

УДК 658.562:004
DOI: 10.22213/2413-1172-2025-3-53-63

Жизненный цикл изделия и система контроля качества

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

М. В. Шинкевич, доктор экономических наук, Казанский национальный исследовательский технический университет, Казань, Россия

Актуальность исследования обусловлена необходимостью перехода промышленности к новым моделям обеспечения качества в условиях цифровой трансформации. Традиционные методы контроля и управления качеством не позволяют в полной мере учитывать динамику производственных процессов, ограничивая возможности предиктивного анализа и комплексной диагностики. Статья посвящена разработке концептуальных подходов к построению архитектуры цифровой системы контроля качества продукции ответственного назначения. Особое внимание уделено интеграции технологий цифровых двойников и CALS-подходов, формирующих единое информационное пространство управления жизненным циклом изделия. В рамках исследования предложена модель организации мониторинга качества, основанная на сочетании методов цифровой прослеживаемости, автоматизированного анализа данных и системы обратной связи. Проведена систематизация современных технологий и метрик, обеспечивающих всестороннюю оценку качества, а также разработаны методические положения по адаптации производственных процессов к условиям гибкой цифровой среды. Основные результаты работы – обоснование структуры цифровой архитектуры контроля качества и формирование комплекса инструментов, позволяющих выявлять внутренние резервы повышения эффективности за счет предиктивной аналитики и адаптивного управления. Сделан вывод, что предложенный подход обеспечивает высокий уровень надежности и устойчивости производственных процессов по сравнению с традиционными методами контроля. Практическая значимость работы заключается в возможности использования представленных моделей и положений для совершенствования систем управления качеством на предприятиях высокотехнологичных отраслей.

Ключевые слова: цифровизация процессов мониторинга качества, жизненный цикл изделия, цифровой двойник, CALS-технологии, предиктивная аналитика.

Введение

Современные системы управления производством разрабатываются с учетом особенностей компании и ее собственных условий. Проблема заключается в том, что системы разрабатываются по принципу «снизу вверх» без установления общей архитектуры системы, ее функций и алгоритма [1].

Жизненный цикл изделия, как правило, определяется как процессы планирования/настройки/мониторинга производственной деятельности и действия по максимизации прибыли и конкурентоспособности изделия. Современные подходы к организации производственного мониторинга на предприятиях высокотехнологичных отраслей предполагают внедрение цифровых инструментов, обеспечивающих прозрачность и управляемость всех этапов производственного цикла.

Однако анализ действующей модели показал, что текущий уровень обратной связи между этапами производства и мониторинга ограничен, что сдерживает потенциал снижения по-

вторяющихся дефектов и затрудняет переход к проактивному управлению качеством.

В целях устранения указанных ограничений и повышения эффективности производственного мониторинга предлагается внедрение модуля постпроизводственного мониторинга на этапе эксплуатации изделия в состав интегрированной системы управления предприятием (ИСУП).

Данный модуль будет выполнять функцию автоматизированной обратной связи, позволяя на основе фактических данных принимать управленические решения, направленные на предупреждение повторяемых ошибок в процессе пайки. Такой подход предполагает переход от фиксирования дефектов к их превентивному предотвращению.

Организационные основы постпроизводственного мониторинга и стратегического управления жизненным циклом изделия

Организационный аспект постпроизводственного мониторинга на этапе эксплуатации изделия заключается в обеспечении устойчивой,

регламентированной, интегрированной и управляемой среды, в рамках которой осуществляется сбор, анализ и использование информации о дефектах после завершения ключевых операций производственного цикла. Для его усиления требуется реализация следующих решений:

Формализация процедур мониторинга с включением постпроизводственного мониторинга в систему управления качеством предприятия как отдельного регламентированного процесса с четко определенными этапами, зонами ответственности и показателями эффективности.

Создание специализированных функциональных подразделений или рабочих групп, ответственных за постпроизводственный мониторинг, с участием представителей служб качества, технического контроля, ИТ и эксплуатации.

Интеграция мониторинга в существующую ИТ-инфраструктуру предприятия, включая ERP, MES, PLM и BI-системы, что позволит автоматизировать сбор и обработку данных о дефектах и формировать цифровой след изделия.

Разработка внутренних регламентов и стандартов, определяющих порядок обработки поступающей информации о дефектах, критерии ее классификации, приоритетности и маршрутизации к ответственным подразделениям.

Организация системы обратной связи с сервисными подразделениями, гарантийными отделами и конечными пользователями продукции для своевременного выявления дефектов, возникающих в процессе эксплуатации.

Внедрение цифровых панелей мониторинга (дашбордов), позволяющих в режиме реального времени отслеживать появление и динамику отклонений, а также эффективность принятых корректирующих решений.

Включение в KPI технических служб предприятия задач постпроизводственного мониторинга на этапе эксплуатации изделия, что обеспечивает мотивацию к проактивному контролю и устранению причин дефектов.

Периодическая оценка зрелости процессов постпроизводственного мониторинга на этапе эксплуатации изделия в рамках системы внутреннего аудита качества, с последующим планированием корректирующих мероприятий [2].

Таким образом, организационное усиление заключается в создании устойчивой управляемой модели, обеспечивающей непрерывность, ответственность, подконтрольность и результативность процессов мониторинга после основных стадий производства. Это позволит обеспечить не только устранение локальных

отклонений, но и формирование стратегических решений по повышению общей эффективности производственной системы [3].

В рамках предложенной модели постпроизводственный мониторинг организуется как непрерывный цифровой процесс, охватывающий фиксацию, анализ и обработку информации по каждому этапу пайки, включая проверку герметичности соединений, выявление скрытых утечек и контроль теплоэнергетических характеристик готового изделия. Информационная связь между основными цифровыми платформами предприятия (MES, ERP, PLM, BI) позволяет сформировать единое информационное пространство, в котором все данные о качестве пайки доступны в режиме реального времени.

В основу функционирования модуля положены ключевые метрики, отражающие уровень стабильности процессов, частоту выявления отклонений, своевременность корректирующих действий, а также полноту и актуальность операционной документации. Примером может служить показатель дефектности пайки после завершения производственных операций (PPDI), отражающий долю изделий, не прошедших контроль герметичности. Динамика данного показателя сигнализирует о сбоях в технологическом процессе и позволяет оперативно реагировать на возникающие риски [4].

Описание жизненного цикла изделий, составленное авторами в процессе исследования, представлено в таблице 1.

Рассмотрим порядок стратегического управления жизненным циклом изделия для управления дефектами. Данные по стратегическому управлению жизненным циклом изделия для управления дефектами получены авторами в процессе исследования и представлены в таблице 2.

Для решения этой задачи в рамках предлагаемой модели разрабатывается аналитический блок систематизации дефектов, интегрируемый в ИСУП как полноценный функциональный компонент [5].

Технологическая архитектура и программные уровни

Информационная система управления производством (ИСУП) формируется как многослойная структура, включающая следующие основные программные продукты (см. табл. 3).

Аналитический блок, который предлагается добавить в ИСУП, будет встроен на стыке MES и BI-уровней, с каналами двустороннего обмена данными с ERP и PLM.

Таблица 1. Описание жизненного цикла изделий**Table 1. Description of the product life cycle**

Основная деятельность	Подробное описание
Планирование объектов	Планирование объекта состоит из компоновки завода и схемы технологического процесса (маршрутизации), а производственный поток определяется вместе с производственной мощностью на основе схемы объекта. Использование объекта заключается в составлении плана назначения объекта с технологическим планированием на основе спецификаций
Планирование процессов	Создание описания наряда-наряда на выполнение работ путем ввода проектных данных блока. Способ производства выбирается на основе технологического планирования. Определение последовательности потока создания продукта Определите время выполнения каждого производственного процесса, контролируя имеющиеся ресурсы и их мощность
Планирование производственной стратегии	Составление плана производственной стратегии и закупок материалов с учетом плана дока и долгосрочного планирования (планирование мощностей). Среднесрочный и краткосрочный график с учетом имеющегося ресурса, объема производства каждого судна и предполагаемого человека-часа

Таблица 2. Стrатегическое управление жизненным циклом изделия для управления дефектами**Table 2. Strategic Product Lifecycle Management for Defect Management**

Управление	Описание
Информация о планировании	Создание исходных возможных основных данных планирования и передача их в систему планирования производства
Балансировка нагрузки	Повышение качества планирования с точки зрения балансировки нагрузки за счет применения эвристической логики диспетчеризации к цифровой модели верфи при планировании производства, выполнении заданий на работы с ресурсами
Планирование и составление графиков	Сведение к минимуму ошибок при планировании и составлении графиков, предварительно изучив результат в производственной среде виртуального судна перед выпуском ежемесячного или еженедельного заказа на выполнение работ
Стратегическое планирование	Вывод оптимальной стратегии планирования предприятия путем обработки информации о долгосрочном планировании до выпуска окончательной стратегии. Минимизация рисков предприятия с использованием ресурсов, ассортимента продукции и др.
Контроль скорости выполнения	Улучшение соответствия запланированного темпа выполнения работ и записи работ за счет сочетания метода S-кривой и виртуальной среды производства
Разработка метода производства	Анализ влияния изменений или усовершенствований методов производства, влияющих на производственные процессы в целом
Планирование процессов	Улучшение соответствия между планированием и исполнением за счет изучения информации о процессе и спецификации рабочего задания, оптимизация маршрутизации процесса
Контроль работы	Повышение качества выполнения работ в цехе с применением эвристической логики диспетчеризации к цифровой модели верфи, что приводит к сбалансированному распределению работ между работниками и рабочей группой
Планирование выполнения	Создание исполняемой информации планирования путем моделирования сценария среднесрочного планирования с состоянием цеха, правилом назначения объекта, правилом операции рабочей зоны, а также информацией о работнике и рабочей группе
Управление материальными потоками	Создание графика транспортировки путем ввода информации о планировании производства и планировании (в основном среднесрочное планирование)

Механизм добавления**блока аналитики дефектов****Этап 1. Сбор и маршрутизация данных**

- MES-система фиксирует факт отклонения (например, превышение вибрации или нештатное значение температуры при термообработке);

- создается карточка дефекта: тип, участок, оператор, код изделия, партия, оборудование;

- автоматически маршрутизируется через API в ERP и в блок аналитики.

Этап 2. Систематизация и связывание с ЖЦИ

- полученные данные интегрируются с PLM-моделью изделия, происходит привязка дефекта к конкретному этапу ЖЦИ (например, если выявлено, что отклонение связано с ошибкой в параметрах чертежа, фиксируется стадия «проектирование»);

- используется классификатор: проектные дефекты, производственные, сборочные, эксплуатационные.

Этап 3. Хранилище данных и ML-обработка

- все карточки поступают в Data Warehouse или распределенное хранилище (Hadoop, NoSQL);

- запускаются ML-алгоритмы, которые:

- выявляют повторяющиеся структуры дефектов;
- прогнозируют появление отклонений на аналогичных лотах;
- выявляют зависимости по видам оборудования, сменам и параметрам обработки.

Этап 4. Обратная интеграция в ИСУП, результаты аналитики отображаются в BI-дашбордах, где видны ключевые показатели:

- уровень дефектности (%);
- индекс зрелости цифрового следа;
- время реакции на дефект;
- частота повторяемости.

На их основе в ERP/PLM автоматически формируются:

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

Таблица 3. Информационная система управления производством (ИСУП)

Table 3. Production Management Information System (PMIS)

Уровень	Назначение	Программные решения
Операционный	Сбор производственных данных	MES (1C:MES, Siemens Opcenter), SCADA
Регламентный	Управление маршрутами, ресурсами, планами	ERP (SAP S/4HANA, 1C:ERP)
Технический	Работа с инженерной моделью и изменениями	PLM (Teamcenter, Windchill), PDM
Аналитический	Интерпретация данных, выявление закономерностей	BI (Qlik, Power BI, SAP BI), ML-модули
Интеграционный	Связь между системами и форматами	Middleware/ESB, API-интерфейсы, XML/STEP/OPC-UA

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. Вместо этого анализ ведется в натуральных показателях (доля, повторяемость, индекс связи с ЖЦИ).

Эти данные используются при оптимизации производственной системы, так как позволяют:

- выявить узкие места в маршрутах;
- оптимизировать загрузку оборудования;
- своевременно корректировать техническую документацию;
- прогнозировать дефекты на следующих этапах выпуска.

Концептуальная схема формирования организационно-технологического эффекта представлена на рисунке 1.

В конечном счете ожидается, что цифровая модель станет комплексной компьютеризированной платформой для виртуального моделирования.

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 научкоемкого производства за счет цифровизации процессов мониторинга.

Современные подходы к реализации проектов мониторинга дефектов демонстрируют смещение акцента от традиционного мониторинга качества к созданию полнофункциональной цифровой среды, в которой управление данными о дефектах осуществляется в реальном времени. Установлено, что внедрение CALS-инструментов, охватывающих этапы от сбора первичных параметров до автоматической генерации отчетов и маршрутов корректировки, обеспечивает непрерывность и согласованность технологической информации, необходимой для быстрого реагирования на выявленные отклонения.

Этот подход позволяет управлять жизненным циклом изделия на предприятии путем реализации фактических данных о продуктах, процессах, ресурсах и планировании в единую сущность, которая преодолевает традиционную статическую и прерывистую методологию системы управления дефектами по стадиям жизненного цикла изделия [6]. Пример архитектуры, составленный автором в процессе исследования, может быть следующим.

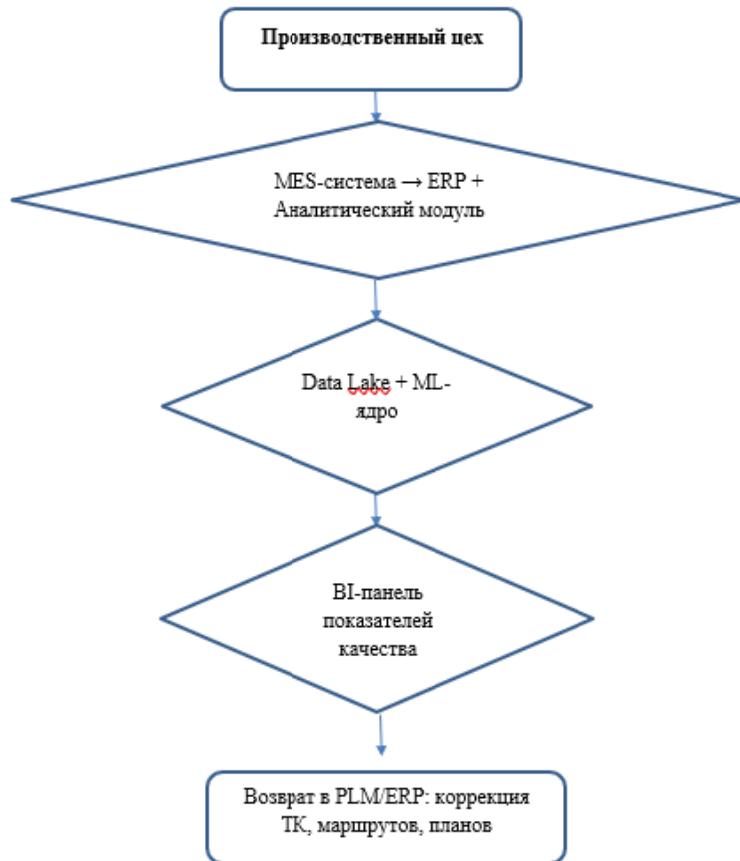


Рис. 1. Организационно-технологический эффект

Fig. 1. Organizational and technological effect

Сбор данных о дефектах организуется через MES-систему, где создаются карточки дефекта с обязательной классификацией по типу, зоне возникновения и предполагаемой причине. Далее данные агрегируются и поступают в аналитический модуль (например, на базе BI-системы или хранилища данных с ML-ядром). Этот блок оценивает долю дефектов в процентах от общего объема выпуска [7].

Концептуальная модель систематизации дефектов с опорой на принципы E2E (end-to-end) управления качеством заключается во внедрении информационного блока аналитики дефектов в существующую систему управления производством (ИСУП) с возможностью его интеграции в каждый этап ЖЦИ. Такая архитектура позволяет не только фиксировать и классифицировать отклонения, но и выстраивать предиктивные модели, основанные на данных постпроизводственного мониторинга на этапе эксплуатации изделия [8].

Базовые компоненты концепции:

цифровой поток данных – от датчиков оборудования, инспекционных приложений и автоматизированных систем мониторинга в MES и ERP, далее – в единый аналитический блок;

систематизация дефектов – привязка дефекта к конкретному этапу жизненного цикла изделия – проектирование (недостатки ТЗ), производство (технологические отклонения), сборка (ошибки операторов), испытания (скрытые дефекты);

предиктивная аналитика (Big Data + ML) – выявление повторяющихся структур дефектов, формирование трендов и прогнозов на основе потоковых данных [9].

обратная связь – автоматическая передача аналитических выводов в PLM и ERP для корректировки маршрутных карт, норм технологических режимов и организационно-технических решений.

Реализация предложенной архитектуры позволит:

- уменьшить количество повторяющихся дефектов за счет оперативной обратной связи;
- повысить точность выявления первопричин отклонений;
- организовать цифровую прослеживаемость дефектов на всем протяжении ЖЦИ;
- прогнозировать потенциальные отказы и дефекты до их физического проявления [10].

Таким образом, систематизация дефектов с опорой на информационные технологии, Big

Data и интеграцию CALS-компонентов позволяет перейти от локального реагирования к проактивной системе управления качеством, охватывающей все стадии ЖЦИ. Это не только технологически оправдано, но и создает условия для организационного эффекта, выражющегося в снижении потерь, времени реагирования и росте устойчивости производственной системы [11].

Данная модель управления качеством фокусируется на функциональной роли компонентов в контексте жизненного цикла изделия: от цифровой фиксации параметров обработки до интеграционной логики и обратной связи в инженерные подсистемы. Важное значение имеют инструменты стандартизованного обмена (STEP, OPC-UA) и платформы аналитики (BI, ML) как критические элементы для построения сквозных цифровых маршрутов дефектов. При этом особое внимание уделяется техническим метрикам, таким как частота повторяемости дефектов, уровень цифровой прослеживаемости и индекс зрелости данных.

Пример архитектуры постпроизводственного мониторинга на этапе эксплуатации изделия представлен на рисунке 2.

Модель реализует принципы E2E (end-to-end) контроля 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 [12]. 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, включение аналитических блоков в цифровую архитектуру предприятия можно рассматривать как средство повышения адаптивности и технологической устойчивости. Внедрение специализированного аналитического модуля постпроизводственного мониторинга в состав информационной системы управления производством (ИСУП) является необходимым шагом к формированию замкнутого контура системы контроля качества [13].

Модуль системы контроля качества обеспечивает:

- автоматизированный сбор и структурирование данных о дефектах на заключительных этапах производства;

- привязку отклонений к параметрам изделий, сменам, технологическим маршрутам;

- обратную интеграцию данных в PLM и ERP-модули для последующей корректировки процессов;

- запуск предиктивных моделей оценки риска повторения дефектов на основе технологий Big Data и машинного обучения;

- визуализацию и оценку качественных показателей через BI-интерфейсы без необходимости финансовых интерпретаций, что особенно важно на этапе оценки технической эффективности [14].

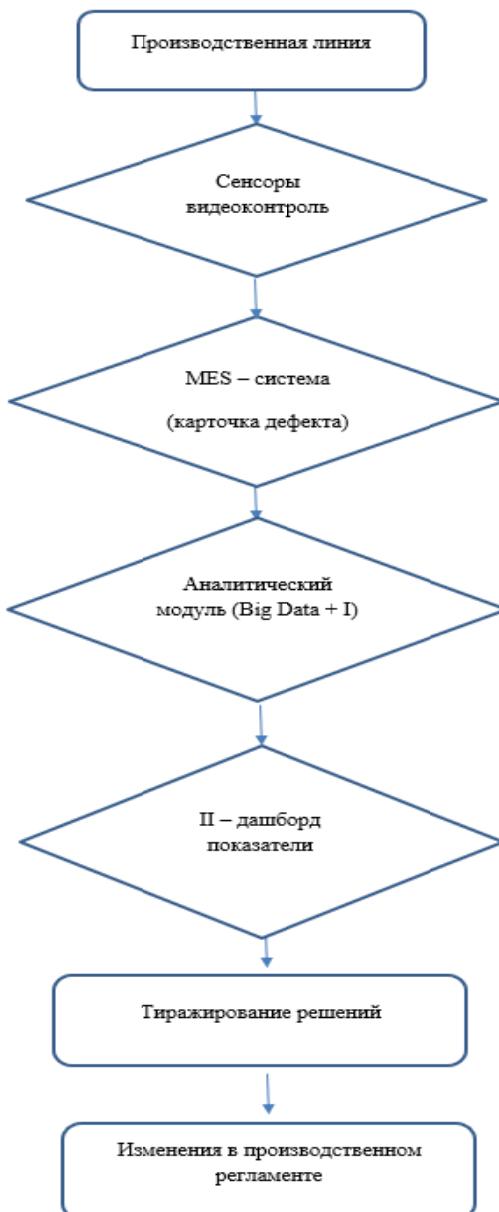


Рис. 2. Пример архитектуры постпроизводственного мониторинга на этапе эксплуатации изделия

Fig. 2. An example of the architecture of post-production monitoring at the stage of product operation

Функционально модуль включается в цифровую инфраструктуру предприятия через интерфейсы с MES, SCADA, ERP и BI-средами. Он становится частью архитектуры E2E-мониторинга (end-to-end), реализующего идею цифровой замкнутости жизненного цикла изделия. Такая интеграция позволяет сократить циклы устранения отклонений, повысить управляемость технологических процессов и улучшить качество изделий без наращивания контрольных ресурсов [15].

Внедрение данного 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. Это решение открывает путь к системному повышению технологической зрелости процессов, снижению внутренних потерь и формированию единой цифровой базы знаний об отклонениях и их причинах.

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. Пороговые значения показа-

теля сигнализируют о необходимости вмешательства, в том числе на уровне инженерных решений и обслуживания [16].

Организация контроля качества продукции представлена в таблице 4.

Таблица 4. А0: Контроль качества продукции

Table 4. A0: Product quality control

Элемент	Содержание
Управление	Техническая документация, нормативы качества
Механизмы	Производственный персонал, отдел контроля качества
Вход	Конструкторская документация, произведенная продукция
Выход	Информация о браке, исправленные изделия, данные о дефектах у потребителя

Декомпозиция А0:

А1: Проектирование

А2: Производство

А3: Контроль на предприятии

Выход: выявленный брак

А4: Отгрузка продукции

А5: Эксплуатация изделия

А6: Выявление дефектов у потребителей

А7: Исправление дефектов.

Модель текущего состояния в нотации IDEF0 представлена на рисунке 3.

Элементы усовершенствованного контроля качества продукции представлены в таблице 5.

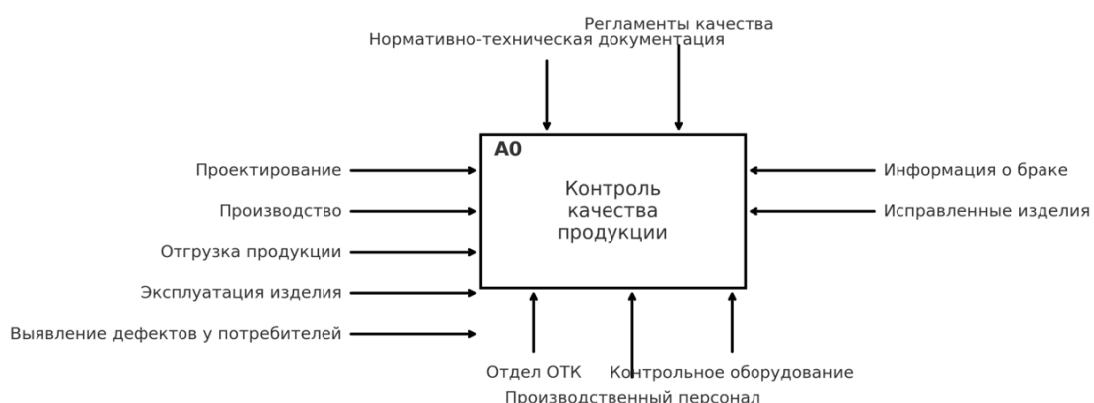


Рис. 3. Модель текущего состояния в нотации IDEF0

Fig. 3. Current state model in IDEF0 notation

Таблица 5. А0: Усовершенствованный контроль качества продукции

Table 5. A0: Improved product quality control

Элемент	Содержание
Управление	Расширенные стандарты качества, нормативные акты, цифровые регламенты
Механизмы	Производственный персонал, отдел ОТК, модуль мониторинга, ИТ-система
Вход	Конструкторская документация, произведенная продукция
Выход	Актуализированные данные мониторинга, предупреждение брака, устраниённые дефекты

Декомпозиция A0:

A1: Проектирование

A2: Производство

A3: Контроль на предприятии

Выход: выявленный брак

A4: Отгрузка продукции

A5: Эксплуатация изделия

A6: Модуль постпроизводственного мониторинга

A7: Выявление дефектов у потребителей

A8: Исправление дефектов

Модель проектируемого состояния в нотации IDEF0 представлена на рисунке 4.

Для оценки эффективности функционирования системы контроля качества продукции были разработаны две функциональные модели в нотации IDEF0 – текущая модель и предлагаемая усовершенствованная модель [17, с. 11]. Представим описание отличий между ними по четырем ключевым составляющим: входам, выходам, управляющим воздействиям и механизмам реализации процесса [18].

Входы процесса контроля качества продукции представлены в таблице 6.

В предлагаемой модели добавлен новый значимый вход, ориентированный на проактивное отслеживание дефектов после передачи продукции потребителю, что повышает гибкость и полноту системы контроля.

Выходы процесса контроля качества продукции представлены в таблице 7.

Количество и глубина выходной информации значительно увеличиваются, акцент смещается с устранения последствий на предупреждение возникновения дефектов.

Элементы контролирующего воздействия представлены в таблице 8.

Предлагаемый подход демонстрирует цифровизацию нормативной базы, что способствует более гибкому управлению процессами и соответствуя современным требованиям стандартизации.

Организационные механизмы реализации модели представлены в таблице 9.

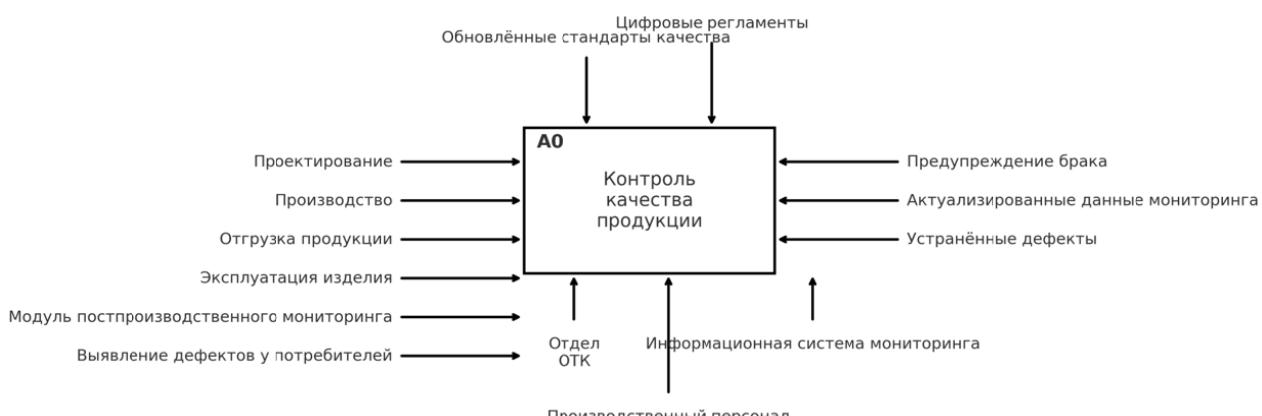


Рис. 4. Модель проектируемого состояния в нотации IDEF0

Fig. 4. Design State Model in IDEF0 notation

Таблица 6. Входы процесса

Table 6. Process inputs

Элемент	Текущее состояние	Предлагаемое состояние
Базовые этапы	Проектирование, производство, отгрузка, эксплуатация	Те же
Добавление	–	Модуль постпроизводственного мониторинга
Комментарий	Отсутствует возможность системного сбора данных после отгрузки	Интеграция мониторинга как структурного элемента процесса

Таблица 7. Выходы процесса

Table 7. Process outputs

Элемент	Текущее состояние	Предлагаемое состояние
Основные выходы	Информация о браке, исправленные изделия	Предупреждение брака, актуализированные данные мониторинга, устраниенные дефекты
Комментарий	Ретроспективный характер реагирования	Появляется возможность превентивной диагностики и активного управления качеством

Таблица 8. Контролирующие воздействия**Table 8. Controlling influences**

Элемент	Текущее состояние	Предлагаемое состояние
Тип управления	Нормативно-техническая документация, регламенты качества	Обновленные стандарты качества, цифровые регламенты
Комментарий	Используются бумажные нормативы	Цифровая среда управления, быстрая адаптация изменений

Таблица 9. Механизмы реализации**Table 9. Implementation mechanisms**

Элемент	Текущее состояние	Предлагаемое состояние
Участники	Отдел ОТК, производственный персонал, контрольное оборудование	Отдел ОТК, производственный персонал, информационная система мониторинга
Комментарий	Ручной контроль, стационарные средства	Автоматизированный сбор и анализ данных о качестве в реальном времени

Функционально модуль включается в цифровую инфраструктуру предприятия через интерфейсы с MES, SCADA, ERP и BI-средами. Он становится частью архитектуры Е2Е-мониторинга (end-to-end), реализующего идею цифровой замкнутости жизненного цикла изделия, что позволяет сократить циклы устранения отклонений, повысить управляемость технологических процессов и улучшить качество изделий без наращивания контрольных ресурсов [20].

Таким образом, новый механизм – цифровая система мониторинга – расширяет зону ответственности контроля качества за пределы производственного цикла.

Выводы

Предложенная модель расширяет границы постпроизводственного мониторинга на этапе эксплуатации изделия и обеспечивает превращение предприятия в самообучающуюся систему, способную адаптировать производство в ответ на реальные эксплуатационные данные. Реализация цифрового блока обратной связи в составе информационной системы управления производством (ИСУП) замыкает цикл качества, снижает риски скрытых дефектов и формирует интеллектуальную основу для устойчивого совершенствования производственных процессов.

Включение аналитических блоков в цифровую архитектуру предприятия повышает ее адаптивность и технологическую устойчивость, создает единую базу знаний об отклонениях и их причинах, а также способствует системному росту цифровой зрелости процессов.

Интегрированная аналитическая система обеспечивает сквозную информационную связь между этапами производства и эксплуатации изделия, реализуя принципы цифровой преемственности (digital thread). Ее ключевые функ-

ции связаны с автоматическим сопоставлением производственных параметров с эксплуатационными отклонениями, прогнозированием рисков отказов и формированием управленческих решений на основе выявленных зависимостей.

Центральным аналитическим результатом является показатель степени соответствия производственных параметров эталонной модели и эксплуатационным откликам изделия, что позволяет своевременно выявлять необходимость корректировок и повышать надёжность продукции.

Таким образом, достигается системное повышение эффективности управления качеством, снижение внутренних потерь и формирование цифрового профиля изделия, дополняемого на всех этапах его жизненного цикла.

Библиографические ссылки

1. Разиньков П. И., Разинькова О. П. Производственный потенциал предприятия. Формирование и использование : монография. Тверь : Тверской гос. техн. ун-т, 2023. 131 с.
2. Садовская Т. Г., Дадонов В. А., Дроговоц П. А. Производственно-экономический потенциал научекомского предприятия : монография / под ред. Т. Г. Садовской. М. : Изд-во МГТУ имени Н. Э. Баумана, 2023. 273 с.
3. Братухин А. Г. CALS-технологии в жизненном цикле Российской конкурентоспособной гражданской авиатехники: SSJ-100 : монография : в 2 кн. М. : МАИ-ПРИНТ, 2014.
4. Акимов С. В., Верхова Г. В., Меткин Н. П. Теоретические основы CALS : монография. Санкт-Петербург : СПбГУТ, 2018. 263 с.
5. Харитонов Д. В. Цифровая трансформация промышленности: стратегии и инструменты повышения эффективности производства. М. : Инфра-М, 2020. 256 с.
6. Гришин Е. С. Непрерывный мониторинг и диагностика промышленного оборудования : моногра-

фия. Калининград : Изд-во Балтийского федерального университета имени Иммануила Канта, 2020.

7. Веревкин А. П., Муртазин Т. М. Искусственный интеллект в задачах моделирования, управления, диагностики технологических процессов : монография. Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2023. 232 с.

8. Динамический мониторинг технологического оборудования : монография / Б. М. Бржозовский, В. В. Мартынов, И. Н. Янкин, М. Б. Бровкова. Саратов : Саратовский государственный технический университет, 2008. 312 с.

9. Фомин С. Н. Виртуальная и дополненная реальность в инженерных системах. М. : Научная книга, 2022. 301 с.

10. Евдокимова Е. Н., Солдак Ю. М. Промышленный интернет вещей (ПоТ): технологии будущего в производственном менеджменте : статья-обзор. 2017. [Электронный ресурс]. URL: https://dblib.rsreu.ru/data/publications/6249_text.pdf (дата обращения: 06.06.2025).

11. Чжун Д., Ван Л., Ли С., Чжан Х. Обзор предиктивного обслуживания на основе цифрового двойника // Applied Sciences. 2023. Т. 13, № 9. С. 5123. DOI: 10.3390/app13095123

12. Шангина Е. Внедрение CALS-технологий в России // Proceedings of the International Scientific Conference “Far East Con” (ISCFEC 2020). Владивосток : Atlantis Press, 2020. С. 2872–2877. DOI: 10.2991/aebmr.k.200321.051

13. Яковлева М. В., Шалина А. И. Алгоритм принятия решений о внедрении предиктивного обслуживания оборудования на высокотехнологичных предприятия // Вопросы инновационной экономики. 2023. Т. 13, № 1. С. 159–172. DOI: 10.18334/vinec.13.1.117426. 1ECONOMIC.RU

14. Анализ эффективности внедрения предиктивного обслуживания горнодобывающего оборудования на основе технологий Индустрии 4.0 / К. В. Харченко, А. Ж. Зубец, Е. И. Москвитина, Л. М. Бабаян, А. М. Лаффах // Горная промышленность. 2024. № 4. С. 130–136.

15. Цифровые двойники в системах управления / А. С. Минзов, А. Ю. Невский, О. Р. Баронов, С. В. Немчанинова // Вестник систем управления, вычислительной техники и информатики. 2024. № 2. С. 29–35. DOI: 10.21681/2311-3456-2024-2-29-35

16. Кубасов И. А. Цифровой двойник: технология, революционизирующая методы работы предприятий // Last Mil. 2023. № 110. С. 72–76. DOI: 10.22184/2070-8963.2023.110.2.72.76

17. Митиогло А. М. Предиктивное обслуживание оборудования: зарубежный и отечественный опыт // Молодой ученый. 2021. № 25 (367) [Электронный ресурс]. URL: <https://moluch.ru/archive/367/117940/> (дата обращения: 06.06.2025).

18. Хитрых Д. Цифровые двойники в промышленности: истоки и перспективы // СТА. Центр технологий и автоматизации [Электронный ресурс]. URL: <https://www.cta.ru/articles/soel/2022/2022-1-165628/> (дата обращения: 06.06.2025).

19. Van Dinter R. (2022) Predictive maintenance using digital twins: A systematic review. Journal of Manufacturing Systems (Elsevier), 2022. Science Direct.

20. Zhong D. (2023) Overview of predictive maintenance based on digital twin. PMC (MDPI/NCBI) [Электронный ресурс]. URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10070392/> (дата обращения: 06.06.2025).

References

- Razinkov P.I., Razinkova O.P. (2023) *Proizvodstvennyj potencial predpriatija. Formirovaniye i ispol'zovaniye* [Production potential of the enterprise. Formation and use]. Tver: Tver State Technical University Publ. House, 131 p. (in Russ.).
- Sadovskaya T.G., Dadonov V.A., Drogovoz P.A. (2023) *Proizvodstvenno-ekonomiceskij potencial naukojomkogo predpriatija* [Production and economic potential of a high-tech enterprise: monograph]. Moscow: Bauman Moscow State Technical University Publ. House, 273 p. (in Russ.).
- Bratukhin A.G. (2014) *CALS-tehnologii v zhiznennom cikle Rossijskoj konkurentospособnoj grazhdanskoy aviatehniki: SSJ-100* [CALS-technologies in the life cycle of Russian competitive civil aircraft: SSJ-100]. Moscow: Mai-Print Publ. House, 536 c. (in Russ.).
- Akimov S.V., Verkhova G.V., Metkin N.P. (2018) *Teoreticheskie osnovy CALS* [Theoretical foundations of CALS: monograph]. St. Petersburg: St. Petersburg State University of Telecommunications Publ. House, 263 p. (in Russ.).
- Kharitonov D.V. (2020) *Cifrovaja transformacija promyshlennosti: strategii i instrumenty povyshenija jeffektivnosti proizvodstva* [Digital transformation of industry: strategies and tools for improving production efficiency]. Moscow: Infra-M Publ., 256 p. (in Russ.).
- Rishin E.S. (2020) *Nepreryvnij monitoring i diagnostika promyshlennogo oborudovaniya* [Continuous monitoring and diagnostics of industrial equipment: monograph]. Kaliningrad: Immanuel Kant Baltic Federal University Publ. House, 2020 (in Russ.).
- Verevkin A.P., Murtazin T.M. (2023) *Iskusstvennyj intellekt v zadachah modelirovaniya, upravleniya, diagnostiki tehnologicheskikh processov* [Artificial intelligence in problems of modeling, control, and diagnostics of technological processes]. Moscow; Vologda: Infra-Engineering Pybl., 232 p. (in Russ.).
- Brzhozovsky B.M., Martynov V.V., Yankin I.N., Brovko M.B. (2008) *Dinamicheskij monitoring tehnologicheskogo oborudovaniya* [Dynamic monitoring of technological equipment]. Saratov: Saratov State Technical University Publ. House, 312 p. (in Russ.).
- Fomin S.N. (2022) *Virtual'naja i dopolnennaja real'nost' v inzhenernyh sistemah* [Virtual and augmented reality in engineering systems]. Moscow: Scientific Book Publ., 301 p. (in Russ.).
- Evdokimova E.N., Soldak Yu.M. (2017) Industrial Internet of Things (IIoT): Future Technologies in Production Management: Review Article [Electronic resource]. Available at: https://dblib.rsreu.ru/data/publications/6249_text.pdf (accessed: 06.06.2025) (in Russ.).

11. Zhong D., Wang L., Li S., Zhang H. (2023) [Overview of predictive maintenance based on digital twin]. *Applied Sciences*, vol. 13, no. 9, p. 5123. DOI: 10.3390/app13095123 (in Russ.).
12. Shangina E. (2020) *Vnedrenie CALS-tehnologij v Rossii* [Implementation of CALS-technologies in Russia]: Proceedings of the International Scientific Conference “Far East Con” (ISCFEC 2020). Vladivostok: Atlantis Press Publ., pp. 2872-877. DOI: 10.2991/aebmr.k.200321.051 (in Russ.).
13. Yakovleva M.V., Shalina A.I. (2023) [Decision-making algorithm for implementing predictive maintenance of equipment at high-tech enterprises]. *Issues of Innovative Economy*, vol. 13, no. 1, pp. 159-172. DOI: 10.18334/vinec.13.1.117426 (in Russ.).
14. Kharchenko K.V., Zubets A.Zh., Moskvitina E.I., Babayan L.M., Laffakh A.M. (2024) [Analysis of the efficiency of implementation of predictive maintenance of mining equipment based on Industry 4.0 technologies]. *Mining Industry*, no. 4, pp. 130-136 (in Russ.).
15. Minzov A.S., Nevskiy A.Yu., Baronov O.R., Nemchaninova S.V. (2024) [Digital twins in control systems]. *Bulletin of Control Systems, Computer Technology and Informatics*, no. 2, pp. 29-35. DOI: 10.21681/2311-3456-2024-2-29-35 (in Russ.).
16. Kubasov I.A. (2023) [Digital twin: a technology revolutionizing enterprise operations]. *Last Mil*, no. 110, pp. 72-76. DOI: 10.22184/2070-8963.2023.110.2.72.76 (in Russ.).
17. Mitioglo A.M. (2021) [Predictive maintenance of equipment: foreign and domestic experience]. *Young Scientist*, no. 25 (367) [Electronic resource]. Available at: <https://moluch.ru/archive/367/117940/> (accessed: 06.06.2025) (in Russ.).
18. Khitrykh D. [Digital Twins in Industry: Origins and Prospects]. CTA. Center for Technology and Automation [Electronic resource]. Available at: <https://www.cta.ru/articles/soel/2022/2022-1/165628/> (accessed: 06.06.2025) (in Russ.).
19. Van Dinter R. (2022) Predictive maintenance using digital twins: A systematic review. *Journal of Manufacturing Systems* (Elsevier), 2022. Science Direct.
20. Zhong D. (2023) Overview of predictive maintenance based on digital twin. PMC (MDPI/NCBI) [Electronic resource]. Available at: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10070392/> (accessed: 06.06.2025) (in Russ.).

Life Cycle and Quality Control System

G.R. Musina, Post-graduate National Research Technical University, Kazan, Russia

M.V. Shinkevich, DSc in Economics, Kazan National Research Technical University, Kazan, Russia

The relevance of the study is determined by the need for industry to transition to new models of quality assurance under the conditions of digital transformation. Traditional methods of quality control and management do not fully account for the dynamics of production processes, thereby limiting the possibilities of predictive analysis and comprehensive diagnostics. The research is devoted to the development of conceptual approaches to designing the architecture of a digital quality control system for mission-critical products. Particular attention is given to the integration of digital twin technologies and CALS approaches, which create a unified information space for managing the product life cycle. Within the framework of the study, a model for organizing quality monitoring is proposed, based on the combination of digital traceability methods, automated data analysis, and feedback mechanisms. A systematization of modern technologies and metrics ensuring comprehensive quality assessment has been carried out, and methodological guidelines for adapting production processes to the conditions of a flexible digital environment have been developed. The main results of the work include the substantiation of the structure of the digital quality control architecture and the formation of a set of tools enabling the identification of internal reserves for efficiency improvement through predictive analytics and adaptive management. It is concluded that the proposed approach provides a higher level of reliability and resilience of production processes compared to traditional control methods. The practical significance of the study lies in the possibility of applying the presented models and provisions to improve quality management systems at enterprises in high-tech industries.

Keywords: digitalization of quality monitoring processes, product life cycle, digital twin, CALS-technologies, predictive analytics.

Получено 14.08.2025

Образец цитирования

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

For Citation

Musina G.R., Shinkevich M.V. (2025) [Life Cycle 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.).