стадии остаются изолированными от общей системы.

Ограниченность данной схемы ручным ведением записей и отсутствием обратной связи с этапом эксплуатации делает критически необходимой интеграцию сквозных информационных систем.

Постпроизводственный мониторинг кардинально меняет эту схему [15, 16]. В центр всей системы

менеджмента качества ставится цифровой след изделия. Это динамически пополняемый массив данных, который непрерывно формируется на протяжении всего периода эксплуатации. Такой подход позволяет отслеживать реальное поведение металла и сварных соединений под воздействием рабочих нагрузок.

Сбор и сквозная интерпретация цифрового следа невозможны без глубокой интеграции основных корпоративных информационных платформ. Процесс сбора данных опирается на строгую физическую привязку. Каждому узлу еще на этапе заготовки присваивается уникальный двухмерный QR-код, который наносится методом лазерной маркировки прямо на поверхность медного патрубка. При поступлении агрегата в сервисный центр мастер считывает код сканером. Система моментально извлекает из PLM-платформы полный электронный паспорт конкретного изделия. Это исключает путаницу в партиях и датах выпуска. Разрозненные базы данных создают информационные «колодцы». Модуль MES фиксирует технологические параметры конкретных операций, режимные показатели оборудования и локальные аномалии на участке обработки. Данные PLM-системы содержат эталонные 3D-модели, спецификации материалов и конструкторские допуски. ERP-контур берет на себя логистическое сопровождение гарантийного сервиса, учет движения запасных частей и регистрацию обращений потребителей. BI-платформа агрегирует эти разнородные потоки в единую аналитическую панель для инженерно-технического персонала.

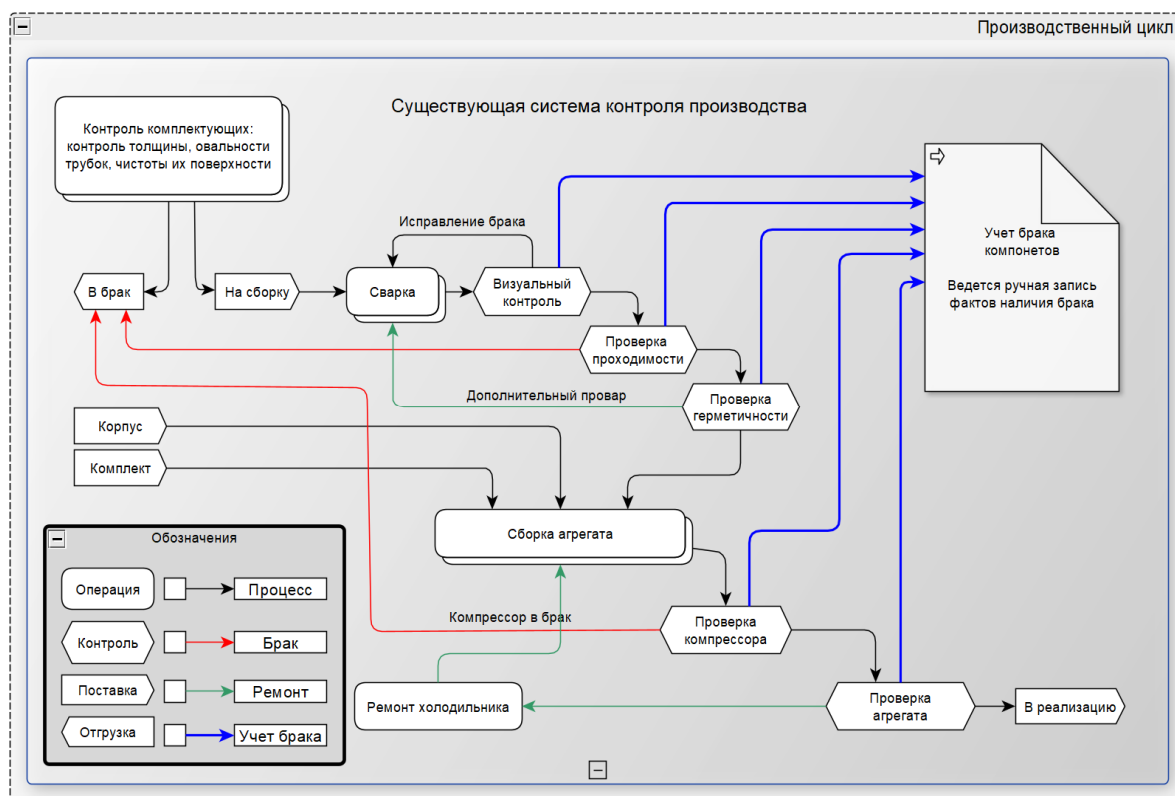


Рис. 3. Существующая система контроля производства

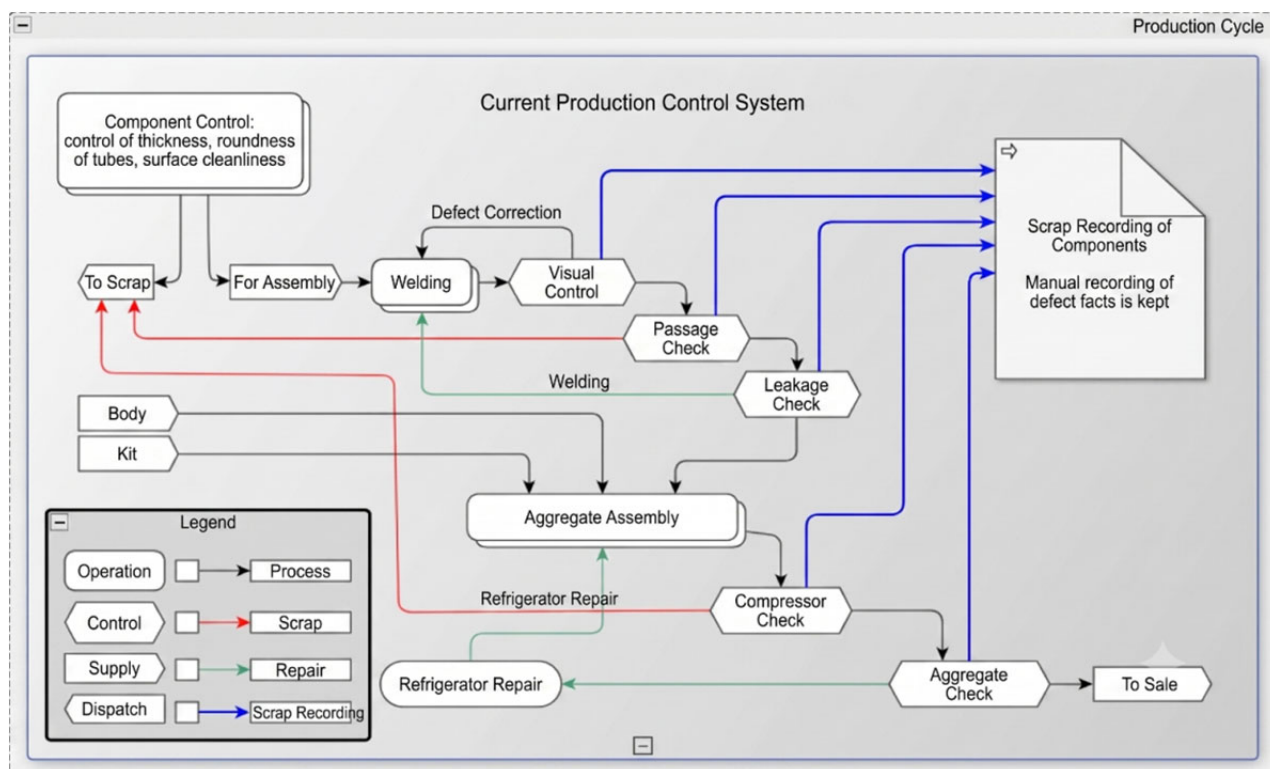


Fig. 3. Existing production control system

В результате взаимодействия систем формируется цифровой паспорт изделия. Он аккумулирует историю всех технологических переходов и эксплуатационных ремонтов.

Ключевой задачей при построении предложенного контура становится правильная настройка статистических границ контроля [17]. Процесс требует проведения специальных математических расчетов на основе исторических данных производства. Неверный выбор пределов неизбежно приводит к ошибкам первого и второго рода – пропуску

скрытого брака на этап сборки либо браковке заведомо годных деталей. В качестве объекта для экспериментального моделирования были выбраны технологические параметры линии пайки медных трубок холодильных агрегатов. В ходе работы оценивались показатели утечки гелия и проходимость капиллярных систем. Различные расчетные варианты настройки допусков, различающиеся математическим ожиданием, стандартным отклонением и положением контрольной границы, сведены в таблицу 1.

Таблица 1. Параметры моделирования процесса контроля и показатели выявления дефектов

Table 1. Modeling parameters of the control process and defect detection rates

Сценарий настройки / Control scenario	Среднее значение контролируемой величины / Mean value of controlled parameter	Стандартное отклонение (СКО) / Standard deviation (SD)	Контрольная граница брака / Control rejection limit	Число отбракованных изделий, шт. / Number of rejected products, pcs.	Подозрительные изделия (зона риска), шт. / Suspicious products (risk zone), pcs.
Вариант А (базовый) / Variant A (baseline)	1,94	0,032	2,00	6	5
Вариант Б (строгий) / Variant B (strict)	1,94	0,032	1,98	10	14
Вариант В (высокая точность) / Variant C (high accuracy)	1,94	0,030	1,98	10	12
Вариант Г (оптимизированный) / Variant D (optimized)	1,90	0,030	1,98	0	1

Анализ результатов моделирования показывает высокую чувствительность производственной системы к изменению контрольных границ. При смещении технологического предела с 2,00 до 1,98 при неизменном СКО (вариант Б) объем выявленного

брака возрастает с 6 до 10 изделий, а число компонентов в зоне риска увеличивается почти в три раза. Это предохраняет сборочный конвейер от установки нестабильных узлов. Однако наиболее эффективным оказывается вариант Г, где за счет настройки обору-

дования снижается среднее значение показателя до 1,90 при сохранении высокой точности измерений. В этом случае уровень брака падает до нуля, оставляя в зоне риска лишь одну деталь. Из этого следует важный вывод: оперативная перенастройка технологического процесса на основе данных BI-аналитики дает значительно больший экономический эффект, чем простое ужесточение входных допусков на этапе ОТК.

Апробация разработанной модели проходила в реальных цеховых условиях на участке пайки медных трубок холодильных агрегатов. Герметичность соединений проверялась на течеискателях Ecotec E3000 и автоматизированных вакуумных установках AGRAMKOV HRM6. Этот этап считается критиче-

ским для всего сборочного производства. Именно микроскопические утечки хладагента составляют основную долю скрытых эксплуатационных дефектов. Восстановление таких узлов в гарантийный период обходится предприятию наиболее дорого.

С точки зрения развития методологии управления качеством главным результатом работы стало создание непрерывного цифрового контура контроля.

Модернизация контрольной инфраструктуры предусматривает трансформацию разрозненных участков проверки в единый цифровой массив. На рисунке 4 изображена усовершенствованная система контроля производства, включающая блок постпроизводственного мониторинга.

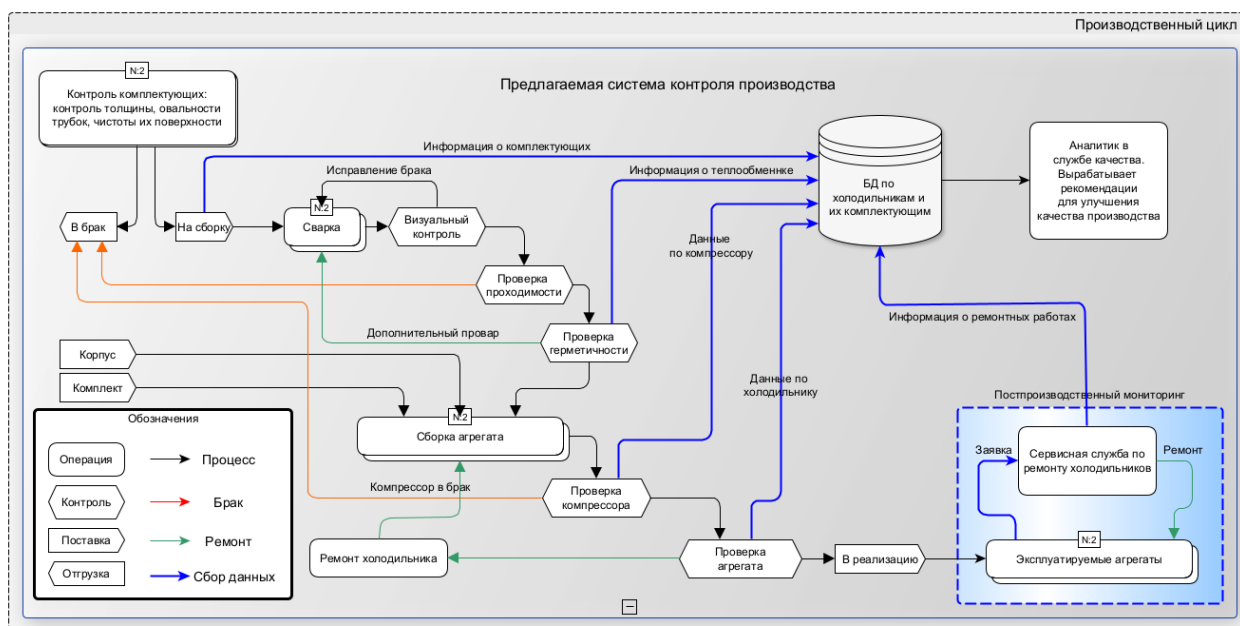


Рис. 4. Предлагаемая система контроля

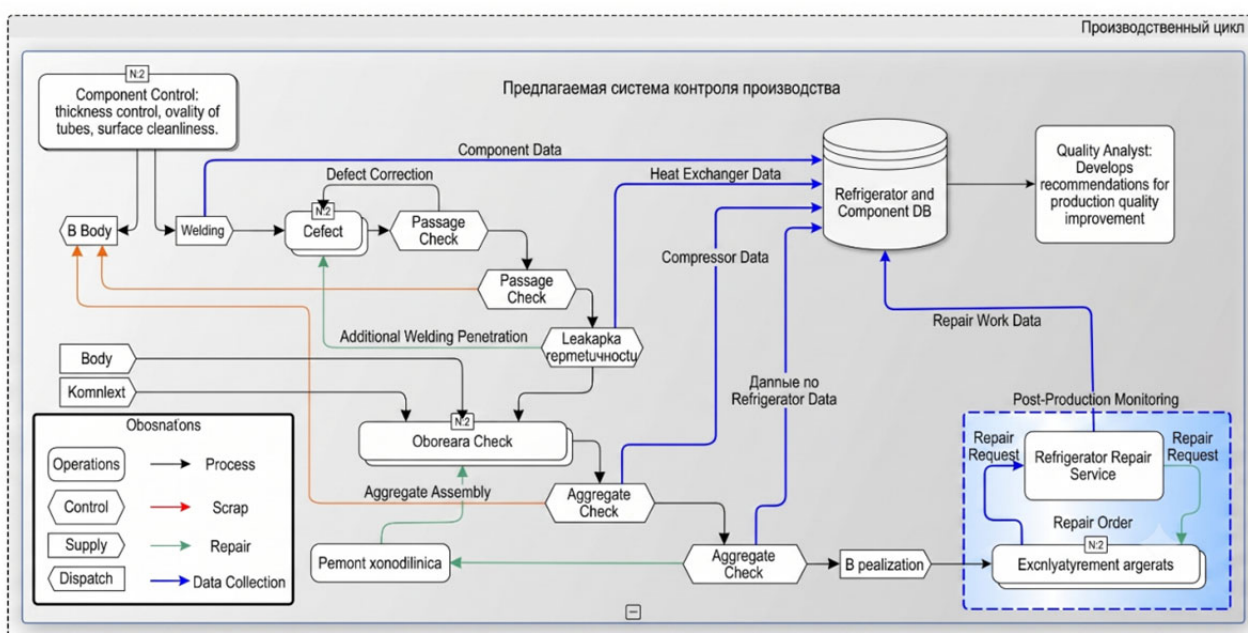


Fig. 4. Proposed quality control system

Взаимосвязь графического материала статьи построена на последовательном решении проблемы. Причинно-следственный анализ на диаграмме Иси-кавы (см. рис. 2) позволяет выделить ключевые точки риска при пайке. Полученные данные закладываются в алгоритмы мониторинга (см. рис. 1), задавая пределы допустимых отклонений. Это позволяет уйти от старой схемы (см. рис. 3) с ее информационными разрывами. Предлагаемая структура (см. рис. 4) замкнет поток данных от сервиса к проектировщикам. Наличие замкнутых информационных потоков позволяет своевременно формировать рекомендации по улучшению технологии пайки и сборки агрегатов

Традиционные подходы рассматривают статистику брака постфактум, без увязки с физикой технологического процесса. Разработанный методический инструментарий позволил объединить параметры неразрушающего контроля (NDT) с алгоритмами предиктивной аналитики [18, 19]. В основу методологического развития лег переход от статичной оценки качества к динамическому моделированию надежности. Аналитический блок системы научился вычислять вероятность отказа изделия еще до его

передачи на сборочную линию. Это достигается за счет автоматической оценки совокупного риска по всем компонентам и операциям.

Запуск цифрового канала обратной связи на базе сервисного бот-приложения дал возможность впервые увязать сообщения о ремонтах с конкретными сменами и исполнителями. Раньше эти данные терялись в бумажных отчетах сервисных центров. В ходе исследования был проведен однофакторный дисперсионный анализ работы четырех сварщиков участка. Результаты показали устойчивые разрывы в качестве пайки между рабочими при практически одинаковой средней выработке. Анализ выявил разброс значений гелиевой течи, выходящий за пределы допустимого СКО у двух операторов из четырех. Это позволило отказаться от абстрактных взысканий и внести точечные изменения в регламенты первичного инструктажа и настройки сварочного оборудования.

Для комплексной оценки методических и практических результатов внедрения цифрового модуля постпроизводственного мониторинга была сформирована сводная таблица изменений ключевых показателей. Данные отражают динамику до и после интеграции систем.

Таблица 2. Изменение ключевых показателей системы управления качеством до и после внедрения цифрового постпроизводственного мониторинга

Table 2. Assessment of quality management system indicators before and after digital monitoring implementation

Наименование показателя / Indicator name	Значение до внедрения / Value before implementation	Значение после внедрения / Value after implementation	Относительное изменение / Relative change, %	Взвешенный вклад в эффективность / Weighted contribution to efficiency, %
Время реакции на технологическое отклонение, ч/смена / Response time to process deviation, hours per shift	3,5	1,75	-50,0	25,0
Уровень повторного брака по участку пайки, % от объема / Repeated defect rate at the soldering station, % of volume	4,2	0,9	-78,5	35,0
Трудозатраты контролеров на оформление ре- кламаций, чел.-ч/мес / Quality control labor costs for claim processing, man-hours per month	120	72	-40,0	15,0
Точность прогнозирования наработки на отказ (ошибка) / Failure prediction accuracy (error rate), %	18,5	4,2	-77,3	25,0

Данные таблицы 2 убедительно фиксируют положительный эффект от трансформации системы контроля. Отдельного внимания требует методика фиксации временных интервалов. Под временем реакции на технологическое отклонение в исследовании понимается период от момента первичной регистрации гелиевой течи автоматизированным датчиком Escotес до принятия инженером службы качества решения о корректировке режимов пайки. Раньше этот процесс занимал в среднем 3,5 ч из-за ручного заполнения актов. Автоматизация передачи данных в ВІ-панель сократила этот лаг до 1,75 ч. Наибольший относительный сдвиг продемонстрировали показатели уровня повторного брака и точности прогнозирования отказов – снижение составило 78,5 и 77,3 % соответственно. При этом суммарный взвешенный вклад этих двух факторов в общую эффективность системы менеджмента качества превышает

60 %. Сокращение времени реакции инженерных служб в два раза позволило купировать технологические сбои в рамках одной смены, предотвращая выпуск крупных партий дефектных агрегатов.

Методологически важным этапом стала проверка работы предиктивного блока, функционирующего на основе вероятностного закона распределения Вейбулла. Модуль рассчитывал прогнозируемый срок службы изделий по имеющемуся цифровому следу компонентов. Сравнение расчетных кривых надежности $R(t)$ с реальными ретроспективными данными сервисных центров предприятия за последние три года показало расхождение не более 4,2 %. Верификация расчетных параметров надежности проводилась на массивной статистической базе. В итоговую выборку вошли данные по 1420 единицам бытовых холодильных приборов, проходивших гарантийное и постгарантийное обслуживание в сервисной сети.

Такой объем наблюдений обеспечивает достаточную репрезентативность результатов. Погрешность математической модели не превышает допустимых технологических пределов. Это подтверждает высокую точность математической модели.

Интеграция корпоративных систем классов ERP, MES, PLM и BI перевела процесс управления качеством из режима реактивного устранения последствий в режим превентивного предупреждения сбоев. Предприятие получило действующий инструмент оценки жизненного цикла изделий, способный самообучаться по мере накопления данных об эксплуатации.

Выводы

Проведенное исследование позволило решить значимую научно-практическую задачу, связанную с построением цифровых систем управления качеством на машиностроительных предприятиях. Традиционные методы контроля ориентированы на изолированные этапы производства. Они не способны обеспечить непрерывную обратную связь на этапе эксплуатации изделий. Внедрение концепции CALS в сочетании с современными системами сквозной аналитики устраняет этот информационный разрыв [20]. На основе проведенного математического моделирования и практической апробации получен ряд существенных результатов.

1. Разработана методология постпроизводственного мониторинга дефектов металлических изделий, создающая замкнутый цифровой контур качества. Предложенный подход интегрирует данные этапов проектирования, производства и эксплуатации в единое информационное пространство предприятия.

2. Сформирован алгоритм построения цифрового следа изделия на базе совместного использования платформ ERP, MES, PLM и BI. Сквозной поток данных позволяет формировать цифровой паспорт продукции с отслеживанием причинно-следственных связей возникновения брака.

3. Предложен методический инструментарий оценки и прогнозирования ресурсов на основе законов распределения Вейбулла и кривых риска $\lambda(x)$. Вероятностная модель обеспечивает расчет наработки на отказ с точностью до 4,2 %, что подтверждено ретроспективным анализом сервисных данных.

4. Разработана методика количественной оценки эффективности цифровой трансформации, основанная на матрице взвешенного вклада показателей качества и расчете индекса цифровой зрелости цифрового следа.

5. Выполнена практическая апробация научно-технических решений на участке пайки медных трубок и контроля герметичности. Внедрение модуля снизило уровень повторного брака на 78,5 %, а время реакции инженерных служб сократилось в два раза. Измерение показателя проводилось от момента автоматической фиксации аномалии течеискателем на линии до внесения инженером утвержденных правок в технологический паспорт операции. До внедрения системы информация об отклонениях передавалась сменным мастером в конце рабочего дня. Теперь

оповещение формируется автоматически за доли секунды. Это дает возможность скорректировать параметры сварочного тока до того, как брак станет массовым.

Достигнутая цель исследования доказывает применимость предложенных методов для повышения конкурентоспособности наукоемкого производства. Переход от реактивного устранения дефектов к предиктивному менеджменту снижает гарантийные издержки предприятия. Перспективным направлением развития темы является интеграция разработанной модели с нейросетевыми алгоритмами машинного обучения. Это позволит автоматизировать процесс перенастройки технологического оборудования по сигналам, поступающим в режиме реального времени от датчиков промышленного интернета вещей (IIoT).

Библиографические ссылки

1. Мусина Г. Р., Шинкевич М. В. Жизненный цикл изделия и система контроля качества // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2025. Т. 28, № 3. С. 53–63. DOI: 10.22213/2413-1172-2025-3-53-63
2. Елизаров В. А. Интегрированные системы управления качеством промышленных предприятий на основе сквозного мониторинга // СТИН. 2024. № 5. С. 28–33. DOI: 10.3103/S1068798X2408012X
3. Мусина Г. Р., Шинкевич М. В. Состояние и перспективы внедрения цифровых технологий на предприятиях машиностроения // Наука и бизнес: пути развития. 2023. № 12. С. 137–140. DOI: 10.25683/VOLBI.2023.150.862
4. Шинкевич А. И., Галимуллина Ф. Ф. Управление качеством в вертикально-интегрированных производственных системах: монография. Казань: Изд-во КНИТУ, 2022. 184 с. ISBN 978-5-7882-3180-8
5. Абрамовичи М., Вебер К. Информационная интеграция жизненного цикла продукции в системах замкнутого цикла // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2022. № 2. С. 34–42.
6. Галимуллина Ф. Ф., Харитонов Д. В. Внедрение CALS-технологий на предприятиях машиностроительного комплекса // Итоговая научно-образовательная конференция студентов КФУ : сборник тезисов. Казань : Изд-во Казанского ун-та, 2022. Т. 25, № 8. С. 88–94.
7. Nahavandi S. (2021) Industry 5.0 - A Human-Centric Solution for Closed-Loop Quality Systems. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, vol. 51, no. 8, pp. 4981-4994. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2924467
8. Stark A., Weber C. (2023) Product Lifecycle Management in the Digital Era. IEEE Transactions on Engineering Management, vol. 70, no. 3, pp. 1042–1055. DOI: 10.1007/978-3-030-97772-5
9. Мусина Г. Р. Разработка концепции модуля постпроизводственного мониторинга в составе ИСУП предприятия бытовой техники // Информационно-экономические аспекты стандартизации и технического регулирования. 2025. № 6 (87). С. 573–580.
10. Колесников С. Г., Ромашина О. В. Применение методов неразрушающего контроля в системах предиктивной аналитики машиностроительных производств // Дефектоскопия. 2023. № 11. С. 51–59. DOI: 10.1134/S106183092311005X
11. Psarommatas F., May G., Dreyfus P.-A., Kiritsis D. (2020) Zero Defect Manufacturing: State-of-the-Art and Review. International Journal of Production Research vol. 58, no. 4, pp. 1230-1255. DOI: 10.1080/00207543.2019.1661538

12. Орлова Т. Н. Построение сквозных каналов данных в корпоративных информационных системах ERP – MES – PLM // Программные продукты и системы. 2023. Т. 36, № 2. С. 201–209. DOI: 10.15827/0236-235X.142.201-209

13. Яковлев Д. Е., Чекумарев А. В. Интеграция систем класса ERP – MES – PLM в цифровом производстве // Промышленная инженерия и логистика. 2024. № 1. С. 15–23.

14. Гниломедов П. И., Шапцев В. А. Математические модели надёжности систем при законе распределения Вейбулла // Автотестирование. 2021. Т. 57, № 3. С. 112–120. DOI: 10.15372/AUT20210314

15. Богданова Л. В., Зайцев И. П. Цифровой след изделия как основа предиктивного управления качеством в машиностроении // Вопросы радиоэлектроники. 2023. № 4. С. 45–52. DOI: 10.21774/2218-6042-2023-4-45-52

16. Рудаков А. М. Цифровые двойники в управлении качеством машиностроительной продукции // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2022. № 4 (398). С. 114–121. DOI: 10.47367/0021-3497_2022_4_114

17. Смирнов И. В. Методология статистического управления процессами в условиях цифровой трансформации // Методы менеджмента качества. 2023. № 7. С. 16–23. DOI: 10.34923/MMQ.2023.77.7.003

18. Садовская Т. Г., Шастова Г. А. Цифровые инструменты мониторинга дефектов наукоемкой продукции // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2024. № 2 (767). С. 61–70. DOI: 10.18698/0536-1044-2024-2-61-70

19. Frank A.G., Dalenogare L.S., Ayala N.F. (2019) Industry 4.0 Technologies: Implementation Patterns in Manufacturing Companies. *International Journal of Production Economics*, vol. 210, pp. 15–26. DOI: 10.1016/j.ijpe.2019.01.004

20. Tao F., Qi Q., Liu A., Kusiak A. (2018) Data-Driven Smart Manufacturing. *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 48, part C, pp. 157–169. DOI: 10.1016/j.jmsy.2018.01.006

References

1. Musina G.R., Shinkevich M.V. (2025) [Product Lifecycle and Quality Control System]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, vol. 28, no. 3. pp. 53–63. DOI: 10.22213/2413-1172-2025-3-53-63 (in Russ.).

2. Elizarov V.A. (2024) Integrated Quality Management Systems for Industrial Enterprises Based on End-to-End Monitoring. *STIN*, vol. 44, no. 8. pp. 1015–1019. DOI: 10.3103/S1068798X2408012X (in Russ.).

3. Musina G.R., Shinkevich M.V. (2023) Status and Prospects for the Implementation of Digital Technologies at Machine-Building Enterprises. *Nauka i biznes: puti razvitiya*, no. 12 (150), pp. 137–140. DOI: 10.25683/VOLBI.2023.150.862 (in Russ.).

4. Shinkevich A.I., Galimullina F.F. (2022) *Upravlenie kachestvom v vertikal'no-integrirovannykh proizvodstvennykh sistemakh* [Quality Management in Vertically Integrated Production Systems]. Kazan: KNRTU Publishing House, 184 p. ISBN 978-5-7882-3180-8 (in Russ.).

5. Abramovici M., Weber C. (2025) Product Lifecycle Information Integration in Closed-Loop Systems. *Problemy mashinostroeniya i avtomatizatsii*, no. 2, pp. 34–42. (in Russ.).

6. Galimullina F.F., Kharitonov D.V. (2022) *Itogovaya nauchno-obrazovatel'naya konferenciya studentov KFU : sbornik tezisov* [KFU Student Research and Educational Con-

ference: Collection of Abstracts]. Kazan: Kazan University Press. vol. 25, no. 8, pp. 88–94 (in Russ.).

7. Nahavandi S. (2021) Industry 5.0 - A Human-Centric Solution for Closed-Loop Quality Systems. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, vol. 51, no. 8, pp. 4981–4994. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2924467

8. Stark A., Weber C. (2023) Product Lifecycle Management in the Digital Era. *IEEE Transactions on Engineering Management*, vol. 70, no. 3, pp. 1042–1055. DOI: 10.1007/978-3-030-97772-5

9. Musina G.R. (2025) [Development of the Concept of a Post-Production Monitoring Module as Part of the Enterprise Management Information System of a Home Appliance Enterprise]. *Informacionno-ekonomicheskie aspekty standartizatsii i tekhnicheskogo regulirovaniya*, no. 6 (87), pp. 573–580 (in Russ.).

10. Kolesnikov S.G., Romashkina O.V. (2023) [Application of Non-Destructive Testing Methods in Predictive Analytics Systems for Mechanical Engineering]. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, vol. 59, no. 11, pp. 1184–1192. DOI: 10.1134/S106183092311005X

11. Psarommatis F., May G., Dreyfus P.-A., Kiritsis D. (2020) Zero Defect Manufacturing: State-of-the-Art and Review. *International Journal of Production Research*, vol. 58, no. 4, pp. 1230–1255. DOI: 10.1080/00207543.2019.1661538

12. Orlova T.N. (2023) [Building End-to-End Data Channels in Corporate Information Systems ERP - MES - PLM]. *Programmnye produkty i sistemy*, vol. 36, no. 2, pp. 201–209. DOI: 10.15827/0236-235X.142.201-209 (in Russ.).

13. Yakovlev D.E., Chekmarev A.V. (2024) [Integration of ERP - MES - PLM Systems in Digital Manufacturing]. *Promyshlennaya inzheneriya i logistika*, no. 1, pp. 15–23 (in Russ.).

14. Gnilomedov P.I., Shaptsev V.A. (2021) [Mathematical Models of System Reliability under the Weibull Distribution Law]. *Avtometriya*, vol. 57, no. 3, pp. 306–314. DOI: 10.3103/S875669902103014X (in Russ.).

15. Bogdanova L.V., Zaitsev I.P. (2023) [Digital Footprint of a Product as a Basis for Predictive Quality Management in Mechanical Engineering]. *Voprosy Radioelektroniki*, no. 4, pp. 45–52. DOI: 10.21774/2218-6042-2023-4-45-52 (in Russ.).

16. Rudakov A.M. (2022) [Digital Twins in Quality Management of Machine-Building Products]. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Seriya: Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti*, no. 4 (398), pp. 114–121. DOI: 10.47367/0021-3497_2022_4_114 (in Russ.).

17. Smirnov I.V. (2023) [Methodology of Statistical Process Control in the Context of Digital Transformation]. *Metody menedzhmenta kachestva*, no. 7, pp. 16–23. DOI: 10.34923/MMQ.2023.77.7.003 (in Russ.).

18. Sadovskaya T.G., Shastova G.A. (2024) [Digital Tools for Monitoring Defects in High-Tech Products]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij. Mashinostroenie*, no. 2 (767), pp. 61–70. DOI: 10.18698/0536-1044-2024-2-61-70 (in Russ.).

19. Frank A.G., Dalenogare L.S., Ayala N.F. (2019) Industry 4.0 Technologies: Implementation Patterns in Manufacturing Companies. *International Journal of Production Economics*, vol. 210, pp. 15–26. DOI: 10.1016/j.ijpe.2019.01.004

20. Tao F., Qi Q., Liu A., Kusiak A. (2018) Data-Driven Smart Manufacturing. *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 48, part C, pp. 157–169. DOI: 10.1016/j.jmsy.2018.01.006

Methodological Foundations of Product Quality Post-Production Monitoring in the Context of the CALS Concept

G.R. Musina, Kazan National Research Technical University, Kazan, Russia

E.S. Vorobyov, PhD in Engineering, Kazan National Research Technical University, Kazan, Russia

The high level of defects at the stages of operation of machine-building products reduces its competitiveness. According to the Ministry of Industry and Trade, over 70% of industry enterprises do not have digital control systems at the service stage, although up to 16% of defects appear in the first year of operation. This requires the creation of closed digital quality management circuits based on national standards. The article is devoted to the development of scientific and methodological approaches to the construction of a system of defect post-production monitoring in metal products. The focus is on the integration of operational data with the design and production stages in the unified information space of CALS technologies. In the course of the work, an algorithm for forming a digital footprint of a product based on ERP, MES, and PLM systems was proposed. A probabilistic resource estimation model based on Weibull's law and digital maturity indices has been developed. The methodology was tested at a machine-building enterprise. A model of end-to-end defect control has been created that combines predictive analytics and non-destructive testing methods. The implementation of the proposed solutions resulted in appreciable economic effect. The respond time to deviation in production reduced in half. The number of repeated defects at soldering reduced by 78.8%, while the accuracy of defect prediction increased up to 95.8%.

Keywords: quality management, CALS technologies, post-production monitoring, digital footprint of the product, lifecycle, predictive analytics, Weibull's law.

Получено 03.08.2026

Образец цитирования

Мусина Г. Р., Воробьев Е. С. Методологические основы постпроизводственного мониторинга качества изделий в контексте CALS-концепции // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2026. Т. 29, № 3. С. 73-82. DOI: 10.22213/2413-1172-2026-3-73-82

For Citation

Musina G.R., Vorobyov E.S. (2026) [Methodological Foundations of Product Quality Post-Production Monitoring in the Context of the CALS Concept]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, vol. 29, no. 3, pp. 73-82. DOI: 10.22213/2413-1172-2026-3-73-82 (in Russ.).