На правах рукописи



ЧИЖ ДМИТРИЙ ВАДИМОВИЧ

РАЗРАБОТКА НАУЧНО-ОРГАНИЗАЦИОННЫХ РЕШЕНИЙ НАДЕЖНОСТНО-ОРИЕНТИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКИМ ОБСЛУЖИВАНИЕМ ОБОРУДОВАНИЯ

2.5.22. Управление качеством продукции.
Стандартизация. Организация производства

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Казань – 2026

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

Научный руководитель: **Малышева Татьяна Витальевна**
доктор технических наук, доцент

Официальные оппоненты: **Бром Алла Ефимовна**
доктор технических наук, профессор, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», профессор кафедры БМ-3 «Промышленная логистика»;

Назаревич Станислав Анатольевич
кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения», доцент кафедры инноватики и интегрированных систем качества.

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», г. Москва

Защита состоится «24» декабря 2026 года в 14:00 на заседании диссертационного совета 24.2.312.08, созданного на базе ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет» (420015, г. Казань, ул. К. Маркса, д. 68, зал заседаний Ученого совета, А – 330).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет» и на сайте https://www.kstu.ru/servlet/contentblob?id=600017.

Автореферат диссертации разослан «____»_____2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.312.08,
доктор экономических наук, доцент



Кудрявцева
Светлана
Сергеевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Стабильная и бесперебойная работа производственного оборудования в значительной степени зависит от его технического состояния, эксплуатации в условиях высоких температур, агрессивных сред и непрерывных технологических циклов. Мировой опыт, где ведущие компании активно используют предиктивную аналитику и цифровые двойники, демонстрирует потенциал роста эффективности от внедрения передовых методов технического обслуживания и ремонта оборудования (ТОиР). Ключевой проблемой, препятствующей внедрению такого подхода в России, является фрагментарность цифровой трансформации. Зачастую инструменты управления внедряются отдельными, не связанными между собой модулями, что создает «лоскутную организацию производства». Это приводит к ситуации, когда, несмотря на большой объем данных, качество управленческих решений по ТОиР не улучшается.

В России эксплуатируется значительная часть оборудования с высокой степенью износа, особенно в электролизном производстве, анодомастерских и системах газоочистки. Согласно отраслевой статистике, доля внеплановых простоев, связанных с отказами оборудования, достигает 25–35% от общего времени остановов, а общая эффективность оборудования (OEE) составляет 60–70%, что на 15–20 п.п. ниже показателей мировых лидеров по производству материалов для машиностроения (Alcoa, Rio Tinto, Hydro). При этом до 40% отказов является следствием неэффективной организации ТОиР.

Традиционная система планово-предупредительных ремонтов (ППР), основанная на календарных циклах и наработке, не учитывает реального технического состояния оборудования, что приводит к негативным последствиям: с одной стороны, значительная часть ремонтов выполняется при исправном состоянии агрегатов («избыточное обслуживание»), с другой – внезапные отказы происходят из-за того, что фактическая скорость износа превышает заложенные в нормативах значения.

Ключевыми документами развития отрасли машиностроения и металлургии, как основного поставщика сырья и материалов, являются «Сводная стратегия развития обрабатывающей промышленности Российской Федерации до 2030 года и на период до 2035 года» и «Стратегия развития металлургической промышленности Российской Федерации на период до 2030 года». Стратегии задают курс на технологическое обновление и автоматизацию, что требует от предприятий внедрения современных подходов к ТОиР, включая предиктивную аналитику и цифровые инструменты контроля состояния оборудования. Заложенные в документах цели по увеличению доли отечественной продукции и повышению надежности техники требуют выстраивать более эффективные процессы управления отказами и простоями, усиливать системы диагностики и планирования ремонтов.

В этой связи существует необходимость разработки организационно-технических решений по развитию системы технического обслуживания оборудования для обеспечения надежности производственных систем с использованием цифрового управления. Требуется создание методического аппарата и системных решений, интегрирующих анализ надежности оборудования, методы прогнозирования качества продукции и современные инструменты цифрового управления ТОиР в единую систему, что и определяет актуальность выбранной темы диссертационного исследования.

Степень разработанности темы исследования. Зарубежные и российские ученые уделяют значительное внимание вопросам организации технического обслуживания и ремонта, управления надежностью оборудования и цифровой трансформации промышленных производств, что ставит в приоритет задачи формирования методологических подходов, стандартов и методик повышения эффективности систем ТОиР для высокотехнологичных и капиталоемких отраслей промышленности.

Вопросы статистического анализа отказов и моделирования надежности производственного оборудования разрабатывались в трудах Алифина Ф.И., Бажина В.Ю., Безруких А.И., Власова А.А., Горева А.А., Гусевой Т.В., Завадяк А.В., Курошева И.С., Полякова П.В., Пузанова И.И., Сизякова В.М., Скобелева Д.О., Юшковой О.В. Зарубежные исследователи Алкали Б.М., Аль Рахби Ю., Альфионита С., Артеага О., Валенсия С.С., Возняк М., Галаррага Л.К., Дуэр С., Коуэлл А., Ли Л., Паш Я., Ризван С.М., Рольч Т., Танеджа Г., Теран Х.К., Чанг К., Чжоу С. применили аналогичные методы для анализа надежности анодных установок, электролизеров и кранов-перегружателей.

Проблематика применения анализа видов и последствий отказов (FMEA) и надежностно-ориентированного технического обслуживания (RCM) для планирования ТОиР нашла отражение в работах Антоненко И.Н., Бром А.Е., Воронина В.В., Колыхалина В.М., Малышевой Т.В., Савиновой М.Е., Тулинова А.Б., Тюменева Ю.Я., Шайдуллина Р.А., а также зарубежных авторов Будихарджо К., Йетрина М., Пебриянто Р., Сусрияти Р., Харма Б.

Вопросы цифровизации процессов ТОиР и предиктивной аналитики исследовались Бахтадзе Н.Н., Варзиным В.В., Леуновым А.А., Назаревичем С.А., Нургалиевым Р.К., Поповым Е.В., Поповым Н.А., Тарасовым И.В., Троянской М.А., Удальцовой Н.Л., Шепелиным Г.И., Шикевич М.В., Шинкевичем А.И., а также зарубежными учеными Ерзамаевым М.П., Ким А.С., Куанг Ж., Санчесом Ф., Хартлибом П., Чжу Дж., Ян Х.

Организационные аспекты, стандартизация и связь технического обслуживания с качеством продукции стали предметом исследований Абдусаломова А.Г.у., Гончаровой Я.С., Дзедика В.А., Зажигалкина А.В., Казовской И.С., Кудрявцевой С.С., Мартусевич Е.А., Немчиновой Н.В., Одинокова С.А., Пятецкого В.Е., Рыбенко И.А., Скобелева К.Д., Ставцева Д.А., Терпенева А.В., Усатых Е.В., Фоминой О.Н., Цурикова Д.В. Ими обоснована необходимость интеграции системы ТОиР с СМК предприятия, предложены модели управления ресурсной эффективностью, а также рассмотрены возможности применения национальных стандартов (ГОСТ Р 27.606–2013, ГОСТ Р 27.303–2021) и отраслевых регламентов.

Однако, несмотря на значительное количество научных публикаций в области ТОиР, организация производства в контексте обеспечения надежности техники и качества продукции сдерживается рядом нерешенных проблем. В существующих работах отсутствуют комплексные методики интеграции данных о качестве продукции в оперативное планирование ремонтов, недостаточно формализованы критерии перехода от планово-предупредительного обслуживания к предиктивному, а также практически не представлены архитектурные решения по интеграции анализа надежности в цифровые системы управления ТОиР с обратной связью и автоматической актуализацией моделей.

Цель диссертационного исследования состоит в разработке научно-организационных решений по развитию системы технического обслуживания оборудования

для управления отказами и обеспечения качества продукции с использованием цифрового управления.

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

1) разработать модель организации надежностно-ориентированного технического обслуживания производственного оборудования, учитывающую влияние отказов на качество продукции;

2) предложить структуру подсистемы технического обслуживания и ремонта в контуре единой системы управления непрерывным производством;

3) разработать методику определения и динамической актуализации межремонтных интервалов на основе статистического анализа надежности;

4) провести апробацию предложенных научно-технических решений по развитию системы технического обслуживания оборудования для организации производства алюминия.

Объектом диссертационного исследования выступает система технического обслуживания и ремонта оборудования, применяемого на алюминиевых заводах.

Предметом исследования являются методы и цифровые инструменты организации технического обслуживания, обеспечивающие управление отказами оборудования и качеством продукции.

Соответствие содержания диссертации избранной специальности. Область диссертационного исследования соответствует научной специальности 2.5.22 Управление качеством продукции. Стандартизация. Организация производства в части пунктов: 15. Научно-практическое развитие инженерных инструментов управления, организации производственных систем, а также баз знаний; 21. Развитие теоретических основ и практических приложений организационно-технологической надежности производственных процессов. Оценка уровня надежности, адаптивности и устойчивости производства; 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 системы технического обслуживания оборудования для обеспечения качества продукции:

1. *Разработана* модель надежностно-ориентированного технического обслуживания производства на основе методологии RCM, *отличающаяся* интеграцией анализа видов и последствий отказов (FMEA-анализа), трехуровневой классификацией оборудования и введением пятой категории влияния последствий отказов на качество продукции с модифицированным приоритетным числом риска (RPN_Q), *позволяющая* перейти к динамическому управлению в реальном времени и повысить надежность производства, обоснованно выбирать стратегию обслуживания (ТОиР) для каждого класса оборудования и ранжировать риски с учетом изменения сортности металла, доли брака и индекса воспроизводимости (п. 15 паспорта специальности 2.5.22).

2. *Предложен* подход к организации подсистемы технического обслуживания и ремонта в контуре единой системы управления производством, позволивший разработать архитектуру подсистемы ТОиР, *отличающуюся* включением ее в цифровую иерархию на

уровнях диспетчерского и оперативного управления с двусторонними информационными связями между системами управления технологическими процессами, предиктивной диагностики, производством и качеством продукции, *обеспечивающую* синхронизацию ремонтных циклов с производственными заданиями, планирование потребности в запасных частях и бюджете ремонтов, а также целостность распределенных данных в условиях непрерывного производства (п. 25 паспорта специальности 2.5.22).

3. *Разработана* методика интеграции анализа надежности на основе распределения Вейбулла в цифровую систему управления техническим обслуживанием и ремонтом, *отличающаяся* сквозным циклом анализа от формирования базы данных отказов через автоматизированный расчет параметров Вейбулла и средней наработки на отказ до интеграции с планированием ремонтов и обратной актуализацией модели, *позволяющая* на основе алгоритма периодичности ремонтов (для оборудования с износовым типом отказов ($\beta > 1$)) обоснованно определять и актуализировать межремонтные интервалы, минимизировать риски внезапных отказов и повышать организационно-технологическую надежность производственного процесса (п. 21 паспорта специальности 2.5.22).

Методология и методы исследования. При проведении диссертационного исследования использованы теоретические положения в области организации производства, теории надежности технических систем, технического обслуживания и ремонта оборудования, цифрового управления промышленными предприятиями, всеобщего управления качеством (TQM), системного анализа и основополагающие принципы системотехнического моделирования. Методологической базой послужили концепции надежностно-ориентированного обслуживания (RCM), анализа видов и последствий отказов (FMEA), теории распределения Вейбулла для моделирования отказов оборудования, а также принципы построения распределенных информационных систем иерархического типа.

Для обоснования выдвинутых в диссертации положений применены следующие общенаучные методы исследования: диалектический и системный подход, метод формализации и моделирования, функциональное моделирование**,** **метод** причинно-следственных связей**,** анализ и синтез**,** методы дескриптивной статистики**,** аппарат распределения Вейбулла и др.

Информационную базу исследования составили данные, содержащиеся в трудах (монографиях, научных статьях, диссертациях) отечественных и зарубежных исследователей по проблематике надежности оборудования алюминиевого производства; законодательные и нормативно-правовые акты, включая «Сводную стратегию развития обрабатывающей промышленности Российской Федерации до 2030 года и на период до 2035 года»», «Стратегию развития металлургической промышленности Российской Федерации на период до 2030 года» и «Перспективную программу стандартизации алюминиевой промышленности на 2022-2026 годы»; национальные и международные стандарты в области надежности и технического обслуживания (ГОСТ Р 27.606-2013, ГОСТ Р 27.303-2021, IEC 60300-3-11, ISO 14224); отраслевые регламенты эксплуатации оборудования алюминиевых заводов, статистические отчеты о простоях, отказах и эффективности оборудования, данные аналитических обзоров по деятельности лидеров по производству алюминия (Alcoa, Rio Tinto, Hydro); эксплуатационные данные, полученные автором в ходе работы на предприятиях объединенной компании АО «РУСАЛ».

Теоретическая значимость работы заключается в развитии инженерных инструментов организации и управления системами технического обслуживания и ремонта оборудования применительно к непрерывным высокотемпературным металлургическим производствам. В работе развиты подходы к синтезу концепций надежностно-ориентированного обслуживания (RCM), анализа видов и последствий отказов (FMEA), цифрового управления и предиктивной аналитики для достижения синергетического эффекта в решении задач повышения надежности алюминиевого производства.

Обобщены результаты отечественных и зарубежных исследований в области эксплуатации оборудования электролизного производства, анодомастерских и систем газоочистки, а также опыт внедрения цифровых систем управления ТОиР на алюминиевых заводах. Доказаны теоретические положения, подтверждающие целесообразность использования методов и инструментов концепций RCM (с доработкой пятой категории последствий отказов на качество продукции), параметрического моделирования надежности на основе распределения Вейбулла, а также архитектурных решений по включению подсистемы ТОиР в единую цифровую иерархию управления предприятием.

Практическая значимость исследования. Результаты диссертационного исследования имеют существенную практическую значимость для реализации инженерных проектов по развитию систем технического обслуживания оборудования на алюминиевых заводах, эксплуатирующихся в условиях высоких температур, агрессивных сред и непрерывных технологических циклов, а также для развития национальной системы стандартов в области организации надежностно-ориентированного обслуживания.

По итогам проведенного исследования разработан и внедрен на предприятиях алюминиевой промышленности ряд моделей, алгоритмов, методик организации технического обслуживания оборудования с постановкой приоритетов по классам критичности, оптимизации межремонтных интервалов на основе распределения Вейбулла и ключевых ресурсов ремонтного процесса, создания стандартизированных операционных процедур ТОиР с временными нормативами на основе математических зависимостей между наработкой на отказ и параметрами технологического процесса. Применение имитационной модели позволило разработать алгоритм оптимизации периодичности ремонтов, интегрированный в предложенную архитектуру АСУ ТОиР с двусторонними информационными связями между уровнями диспетчерского управления, оперативного управления, предиктивной диагностики и системы управления качеством.

Положения, выносимые на защиту:

1. Модель надежностно-ориентированного технического обслуживания производства на основе методологии RCM с учетом влияния последствий отказов на качество продукции.

2. Архитектура подсистемы управления техническим обслуживанием и ремонтом оборудования в контуре единой системы управления производством.

3. Методика интеграции анализа надежности на основе распределения Вейбулла в цифровую систему управления техническим обслуживанием производства.

Степень достоверности и апробация результатов исследования.

Достоверность научных результатов подтверждается соответствием их положениям фундаментальной научной литературы по организации технического обслуживания оборудования, управлению надежностью технических систем и цифровой трансформации

производств. Полученные теоретические результаты построены на известных научных положениях (теория надежности, теория распределения Вейбулла, принципы системотехнического моделирования). Практические результаты достигнуты с применением признанных информационных технологий (автоматизированные системы управления, предиктивная диагностика, цифровые двойники), а ожидаемые результаты работы согласуются с опубликованными экспериментальными данными по эксплуатации оборудования алюминиевых заводов.

Основные результаты диссертации доложены и представлены на следующих научно-практических конференциях: «Технологии и техника: пути инновационного развития» (г. Воронеж, 2026), «Научные исследования и разработки 2026» (г. Пенза, 2026), «Эффективные системы менеджмента: Стандартизация. Экономика данных. Кадровое и технологическое лидерство» (г. Казань, 2026), «Математические методы в технологиях и технике (ММТТ–37)» (г. Казань, 2024), «Актуальные тренды цифровой трансформации промышленных предприятий» (г. Казань, 2024) и др.

Результаты диссертационной работы внедрены на предприятиях объединенной компании АО «РУСАЛ» при развитии системы технического обслуживания и ремонта оборудования с использованием цифрового управления. Разработанные методические рекомендации по развитию инженерных инструментов организации ТОиР использованы при разработке образовательных программ ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет», что подтверждено справками о внедрении результатов диссертации.

Публикации. По теме исследования опубликовано 10 научных работ общим объемом 4,44 п. л. (в т.ч. лично автора – 3,11 п. л.), из них 4 статьи в журналах из перечня рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России – «Компетентность», «Русский инженер», «Известия Тульского государственного университета», «Информационно-экономические аспекты стандартизации и технического регулирования», статьи в сборниках научно-практических международных и всероссийских конференциях, зарегистрирован электронный ресурс.

Структура и объем работы. Диссертационное исследование состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы, содержит 34 рисунка и 24 таблицы. Список литературы насчитывает 146 источников. Общий объем диссертационной работы – 193 страницы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В первой главе «Анализ научно-технических подходов к организации обслуживания и ремонта оборудования непрерывного производства» рассмотрены современное состояние изученности темы организации систем ТОиР в производстве алюминия, проанализирована база стандартов в области исследования, проведен обзор цифровых инструментов и лучших практик управления техническим обслуживанием оборудования на алюминиевых заводах.

В процессе анализа алюминиевых заводов установлено, что производство первичного алюминия представляет собой многостадийную распределенную систему, включающую оборудование различных принципов действия (дробильно-размольное, термическое, гидромеханическое, дозировочно-смесительное, электрохимические агрегаты). Высокая энергонапряженность, непрерывность процессов и агрессивные среды предъявляют повышенные требования к системе ТОиР, от которой зависит стабильность технологического процесса и качество готовой продукции. Показано, что традиционно применяемая на алюминиевых заводах система (ППР), основанная на календарных циклах, не учитывает реального состояния оборудования, что приводит к избыточности ремонтов и внезапным отказам, когда фактический износ превышает нормативный.

Обзор научных публикаций последних 10 лет позволил выделить ключевые направления исследований в области ТОиР для алюминиевого производства: статистический анализ отказов и моделирование надежности, применение анализа видов и последствий отказов (FMEA) и надежностно-ориентированного технического обслуживания (RCM) для планирования ТОиР, цифровизация и предиктивная аналитика (IIoT, машинное обучение, цифровые двойники), стандартизация и связь ТОиР с качеством продукции. Установлено, что в существующих публикациях недостаточно полно раскрыты вопросы интеграции данных о текущем качестве продукции в алгоритмы оперативного планирования ТОиР, отсутствуют методики автоматической корректировки приоритетов ремонтных работ при ухудшении показателей стабильности технологического процесса, а также гибридные стратегии ТОиР, сочетающие ППР, обслуживание по состоянию и предиктивную аналитику с обоснованием критериев перехода между стратегиями.

Анализ нормативной базы свидетельствует о недостаточной разработанности стандартов по организации ТОиР алюминиевых производств в России. Перспективная программа стандартизации алюминиевой промышленности на 2022–2026 годы ориентирована на расширение потребления алюминия и не затрагивает ТОиР, ремонтные нормативы, диагностику, цифровое управление и квалификацию персонала. Сформулированы рекомендации по включению в программу направления «Техническое обслуживание и ремонт оборудования алюминиевых производств» с разработкой базового стандарта ТОиР, нормативов периодичности ремонтов, методов диагностики и требований к цифровому управлению.

Обзор цифровых инструментов и лучших практик управления ТОиР в производстве алюминия показал, что фундамент цифровой трансформации составляют системы управления активами предприятия (CMMS/EAM-системы), создающие единое пространство для учета единиц оборудования, планирования ремонтов, управления ресурсами и формирования отчетности. На следующем уровне цифрового развития осуществляется внедрение IIoT и предиктивного обслуживания для перехода к ремонту по фактическому состоянию оборудования. На основе обзора международных методологий (FMEA, RCM, TPM, предиктивная аналитика) и лучших практик ведущих компаний (РУСАЛ, Alcoa, Hydro, Rio Tinto) выявлено, что устойчивый системный эффект достигается при комплексной интеграции всех классов инструментов в единую цифровую среду предприятия (рис. 1).

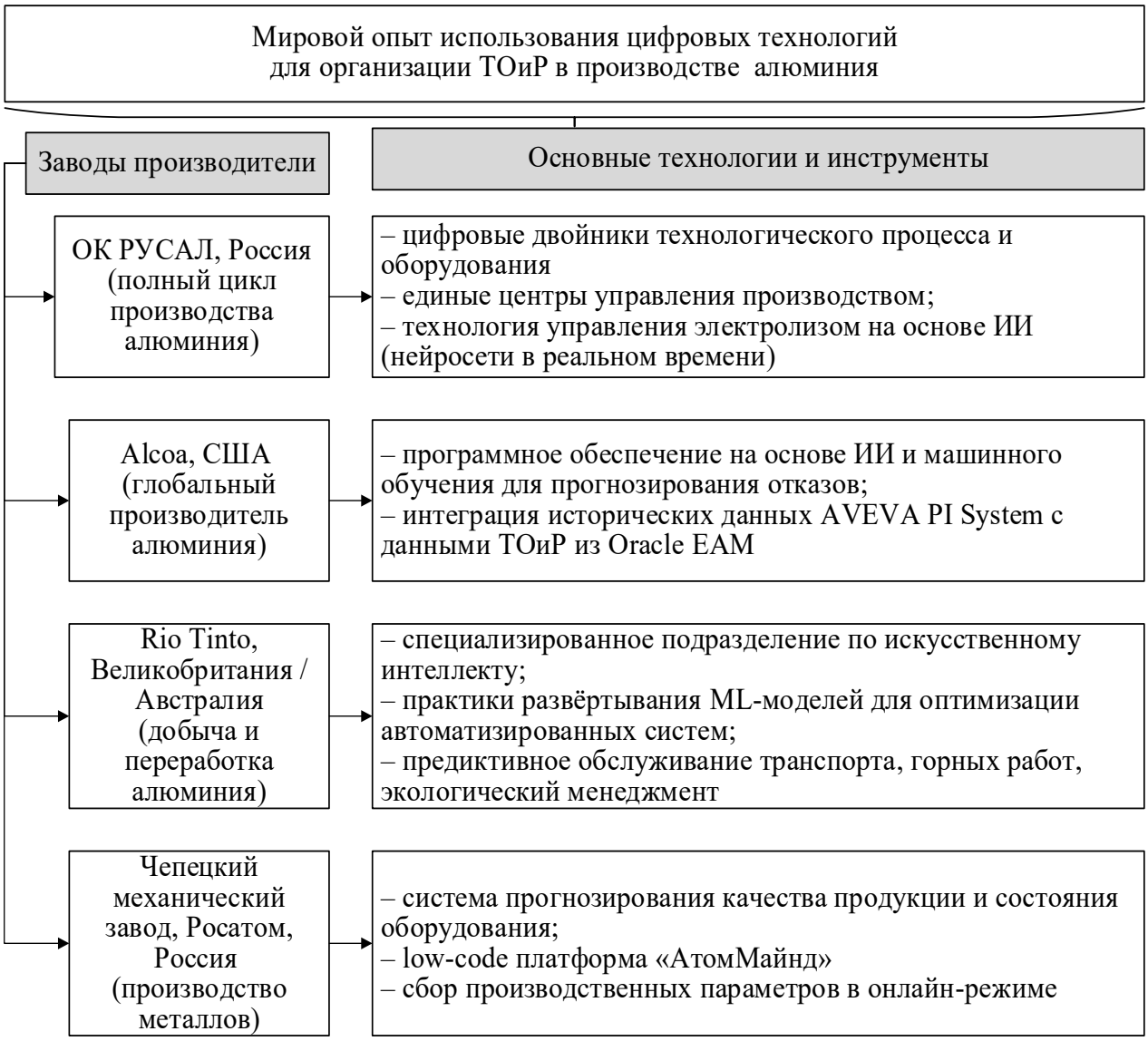


Рисунок 1 – Примеры внедрения предиктивного обслуживания и цифровых инструментов ТОиР в производстве алюминия (обобщено автором)

Выявленные тенденции и закономерности необходимо учитывать при разработке системы ТОиР для производства алюминия, отвечающей требованиям стандартов RCM и FMEA и обеспечивающей организационную надежность. Дальнейшее развитие цифровых инструментов ТОиР должно идти по пути усиления интеграции параметров качества в контур управления техническим обслуживанием и создания автоматизированных систем поддержки принятия решений, встроенных в единую цифровую платформу предприятия.

Во второй главе «Организация надежностно-ориентированного технического обслуживания оборудования с учетом влияния отказов на качество продукции» проведена диагностика проблем организации ТОиР на примере алюминиевого производства. Установлено, что доля внеплановых простоев, связанных с отказами оборудования, достигает 48% в структуре потерь, а общая эффективность оборудования (OEE) на российских предприятиях составляет 67% против 87% у мировых лидеров. Выявлен разрыв в показателях надежности: коэффициент готовности наиболее критичных узлов (камерные смесители) составляет 75%, внеплановые простои в 2,8 раза выше, чем у лучших мировых производителей (рис. 2).

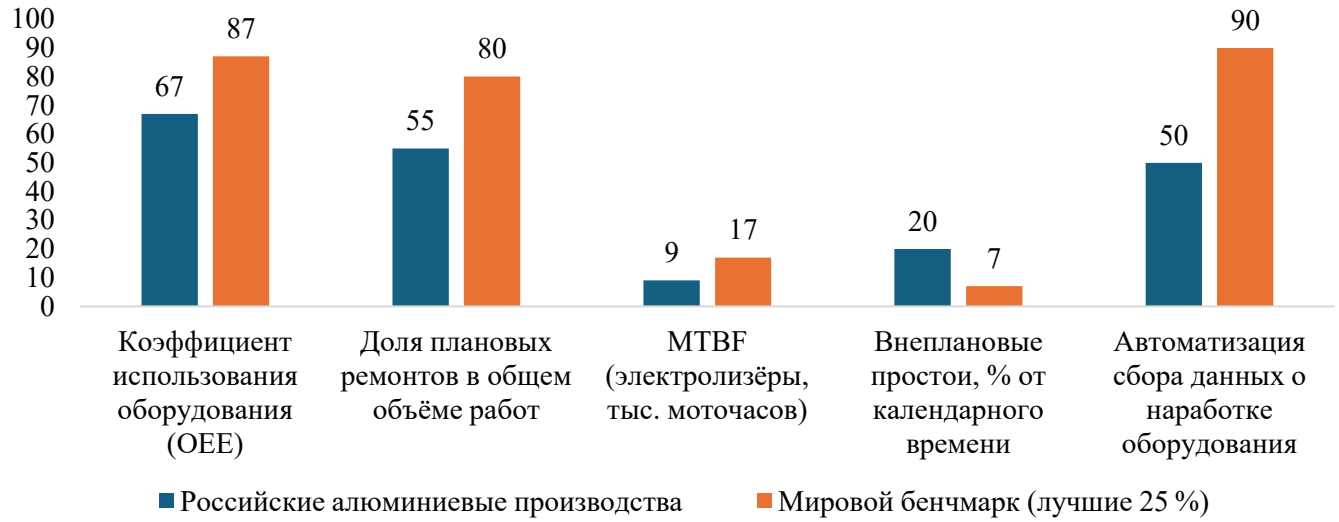


Рисунок 2 – Сравнение показателей эффективности ТОиР в производстве алюминия (построено автором)

Разработана модель надежностно-ориентированного технического обслуживания на основе методологии RCM, интегрирующая FMEA-анализ, цифровое управление и обратные связи по качеству, надежности и затратам (рис. 3). Модель включает четыре уровня и три замкнутых контура непрерывного улучшения, что обеспечивает переход от статичного RCM-анализа к динамическому управлению. Предложена трехуровневая классификация активов алюминиевого производства (критическое, существенное, вспомогательное оборудование) и для каждого класса определена оптимальная стратегия ТОиР. Расширена классическая методология RCM введением пятой категории последствий – влияния на качество продукции и модифицированного показателя RPN_Q:

$$RPN_Q = RPN * \left(1 + \frac{QS}{10}\right), \quad (1)$$

где *QS* – тяжесть последствий отказа для качества продукции (оценивается по шкале от 0 до 10); *RPN* – классическое приоритетное число риска (*S*O*D*).

На примере анодной рамы электролизера апробирован FMEA-анализ, показавший снижение приоритетного числа риска (RPN) для критического отказа (трещина анодной рамы) в 4 раза (с 240 до 60) после внедрения корректирующих мер (табл. 1).

Таблица 1 – Результат внедрения корректирующих мер по наиболее критичному виду отказа – трещине анодной рамы (предложен автором)

Параметр	До внедрения (базовый FMEA)	После внедрения (скорректированный FMEA)
Тяжесть последствий (S)	10 (критические)	10 (критические)
Вероятность возникновения (O)	4 (средняя)	2 (низкая)
Вероятность обнаружения (D)	6 (средняя)	3 (высокая)
RPN	240	60

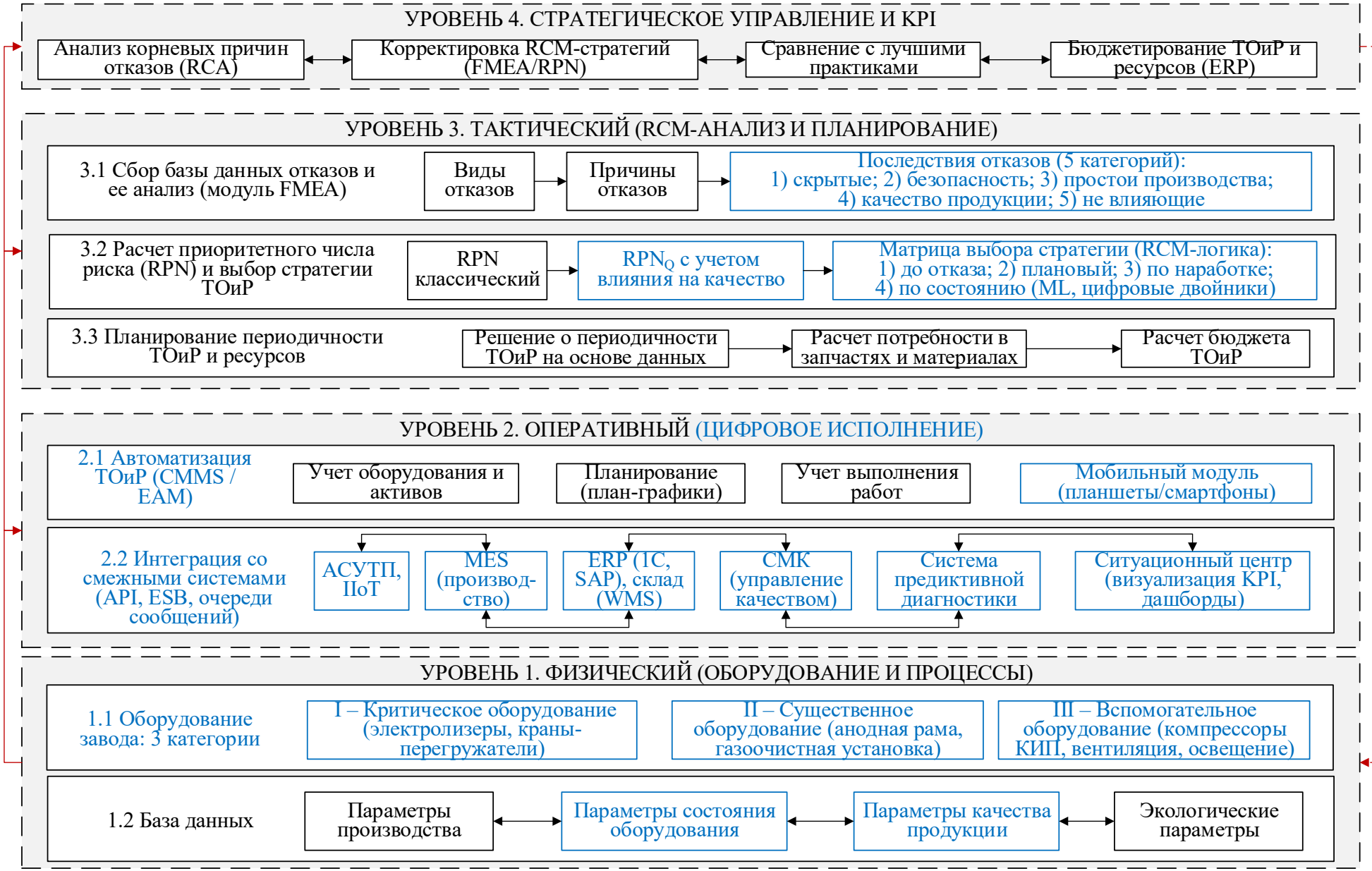


Рисунок 3 – Модель надежностно-ориентированного ТОиР на основе методологии RCM (FMEA-анализа) и цифрового управления (разработана автором)

Разработана методика организации прогнозирования качества продукции на основе данных о техническом состоянии оборудования (вибрация, температура, ток, наработка) и методов машинного обучения (рис. 4).

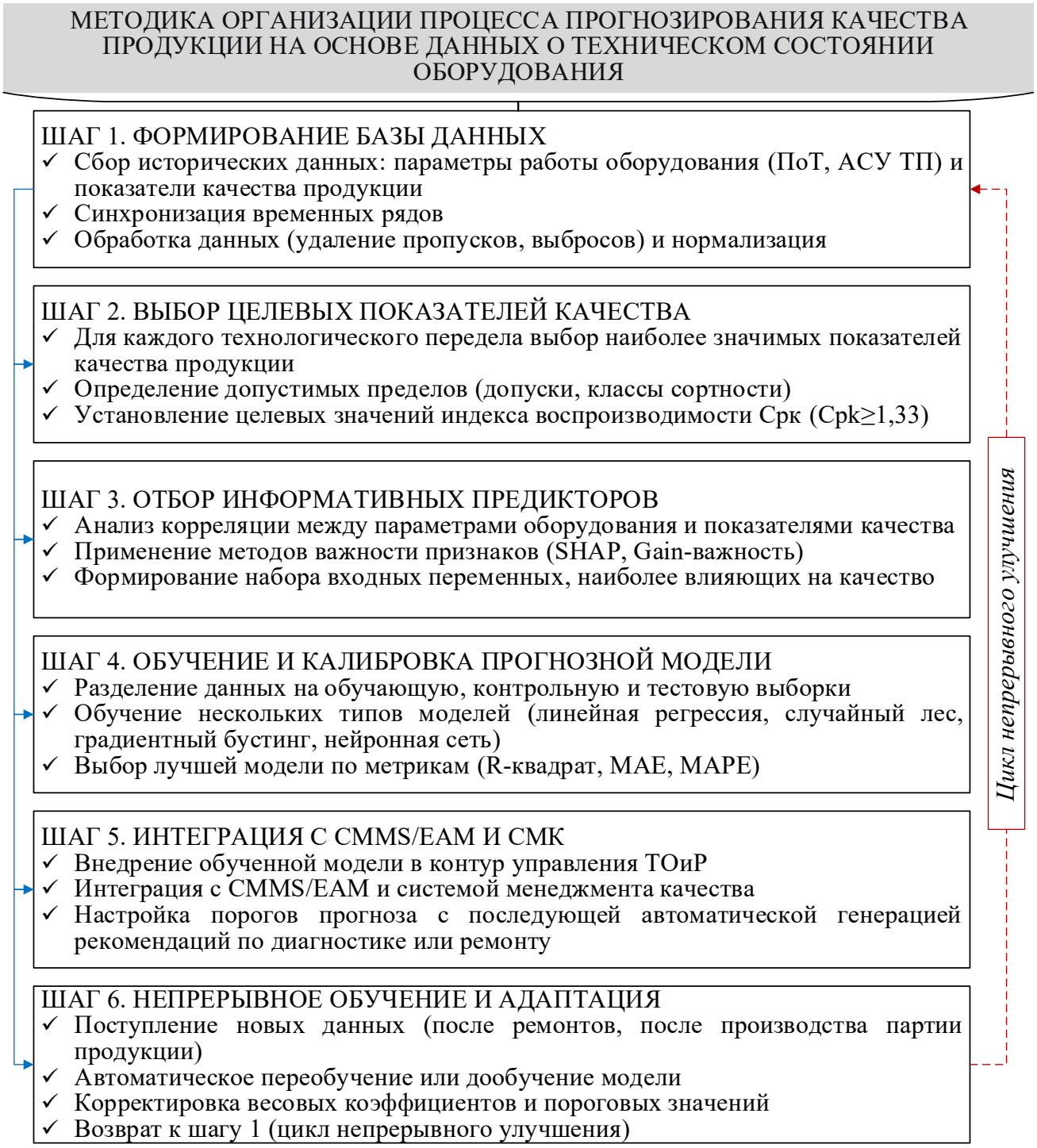


Рисунок 4 – Методика организации процесса прогнозирования качества продукции на основе данных о техническом состоянии оборудования в цифровой среде (предложена автором)

Методика включает шесть последовательных этапов: формирование интегрированной базы данных, выбор целевых показателей качества, отбор информативных предикторов, обучение и калибровку моделей, интеграцию с CMMS/EAM и СМК, непрерывное дообучение. При превышении порогового прогнозного брака система инициирует внеплановую диагностику и ремонт.

Практическая реализация подхода апробирована на примере установления зависимости овальности отверстия блока цилиндра из алюминия от уровня вибрации подшипника (порог брака – вибрация 4,5 мм/с) (табл. 2).

Таблица 2 – Этапы состояния оборудования и его влияние на овальность отверстия блока цилиндра (предложено автором)

Этап	Состояние оборудования	Вибрация (X), мм/с	Овальность (Y), мкм
1	Норма (Эталон) – Базовый уровень	2,5	3,0
2	Начало износа	3,8	5,2
3	Развитие дефекта	4,0	7,0
4	Критический уровень	4,2	9,5
5	Требуется останов – Порог брака расчетный	4,5	10,0
6	После ремонта – Норма (Эталон) – Базовый уровень	2,5	3,0

Разработанный подход позволяет создать самообучающийся контур «диагностика – прогноз – обслуживание – контроль», снижающий риск выпуска несоответствующей продукции и повышающий организационную надежность производства.

В третьей главе «Разработка структуры подсистемы технического обслуживания и ремонта в контуре единой цифровой системы управления производством» обоснован системный подход к организации технического обслуживания и ремонта в производстве алюминия; выявлены случаи «лоскутной автоматизации», когда внедрение отдельных цифровых инструментов без системной интеграции не улучшает качество управленческих решений; определены ключевые принципы системной инженерии применительно к ТОиР: сквозная прослеживаемость, рассмотрение системы «техника – человек», архитектурно-центричный подход, итеративность и верификация.

Разработана архитектура автоматизированной системы технического обслуживания и ремонта (АСУ ТОиР) как подсистемы единой системы управления производством алюминия (рис. 5). Определено место АСУ ТОиР в иерархии управления согласно стандарту ГОСТ Р МЭК 62264: взаимодействие с АСУ ТП, АСОУ, MES и ERP. Выделены функциональные модули и показаны двусторонние информационные связи с ситуационным центром, системой предиктивной диагностики, с-MES и корпоративными платформами управления данными. Предложенная архитектура обеспечивает переход от реактивного к проактивному управлению на основе данных о состоянии оборудования и предиктивной аналитике.

Разработана методика интеграции анализа надежности на основе распределения Вейбулла в цифровую систему управления ТОиР, включающая пять этапов: формирование единой базы данных отказов, периодический расчет параметров Вейбулла β и η, их хранение и визуализация, интеграция с планированием ремонтов и механизм обратной связи для актуализации модели (рис. 6). Значение параметра формы β может быть использовано для характеристики природы отказа: $\beta<1$ – приработочные отказы оборудования: дефекты проявляются на ранних этапах эксплуатации; $\beta>1$ – износовые отказы оборудования: интенсивность отказов возрастает по мере старения и износа элементов технических систем.

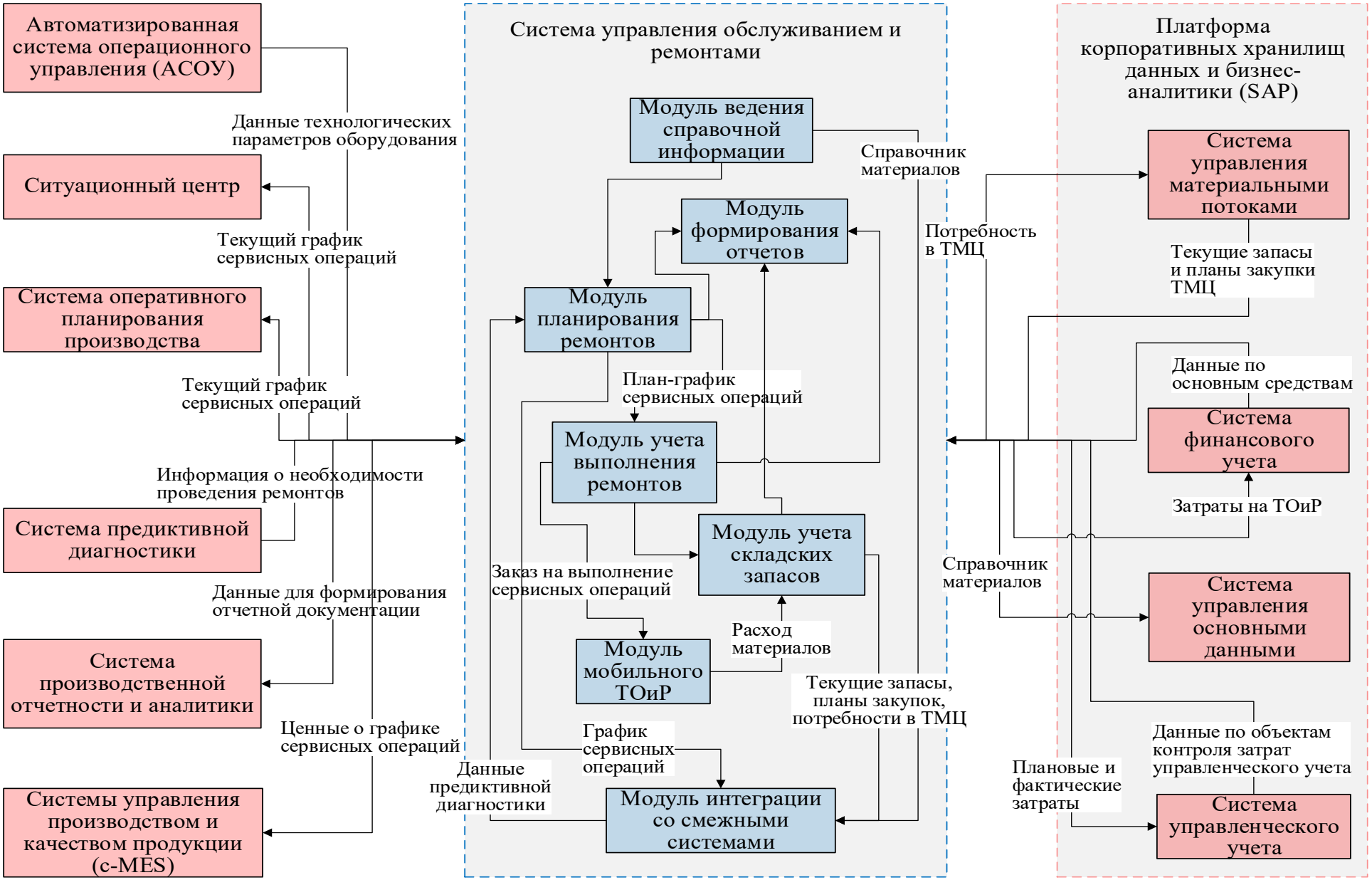


Рисунок 5 – Архитектура автоматизированной системы технического обслуживания и ремонта (АСУ ТОиР) в контуре единой системы управления производством алюминия (разработана автором)

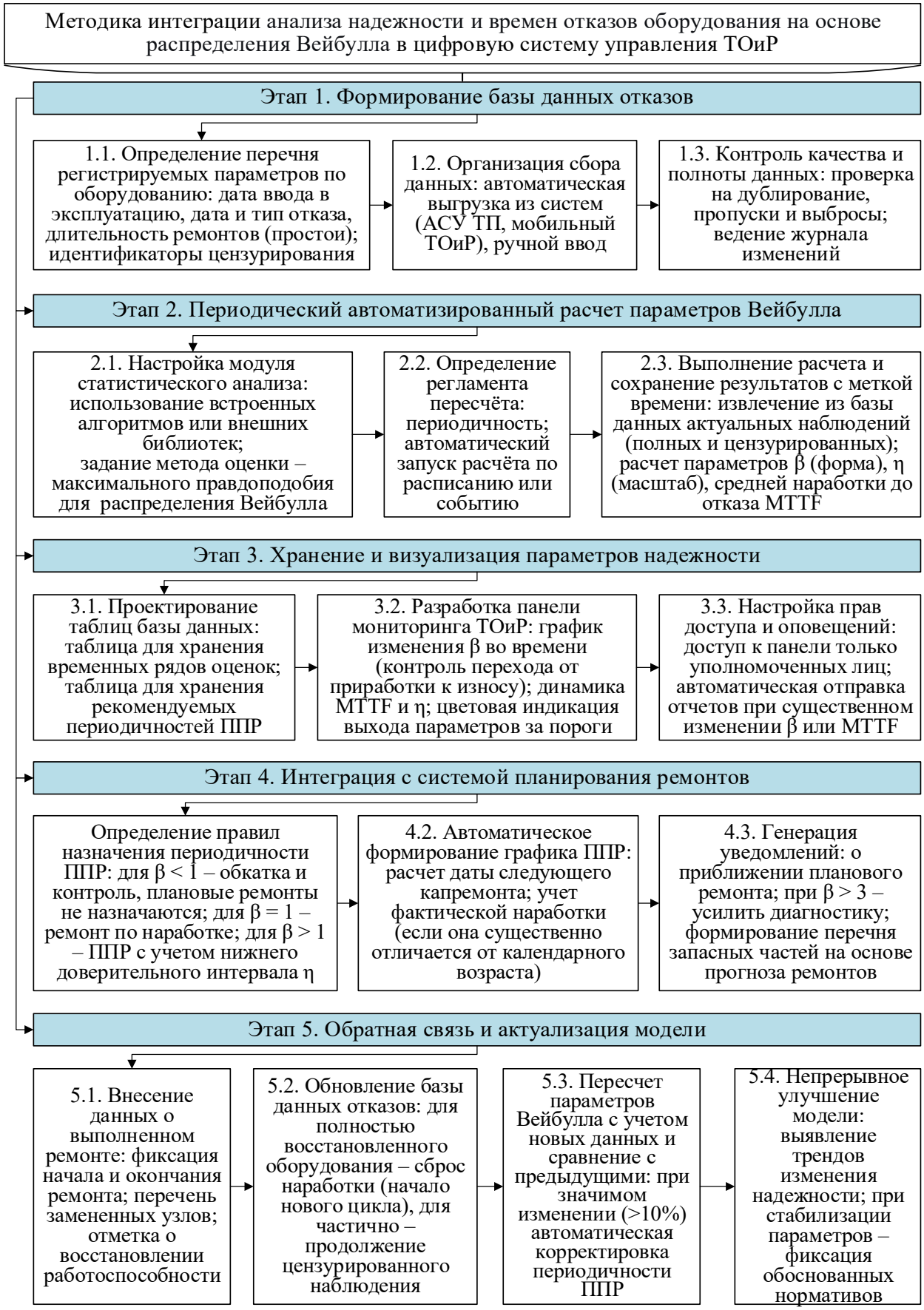


Рисунок 6 – Методика интеграции анализа надежности и отказов оборудования на основе распределения Вейбулла в цифровую систему управления ТОиР (разработана автором)

Методика базируется на требованиях ГОСТ Р 50779.27–2017 и позволяет использовать количественные оценки надежности для планирования обслуживания. В

результате обеспечивается переход от реактивного (аварийного) обслуживания к стратегии, основанной на количественных оценках износа и старения оборудования.

Разработана архитектура системы производственной отчетности и аналитики, интегрирующей результаты анализа Вейбулла в контур управления ТОиР, что создает фундамент для перехода к обслуживанию по фактическому состоянию и повышению организационной надежности алюминиевого производства (рис. 7).

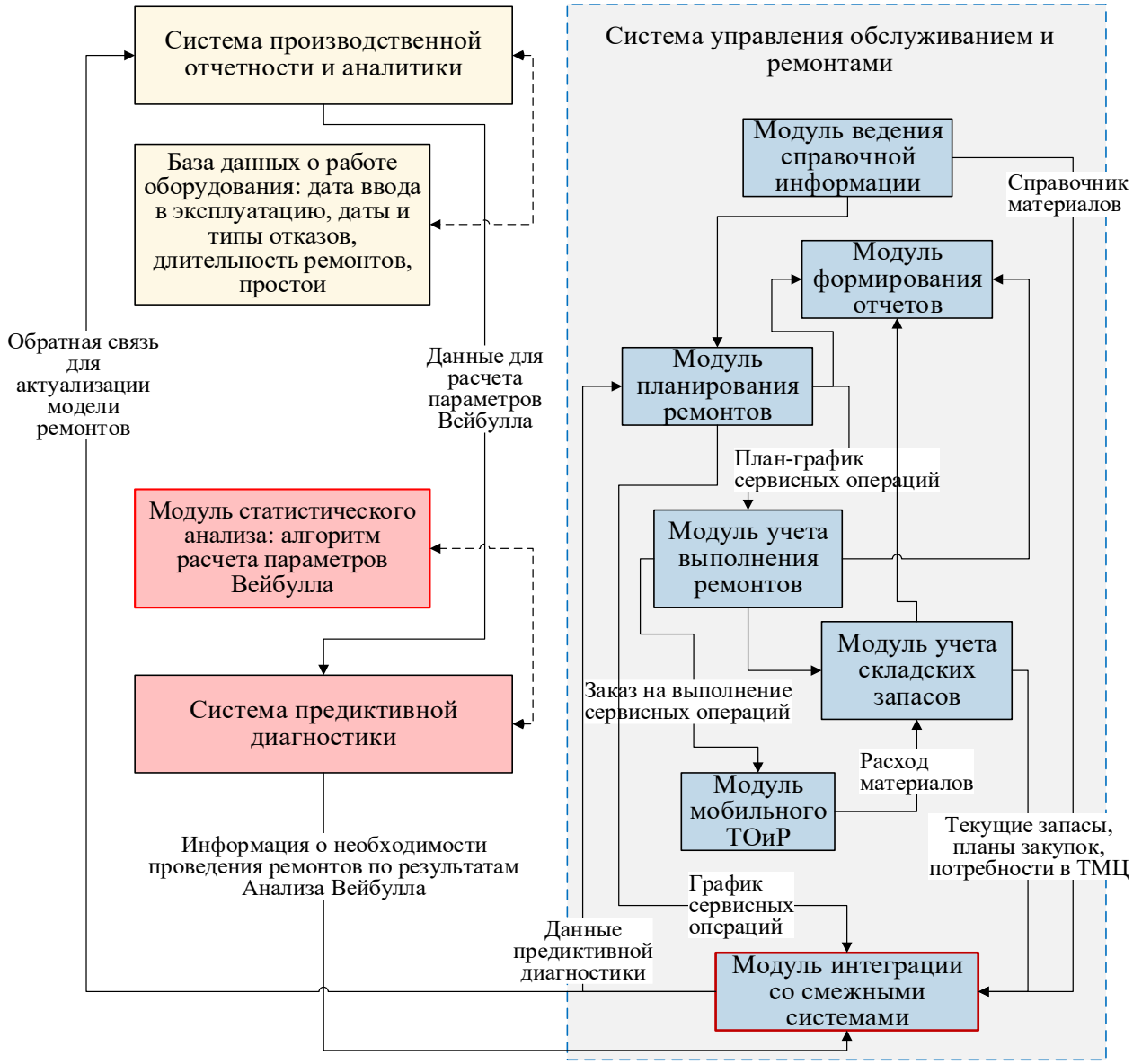


Рисунок 7 – Архитектура системы производственной отчетности и аналитики, интегрирующей результаты анализа надежности на основе распределения Вейбулла в контур управления ТОиР (разработана автором)

Предложен типовой алгоритм назначения периодичности планово-предупредительных ремонтов для оборудования с износовым типом отказов ($\beta > 1$), включающий расчет MTTF, выбор базовой периодичности в диапазоне 70–80% от MTTF, оценку риска досрочного отказа с помощью функции надежности R(t) и определение плановой даты ремонта для каждой единицы оборудования (рис. 8). Алгоритм реализует требования ГОСТ Р 27.606–2013 по надежностно-ориентированному обслуживанию (RCM) и обеспечивает автоматическую корректировку графиков при обновлении данных об отказах.

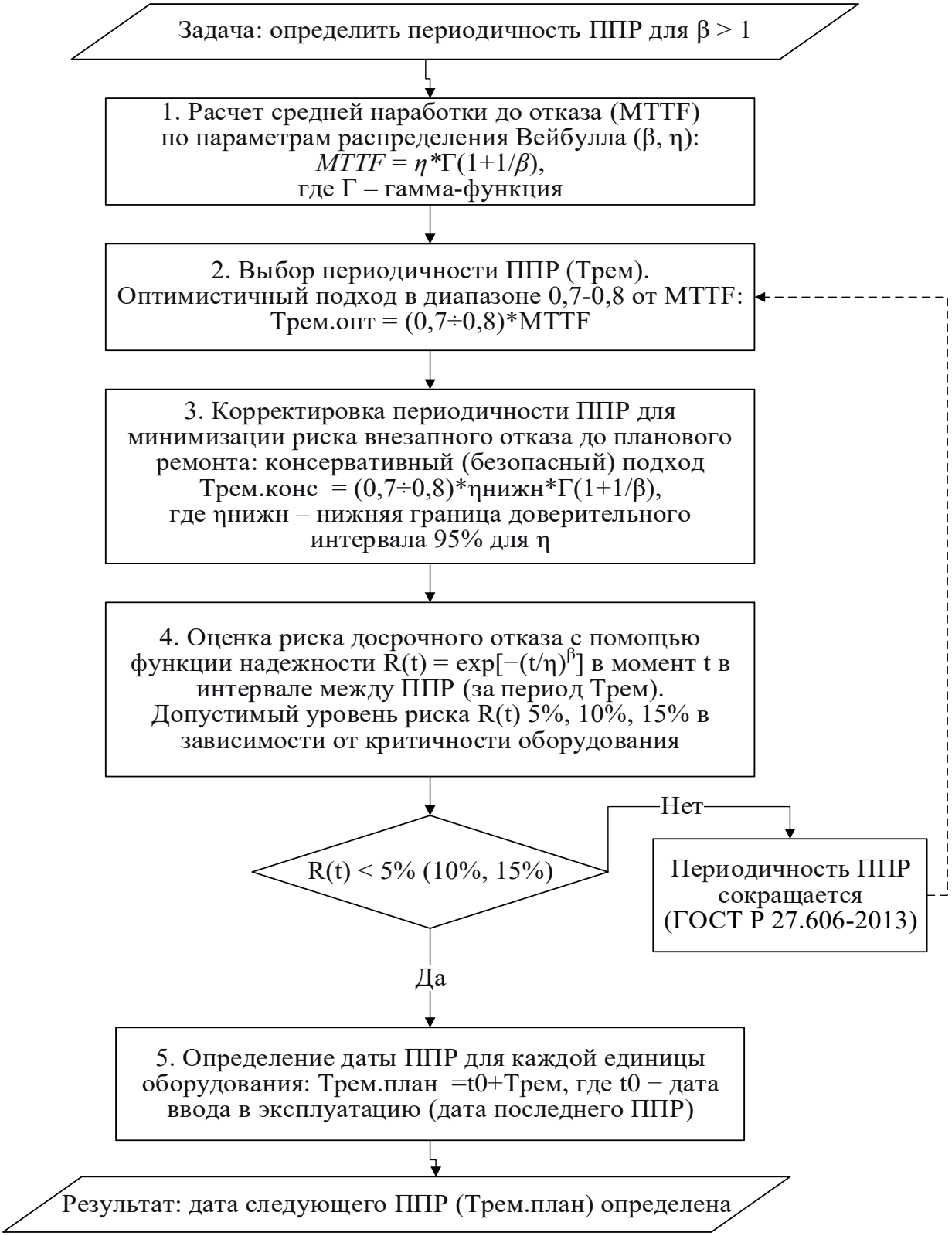


Рисунок 8 – Типовой алгоритм определения периодичности ППР для оборудования с износовым типом отказов (β > 1) (предложен автором)

Результатом алгоритма является научно обоснованная, статистически сбалансированная периодичность капитальных ремонтов, а для каждой единицы оборудования – индивидуальная плановая дата ремонта. При использовании в цифровой системе управления ТОиР алгоритм может автоматически пересчитывать периодичность при обновлении базы данных отказов, что обеспечивает адаптацию графика ремонтов к фактической надежности оборудования.

В четвертой главе «Апробация предложенных решений по надежностно-ориентированному управлению техническим обслуживанием оборудования» практически реализованы предложенные решения на примере высокоамперных электролизеров РА-300 Хакасского алюминиевого завода (ОК РУСАЛ). На основе выборки из 40 электролизеров с использованием двухпараметрического распределения Вейбулла подтверждена адекватность модели для описания отказов оборудования. Получены статистически значимые оценки параметров: параметр формы $\beta = 3{,}05 > 1$, что доказывает преобладание износовых механизмов отказов (деградация футеровки, коррозия, усталостные повреждения), параметр масштаба $\eta = 3065$ дней. Рассчитана средняя наработка до отказа (MTTF) по формуле Вейбулла с учетом гамма-функции Г, составившая 2735 дней или 7,5 лет:

$$\mathrm{MTTF} = \eta * \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) = 2735. \quad (2)$$

Рекомендована периодичность капитальных ремонтов 6-7 лет с учетом нижней границы ДИ параметра η (табл. 3). Адекватность модели подтверждена тестом Холландера-Прошана ($p = 0{,}328$) и визуальными методами оценки (гистограмма, квантильный график, функция надежности) (рис. 9, 10).

Таблица 3 – Результаты анализа надежности электролизеров (рассчитано автором)

Показатель	Значение	95% доверительный интервал (ДИ)	Интерпретация
Параметр формы β	3,05	1,90 – 4,90	износовые отказы (β > 1)
Параметр масштаба η, дней	3065	2409 – 3899	наработка, соответствующая вероятности отказа 63,2%
Средняя наработка до отказа MTTF, дней	2735	–	среднее время до отказа 7,5 лет
Рекомендуемая периодичность кап. ремонтов, лет	6-7	–	определено с учетом нижней границы ДИ параметра масштаба η

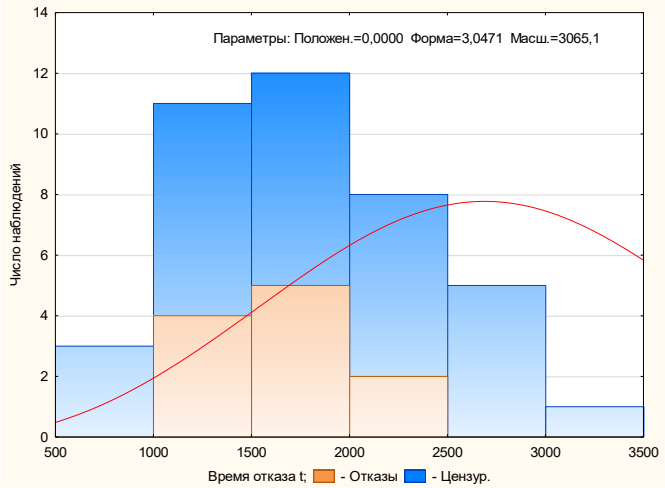


Рисунок 9 – Гистограмма распределения длительности пребывания в работе электролизеров с выделением отказов и цензурированных наблюдений

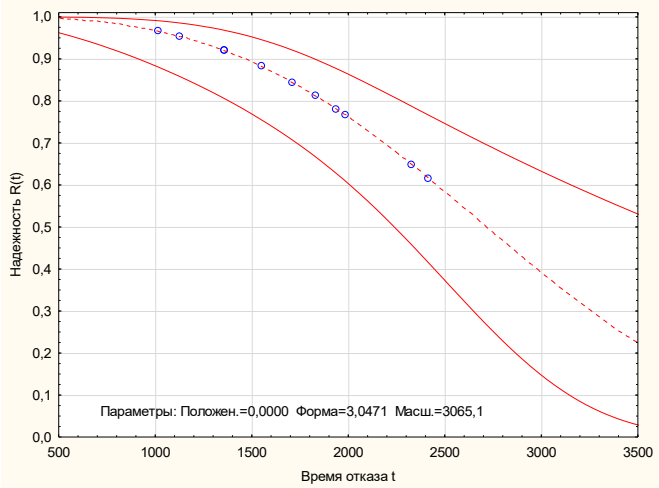


Рисунок 10 – Функция надежности (вероятность безотказной работы) по распределению Вейбулла (метод максимального правдоподобия)

Разработана гибридная (агентно-дискретно-событийная) имитационная модель системы ТОиР алюминиевого производства в среде AnyLogic. Модель отражает жизненный цикл оборудования (состояния от нормальной работы до ремонта), генерацию аварийных отказов по распределению Вейбулла, плановое обслуживание по наработке, приоритезацию заявок и использование ограниченных ремонтных бригад (рис. 11, 12).

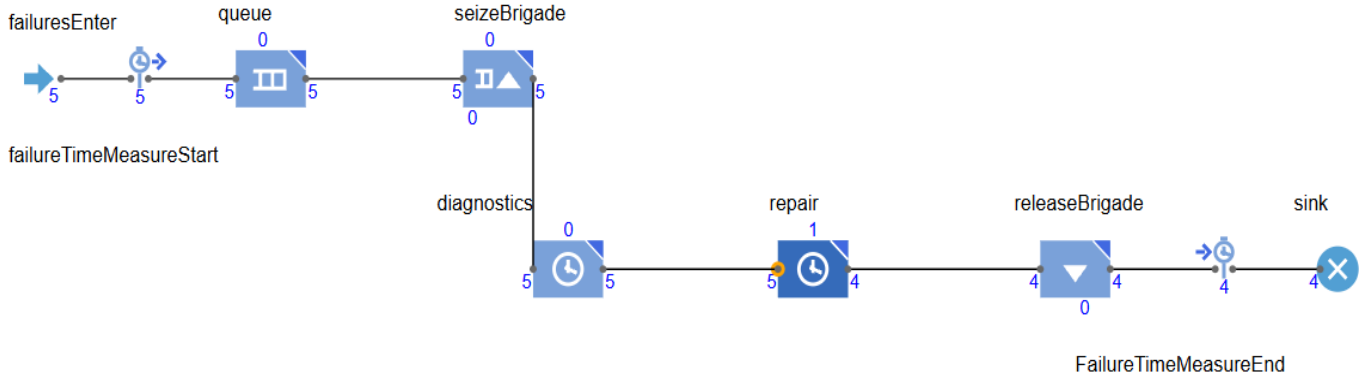


Рисунок 11 – Схема процессной части имитационной модели ТОиР: модель процесса аварийных ремонтов (построена автором)

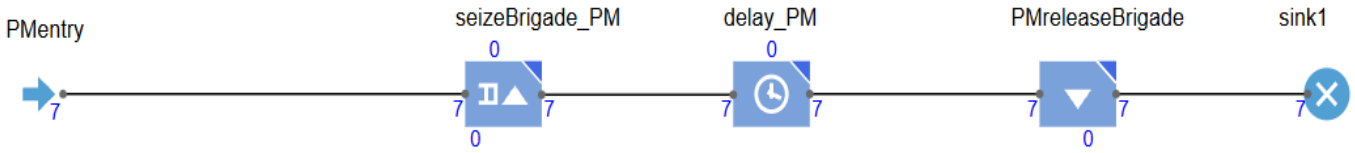


Рисунок 12 – Схема процессной части имитационной модели ТОиР: модель процесса планового ремонта (построена автором)

Сценарное моделирование с разным числом ремонтных бригад показало, что увеличение бригад с 1 до 2 сокращает общий простой оборудования на 15,6%, среднюю длительность аварийных ремонтов – на 6,1%, а средний простой на плановый ремонт – на 25% (табл. 4). Полученные количественные оценки позволяют обоснованно выбирать ресурсное обеспечение ремонтной службы, обеспечивая рациональное соотношение между затратами на персонал и потерями от простоев.

Таблица 4 – Моделирование параметров ТОиР при различном количестве доступных ремонтных бригад (рассчитано автором)

Параметр	Сценарий 1 (1 бригада)	Сценарий 2 (2 бригады)	Изменение, %
Общий простой по причине ТОиР, часов	32	27	-15,63
Средняя длительность аварийных ремонтов, часов	8,49	7,97	-6,12
Максимальная длительность аварийных ремонтов, часов	15,99	15,99	0,00
Средняя длительность простоя на плановый ремонт, часов	4	3	-25,00

Выполнена комплексная оценка эффекта от внедрения разработанных организационно-технических решений. Переход от календарных ППР к назначению периодичности на основе распределения Вейбулла позволяет снизить риск внезапных отказов на 27,5%. Интеграция предиктивной диагностики и самообучающихся моделей сокращает долю реактивных ремонтов с 45% до 20%. Оптимизация числа ремонтных бригад

путем имитационного моделирования уменьшает общий простой оборудования на 15,6%, а средний простой на плановый ремонт – на 25% (табл. 5).

Таблица 5 – Оценка эффекта от внедрения организационно-технических решений по развитию цифровой системы технического обслуживания и ремонта (рассчитана автором)

Организационно-техническое решение	Целевой показатель	Уровень анализа	Оценка эффекта
Переход от календарных ППР к назначению периодичности на основе распределения Вейбулла с использованием нижней границы 95% ДИ	Снижение риска внезапных отказов	Надежностный (вероятностный)	на 27,5%
Интеграция предиктивной диагностики (вибрация, температура, ток) и самообучающихся моделей	Сокращение доли реактивных ремонтов	Процессный (стратегический)	с 45% до 20%
Оптимизация числа ремонтных бригад с 1 до 2 (имитационное моделирование)	Сокращение общего простоя оборудования	Результативный (временной)	на 15,6%
	Сокращение среднего простоя на плановый ремонт	Операционный	на 25%

Для камерных смесителей прогнозируется рост коэффициента готовности с 0,75 до 0,89, для электролизеров РА-300 – с 0,835 до 0,93. Средняя наработка на отказ электролизеров увеличивается с 4–5 лет до 6–7 лет (рост до 40%), а приоритетное число риска для анодной рамы снижается в 4 раза (с 240 до 60 баллов) (табл. 6).

Таблица 6 – Ожидаемое улучшение показателей надежности электролизеров РА-300 в условиях цифровой системы ТОиР (рассчитано автором)

Показатель	Традиционная система ППР	Цифровая система ТОиР	Изменение
Средняя наработка на отказ (MTTF), лет	4,5	6,5	рост до 40%
Коэффициент готовности (оценка)	0,835	0,93	рост на 0,10
Приоритетное число риска (RPN) для анодной рамы, баллов	240	60	снижение в 4 раза
Периодичность капитальных ремонтов	не регламентирована, эксплуатация до отказа	6-7 лет (на основе расчета MTTF)	

Полученные результаты подтверждают достижение цели диссертации – развитие системы ТОиР на основе цифрового управления для обеспечения надежности производства алюминия. Предложенные решения могут быть масштабированы на предприятиях горно-металлургического комплекса с аналогичными условиями эксплуатации оборудования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По итогам проведенного исследования получены научно-технические результаты в области организации системы технического обслуживания оборудования для управления отказами и обеспечения качества продукции с использованием цифрового управления.

1. Разработана модель надежностно-ориентированного ТОиР на основе методологии RCM 4.0, интегрирующая FMEA-анализ, цифровое управление и обратные связи по качеству, надежности и затратам. Модель включает четыре уровня и три замкнутых контура непрерывного улучшения, что обеспечивает переход от статичного RCM-анализа к динамическому управлению в реальном времени. Расширена классическая методология RCM введением пятой категории последствий – влияния на качество продукции, что позволило разработать модифицированный показатель RPN_Q. На этой основе создана методика прогнозирования качества с использованием машинного обучения, интегрирующая диагностику оборудования в контур управления ТОиР.

2. Обоснован системный подход к организации ТОиР, позволяющий преодолеть «лоскутную автоматизацию» путем интеграции цифровых инструментов. Структурированы прогрессивные решения (IIoT, цифровые двойники, машинное обучение). Ключевым результатом является разработка архитектуры АСУ ТОиР как подсистемы единой системы управления производством алюминия. В соответствии с ГОСТ Р МЭК 62264 определено место АСУ ТОиР в иерархии, установлены двусторонние связи с ситуационным центром, системой предиктивной диагностики и c-MES. Предложенная архитектура обеспечивает переход от реактивного управления к проактивному на основе данных о состоянии оборудования и предиктивной аналитики.

3. Разработана методика интеграции анализа надежности на основе распределения Вейбулла в цифровую систему управления ТОиР, включающая пять этапов от формирования базы отказов до актуализации модели после ремонтов. На ее основе предложен типовой алгоритм назначения периодичности ППР для оборудования с износовыми отказами ($\beta > 1$): расчет MTTF, выбор периодичности 70-80% от MTTF, оценка риска досрочного отказа R(t) на допустимом уровне 5-15%. Разработана архитектура производственной отчетности, интегрирующая модуль статистического анализа (β, η) и предиктивной диагностики с CMMS/EAM, что создает фундамент для обслуживания по фактическому состоянию.

4. Практическая реализация предложенных решений на предприятиях АО «РУСАЛ» подтвердила адекватность распределения Вейбулла для описания отказов электролизеров РА-300 (износовые отказы). Рассчитанная средняя наработка на отказ в 7,5 лет позволила обосновать периодичность капремонтов в 6-7 лет. Разработанная имитационная модель показала, что увеличение ремонтных бригад с 1 до 2 сокращает общий простой на 15,6%. Прогнозируется рост коэффициента готовности электролизеров с 0,835 до 0,93. Интеграция предиктивной диагностики оборудования с самообучающимися моделями позволила установить пороговые значения вибрации и температур, при превышении которых инициируется внеплановая диагностика, что снижает риск выпуска бракованной продукции (по примесям Fe и Si – до 1,0%, по геометрии анодов – в 4 раза по RPN).

Рекомендуется использовать результаты исследования в практике предприятий с непрерывным производством для реализации проектов цифровой трансформации систем

технического обслуживания оборудования; при формировании отраслевых программ повышения организационной надежности производства; при актуализации программы стандартизации алюминиевой промышленности и разработке корпоративных стандартов ТОиР, а также при модернизации систем управления качеством продукции на основе предиктивной диагностики и анализа надежности оборудования.

Перспективы темы заключаются в развитии системы стандартов в области организации надежностно-ориентированного технического обслуживания для непрерывных производств, включая стандартизацию методов сбора и обработки данных об отказах, методик расчета межремонтных интервалов, а также требований к интеграции систем ТОиР с системами менеджмента качества и предиктивной аналитики.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

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

1. Чиж, Д. В. Системный подход к развитию организации технического обслуживания и ремонта / Д. В. Чиж, Т. В. Малышева // Компетентность. – 2026. – № 4. – С. 48-54. – 0,69 п. л./0,42 п. л.

2. Чиж, Д. В. Имитационная модель процесса технического обслуживания алюминиевого производства / Д. В. Чиж, Т. В. Малышева // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2026. – № 8. – С. 104-114. – 1,27 п. л./0,89 п. л.

3. Чиж, Д. В. Организационные аспекты прогнозирования отказов оборудования для целей обеспечения качества продукции в цифровом производстве / Д. В. Чиж, А. И. Лысенков // Информационно-экономические аспекты стандартизации и технического регулирования. – 2026. – №2. – С. 68-72. – 0,58 п. л./0,38 п. л.

4. Чиж, Д. В. Применение анализа видов и последствий отказов (FMEA) для надежностно-ориентированного технического обслуживания оборудования (RCM) в производстве алюминия / Д. В. Чиж // Русский инженер. – 2026. – № 02 (91). – С. 63-67. – 0,81 п. л./0,62 п. л.

Свидетельство о регистрации электронного ресурса

5. Чиж Д.В., Малышева Т.В. Алгоритм определения периодичности планово-предупредительных ремонтов на основе распределения Вейбулла для оборудования с износовым типом отказов // Свидетельство о регистрации электронного ресурса № 25652 от 05.08.2026г. ОФЭРНиО.

Публикации в других научных изданиях и сборниках материалов конференций

6. Чиж, Д. В. Внедрение инструментов комплексной автоматизации производства (ERP, SCM, CRM) на отечественной операционной платформе / Д. В. Чиж // Актуальные тренды цифровой трансформации промышленных предприятий: сборник статей Всероссийской научно-практической конференции, Казань, 30–31 октября 2024 года. – Курск: ЗАО «Университетская книга», 2024. – С. 265-268. – 0,23 п. л./0,17 п. л.

7. Чиж, Д. В. Нейросетевое прогнозирование перехода предприятий с цифровым администрированием на отечественные операционные системы Linux / Т. В. Малышева, Д.

В. Чиж // Математические методы в технологиях и технике (ММТТ–37). – Казань, 2024. – № 1. – С. 105-108. – 0,23 п. л./0,17 п. л.

8. Чиж, Д. В. Внедрение искусственного интеллекта в алгоритм принятия решений по управлению качеством на основе диагностики оборудования / Д. В. Чиж // Эффективные системы менеджмента: Стандартизация. Экономика данных. Кадровое и технологическое лидерство: сборник статей XIII Международного научно-практического форума, Казань, 26–28 марта 2026 года. – Казань, 2026. – С. 424-427. – 0,23 п. л./0,17 п. л.

9. Чиж, Д. В. Цифровые инструменты технического обслуживания и ремонта оборудования в производстве алюминия / Д. В. Чиж // Научные исследования и разработки 2026: сборник статей VI Международной научно-практической конференции, Пенза, 25 апреля 2026 года. – Пенза, 2026. – С. 10-12. – 0,17 п. л./0,12 п. л.

10. Чиж, Д. В. Управление качеством технических систем производства алюминия на основе автоматизации процессов обслуживания оборудования / Д. В. Чиж, Т. В. Малышева // Сборник научных статей «Технологии и техника: пути инновационного развития» (ТМ-17). – Воронеж, 2026. – С. 470-743. – 0,23 п. л./0,17 п. л.