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

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

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, доцент
Малышева Татьяна Витальевна

Казань–2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

СПИСОК АББРЕВИАТУР 4
ВВЕДЕНИЕ 6
1 АНАЛИЗ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИХ ПОДХОДОВ К ОРГАНИЗАЦИИ ОБСЛУЖИВАНИЯ И РЕМОНТА ОБОРУДОВАНИЯ НЕПРЕРЫВНОГО ПРОИЗВОДСТВА 16
1.1 Современное состояние изученности темы организации систем технического обслуживания и ремонта в производстве алюминия 16
1.2 Анализ базы стандартов в области технического обслуживания и ремонта производства алюминия 28
1.3 Обзор цифровых инструментов и лучших практик управления техническим обслуживанием производственного оборудования 42
ВЫВОДЫ ПО ПЕРВОЙ ГЛАВЕ 53
2 ОРГАНИЗАЦИЯ НАДЕЖНОСТНО-ОРИЕНТИРОВАННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ ОТКАЗОВ НА КАЧЕСТВО ПРОДУКЦИИ 56
2.1 Диагностика простоев, внеплановых отказов и потерь качества продукции при техническом обслуживании оборудования на предприятиях 56
2.2 Модель надежностно-ориентированного технического обслуживания оборудования на основе методологии RCM (FMEA-анализа) и цифрового управления 64
2.3 Методика организации процесса прогнозирования качества продукции на основе моделей машинного обучения и интеграции систем технического обслуживания и менеджмента качества 79
ВЫВОДЫ ПО ВТОРОЙ ГЛАВЕ 91
3 РАЗРАБОТКА СТРУКТУРЫ ПОДСИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ И РЕМОНТА В КОНТУРЕ ЕДИНОЙ ЦИФРОВОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВОМ 94

3.1 Системный подход к организации технического обслуживания в производстве алюминия на основе АСУ ТОиР (CMMS-систем)..... 94
3.2. Архитектура автоматизированной системы технического обслуживания и ремонта в контуре единой системы управления производством алюминия 108
3.3 Методика интеграции анализа надежности и времен отказов оборудования на основе распределения Вейбулла в цифровую систему управления техническим обслуживанием..... 119
ВЫВОДЫ ПО ТРЕТЬЕЙ ГЛАВЕ..... 130
4 АПРОБАЦИЯ ПРЕДЛОЖЕННЫХ РЕШЕНИЙ ПО НАДЕЖНОСТНО-ОРИЕНТИРОВАННОМУ УПРАВЛЕНИЮ ТЕХНИЧЕСКИМ ОБСЛУЖИВАНИЕМ ОБОРУДОВАНИЯ..... 133
4.1 Прогнозирование периодичности ремонтов электролизеров завода по производству алюминия на основе оценок средней наработки до отказа (анализ Вейбулла) 133
4.2 Имитационное моделирование процесса технического обслуживания в производстве алюминия в среде AnyLogic на основе времени операций и параметров процесса..... 144
4.3 Оценка эффекта от внедрения организационно-технических решений по развитию цифровой системы технического обслуживания и ремонта 159
ВЫВОДЫ ПО ЧЕТВЕРТОЙ ГЛАВЕ..... 166
ЗАКЛЮЧЕНИЕ 169
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ..... 172
ПРИЛОЖЕНИЯ..... 191
ПРИЛОЖЕНИЕ А 192
Доверительные пределы для функции распределения и надежности (метод максимального правдоподобия) на основе распределения Вейбулла с параметрами $\beta = 3{,}047$, $\eta = 3065$ дней..... 192
ПРИЛОЖЕНИЕ Б..... 193
Накопленные вероятности отказов (функции распределения Вейбулла) Значения процентиля P (% отказов на момент t)..... 193

СПИСОК АББРЕВИАТУР

АСОУ – автоматизированная система оперативного управления

АСУ ТОиР – автоматизированная система управления техническим обслуживанием и ремонтом

АСУ ТП – автоматизированная система управления технологическим процессом

ЖЦ – жизненный цикл

ИИ – искусственный интеллект

ОТК – отдел технического контроля

ППР – планово-предупредительный ремонт

СМК – система менеджмента качества

ТД – техническая документация

ТОиР – техническое обслуживание и ремонт

ЧПУ – числовое программное управление

AI – Искусственный интеллект (Artificial Intelligence)

ARO – Оптимизация надежности активов (Asset Reliability Optimization)

CBM – Техническое обслуживание по состоянию (Condition-Based Maintenance)

CMMS – Компьютеризированная система управления техническим обслуживанием (Computerized Maintenance Management System)

Cpk – Индекс воспроизводимости процесса (Process Capability Index)

DFMEA – Анализ видов и последствий отказов конструкции (Design Failure Mode and Effects Analysis)

EAM – Управление активами предприятия (Enterprise Asset Management)

ERP – Планирование ресурсов предприятия (Enterprise Resource Planning)

FMEA – Анализ видов и последствий отказов (Failure Mode and Effects Analysis)

FMECA – Анализ видов, последствий и критичности отказов (Failure Mode, Effects and Criticality Analysis)

IoT – интернет вещей (Internet of Things)

MAE – Средняя абсолютная ошибка (Mean Absolute Error)

MAPE – Средняя абсолютная процентная ошибка (Mean Absolute Percentage Error)

MES – Исполнительная система производства (Manufacturing Execution System)

MTBF – Средняя наработка на отказ (Mean Time Between Failures)

MTTR – Среднее время восстановления (Mean Time To Repair)

NLP-алгоритм – Алгоритм обработки естественного языка (Natural Language Processing algorithms)

OEE – Общая эффективность оборудования (Overall Equipment Effectiveness)

PdM – Предиктивное техническое обслуживание (Predictive Maintenance)

PFMEA – Анализ видов и последствий отказов технологического процесса (Process Failure Mode and Effects Analysis)

PLM – управление жизненным циклом изделия (Product Lifecycle Management)

RCM – Техническое обслуживание, ориентированное на надежность (Reliability-Centered Maintenance)

RPN – Приоритетное число риска (Risk Priority Number)

SCADA – Диспетчерское управление и сбор данных (Supervisory Control And Data Acquisition)

SHAP – Аддитивные объяснения Шепли (SHapley Additive exPlanations)

TPM – Всеобщий уход за оборудованием (Total Productive Maintenance)

TQM – Всеобщее управление качеством (Total Quality Management)

ВВЕДЕНИЕ

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. [49,50,72,80,34,33]. 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. [108,110,111,136] 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., Воронина В.В., Колыхалина В.М., Малышевой Т.В., Савиновой М.Е., Тулинова А.Б., Тюменева Ю.Я., Шайдуллина Р.А. [4,5,6,13,44,55,53,86,103], а также зарубежных авторов Будихарджо К., Йетрина М., Пебриянто Р., Сусрияти Р., Харма Б. [114,132,145].

Вопросы цифровизации процессов ТОиР и предиктивной аналитики исследовались Варзиным В.В., Леуновым А.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. [51,73,84,88,104, 63], а также зарубежными учеными Ерзамаевым М.П., Ким А.С., Куанг Ж., Санчесом Ф., Хартлибом П., Чжу Дж., Ян Х. [118,117,137,121,137,64].

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., Клентак А.С., Кудрявцевой С.С., Мартусевич Е.А., Немчиновой Н.В., Одинокова С.А., Рыбенко И.А., Скобелева К.Д, Ставцева Д.А., Терпенева А.В., Усатых Е.В., Фоминой О.Н., Цурикова Д.В. [1,38,48,58,90,94,36,34,67,41,81]. 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 алюминия 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 пп.: 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 (пункт 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 (пункт 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 (пункт 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 – 3,25 п. л.), из них 4 статьи в журналах из перечня рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК при Министерстве науки и высшего образования РФ – «Компетентность», «Русский инженер», «Информационно-экономические аспекты стандартизации и технического регулирования», «Известия Тульского государственного университета. Технические науки», статьи в сборниках научно-практических международных и всероссийских конференциях, получено свидетельство о регистрации электронного ресурса.

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.

1 АНАЛИЗ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИХ ПОДХОДОВ К ОРГАНИЗАЦИИ ОБСЛУЖИВАНИЯ И РЕМОНТА ОБОРУДОВАНИЯ НЕПРЕРЫВНОГО ПРОИЗВОДСТВА

1.1 Современное состояние изученности темы организации систем технического обслуживания и ремонта в производстве алюминия

Производство алюминия является одной из наиболее капиталоемких и технологически сложных отраслей с непрерывным производственным процессом. В условиях санкционного давления и необходимости обеспечения технологического суверенитета перед российскими алюминиевыми заводами стоит задача не только сохранения, но и наращивания выпуска. Согласно «Стратегии развития металлургической промышленности Российской Федерации на период до 2030 года», утвержденной Распоряжением Правительства РФ № 4260-р от 28 декабря 2022 года, плановый показатель производства алюминия к 2030 году по консервативному сценарию составит порядка 4,48 млн тонн, а по базовому – 4,90 млн тонн в год [81]. Достижение этих ориентиров требует кардинального повышения эффективности использования оборудования и внедрения передовых методов управления его надежностью. Техническое обслуживание и ремонт (ТОиР) в этой отрасли имеют ключевое значение, поскольку непрерывность электролитического получения алюминия, работа газоочистных систем, анодомастерских и кранов-перегружателей определяют стабильность технологического процесса и качество готовой продукции чушек, катанки, анодной массы.

Производство первичного алюминия осуществляется методом электролитического восстановления оксида алюминия (Al_2O_3) в расплаве криолита (Na_3AlF_6) с применением углеродистых анодов. Наибольший удельный вес в структуре себестоимости готового металла занимают три основных ресурсных компонента: глинозем (Al_2O_3), электрическая энергия, а

также расходуемый углеродный анод (или анодная масса для самообжигающихся анодов). Технологические нормы расхода для получения 1 тонны первичного алюминия составляют: 1,92 т глинозема, 13 000-16 000 кВтч электроэнергии, 425-550 кг анодной продукции или соответствующей анодной массы. В свою очередь, производство анодов требует использования сырьевых материалов – нефтяного кокса и каменноугольного пека.

Добыча минерального сырья и непосредственно производство первичного алюминия ведется в России Объединенной компанией «РУСАЛ» (ОК «РУСАЛ»): алюминиевая промышленность представлена 12 предприятиями, из которых 10 являются алюминиевыми заводами (производство первичного алюминия) и 2 завода по производству глинозема (рисунок 1.1.1).



Рисунок 1.1.1 – Масштаб предприятий алюминиевой промышленности России [108]

Алюминиевые заводы расположены в 8 регионах: Волгоградская область (ВгАЗ), Республика Карелия (НАЗ), Мурманская область (КАЗ), Свердловская область (УАЗ и БАЗ), Кемеровская область (Новокузнецкий АЗ), Республика Хакасия (Саяногорский АЗ), Красноярский край (КрАЗ,

Богучанский АЗ), Иркутская область (БрАЗ, ИркАЗ). Глиноземные заводы находятся в Ленинградской области (Пикалевский) и Красноярском крае (Ачинский). Таким образом, основная часть алюминиевых мощностей сосредоточена в Сибирском и Уральском федеральных округах, тогда как глиноземное производство имеет более западную и центрально-сибирскую локализацию [108].

Специфика алюминиевого производства предъявляет повышенные требования к системам ТОиР: высокотемпературные агрегаты электролизеры, агрессивная химическая среда (фтористые соединения, смолистые вещества), значительные динамические нагрузки на крановое оборудование, запыленность. Согласно отраслевой статистике, доля внеплановых простоев, связанных с отказами оборудования, достигает 25-35% от общего времени остановов. Исследования на металлургических предприятиях показывают, что 33,2% простоев могут быть классифицированы как «горячие», при этом в ряде цехов доля простоев, вызванных проблемами в системе ТОиР, достигает 40% [75,31]. В то же время по оценкам экспертов, оборудование в промышленности в среднем простаивает 5-10% рабочего времени, и около половины этих простоев связано с его поломками. Более того, до 40% отказов являются следствием неэффективной организации технического обслуживания, а по данным надзорных органов, неудовлетворительная организация ремонтных работ является причиной более чем 60% инцидентов на производстве.

Первичный алюминий производится путем электролитического восстановления оксида алюминия (глинозема), растворенного в расплавленном электролите (криолите) при температуре до 960°С (рисунок 1.1.2). На каждом этапе производства используется несколько единиц технологического оборудования (таблица 1.1.1).

На этапе производства глинозема способом Байер-спекания применяются дробилки, шаровые мельницы, автоклавные батареи, сгустители, фильтры, вращающиеся печи, декомпозеры, печи для кальцинации. Часть оборудования (дробилки, мельницы, сгустители)

применяется на нескольких переделах (подготовка шихты, переработка спека, переработка алюминатных растворов).

Технологическая линия производства анодной массы оснащена оборудованием для приема, дробления, прокалки и сортировки нефтяного кокса, а также для подготовки каменноугольного пека. Для механической обработки сырья применяются двухвалковые зубчатые дробилки, молотковые дробилки, шаровые барабанные мельницы и универсальные грохоты; термическая обработка осуществляется во вращающихся прокалочных печах барабанного типа и сушильных агрегатах. Завершающая стадия дозирования, смешения и формования брикетов реализована с помощью весовых дозаторов, смесителей и формовочных устройств, причем на всех этапах предусмотрены системы улавливания пыли и возгонов пека.

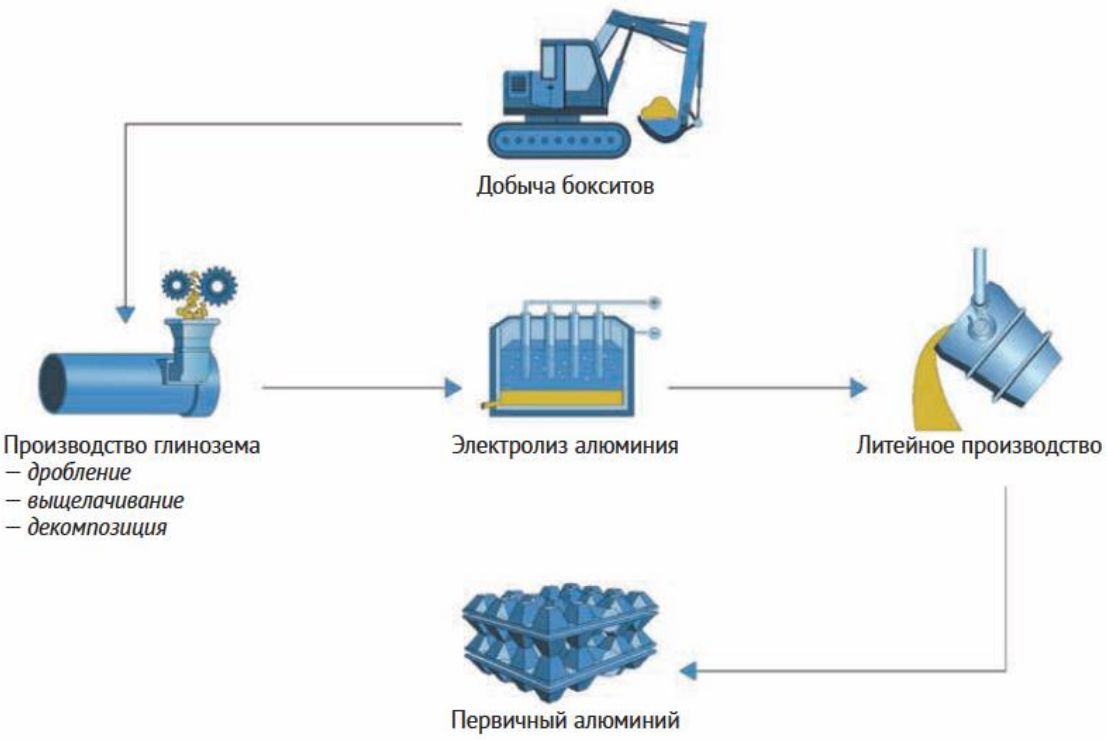


Рисунок 1.1.2 – Схема производства первичного алюминия [108]

Технологическая цепочка производства обожженных анодов включает подготовку сырья (нефтяной кокс и огарки анодов) с использованием двухвалковых зубчатых дробилок, молотковых дробилок, универсальных

грохотов и шаровых барабанных мельниц для дробления, размола и рассева на фракции.

Таблица 1.1.1 – Основное технологическое оборудование по этапам производства первичного алюминия (составлено автором по [108])

Этапы производства	Основное технологическое оборудование
Производство глинозема способом Байер-спекания	– дробилки; – шаровые мельницы; – автоклавные батареи; – сгустители; – фильтры; – вращающиеся печи; – декомпозеры; – печи для кальцинации
Получение анодной массы	– двухвалковая зубчатая дробилка; – вращающаяся прокалочная печь барабанного типа; – дробилка молотковая однороторная; – дробилка двухвалковая; – грохот универсальный; – шаровые барабанные мельницы; – сушильный агрегат; – пекоприемники; – пекоплавители; – весовые дозаторы; – смесители; – формовочное устройство
Производство обожженных анодов	– двухвалковая зубчатая дробилка; – молотковая однороторная дробилка; – двухвалковая дробилка; – универсальный грохот; – шаровые барабанные мельницы; – пекоприемники; – пекоплавители; – весовые дозаторы; – смесители; – вибропресс; – многокамерная кольцевая печь открытого типа; – печи ИЧТ; – конвейеры; – системы очистки огарков; – дробилки для огарков
Производство первичного алюминия	– склады, силосы, бункера для хранения сырья; – электролизеры с самообжигающимися анодами (тип Содерберга); – электролизеры с предварительно обожженными анодами (тип ОА)

Для пекоподготовки применяются пекоприемники и пекоплавители; дозирование и смешение компонентов осуществляются весовыми дозаторами и смесителями с последующим формованием «зеленых» анодов на вибропрессе. Обжиг «зеленых» анодов выполняется в многокамерных кольцевых печах открытого типа, а финишные операции монтажа анодов и переработки огарков ведутся с использованием печей ИЧТ, конвейеров и систем очистки совместно с дробилками для огарков.

Технологический процесс получения первичного алюминия начинается с приема, хранения и дозирования сырьевых компонентов (глинозема, фторсолей, анодной массы или обожженных анодов) на складах, в силосах и бункерах. Основной передел – электролитическое восстановление алюминия – осуществляется в электролизерах двух типов: с самообжигающимися анодами (технология Содерберга) либо с предварительно обожженными анодами (технология ОА). Выходящим продуктом является алюминий-сырец (первичный алюминий), а в качестве побочных материальных потоков образуются газообразные выбросы, твердые фториды, а также отходы – отработанная футеровка, угольная пена и огарки анодов.

Перечень основного технологическое оборудование свидетельствует о том, производство первичного алюминия является многостадийной, распределенной системой, включающей оборудование различных принципов действия: дробильно-размольное, термическое, гидромеханическое, дозировочно-смесительное, а также специфические электрохимические агрегаты – электролизеры. Многообразие единиц оборудования, их высокая энергетическая напряженность и сложность взаимосвязей определяют повышенные требования к системе ТОиР. Система ТОиР должна обеспечивать надежную, бесперебойную и безопасную работу всех переделов – от подготовки сырья до выпуска готового металла. Особого внимания требуют термические агрегаты (печи), работающие в агрессивных средах и при высоких температурах, а также электролизеры, отказы которых ведут к значительным экономическим и экологическим последствиям.

Традиционно на алюминиевых заводах применяется система планово-предупредительных ремонтов (ППР), основанная на календарных циклах. Однако практика показывает, что такой подход приводит к двум негативным последствиям: с одной стороны, значительная часть ремонтов выполняется при исправном состоянии оборудования и возникает «избыточность», с другой, внезапные отказы происходят из-за того, что реальная скорость износа превышает заложенную в нормативах. Особенно остро эта проблема проявляется для узлов, работающих в зоне высоких температур (футеровка электролизеров, анодные штыри, газоходы).

В связи с этим мировое научное сообщество и передовые промышленные компании (РУСАЛ, Alcoa, Hydro, Rio Tinto) с 2010-х годов активно разрабатывают и внедряют методы технического обслуживания, ориентированного на надежность (RCM, Reliability-Centered Maintenance), а также подходы к обслуживанию по фактическому состоянию (CBM, Condition-Based Maintenance) с использованием цифровых технологий [134]. Технологический прогресс в этом направлении наглядно демонстрируется опытом мировых отраслевых лидеров. Так, в РУСАЛе цифровая трансформация ТОиР реализована через создание технологий цифровых двойников оборудования и внедрение масштабных проектов по предиктивному обслуживанию с использованием нейросетей, машинного зрения и технологий анализа больших данных (Big Data). Alcoa (США) перешла к активному использованию предиктивного обслуживания, основанного на системах сбора данных с датчиков (IIoT) в режиме реального времени и аналитике на базе искусственного интеллекта. Hydro (Норвегия) разработала и внедряет специализированные платформы мониторинга состояния активов (ARO, Asset Reliability Optimization), которые обеспечивают прозрачность и дают оптимизированные рекомендации по техническому обслуживанию. Rio Tinto (Великобритания / Австралия) создала операционные центры для централизованного мониторинга агрегатов и

аналитический центр передового опыта, предназначенный для обработки больших данных и сокращения внеплановых отказов [39].

Обзор научных публикаций за последние 10 лет позволяет выделить несколько ключевых направлений в развитии систем ТОиР для алюминиевого производства.

Первое направление – статистический анализ отказов и моделирование надежности. Над стратегическими задачами организации производства алюминия работает научная школа под руководством Полякова П. В., исследователи которой – Сизяков В.М., Бажин В.Ю., Власов А.А., Юшкова О.В., Завадяк А.В., Пузанов И.И., Безруких А.И., Горев А.А. – публикуют статьи в ведущих рецензируемых изданиях и являются авторами патентов в этой области [80,72,131]. Их работы затрагивают вопросы организационной надежности производства, предлагая модели оценки вероятности безотказной работы оборудования в условиях множественных отказов и ограниченных ремонтных ресурсов.

Работы Аль Рахби Ю., Ризван С.М., Алкали Б.М., Коуэлл А., Танеджа Г. и др. [108,110,140,139] посвящены анализу надежности анодомастерских установок с множественными отказами и одним ремонтником. Авторы используют метод пространства состояний и рассчитывают такие показатели, как средняя наработка на отказ (MTBF) и коэффициент готовности. В российской практике аналогичные исследования проведены для электролизеров и кранов-перегружателей (Курошев И.С., Скобелев Д.О. [50]), где выявлены основные виды отказов и оценено их влияние на технологические потери.

Второе направление – применение анализа видов и последствий отказов (FMEA) в методологии планирования технического обслуживания и ремонта инженерных систем или надежно-ориентированного технического обслуживания (RCM). В работах Антоненко И.Н., Воронина, В. В., Колыхалина В.М., Малышевой Т.В., Савиновой М.Е., Тулинова А.Б., Тюменева Ю.Я., Шайдуллина Р.А., показано, что методология FMEA

позволяет систематизировать виды отказов оборудования (в алюминиевом производстве – анодные рамы, системы подачи глинозема, газоочистки) и ранжировать их по критичности [6,13,86,44,103,5].

На основе FMEA разрабатываются стратегии технического обслуживания в рамках RCM в работах Харма Б., Йетрина М., Сусрияти Р., Пебриянто Р., Будихарджо К. и других зарубежных авторов [133,114,125,132]. Особое внимание уделяется последствиям отказов для безопасности персонала, окружающей среды и качества продукции, например, рост содержания серы в анодной массе.

Третье направление – цифровизация процессов ТОиР и предиктивная аналитика. В работах Варзина В.В., Леунова А. А., Нургалиева Р.К., Попова Е. В., Попова Н.А., Тарасова И.В., Троянской М.А., Удальцовой Н. Л., Шепелина Г.И., Шинкевич М.В., Шинкевича А.И., рассматриваются вопросы цифровой трансформации промышленных предприятий, включая применение программных решений для автоматизации управления, а также практические аспекты внедрения искусственного интеллекта в металлургическом производстве. Особое внимание уделяется повышению эффективности производственных линий, оптимизации процессов через переход интеграцию современных методов управления рисками и стратегическими решениями [74,51,73,94].

Зарубежные исследователи Ерзамаев М. П., Ким А. С., Куанг Ж., Санчес Ф., Хартлиб П., Чжу Дж., Ян Х. изучали разнообразные аспекты повышения эффективности промышленных систем, в том числе вопросы оптимизации эксплуатации узлов и агрегатов, внедрения новых технологий контроля качества и создания цифровых двойников для металлургии [118,137,130,117]. В работах предложены архитектуры цифровых систем управления обслуживанием и ремонтами, включающие модули сбора данных с датчиков (IIoT), планирования ремонтов, учета выполнения работ и интеграции с MES и ERP (SAP). Разработанные программно-аппаратные комплексы позволяют

прогнозировать остаточный ресурс оборудования на основе машинного обучения и снижать число внеплановых простоев на 20-30%.

Четвертое направление – организационные аспекты, стандартизация, связь технического обслуживания оборудования с качеством продукции**.** В работах Абдусаломова А. Г. у., Гончаровой Я. С., Зажигалкина А. В., Казовской И. С., Мартусевич Е. А., Немчиновой Н. В., Рыбенко И. А., Ставцева Д. А., Терпенева А. В., Усатых Е. В., Фоминой, О. Н., Цурикова Д. В. показана необходимость интеграции системы ТОиР с системой менеджмента качества (СМК) предприятия. Предложены структурно-организационные модели, включающие программно-целевые матричные структуры для управления ресурсной эффективностью [59,1,58,85,90,38]. Важное место занимает применение национальных стандартов: ГОСТ Р 27.606-2013 «Надежность в технике. Управление надежностью. Техническое обслуживание, ориентированное на надежность», ГОСТ Р 27.303–2021 «Надежность в технике. Анализ видов и последствий отказов», а также отраслевых регламентов (например, «Руководство по ремонту оборудования систем автоматизации крана технологического цеха обжига анодов» и др.) [29,19].

Ряд публикаций [112,138,135,115,111,136] устанавливает корреляцию между показателями надежности оборудования (MTBF, коэффициент технического использования) и такими характеристиками качества алюминия, как содержание примесей (Fe, Si), стабильность выхода по току, энергоемкость. Авторами Алифин Ф. И., Альфионита С., Артеага О., Валенсия С.С., Возняк М., Галаррага Л.К., Дуэр С., Ли Л., Паш Я., Рольч Т., Теран Х.К., Чанг К., Чжоу С. исследуются методы оценки и повышения надежности технических систем с акцентом на показатель средней наработки на отказ (MTBF) и его практическое применение. Также рассматриваются вопросы неразрушающего контроля для выявления дефектов алюминиевых деталей, оптимизации на основе анализа чувствительности, профилактического обслуживания с расчетом MTBF и MTTR, а также предлагаются уточненные

робастные процедуры тестирования MTBF для повышения достоверности результатов. Показано, что своевременная замена изношенных узлов (например, анодных штырей, рукавных фильтров газоочистки) позволяет предотвратить аварийную остановку и сохранить стабильность технологического процесса, что выражается в росте индекса воспроизводимости Cpk (таблица 1.1.2).

Таблица 1.1.2 – Направления научных исследований в области ТОиР для производства алюминия (составлено автором)

№	Направление исследований	Ключевые слова и методы	Основные авторы
1	Статистический анализ отказов и моделирование надежности	MTBF, коэффициент готовности, метод пространства состояний, марковские процессы, оценка вероятности безотказной работы	Поляков П.В., Сизяков В.М., Бажин В.Ю., Власов А.А., Юшкова О.В., Завадяк А.В., Пузанов И.И., Безруких А.И., Горев А.А.; Аль Рахби Ю., Ризван С.М., Алкали Б.М., Коуэлл А., Танеджа Г., Курошев И.С., Скобелев Д.О.
2	Применение FMEA и RCM для планирования ТОиР	FMEA, RCM, критичность отказов, приоритетное число риска (RPN), матрица решений	Антоненко И.Н., Воронин В.В., Колыхалин В.М., Малышева Т.В., Савинова М.Е., Тулинов А.Б., Тюменев Ю.Я., Шайдуллин Р.А., Харм Б., Йетрин М., Сусрияти Р., Пебриянто Р., Будихарджо К.
3	Цифровизация ТОиР и предиктивная аналитика	IIoT, машинное обучение, цифровые двойники, MES, ERP, SCADA, искусственный интеллект, CMMS	Варзин В.В., Леунов А.А., Попов Е.В., Попов Н.А., Тарасов И.В., Троянская М.А., Удальцова Н.Л., Шепелин Г.И., Шинкевич А.И., Ерзамаев М.П., Ким А.С., Куанг Ж., Санчес Ф., Хартлиб П., Чжу Дж., Ян Х.
4	Организационные аспекты, стандартизация и связь ТОиР с	Интегрированная система менеджмента качества (СМК), матричные структуры,	Абдусаломов А.Г.у., Гончарова Я.С., Зажигалкин А.В., Казовская И.С., Мартусевич Е.А., Немчинова

№	Направление исследований	Ключевые слова и методы	Основные авторы
	качеством продукции	надежно-ориентированное технического обслуживание (RCM), анализ видов и последствий отказов (FMEA)	Н.В., Рыбенко И.А., Ставцев Д.А., Терпенев А.В., Усатых Е.В., Фомина О.Н., Цуриков Д.В.
5	Методы оценки надежности и неразрушающего контроля на основе MTBF/MTTR	MTBF, MTTR, анализ чувствительности, неразрушающий контроль, робастное тестирование, профилактическое обслуживание	Алифин Ф.И., Альфионита С., Артеага О., Валенсия С.С., Возняк М., Галаррага Л.К., Дуэр С., Ли Л., Паш Я., Рольч Т., Теран Х.К., Чанг К., Чжоу С.

На основе проведенного обзора можно сделать вывод, что в существующих научных публикациях недостаточно полно раскрыты вопросы интеграции данных о текущем качестве продукции (например, Cpk, доля брака) в алгоритмы оперативного планирования технического обслуживания и ремонта: отсутствуют методики, позволяющие автоматически корректировать приоритеты ремонтных работ при ухудшении показателей стабильности технологического процесса. Кроме того, остаются нерешенными задачи создания гибридных стратегий ТОиР (сочетающих планово-предупредительное, обслуживание по состоянию и предиктивную аналитику) для разных типов оборудования алюминиевого производства с обоснованием критериев перехода от одной стратегии к другой.

Практически не разработаны имитационные модели (в том числе на базе цифровых двойников), которые позволяют количественно оценить влияние задержек ремонтов и отказов оборудования на организационную надежность и качество готовой продукции. Также отсутствуют стандартизованные подходы к информационному обмену между системами сбора данных IIoT, предиктивной аналитики и корпоративными системами управления ресурсами

(ERP) в части учета влияния состояния оборудования на показатели качества. Наконец, в научной литературе слабо отражены методы оценки экономической эффективности внедрения цифровых инструментов ТОиР с учетом предотвращенного брака и повышения индекса воспроизводимости Cpk.

Таким образом, анализ научных работ позволяет сделать вывод, что, несмотря на значительный прогресс в области цифровизации ТОиР, остаются нерешенными следующие проблемы:

– отсутствие единой методологии выбора стратегии обслуживания для разных типов оборудования алюминиевого завода (электролизеры, краны, газоочистки, анодомастерские);

– недостаточная интеграция данных о качестве продукции в системы планирования ремонтов;

– слабая формализация алгоритмов принятия решений для перехода от ППР к обслуживанию по фактическому состоянию.

Современное состояние систем ТОиР в производстве алюминия характеризуется переходом от реактивных и планово-предупредительных стратегий к прогностическому обслуживанию на основе цифровых технологий. Ключевыми научно-практическими результатами являются: развитие методов FMEA и RCM применительно к алюминиевому оборудованию, создание имитационных моделей и программных комплексов управления ТОиР, а также формирование организационно-методической базы для интеграции ТОиР в общую систему менеджмента качества предприятия.

1.2 Анализ базы стандартов в области технического обслуживания и ремонта производства алюминия

Техническое обслуживание и ремонт на алюминиевых производствах – это совокупность мероприятий, направленных обеспечение беспрерывности

производственных процессов, посредством планирования, контроля, мониторинга и поддержания оборудования в работоспособном состоянии, с целью исключения поломок и простоя оборудования, что позволяет повысить надежность и эффективность производства [4].

Основными компонентами ТОиР являются [4]:

– планирование ремонтных работ с учетом особенностей жизненного цикла, сезонности, загрузки производственных мощностей алюминиевых производств;

– проведение текущего ремонта и планового, капитального ремонта;

– контроль и диагностика текущего состояния оборудования для своевременного определения отклонения от норм и принятия упреждающих воздействий;

– контроль за материально-техническим обеспечением производственного процесса, наличие необходимых запасных частей для своевременной замены в случае поломки оборудования;

– наличие квалифицированного персонала в области ТОиР, организация прохождения курсов переподготовки;

– ведение соответствующей документации для четкой фиксации деятельности в области ТОиР с целью последующего анализа и корректировки необходимых мероприятий;

– использование автоматизированных систем и современных информационных систем управления ТОиР, актуальные для алюминиевых производств.

На сегодняшний день в России отсутствуют стандарты в области ТОиР алюминиевых производств. Единственным стандартом, регламентирующим требования к оборудованию, используемому для производства алюминия является ГОСТ 34196-2017 «Электролизеры для производства алюминия. Общие технические условия» [17]. Данный регламент раскрывает область применения стандарта, дает определения ключевым терминам, приводит нормативны ссылки, классификацию, технические требования, требования к

безопасности, правила приемки, методы контроля, маркировки, транспортировки, гарантии.

В ГОСТ 34196-2017 приведены схемы конструкции электролизеров, один из которых отражен на рисунке 1.2.1.

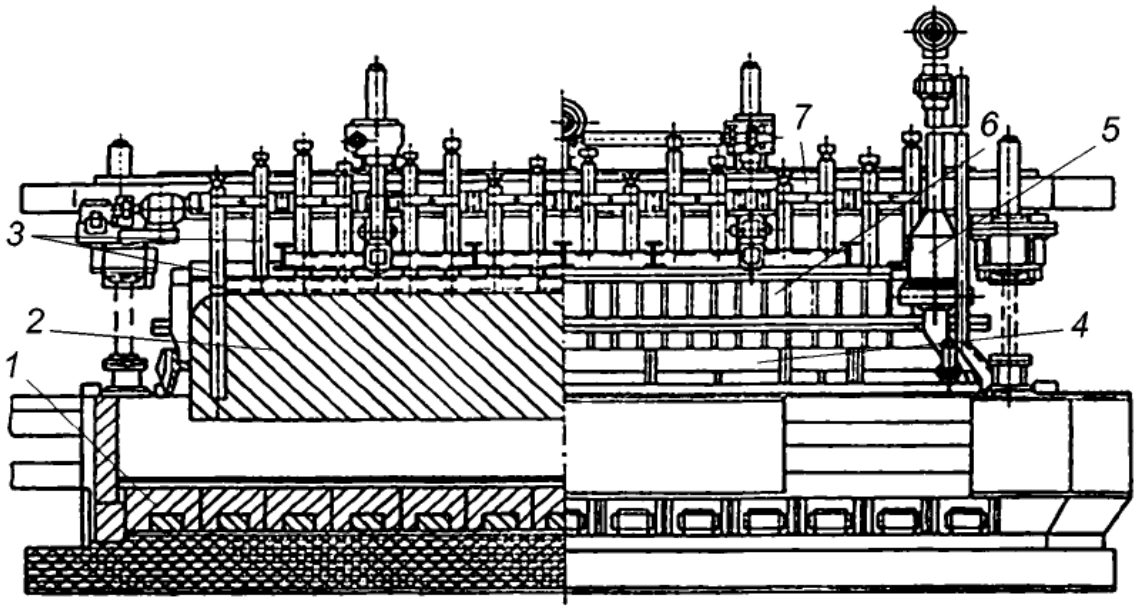


Рисунок 1.2.1 – Электролизер с самообжигающимся анодом для получения технического алюминия: 1 – катодные угольные блоки; 2 – анодный массив; 3 – анодный токоведущий штырь; 4 – колокольный газосборник; 5 – горелочное устройство; 6 – анодный кожух; 7 – анодная шина [17]

Таким образом, данный стандарт описывает технологию для производства алюминия, но не содержит методологию организации ТОиР и критериев оценки ее эффективности.

В 25 октября 2022 года утверждена «Перспективная программа стандартизации алюминиевой промышленности на 2022-2026 годы» (далее – Программа), инициаторами которой стали Министерство промышленности и торговли РФ, Росстандарт и Алюминиевая Ассоциация. Данная программа пришла на смену предыдущей, реализованной в 2018-2023 гг., которая была выполнена на 80% [70]. Целью Программы является повышение потребления алюминия в различных отраслях промышленности и сферах экономической деятельности, в том числе строительстве, машиностроении, дорожно-

транспортной инфраструктуре, энергетике. В рамках данного документа актуализируются 209 стандартов (вместо текущего фонда стандартов, включающего более 170 документов). Головным техническим комитетом является ТК 099 «Алюминий» – технический комитет по стандартизации, сотрудничества организаций, органов власти и физических лиц при проведении работ по национальной, межгосударственной и международной стандартизации в сфере алюминия и продукции на его основе. ТК 099 «Алюминий» интегрирует заинтересованные предприятия, органы власти и экспертов для развития стандартизации в отрасли, в том числе [70]:

– для повышения эффективности стандартизации алюминия и алюмосодержащей продукции;

– для учета мнения экспертного общества;

– для разработки качественных стандартов на продукцию из алюминия и сплавов.

В таблице 1.2.1 представлены ключевые направления стандартизации, с определением статуса в Программе и выделением основных недостатков.

Перспективная программа стандартизации алюминиевой промышленности на 2022-2026 гг. в области ТОиР не включает:

– систему ТОиР алюминиевых производств (не содержит стандарты по организации ТОиР – каждое предприятие разрабатывает собственную систему, отсутствует унификация);

– ремонтные нормативы и периодичность (не содержит отраслевые нормы межремонтных периодов – невозможно объективно планировать затраты на ТОиР);

– диагностика оборудования в эксплуатации (не содержит стандарты на методы контроля состояния оборудования – диагностика оборудования ведется по разным методикам);

– стандарты на запасные части (не содержит требований к взаимозаменяемости и ремонтопригодности – усложнение снабжения ремонтных служб);

– материально-техническое обеспечение ТОиР (не содержит требования к МТО);

– квалификация персонала ТОиР (отсутствуют требования к компетенциям сотрудников ремонтных служб, отсутствуют единые требования к обучению и аттестации специалистов ТОиР);

– цифровое управление ТОиР (не содержит стандарты на автоматизацию процессов ТОиР);

– методологии управления надежностью и безопасностью производственных процессов (нет адаптации риск-ориентированных подходов).

Таблица 1.2.1 – Ключевые направления развития Перспективной программы стандартизации алюминиевой промышленности на 2022-2026 гг. и их недостатки (обобщено автором)

Группа стандартов	Статус	Примеры	Недостатки в области ТОиР
На продукцию из алюминия и сплавов	Приоритетное направление	ГОСТ Р на радиаторы, оконные блоки, теплоизоляцию, несущие конструкции	Ориентация на конечную продукцию, а не на производственные процессы; отсутствие требований к ремонтопригодности
Для строительной отрасли	Активно развивается	Ожидается 25 новых документов	Не охватывают вопросы эксплуатации и обслуживания алюминиевых конструкций
Для машиностроения	Предусмотрено Программой	В стадии разработки	Отсутствуют стандарты ТОиР для оборудования алюминиевых производств
Для дорожной инфраструктуры	Включено в Программу	В стадии разработки	Не касаются вопросов технической эксплуатации
Методы испытаний и контроля	Часть фонда ТК 099	В составе 170 стандартов	Преимущественно для готовой продукции, недостаточно для диагностики в процессе эксплуатации

Наряду с отсутствием стандартов в области ТОиР Перспективная программа стандартизации алюминиевой промышленности на 2022–2026 гг. является важным документом и имеет сильные стороны, отраженные на рисунке 1.2.2.

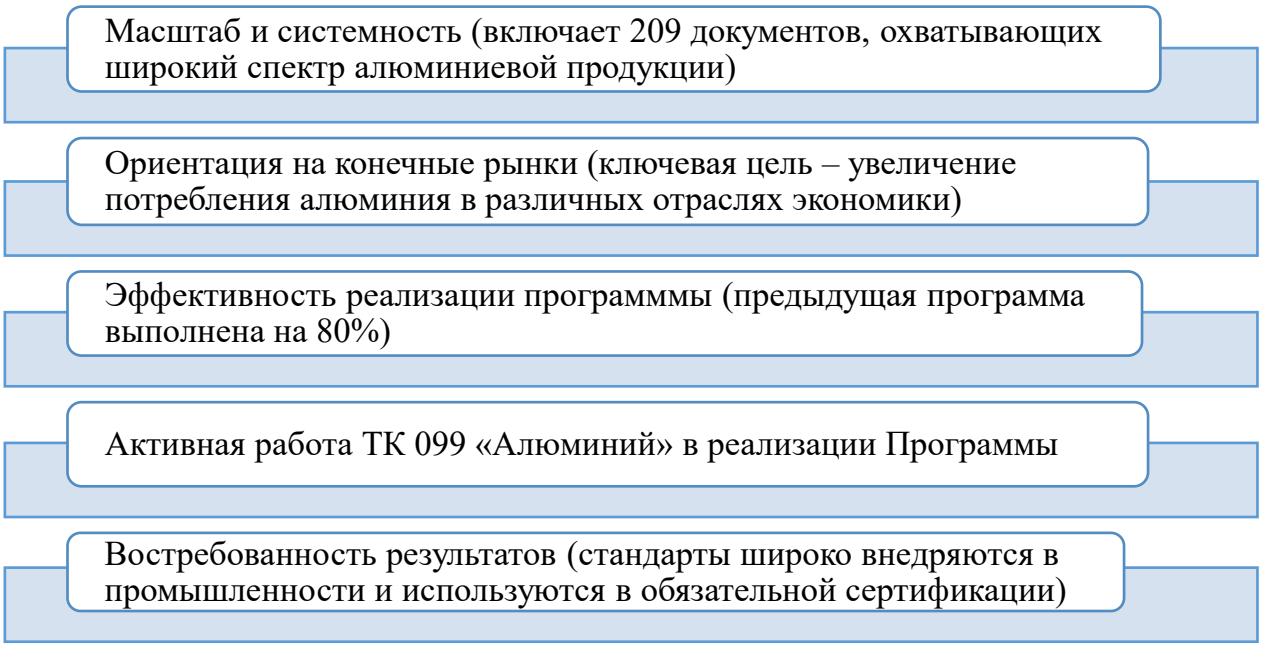


Рисунок 1.2.2 – Направления Перспективной программы стандартизации алюминиевой промышленности на 2022-2026 гг. [70]

Таким образом, приоритетами Программы являются увеличение объемов потребления алюминия, посредством расширения числа алюминия потребляющих отраслей, с целью обеспечения технологического суверенитета страны. Однако Программа не охватывает развитие системы стандартов в области ТОиР алюминиевых производств, отсутствуют – направления обеспечения надежности и безопасности производств, системы управления рисками, технологии цифровизации данной сфера, что позволило бы продлить ресурсы оборудования алюминиевых заводов и повысить их эффективность.

Следовательно, при разработке следующей Перспективной программы стандартизации алюминиевой промышленности (на период после 2026 года)

рекомендуется включение отдельного направления стандартов «Техническое обслуживание и ремонт оборудования алюминиевых производств», в том числе:

– разработка базового стандарта «Техническое обслуживание и ремонт оборудования алюминиевых производств»;

– проработка нормативов, периодичности и трудоемкости ремонтов с учетом специфики, сезонности и жизненного цикла оборудования;

– стандартизация критериев, методов анализа, диагностики, контроля оборудования;

– формирование требований к цифровому управлению ТОиР в алюминиевой промышленности.

Поскольку в отечественной системе стандартизации в ТОиР алюминиевых производств отсутствует система регламентаций и стандартов, рассмотрим примеры международных практик и методологий, актуальных для данной области исследования.

Для регулирования ТОиР в алюминиевой промышленности актуально использование анализа видов и последствий отказов (FMEA), технического обслуживания, ориентированного на надежность (RCM), всеобщего обслуживания оборудования (TPM), предиктивной аналитики. В таблице 1.2.2 систематизированы возможности и потенциал их использования.

Рассмотрим сущность каждой международных методологий в области ТОиР с целью определения потенциала использования для формирования отечественных стандартов в алюминиевой промышленности.

Международный метод FMEA представляет собой анализ видов и последствий отказов, упреждающий, систематический метод, направленный на выявление потенциальных дефектов (отказов) при производстве продукции, а также оценка их влияния на конечного потребителя [46]. Сущность метода кратко выражается тремя ключевыми действиями:

– упреждающие выявление потенциальных причин дефектов (отказов) производственных процессов;

– анализ рисков, представляет количественную оценку рисков по трем параметрам: последствия для потребителей или системы, частота возникновения причины отказа, вероятность обнаружения отказа до его наступления);

– определение приоритетного риска и разработка мер по снижению самого высокого риска.

Таблица 1.2.2 – Возможности и потенциал использования международных стандартов в области ТОиР (обобщено автором)

Методология	Применение в алюминиевой отрасли	Пример внедрения
Анализ видов и последствий отказов (FMEA)	Анализ видов и последствий отказов для критического оборудования. Позволяет разработать профилактические мероприятия до наступления отказа	Анализ сценариев отказов оборудования и техники, выявление все видов потерь
Техническое обслуживание, ориентированное на надежность (RCM)	Оптимизация стратегий ТО на основе надежности оборудования. Внедряется через «тактические руководства по обслуживанию»	Разработка для каждой единицы оборудования тактические руководства, определяющие оптимальный вид ТО
Всеобщее обслуживание оборудования (TPM)	Культура вовлечения операционного персонала в обслуживание	Использование подхода «kaizen» для устранения «узких мест»
Предиктивная аналитика	Мониторинг состояния оборудования в реальном времени	Внедрение системы мониторинга с различными наборами данных **(**вибрация, температура и т.д.)

В отечественной практике ГОСТ Р 27.303-2021 «Надежность в технике. Анализ видов и последствий отказов» национальный стандарт Российской Федерации устанавливает методы анализа видов и последствий отказов (FMEA), а также видов, последствий и критичности отказов (FMECA) [29].

Следующим методом, регламентирующим ТОиР является техническое обслуживание, ориентированное на безотказность (RCM), позволяющее

определить комплекс инструментов по ТОиР для каждого вида оборудования, технологии и производства, исходя из последствий отказов, а не из общих нормативов. Целью RCM является выявление и предупреждение отказов и дефектов, а не типового планового обслуживания [71]. Перечень и комплекс упреждающих воздействий формируется на основе анализа частоты и тяжести их последствий от отказов и перебоев для безопасности, надежности и финансовых показателей предприятия. ТОиР проводится, если позволяет снизить критичность отказа, в том случае есть затраты на работы меньше, чем последствия отказа.

Рассмотрим сущность последовательность технического обслуживания, ориентированного на безотказность (рисунок 1.2.3).

Согласно Российскому стандарту ГОСТ Р 58771-2019 «Менеджмент риска. Технологии оценки риска» функциональный анализ в RCM выполняется с использованием FMECA. При этом RCM использует FMEA как инструмент для идентификации отказов, с целью определения алгоритма их предотвращения и борьбы с последствиями отказов.

Всеобщее производительное обслуживание оборудования (TPM) является методикой организации эксплуатации и технического обслуживания оборудования, основанная на комплексном подходе, основанная на принципах всеобщего участия персонала и непрерывного совершенствования (Kaizen), направленная на оптимизацию производственных и технологических процессов, обеспечению их надежности и безопасности, повышению эффективности, рентабельности за счет минимизации все видов потерь и издержек [14].

1. Функциональный анализ
- Определение функций оборудования и требований к их выполнению (стандарт производительности)

2. Выявление функциональных отказов
- Определение, что считается нарушением каждой функции

3. Определение причин отказов
- Поиск первопричины (коренной причины) с использованием техник типа «5 почему»

4. Оценка последствий
- Анализ влияния отказа на безопасность, экологию, производство, экономику

5. Оценка критичности
- Количественная или качественная оценка на основе тяжести последствий и вероятности возникновения

6. Выбор стратегии ТОиР
- Определение применимых и эффективных мер для каждого отказа

7. Определение «разовых преобразований»
- Выявление изменений в конструкции, обучении персонала, процедурах эксплуатации, которые могут снизить риски

Рисунок 1.2.3 – Последовательность технического обслуживания, ориентированного на безотказность [71]

Основные принципы всеобщего производительного обслуживания оборудования:

– принцип максимизации общей эффективности оборудования (который представляет собой комплексный показатель, включающий параметры доступности, производительности и качества);

– принцип автономного обслуживания (стандартизированная процедура выполнения операторами рутинных операций – осмотр, чистка, мелкие ремонтные работы);

– принцип планирования превентивности (организация технического обслуживания на основе статистических моделей выявления корневых причин отказов);

– принцип вовлеченности персонала (формирование философии командной работы, уход от индивидуальных показателей исполнительной дисциплины);

– принцип обучения на рабочем месте (формирование кросс-функциональных компетенций оператор-ремонтник).

В отличие от традиционных подходов к ТОиР, где в фокусе находится техническое состояние оборудования, в TPM объектом управления является совокупность повторяющихся потерь – из-за отказов (поломок); на переналадку и настройку; на холостой ход и мелкие остановки; скорости производительности; из-за дефектов и переделок; при запуске (снижение производительности после ремонта; безопасности, энергоэффективности и логистики сырья [14].

Технологии TPM содержатся в ГОСТ Р 56020-2020 «Бережливое производство. Основные положения и словарь» [21]. Кроме того, ГОСТ Р 56020-2020 определяет сущность бережливого производства, формирует словарь терминов и предназначается для создания и развития производственных систем, разработки соответствующих документов, а также для обучения персонала.

В отечественной практике документом, регламентирующим ТОиР, является ГОСТ 18322-2016 «Система технического обслуживания и ремонта техники. Термины и определения». Целью ГОСТ 18322-2016 является систематизация терминов и определений основных понятий в области ТОиР для обеспечения однозначного понимания требований в технической документации. ГОСТ 18322-2016 дает четкие, юридически закрепленные определения процессам технического обслуживания, ремонта, системы ТОиР [16].

Несмотря на практическую пользу унификации терминов, определим основные недостатки ГОСТ 18322-2016 связанные с проблемами при сопоставлении с международными нормами и стандартами, устаревшей методологией и пр. (рисунок 1.2.4).

Таким образом, ГОСТ 18322-2016 «Система технического обслуживания и ремонта техники. Термины и определения» необходим при составлении внутренней документации или прохождении сертификации, однако при внедрении и закупке современного зарубежного оборудования потребуются дополнительная нормативная база.

Проблемы сопоставления с международными нормами и стандартами: идентификации с «IEC 60050-192» (международный электротехнический словарь)

- Зарубежные подходы RCM, TPM и российские «Планово-предупредительная система (ППР)» строятся на разных принципах. Следовательно, термин из ГОСТ 18322 может искажать сущнось зарубежных подходов. Это создает трудности при составлении контрактов с иностранными поставщиками и унификации международных производств.

Отрыв от современных технологий производства

- Стандарт описывает классическую модель устранения отказов после их появления. Однако на современном высокотехнологичном оборудовании чаще применяется обслуживание по состоянию. В тексте ГОСТ этот подход описан недостаочно полно по сравнению с классическими видами ТО.

Наследие плановой экономики

- На практике стандарт зачастую мотивирует предприятия к экстенсивному пути – созданию штатов ремонтных служб и складов запасных частей, инструментов и принадлежностей, вместо внедрения эффективного обслуживания силами оператора оборудования, как в концепции TPM.

Добровольность применения (юридический аспект)

- Как и большинство ГОСТ в РФ, данный стандарт имеет добровольный статус, если иное не оговорено в договоре или технипческом регламенте. Следовательно, предприятие может игнорировать терминологию стандарта, используя свою терминологию, что приводит к правовой неопределенности.

Устаревшие ссылки

- Стандарт предписывает применять его совместно с ГОСТ 27.002 . Проблема в том, что эти стандарты по надежности также многократно пересматривались, и частая путаница в версиях (2015 года или 1989 года) создает трудности для разработчиков конструкторской документации.

Рисунок 1.2.4 – Недостатки ГОСТ 18322-2016 «Система технического обслуживания и ремонта техники. Термины и определения» (обобщено автором)

Национальный стандарт РФ ГОСТ Р 27.303-2021 «Надежность в технике. Анализ видов и последствий отказов», идентичный международному документу МЭК 60812:2018, определяет процедуру идентификации потенциальных отказов, их причин и последствий для технических систем, технологических процессов и программного обеспечения [29].

Ключевые характеристики стандарта:

– предиктивная политика, направленная на предотвращение отказов на этапах проектирования и эксплуатации;

– оценка состояния аппаратных компонентов, включенность человеческого фактора, актуальность программного обеспечения;

– ранжирование рисков, в зависимости от тяжести последствий, частоты возникновения и вероятности обнаружения дефекта до наступления неблагоприятной ситуации;

– стандарт синхронизирован с международной практикой управления надежностью.

В качестве недостатков ГОСТ Р 27.303-2021 можно выделить следующие:

– ограниченность учета комбинаторных отказов;

– субъективность экспертных оценок;

– статичность модели;

– высокая трудоемкость и риск формализации;

– невозможность анализа «непредусмотренных» видов отказов.

ГОСТ Р 27.303-2021 представляет собой систематизированный и международно-согласованный инструмент анализа рисков, эффективный для детерминированных, умеренно сложных систем [29]. Однако его применение для сложных технологических систем требует использования дополнительных методов оценки.

Анализ базы стандартов в области технического обслуживания и ремонта (ТОиР) алюминиевых производств позволяет сформулировать следующие выводы и рекомендации.

Алюминиевая промышленность в РФ характеризуется высокой энергоемкостью и использованием высокотехнологичного оборудования, ключевыми направлениями развития которой являются расширение использования алюминиевой продукции в различных отраслях, а также обновление производственных мощностей и обеспечение их надежности и безопасности, что требует развитие нормативно-технической базы ТОиР для российских алюминиевых производств.

В связи с чем, рекомендуется разработка стандартов «Техническое обслуживание и ремонт оборудования алюминиевых производств», проработка нормативов, периодичности и трудоемкости ремонтов с учетом специфики, сезонности, жизненного цикла оборудования; стандартизация критериев, методов анализа, диагностики, контроля оборудования; формирование требований к цифровому управлению ТОиР в алюминиевой промышленности.

Развитие системы стандартизации ТОиР для российских алюминиевых производств должно осуществляться по следующим приоритетным направлениям: риск-ориентированный подход (в соответствии с ГОСТ Р 58969-2020), отраслевая адаптация метода FMEA (на базе ГОСТ Р 27.303-2021), цифровизация процессов управления надежностью, интеграция с разрабатываемыми стандартами цифровых цехов и гармонизация с актуализированными справочниками НДТ. Реализация предложенных рекомендаций позволит системно повысить надежность оборудования, снизить эксплуатационные затраты и обеспечить переход к методологии технического обслуживания по фактическому состоянию на основе анализа рисков и предиктивных данных.

1.3 Обзор цифровых инструментов и лучших практик управления техническим обслуживанием производственного оборудования

Переход алюминиевой промышленности к парадигме Индустрии 4.0 инициировал глубокую трансформацию подходов к управлению техническим обслуживанием и ремонтами оборудования. Для производства алюминия, характеризующегося высокой энергоемкостью, непрерывностью процессов и повышенными экологическими требованиями, внедрение цифровых инструментов ТОиР становится фактором повышения эффективности и необходимым условием обеспечения конкурентоспособности и устойчивого развития. В данном параграфе рассматриваются ключевые классы цифровых решений для управления ТОиР (CMMS/EAM, IIoT и предиктивная аналитика, управление ТОиР по данным о качестве продукции), лучшие практики их внедрения на ведущих предприятиях и обосновывается концепция управления ТОиР на основе прямого контроля качества продукции.

Традиционная организация технического обслуживания на многих промышленных предприятиях, включая алюминиевые заводы, долгое время базировалась на реактивной стратегии, также известной как «эксплуатация до отказа» (Run-to-Failure). При таком подходе ремонтные работы выполняются после выхода оборудования из штатного режима, что сопряжено с внеплановыми остановами производства, аварийными ремонтами и потерями на производстве. Согласно статистике, около 50% технического обслуживания на российских предприятиях имеет на сегодняшний день реактивный характер.

В условиях непрерывной работы электролизера, синхронизации работы анодных фабрик, газоочисток и кранов-перегружателей реактивная стратегия может приводить к серьезным последствиям. Так, аварийное отключение электролизера влечет риск разрушения футеровки, потерю фторсодержащего сырья. В этой связи производства алюминия должны последовательно переходит к проактивному управлению ТОиР.

В свою очередь, проактивное управление ТОиР включает две организационные модели: планово-предупредительные ремонты (ППР) ремонты и обслуживание по фактическому состоянию (CBM) с предиктивной аналитикой (PdM).

При ППР ремонты выполняются по календарным графикам или по наработке. Несомненно, ППР снижает число внезапных отказов, но не учитывает реального состояния оборудования, следствием чего являются избыточные ремонты или, напротив, эксплуатация оборудования за пределами его фактического ресурса.

При обслуживании по фактическому состоянию и предиктивном обслуживании решение о ремонте принимается на основе мониторинга параметров оборудования (вибрация, температура, ток, запыленность) с использованием IIoT и алгоритмов машинного обучения. Это прогрессивная форма проактивного управления, позволяющая прогнозировать остаточный ресурс агрегатов до предполагаемого отказа и выполнять ремонт точно вовремя, без аварий и с минимальной потерей производительности.

Переход от реактивной к проактивной модели требует не только внедрения цифровых инструментов (CMMS/EAM, предиктивной аналитики), но и изменения организационной культуры: планирование, анализ коренных причин отказов, постоянное улучшение надежности. Для алюминиевого производства такой переход становится конкурентным преимуществом. Ведущие компании (РУСАЛ, Alcoa, Rio Tinto) уже фиксируют сокращение внеплановых простоев на 20-30%, снижение затрат на ТОиР на 10-20% и рост коэффициента готовности оборудования до значений, превышающих плановые.

Методология технического обслуживания, ориентированного на надежность (RCM) выступает связующим звеном, которое объясняет, для каких целей внедряются такие цифровые инструменты, как CMMS/EAM-системы и предиктивная аналитика. Отказ оборудования в производстве алюминия может привести к простоям и катастрофическим последствиям.

Аварийная остановка электролизера может привести к разрушению дорогостоящей футеровки. Именно для таких сложных, опасных и капиталоемких производств была создана концепция RCM как необходимость для управления рисками, предусматривающая проактивное обслуживание.

Анализ видов и последствий отказов (FMEA) является обязательным шагом в алгоритме принятия управленческих решений по RCM для организации производства. На практике большое количество RCM-программ и соответствующего ПО построено именно на связке RCM и FMEA. RCM дает технологическую карту, которая превращает сырые данные из АСУТП в конкретные инженерные решения.

Международная научная среда уже разрабатывает концепцию RCM 4.0 [119,113,116]. Это совершенно новый уровень, который интегрирует RCM с большими данными (Big Data), цифровыми двойниками и ИИ для создания самооптимизирующейся предиктивной системы. Алгоритмы машинного обучения и IIoT становятся инструментами для постоянного и автоматического обновления RCM-стратегий.

1. Системы класса CMMS/EAM. Базовым элементом цифровой инфраструктуры управления ТОиР выступают:

– компьютеризированная (автоматизированная) система управления техническим обслуживанием и ремонтами (CMMS);

– система управления активами предприятия (EAM).

Принципиальное различие между ними заключается в стратегическом ориентире: CMMS ориентирована на оперативное управление ремонтными работами и заявками, а EAM охватывает полный жизненный цикл активов, включая тактическое и стратегическое планирование. В российской системе стандартизации прямого класса систем CMMS или EAM не существует, но их разработка может опираться на смежные стандарты по разделам технического обслуживания, надежности, управления активами и связи с производственными системами (таблица 1.3.1).

Таблица 1.3.1 – Российские стандарты, связанные с системами управления CMMS и EAM (составлено автором)

Группа стандартов	Нормативная база	Область регулирования
Техническое обслуживание и ремонт (ТОиР)	ГОСТ Р 57329-2016 (EN 13306:2010)	Термины и определения (АСУ ТОиР)
Надежность в технике	ГОСТ Р 27.102-2021 [19]	Планирование ТОиР (расчет показателей безотказности)
Управление активами предприятия	Серия ГОСТ Р 55.0.XXX (ИСО 55000)	Стандарты менеджмента (управление стоимостью/рисками активов)
Автоматизированные системы управления (АСУ)	ГОСТ 34.602-2020 [26], ГОСТ 24.104-2023 [25]	Общие требования к созданию АСУ
Связь с производственными системами	Комплекс ГОСТ Р М ЭК 62264 (IEC 62264) [30]	Интеграция с MES/ERP

Компьютеризированная система управления техническим обслуживанием и ремонтами (CMMS) представляет собой это программный комплекс, предназначенный для автоматизации учета, планирования, выполнения и анализа работ по техническому обслуживанию и ремонту оборудования. В более широком смысле к этому классу относят системы управления активами предприятия (EAM), которые охватывают также финансовый и логистический учет основных средств на протяжении всего жизненного цикла. В настоящей работе под CMMS понимается единое информационное ядро, обеспечивающее переход от разрозненных ручных записей к централизованному цифровому управлению процессами ТОиР.

Ценность CMMS многократно возрастает при ее включении в единое информационное пространство предприятия (таблица 1.3.2).

Таблица 1.3.2 – Интеграция CMMS/EAM со смежными информационными системами предприятия (составлено автором)

Смежная ИС	Назначение интеграции
АСУТП / SCADA	– автоматическая фиксация наработки оборудования (моточасы, циклы) и инициирование ремонтных событий при достижении порогов; – передача данных с датчиков для обслуживания по состоянию
MES	– согласование ремонтных остановов с производственным расписанием; – учет влияния простоев на выполнение плана выпуска продукции
ERP (1C, SAP)	автоматическое списание материалов, синхронизация справочников, передача затрат на ТОиР в финансовый и управленческий учет
СМК (система менеджмента качества)	– сопоставление ремонтов с динамикой показателей качества (предиктивная аналитика); – выявление оборудования, отказы которого ведут к ухудшению качества продукции

Разработка и внедрение CMMS на российских промышленных предприятиях должны опираться на ГОСТ 18322-2016, ГОСТ Р 27.606-2013, ГОСТ Р 51901.12-2007, ГОСТ Р 57330-2016.

CMMS является связующим звеном между техническим состоянием оборудования и качеством выпускаемой продукции. Ранжирование отказов по их влиянию на качество или сортность металла позволяет определить приоритетные направления ТОиР. Например, увеличение содержания железа в алюминии при эрозии катодной секции позволяет принять решение об ее незамедлительном техническом обслуживании. Интеграция ТОиР с СМК позволяет отслеживать динамику индекса воспроизводимости (Cpk) или доли брака.

Практический опыт Чепецкого механического завода Росатома подтверждает, что добавление параметров качества в аналитическое ядро управления оборудованием способно снизить брак с 2,5-10% до менее 1%.

Таким образом, CMMS становится фундаментом цифровой трансформации ТОиР, без которого невозможно системное применение предиктивной аналитики, цифровых двойников и управления ремонтами по данным о качестве продукции основного направления развития инструментов ТОиР в производстве алюминия.

В контексте настоящего исследования под EAM-системой понимается интегрированное программное решение для автоматизации процессов учета, планирования, выполнения и анализа результатов технического обслуживания и ремонтов промышленного оборудования. Ключевые функциональные возможности EAM-систем включают: централизованное ведение справочников, планирование ремонтов, учет выполнения работ, управление складскими запасами, интеграция со смежными системами, формирование отчетности.

Проведенный анализ внедрений EAM-решений на отечественных промышленных предприятиях позволяет выделить ключевую функцию, определяющую практическую ценность таких систем для алюминиевого производства, а именно автоматизированный контроль наработки критических узлов**.** Традиционно данные о наработке оборудования собирались вручную, вносились в таблицы Excel и анализировались разрозненно, что создавало высокие риски ошибок и недостоверной информации по остаткам ресурса.

В контексте производства алюминия переход от ручного управления к автоматизированной EAM-системе особенно актуален для следующих переделов:

- электролизное производство (до 200 электролизеров в одной серии требуют синхронизированного контроля футеровки, анодной рамы и газоочистного оборудования);
- анодомастерские и производство анодов (многостадийные процессы дробления, смешения, формования и обжига, где каждая единица оборудования имеет собственный регламент ТОиР);

– крановое и транспортное оборудование (высоконагруженные узлы с повышенным риском внезапных отказов и необходимостью точного планирования ресурсов).

2. IIoT и предиктивная аналитика. Следующим уровнем цифровой трансформации ТОиР, как надстройка над EAM-системами, является внедрение технологий промышленного интернета вещей (IIoT) и предиктивной аналитики (PdM). Если EAM-системы автоматизируют документооборот и управление ресурсами, то системы предиктивного обслуживания качественно меняют саму логику принятия решений: от планово-предупредительных ремонтов к обслуживанию по фактическому состоянию оборудования к полностью автоматизированным системам с элементами искусственного интеллекта.

Принципиальное отличие обслуживания по состоянию от традиционных стратегий ТОиР заключается в следующем:

– при планово-предупредительном обслуживании (ППР) оборудование ремонтируется по календарному графику, установленному производителем, что часто приводит к избыточности (ремонты исправного оборудования) или недостаточности (если износ ускоряется из-за экстремальных условий эксплуатации);

– при обслуживании по фактическому состоянию решение о ремонте принимается на основе данных с датчиков (вибрация, температура, ток, давление), которые в реальном времени отражают текущий технический статус агрегатов;

– предиктивное обслуживание использует методы машинного обучения и искусственного интеллекта для прогнозирования остаточного ресурса оборудования и времени наступления отказа с опережением.

В центре технологической архитектуры предиктивное обслуживания находятся датчики IIoT – устройства сбора данных о вибрации, температуре, давлении, токе, запыленности и других физических параметрах, устанавливаемые на критическое оборудование. Данные в реальном времени

поступают в аналитическую платформу, где происходит их очистка, нормализация и агрегация. Предиктивные алгоритмы машинного обучения (нейронные сети, градиентный бустинг, деревья решений) анализируют тренды с помощью обученных на исторических данных моделей, что позволяет выявлять аномалии на ранних стадиях, оценивать текущее состояние оборудования и прогнозировать его остаточный ресурс. Система автоматически формирует оповещения для ремонтного персонала и инициирует создание ремонтных заявок в EAM-системе при достижении пороговых значений прогноза надежности.

Анализ лучших мировых и отечественных практик внедрения цифровых инструментов управления техническим обслуживанием и ремонтами показывает, что ведущие компании алюминиевой отрасли и смежных металлургических производств последовательно реализуют стратегию перехода от реактивного и планово-предупредительного обслуживания к предиктивной аналитике и интеллектуальному управлению активами. На рисунке систематизированы ключевые технологические решения, применяемые компаниями Alcoa, Rio Tinto, РУСАЛ и Чепецким механическим заводом (Росатом), которые могут рассматриваться в качестве ориентиров для развития системы ТОиР в производстве алюминия (рисунок 1.3.1).

3. Управление ТОиР по данным о качестве продукции. Ключевой особенностью предлагаемого в диссертации подхода к развитию системы ТОиР является установление прямых связей между данными о качестве продукции и приоритетами технического обслуживания. В отличие от традиционного подхода, где ТОиР реагирует на отказы или следует календарным нормативам, предлагается использовать предиктивные модели, прогнозирующие выход показателей качества продукции за допустимые пределы при ухудшении состояния конкретных единиц оборудования.

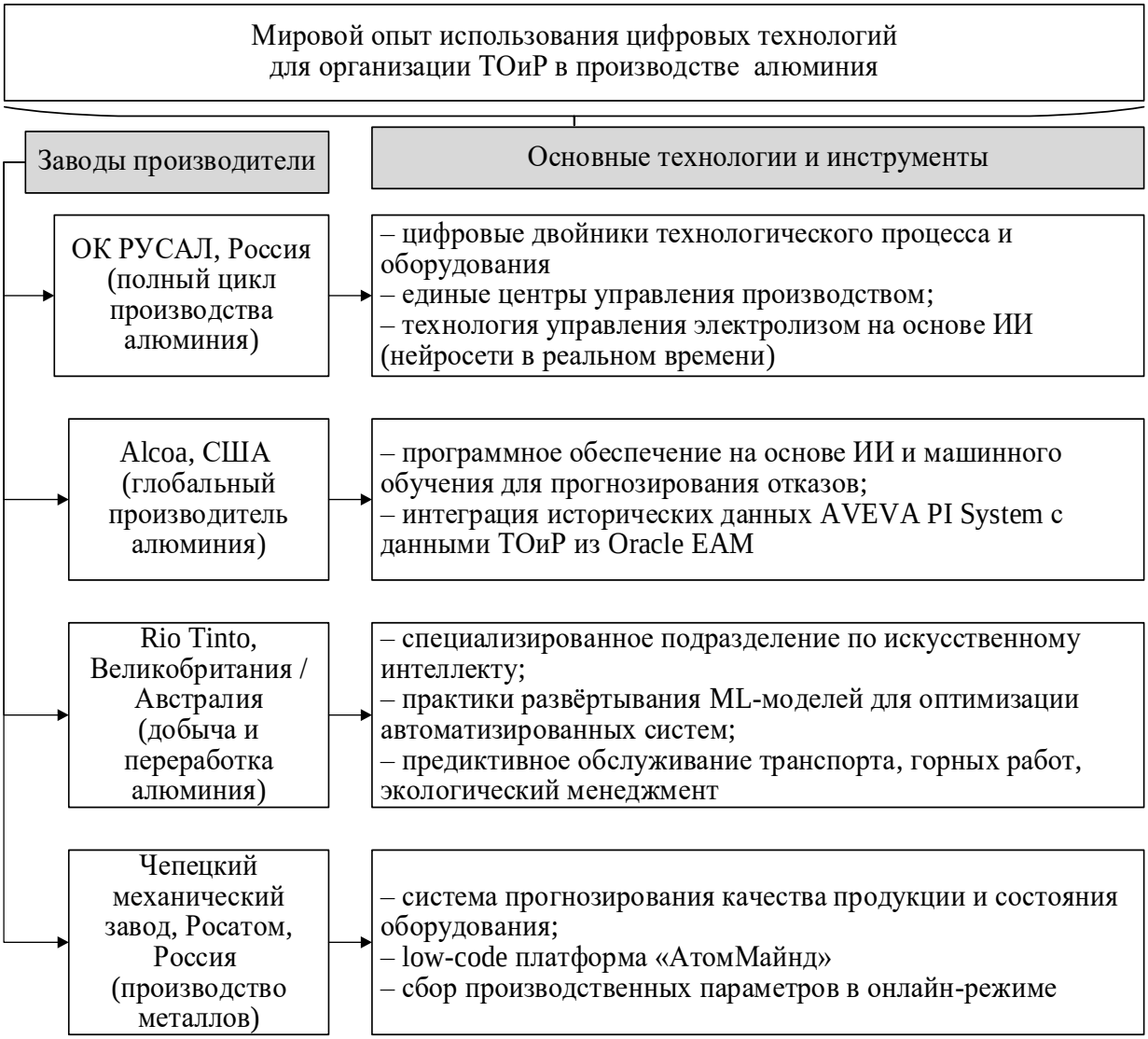


Рисунок 1.3.1– Примеры внедрения предиктивного обслуживания и цифровых инструментов ТОиР в производстве алюминия (составлено автором по [39,133]

Параметры качества продукции могут сигнализировать о начале сбоя в работе оборудования даже в тех случаях, когда датчики вибрации или температуры не улавливают критических отклонений. Для производства алюминия к таким опережающим индикаторам относятся:

– содержание железа и кремния в алюминии-сырце возможно вследствие эрозии катодной секции и стабильности работы систем подачи сырья;

– энергоемкость электролиза зависит от состояния подвесной части с анодами, механизмов регулировки межполюсного расстояния и качества анодов;

– выбросы смолистых веществ и фтористого водорода могут служить маркерами эффективности работы газоочистного оборудования и герметизации электролизеров;

– фракционный состав анодной массы или качество обожженных анодов определяют стабильность электролиза и зависят от состояния смесительного и формовочного оборудования.

Механизм обратной связи от качества к ТОиР основан на построении модели корреляции между отклонениями контролируемых показателей качества и деградацией конкретных технических систем. При устойчивом выходе показателя качества за установленные пределы система автоматически инициирует внеплановую диагностику соответствующего оборудования и, при необходимости, формирует рекомендацию по ремонту с приоритетом, зависящим от степени отклонения. Дополнительно ведется статистический анализ массива данных о браке для выявления оборудования – источника системных потерь. При этом, ремонтные периоды синхронизируются с прогнозируемыми моментами ухудшения качества на основе прогнозных моделей.

4. Интеграция цифровых инструментов и лучшие практики. Высший уровень цифровой зрелости системы ТОиР достигается при интеграции всех трех описанных классов инструментов в единую цифровую среду, охватывающую и управление производством. Такая интеграция создает замкнутый информационный контур, в котором каждое управленческое решение (о проведении ремонта, закупке запчастей, изменении технологических параметров) генерируется на основе корректных данных.

Ключевые интеграционные задачи при построении такой среды:

– интеграция EAM с АСУТП для автоматической регистрации наработки агрегатов, запуска ремонтных процессов при достижении порогов и фиксации фактических режимов работы, повлиявших на износ.

– интеграция EAM с ERP (включая модули управления финансами, закупками и складским учетом) для автоматического списания материалов, формирования бюджета и оптимизации складских запасов на основе данных о потребностях ТОиР.

– интеграция EAM с предиктивной аналитикой для автоматического создания заявок и корректировки план-графиков при раннем выявлении признаков отказа.

– интеграция EAM с СМК для учета влияния состояния узлов и агрегатов оборудования на стабильность выпуска продукции и информирования системы ТОиР с выдачей рекомендаций при выявлении нарушения качества продукта.

Таким образом, обзор цифровых инструментов и лучших практик управления ТОиР в производстве алюминия показывает, что фундамент цифровой трансформации составляют системы управления активами предприятия (CMMS/EAM-системы). Данные информационные системы согздают единое информационное пространство для учета единиц оборудования, планирования ремонтов, управления ресурсами и формирования отчетности. На следующем уровне цифрового развития осуществляется внедрение промышленного интернета вещей (IIoT) и предиктивного обслуживания для перехода к ремонту по фактическому состоянию оборудования. Перспективным для целей организационной надежности и обеспечения качества алюминия является интеграции СМК с данными о качестве продукции в систему управления ТОиР.

Устойчивый системный эффект достигается при комплексной интеграции всех классов инструментов в единую цифровую среду управления предприятием, что позволяет создать замкнутый цикл «диагностика – прогнозирование – планирование – выполнение – контроль качества».

Выявленные тенденции и закономерности необходимо учитывать при разработке системы ТОиР для производства алюминия, отвечающей требованиям стандартов RCM и FMEA и обеспечивающей гарантированный уровень организационной надежности. 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.

ВЫВОДЫ ПО ПЕРВОЙ ГЛАВЕ

1. 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.

2. Традиционно применяемая на алюминиевых заводах система планово-предупредительных ремонтов (ППР) основана на календарных циклах и не учитывает реального состояния оборудования. Это приводит к двум негативным последствиям: избыточности ремонтов (при исправном состоянии) и внезапным отказам (когда фактический износ превышает нормативный). Особенно остро проблема проявляется для узлов, работающих в зоне высоких температур (футеровка электролизеров, анодные штыри, газоходы).

3. Обзор научных публикаций последних 10 лет позволил выделить четыре ключевых направления исследований в области ТОиР для алюминиевого производства: статистический анализ отказов и моделирование надежности (методы пространства состояний, оценка MTBF, коэффициента

готовности); применение FMEA и RCM для планирования ТОиР; цифровизация и предиктивная аналитика (IIoT, машинное обучение, цифровые двойники); организационные аспекты, стандартизация и связь ТОиР с качеством продукции.

4. Установлено, что в существующих публикациях недостаточно полно раскрыты вопросы интеграции данных о текущем качестве продукции (индекс воспроизводимости Cpk, доля брака) 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.

5. Анализ действующей нормативной базы показал, что в России отсутствуют стандарты, регламентирующие организацию ТОиР на алюминиевых заводах. Единственный отраслевой стандарт ГОСТ 34196-2017 касается только технических требований к электролизерам. Перспективная программа стандартизации алюминиевой промышленности на 2022-2026 гг. ориентирована на расширение потребления алюминия в смежных отраслях, но не включает разделов по ТОиР, ремонтным нормативам, диагностике оборудования, цифровому управлению и квалификации персонала ремонтных служб.

6. На основе обзора международных методологий (FMEA, RCM, TPM, предиктивная аналитика) и лучших практик ведущих компаний (РУСАЛ, Alcoa, Hydro, Rio Tinto) выявлено, что цифровая трансформация ТОиР должна базироваться на внедрении CMMS/EAM-систем как единого информационного ядра, затем надстраиваться системами IIoT и предиктивной аналитики для перехода к обслуживанию по фактическому состоянию, а перспективным направлением является интеграция параметров качества продукции в контур управления ТОиР. Устойчивый эффект достигается при

комплексной интеграции всех инструментов в единую цифровую среду предприятия (замкнутый контур «диагностика – прогнозирование – планирование – выполнение – контроль качества»).

2 ОРГАНИЗАЦИЯ НАДЕЖНОСТНО-ОРИЕНТИРОВАННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ ОТКАЗОВ НА КАЧЕСТВО ПРОДУКЦИИ

2.1 Диагностика простоев, внеплановых отказов и потерь качества продукции при техническом обслуживании оборудования на предприятиях

Для разработки объективных организационно-технических решений по развитию системы ТОиР недостаточно констатировать наличие отказов и простоев. Необходим системный анализ оценки масштаба негативных явлений и их структуры: наиболее уязвимые виды оборудования, последствия внеплановых остановов, взаимосвязь состояния технических систем с качеством выпускаемой продукции.

Проведена диагностика проблем ТОиР на предприятиях алюминиевой промышленности на основе открытых отраслевых данных (2010-2025 гг.), статистики предприятий ОК «РУСАЛ» и результатов научных исследований. Анализ структурирован по пяти последовательным уровням:

– отраслевая классификация отказов оборудования, показывающая динамику структуры отказов по типу, и оценка масштаба простоев в отрасли;

– статистика аварийных ситуаций и показатели надежности;

– экономические последствия простоев, в том числе по типам оборудования, включая динамику роста стоимости простоя;

– связь состояния оборудования с качеством продукции;

– отраслевые барьеры внедрения проактивного ТОиР.

Масштаб проблемы ТОиР в промышленности достигает глобальных уровней. Согласно отчету технологической компании Siemens за 2024 год, мировые потери ведущих промышленных предприятий от незапланированных простоев составляют в среднем 27 часов простоя ежемесячно, что соответствует около 11% от суммарной выручки [145]. Для металлургии среднегодовые потери от простоев и брака достигают 20% годовой

производительности, причем доли времени простоя по причинам распределяются специфическим образом (табл. 2.1.1).



Рисунок 2.1.1 – Структура простоев оборудования металлургических предприятий по видам причин в 2024 году (составлено автором по [145,127])

Диаграмма показывает, что в 2024 году основная доля простоев оборудования на металлургических предприятиях приходилась на отказы оборудования (48%) и переналадку (22%). При этом заметно с 2019 года выросли доли дефицита запчастей (+3 п.п.) и потерь качества (+2 п.п.), что указывает на усиление логистических проблем и ужесточение требований к качеству. Доля ошибок персонала составляет 11%. Таким образом, хотя технические простои сокращаются, организационные (дефицит материалов) и технологические (переделка брака) факторы приобретают все большее значение.

По данным исследовательских проектов Аль-Рахби и соавторов по анализу надежности оборудования для производства анодов [108], в условиях последовательного ремонта одним мастером в анодной перегрузочной станции система сохраняла коэффициенты готовности на уровне 80% при среднем времени до отказа всей системы (MTBF) 150 часов. Данные таблицы

2.1.1 показывают, что в отрасли сохраняются значительные резервы повышения готовности оборудования за счет изменения организации ТОиР.

Таблица 2.1.1 – Показатели надежности оборудования на примере алюминиевых анодных установок (составлено автором по [108,141,142])

Вид оборудования (тип отказов)	Среднее время до отказа системы (MTBF), ч	Коэффициент готовности, %	Средние потери времени на ремонт, ч
Анодная перегрузочная станция (множественные)	150	80	1,00
Камерный смеситель (механические)	120	75	2,50
Электрические приводы (внезапные)	350	92	0,65
Гидросистемы кранов (постепенные)	820	95	0,80

В таблице приведены показатели надежности для четырех видов оборудования алюминиевого производства. Информация аккумулирована из источников исследовательских проектов Аль-Рахби, материалам ежегодного симпозиума Light Metals – 2021, статистических данных Международного общества автоматизации (ISA) и оценок показателя общей эффективности оборудования (OEE) [108,141,142]. Наиболее низкая надежность у камерного смесителя (механические отказы): MTBF 120ч, коэффициент готовности 75%, наибольшее время ремонта (2,5ч). Наиболее высокая надежность у гидросистем кранов (постепенные отказы): MTBF 820ч, коэффициент готовности 95%, время ремонта 0,8ч. Электрические приводы занимают промежуточное положение (MTBF 350ч, готовность 92%, ремонт 0,65ч). Анодная перегрузочная станция с множественными отказами имеет MTBF 150 ч, готовность 80%, ремонт 1,0ч. Таким образом, наибольший риск

по частоте отказов и потерям времени связан с камерным смесителем, что требует особого внимания в системе ТОиР.

При этом структура простоев существенно различается в зависимости от типа подразделения:

– производственные цеха (основной передел) характеризуются высокой долей технологических отказов и внеплановых остановов из-за критичности оборудования (до 60 % от общего времени простоев);

– вспомогательные службы (энергохозяйство, ремонтные участки) чаще простаивают из-за организационных сбоев и дефицита запчастей, что свидетельствует о недостаточной интеграции логистики в общий контур управления ТОиР.

В специфике алюминиевого производства высока степень технологических рисков. Экономика алюминиевого производства, где высокая энергоемкость (до 16 тыс. кВтч на тонну алюминия) сочетается с непрерывностью электролиза, крайне чувствительна к вынужденным остановам. Каждый час сверхпланового простоя кранов или электролизеров, по данным Alcoa, может достигать 0,75 млн долл. потерь. Перевод простоев в экономический эквивалент позволяет обосновать окупаемость решений по автоматизации и цифровизации ТОиР (таблица 2.1.2).

Следует отметить, что логистическая причина простоев (дефицит запчастей) за период 2019-2024 гг. выросла на на 3 п.п. Согласно отчетам MaintainX за 2024-2025 года [122,123], 72% предприятий объяснили увеличение стоимости незапланированных простоев именно ростом стоимости запчастей и задержками их доставки**.** При этом 58,9% предприятий, которым удалось снизить затраты на внеплановые простои, связали это улучшение с оптимизацией управления запасами запасных частей.

Таблица 2.1.2 – Стоимость 1 часа незапланированного простоя по типам оборудования алюминиевого производства (составлено автором по [142,141])

Тип оборудования	Стоимость простоя, долл./ч	Характер потерь
Электролизная ванна (серия)	650 000	потеря расплава, деградация футеровки, экологические штрафы
Литейное производство (литье слитков)	190 000	штрафы за недопоставку, простой кранов, остывание ковша
Анодомастерская (линия смешения, формования)	35 000	дефицит анодов, остановка серии, брак анодной массы
Газоочистная установка (рукавные фильтры)	15 000	экологические штрафы, разрежение в электролизерах

В российской металлургии эта проблема приобрела системный характер в условиях санкционного давления. На Магнитогорском металлургическом комбинате доля поставок оборудования от отечественных производителей увеличилась с 71% до 86% в 2024 году, при этом китайские производители стали удовлетворять 11% потребностей комбината. Для алюминиевого производства, где многие виды оборудования (электролизеры, краны большой грузоподъемности) поставлялись по импорту, дефицит оригинальных запчастей остается одним из ключевых факторов роста внеплановых простоев. Это особенно актуально для газоочистных установок (импортные рукавные фильтры и мембранные клапаны) и автоматизированных кранов-перегружателей (импортные редукторы и системы управления).

Доля ошибок персонала в структуре простоев за период 2019-2024 гг. оставалась на стабильном уровне 8-12%, что указывает на сохранение кадровых проблем в системе ТОиР. По данным отчета MaintainX [122], 65,7% предприятий, где в 2024 г. наблюдалось увеличение внеплановых простоев, указали на нехватку рабочей силы и отсутствие необходимых навыков в качестве причины этого роста. Анализ травматизма на

металлургических предприятиях показывает, что 76% случаев происходят по организационным причинам (включая недостатки в организации ремонтных работ и недостаточную квалификацию персонала).

Проблема человеческого фактора в ТОиР имеет не только количественное, но и качественное выражение. Зачастую персонал не воспринимает изменения в системе ТОиР, поскольку руководство технических служб оперативно не адаптирует мастеров к современным подходам. Практический опыт по вовлечению персонала в процесс цифровой трансформации ремонтов показывает металлургическая компания ООО «ВИЗ-Сталь» из Группы НЛМК, где уровень фиксации неисправностей сотрудниками вырос в 13 раз [64]**.** Работа в условиях высокого теплового излучения, запыленности и электромагнитных полей алюминиевого производства вызывает снижение внимания персонала и требует перехода к мобильным инструментам сбора данных с простым интерфейсом при внедрении цифровых систем ТОиР.

Связь качества продукции с отказами оборудования проявляется в виде роста доли брака при отказе или деградации конкретных узлов. К примеру, износ шнека питателя приводит к нестабильной подаче глинозема, что в свою очередь вызывает увеличение содержания кремния в алюминии-сырце. Кроме того, ухудшение качества продукции может быть следствием неправильных режимов работы, вызванных компенсацией неисправного состояния смежного оборудования. В этом случае взаимосвязь состояния оборудования с качеством продукции будет не прямой (первичной), а опосредованной (вторичной), что выявить более сложно.

Таблица 2.1.3 демонстрирует, что отказы критического оборудования алюминиевого производства напрямую влияют на качество продукции, приводя к росту брака до 3,5 процентных пункта от нормированного значения. Наибольший рост брака вызывает нестабильная дозировка глинозема, которая загрязняет металл железом и кремнием. Дефекты анодной рамы, например, перекос анодов, увеличивают брак на 3 процентных пункта за счет снижения

выхода по току и роста примесей. Наименьший рост брака (2,0 п.п.) связан с нарушением уплотнения анодной массы, что ведет к ее повышенному расходу и загрязнению металла. Таким образом, таблица подтверждает необходимость интеграции контроля качества в систему ТОиР.

Таблица 2.1.3 – Взаимосвязь отказов оборудования и качества продукции в производстве алюминия (составлено автором)

Вид оборудования	Вид отказа	Последствия для качества продукции	Рост брака, п.п.
Система подачи глинозема (дозаторы)	Нестабильная дозировка	Неравномерный состав электролита приводит к загрязнению металла Fe, Si	3,5
Анодная рама, механизм подъема	Износ подвески, перекос анодов	Неравномерное распределение тока приводит к снижению выхода по току, росту примесей	3,0
Виброустановка формования анодов	Снижение амплитуды, неравномерное уплотнение	Низкая плотность анодной массы приводит к повышенному расходу анодов, загрязнению металла	2,0

Как было показано ранее, внедрение системы прогнозирования качества продукции во взаимосвязи с состоянием оборудования на Чепецком механическом заводе позволило сократить брак с 10% до целевого уровня в менее чем 1%**.** Для алюминиевого производства аналогичный инструмент позволил бы не только снизить потери от брака, но и повысить сортность алюминия на 1–2 класса без капитальных вложений в переоборудование.

Анализ отраслевых отчетов и публикаций ведущих производителей алюминия (РУСАЛ, Alcoa, Hydro, Rio Tinto) позволяет выделить ключевые разрывы в эффективности ТОиР. На графике 2.1.2 показано сравнение

показателей эффективности ТОиР в производстве алюминия по российским предприятиям и лучших 25% предприятий как мировой бенчмарк.

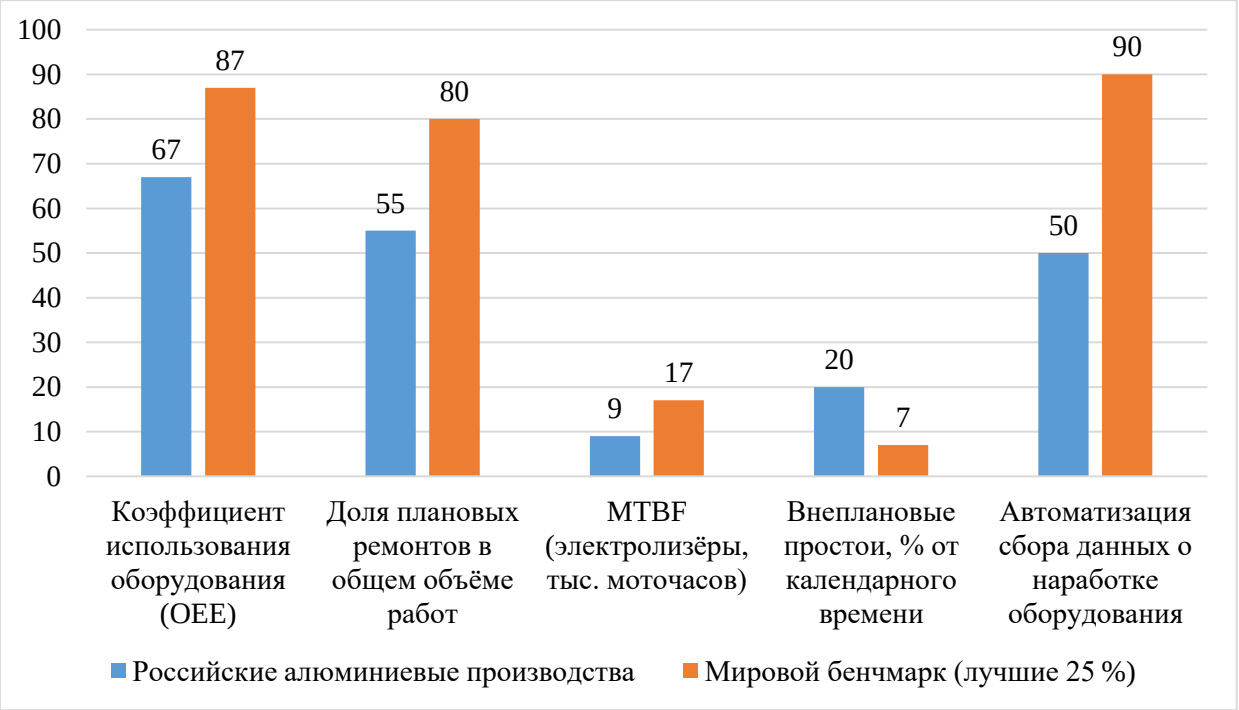


Рисунок 2.1.2 – Сравнение показателей эффективности ТОиР в производстве алюминия (составлено автором)

Коэффициент использования оборудования (OEE) в России составляет 67% против 87% у лидеров, что указывает на потерю более 20% потенциального выпуска продукции. Доля плановых ремонтов в общем объеме работ в России – 55% против 80% у бенчмарка, что говорит о высокой доле реактивного обслуживания и внеплановых простоев. Низкая надежность оборудования подтверждается относительно низким показателем средней наработки на отказ (MTBF), равном 9 тысяч моточасов, т.е. отказы происходят в 1,9 раз чаще. Внеплановые простои в России составляют 20% от календарного времени, что в 2,8 раза больше, чем у лучших мировых производителей. Уровень автоматизации сбора данных о наработке оборудования – 50%. Это является серьезным барьером для перехода к предиктивному обслуживанию и управлению по фактическому состоянию.

Проблемы управления и внедрения проактивного ТОиР на российских предприятиях алюминиевой промышленности заключаются в следующем:

– высокая доля износа оборудования, что увеличивает частоту отказов (потери свыше 200 млрд руб. в год);

– неэффективном анализе причин отказов оборудования согласно методологии RCA, что приводит к формированию системных проблем (до 60% повторных отказов);

– несовершенство стандартов и информационной базы, отсутствие интегрированных CMMS/EAM для сбора данных по наработке оборудования (около 50% данных собирается вручную).

Таким образом, причины отставания российских производств алюминия в развитии ТОиР заключаются в высокой доле износа оборудования, следовательно, в недостаточной автоматизации сбора данных и низкой степени интеграции ТОиР в общий контур управления производством и качеством продукции. Мировые лидеры на системной основе используют данные о качестве и стабильности технологического процесса для корректировки стратегий технического обслуживания, что позволяет им достигать существенно более высоких показателей.

2.2 Модель надежностно-ориентированного технического обслуживания оборудования на основе методологии RCM (FMEA-анализа) и цифрового управления

Одним из наиболее эффективных подходов к организации ТОиР является техническое обслуживание, ориентированное на надежность, описываемое методологией RCM (Reliability Centered Maintenance). В России методология известна как надежностно-ориентированное техническое обслуживание, что закреплено в ГОСТ Р 27.606-2013 [19]. В основе методологии RCM лежит метод FMEA) – анализ видов и последствий отказов, который выполняет функцию фундамента для всей последующей работы по

оптимизации ТОиР (ГОСТ Р 27.303-2021) [29]. Стандарт отмечает, что методология RCM применима для широкого круга технически сложные объектов, к числу которых относятся и производства алюминия. В научной литературе RCM определяется как проактивный подход к техническому обслуживанию. FMEA идентифицирует потенциальные отказы и их вероятные последствия, а также предписывает корректирующие действия. Согласно выше обозначенным ГОСТ, сокращенные названия надежностно-ориентированного ТО и анализа видов и последствий отказов употребляются в России как общепринятые в мировой практике – RCM и FMEA [98].

Техническое обслуживание, ориентированное на надежность (RCM), представляет собой систематизированную методологию определения оптимальных стратегий технического обслуживания оборудования, основанную на анализе функций и видов отказов каждого актива. Методология RCM была разработана в конце 1960-х годов в авиационной промышленности США, когда стало очевидно, что традиционные подходы, построенные на календарных графиках ремонтов, не обеспечивают требуемого уровня безопасности и надежности сложных технических систем.

Международным стандартом RCM является SAE JA1011-2024, устанавливающий ключевые критерии, которым должна соответствовать процедура RCM. Второй стандарт SAE JA1012-2002 детализирует применение данных критериев на практике. Принципиальной особенность RCM является признание того факта, что техническое обслуживание способно лишь поддерживать присущий оборудованию уровень надежности, заложенный при проектировании и не может повысить его выше предела.

Для целей настоящего диссертационного исследования RCM рассматривается не просто как стратегия ремонта, а как методологическая основа для построения системы управления ТОиР, ориентированного на организационную надежность и качество продукции. Применительно к производству алюминия это требует адаптации классической RCM-процедуры

к специфике непрерывных высокотемпературных процессов и многостадийной технологической цепочке.

Понимание последствий отказов должно определять планирование технического обслуживания. В рамках RCM на основе FMEA-анализа разрабатываются оптимальные задачи профилактического обслуживания, предложения по модернизации оборудования, перечень необходимых запасных частей, а также процедуры эксплуатации и ремонта.

FMEA представляет собой систематизированную совокупность мероприятий, целью которых является обнаружение места возможного нахождения потенциальных отказов продукции и процесса, определение действий, которые могут устранить или уменьшить вероятность их возникновения, и документирование всех этих мероприятий. Метод FMEA применим к оборудованию, программному обеспечению, процессам, действиям человека и их различным сочетаниям.

FMEA-анализ является проактивным, подкрепленным фактами выявления видов отказов, оценки их риска и приоритизации действий по снижению риска. Метод FMEA-анализа позволяет:

- выявить потенциальные виды отказов оборудования и процессов;
- определить причины и механизмы возникновения отказов;
- оценить последствия отказов для технологического процесса, продукции, персонала и окружающей среды;
- ранжировать отказы по степени критичности;
- разработать рекомендации по предотвращению или смягчению последствий отказов.

Методология RCM, которая используется для разработки оптимальных стратегий технического обслуживания, опирается на FMEA-анализ как на свой фундамент. RCM обеспечивает системный подход к выявлению потенциальных видов отказов, которые могут нарушить работу производственной системы. Следует отметить, что FMEA-анализ может быть выполнен несколько раз в течение жизненного цикла объекта и адаптирован

для применения во всех отраслях промышленности и организациях любого вида.

В рамках RCM метод FMEA выполняет определенные функции ТОиР, характерные для алюминиевых заводов: электролизное производство, анодные установки, крановое хозяйство, газоочистка (рисунок 2.2.1).



Рисунок 2.2.1 – Функции FMEA в RCM с учетом специфики алюминиевого производства (составлено автором на основе данных [47,19])

В рамках методологии RCM анализ видов и последствий отказов (FMEA) выполняет четыре ключевые функции, адаптированные к условиям алюминиевого производства. Идентификация видов отказов предполагает выявление характерных для электролизеров, кранов-перегружателей и газоочисток поломок (например, трещина анодной рамы, обрыв анодного штыря, износ ходовых колес, разрушение рукавного фильтра). Анализ последствий разделяет локальные эффекты (нарушение токораспределения, перегрев, вибрация) и глобальные (выплеск расплава, останов серии электролизеров, брак металла по примесям, превышение выбросов). Определение причин отказов учитывает конструктивные (усталостное разрушение сварного шва), эксплуатационные (отсутствие смазки, перегрузки), внешние факторы (запыленность, температура, магнитные поля) и человеческий фактор (ошибки монтажа, несвоевременная диагностика).

Наконец, приоритизация видов отказов на основе приоритетного числа риска (RPN) позволяет выбирать оптимальную стратегию ТОиР: для высококритичных отказов – предиктивное обслуживание с виброконтролем и ультразвуковой дефектоскопией, для среднекритичных – планово-предупредительный ремонт с контролем момента затяжки, для низкокритичных – обслуживание по состоянию или текущий ремонт. Приоритетное число риска **(**RPN**)** используется в методике FMEA для ранжирования выявленных видов отказов по степени опасности:

$$\mathrm{RPN_i} = \mathrm{S_i} * \mathrm{O_i} * \mathrm{D_i}, \qquad (2.2.1)$$

где S **–** тяжесть последствий отказа (оценивается от 1 до 10, где 10 – наиболее значительные последствия);

O **–** частота возникновения или вероятность отказа (от 1 до 10, где 10 – наибольшая частота отказа);

D – вероятность необнаруженных отказов до их проявления (от 1 до 10, где 10 – отказ невозможно выявить заранее средствами контроля).

Параметры оцениваются экспертным методом на основе статистики, паспортных данных и опыта эксплуатации.

На рисунке 2.2.1 базовые функции FMEA преобразованы в практические задачи для инженеров и ремонтных служб алюминиевого завода. Без качественного FMEA-анализа дальнейшая работа по методологии RCM теряет свою эффективность, поскольку стратегия обслуживания определяется именно на основе полученных данных о видах, причинах и последствиях отказов.

На примере анодной рамы электролизной ванны проведем анализ видов и последствий отказов. Анодная рама является одним из самых ответственных узлов электролизера для производства алюминия. Она предназначена для подвешивания и токоподвода к анодной секции, а также для регулировки положения анодов в процессе электролиза. От надежности работы анодной рамы напрямую зависят качество получаемого алюминия, уровень выбросов в атмосферу и безопасность персонала.

Характерные виды отказов, возможные в процессе эксплуатации электролизера, выявленные на основе ретроспективных данных, представлены в таблице 2.2.1.

Согласно методики проведения FMEA-анализа для производства алюминия примем следующую шкалу оценки:

– тяжесть последствий отказа (S): 1 – нет заметного влияния; 2-4 – незначительное влияние, возможен мелкий ремонт; 5-7 – существенное влияние на процесс, требуется ремонт средней сложности; 8-9 – сильное влияние, нарушение безопасности процесса; 10 – критические последствия, угрожающие жизни людей и/или окружающей среде;

– вероятность возникновения отказа (O): 1 – возникновение крайне маловероятно; 2-3 – низкая вероятность; 4-6 – средняя вероятность; 7-9 – высокая вероятность; 10 – отказ происходит постоянно;

– вероятность обнаружения отказа (D): 1 – отказ достоверно обнаруживается; 2-3 – высокая вероятность обнаружения; 4-6 – средняя вероятность обнаружения; 7-9 – низкая вероятность обнаружения; 10 – отказ практически невозможно обнаружить.

Таблица 2.2.1 – Систематизация потенциальных отказов оборудования анодной рамы электролизной ванны (составлено автором с использованием [68,39,47])

Функция	Вид отказа	Причина отказа
Обеспечение заданной силы тока в анодной секции	Трещина (излом) анодной рамы	Усталостное разрушение металла из-за вибрации; коррозия; дефекты материала; превышение допустимой нагрузки
Равномерное токораспределение по анодам	Ослабление крепления анодного штыря	Коррозия резьбы; недостаточная затяжка при монтаже; вибрация; перегрузка
Регулировка положения анодов	Заклинивание механизма перемещения анодов	Попадание окалины, пыли (от разгара анодов); деформация деталей механизма; износ подшипниковых узлов
Электрический контакт с системой ошиновки	Обгорание или перегрев контактного соединения	Ослабление контакта из-за вибрации; окисление контактных поверхностей; перегрузка по току
Обеспечение герметизации ванны	Деформация рамы под воздействием температуры	Неравномерный прогрев анодной части; недостаточная вентиляция; неравномерная загрузка агрегата

На рисунке 2.2.2 представлены значения приоритетного числа риска (RPN) поломок анодной рамы электролизной ванны. Согласно экспертным оценкам технологов и инженеров ТОиР наиболее критичным (RPN = 240) является трещина анодной рамы, так как это событие характеризуется критическими последствиями (10) при средней вероятности возникновения (4) и средней вероятности обнаружения (6). Такое сочетание требует разработки мероприятий по предотвращению и позволяет рекомендовать использование

предиктивного обслуживания для данного узла. Среднекритичные отказы (RPN = 175 и 144) имеют приемлемый уровень риска, но также требуют плановых мероприятий и периодического контроля. Наименее критична (RPN = 81) деформация рамы из-за температурных воздействий. Характеризуется значительными последствиями (9), однако отличается меньшей вероятностью возникновения (3) и относительно высокой вероятностью обнаружения (3) за счет использования систем видеомониторинга и датчиков температуры, которые могут своевременно сигнализировать о развитии критического состояния [57,129].

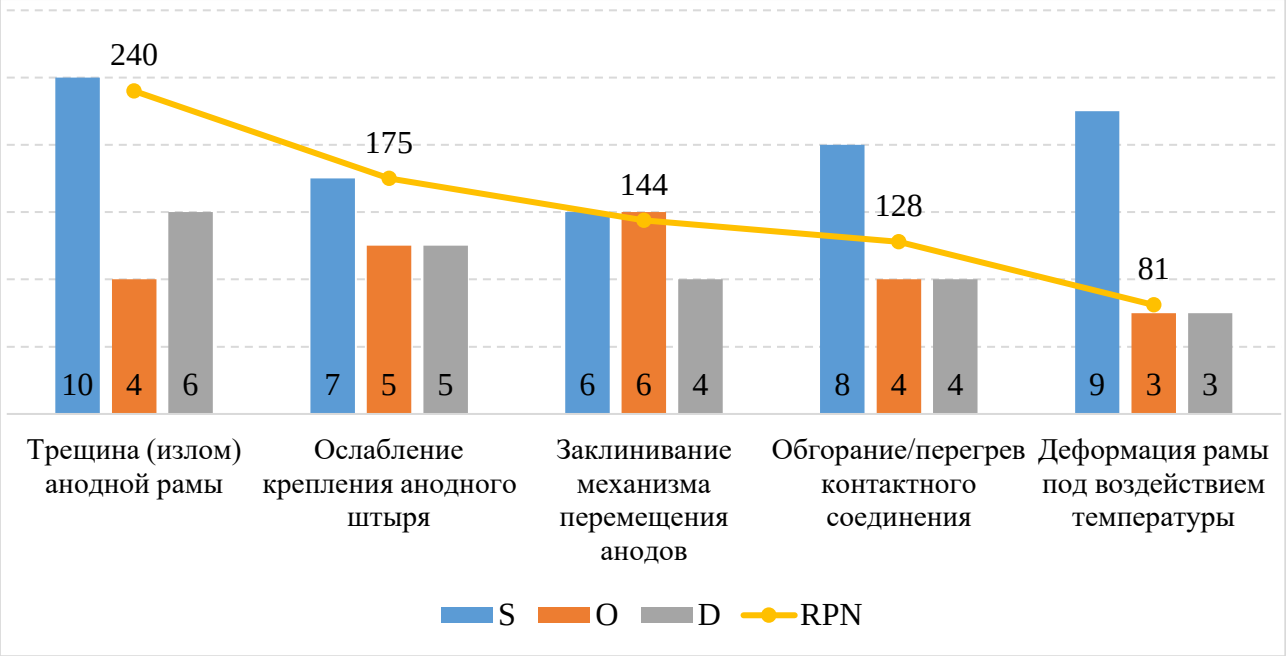


Рисунок 2.2.2 – Приоритетное число риска (RPN) поломок анодной рамы электролизной ванны (составлено автором)

Таким образом, различные виды отказов ранжируются по степени критичности. Важно отметить, что для алюминиевого производства последствия отказа часто связаны не только с выпуском бракованной продукции, но и с риском для здоровья персонала и нарушением экологических требований.

Использование FMEA-анализа в связке с RCM позволяет обоснованно перевести часть оборудования на обслуживание по состоянию (например, для

трещин рамы – установка вибродатчиков и систем АСУ ТП). Для среднекритичных отказов можно оставить систему планово-предупредительных ремонтов, но скорректировать межремонтные интервалы. Для менее критичных отказов (деформация рамы) целесообразно применять профилактические меры, такие как теплоотражающие экраны и вентиляцию [143].

Как правило, на предприятиях устанавливаются пороговые значения RPN, определяющие необходимость принятия мер:

RPN ≥ 200 – критический риск, требуются немедленные корректирующие действия;

100 ≤ RPN < 200 – высокий риск, требуются меры по снижению;

50 ≤ RPN < 100 – средний риск, рекомендуется рассмотреть корректирующие действия;

RPN < 50 – низкий риск, дополнительных мер обычно не требуется.

После внедрения корректирующих мер по наиболее критичному виду отказа (трещина анодной рамы) возможно снижение RPN с 240 до 60 (таблица 2.2.2). В целях снижения вероятности возникновения отказа внедрено предиктивное обслуживание на основе анализа вибрации, усилен контроль затяжки анодных штырей, повышена периодичность и глубина неразрушающего контроля. Для повышения вероятности обнаружения дефекта организована система непрерывного мониторинга вибрации с пороговой сигнализацией. При этом, тяжесть последствий не изменилась, поскольку даже при своевременном обнаружении и снижении вероятности поломка анодной рамы ведет к аварийной остановке серии электролизеров. Конструктивное изменение узла выходит за рамки ТОиР и относится к стадии проектирования, поэтому в FMEA-анализе для действующего производства S не снижается.

Таблица 2.2.2 – Результат внедрения корректирующих мер по наиболее критичному виду отказа – трещине анодной рамы (составлено автором)

Параметр	До внедрения корректирующих мер (базовый FMEA)	После внедрения корректирующих мер (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

Таким образом, риск отказа был снижен в 4 раза, что является подтверждением эффективности применения подхода FMEA внутри RCM. Для алюминиевого завода, имеющего порядка 500 однотипных электролизеров, эффект от предотвращения только одного отказа типа «трещина анодной рамы» может быть существенным. FMEA позволяет системно подойти к организации производства с акцентом на качество продукции и надежность. На основе результатов FMEA-анализа разрабатываются стратегии ТОиР, что напрямую соотносится с задачами управления надежностью технической системы.

FMEA должен быть интегрирован в общую систему менеджмента качества предприятия. Результаты FMEA используются при разработке стандартов предприятия, технологических регламентов и инструкций по ТОиР. Это особенно важно для сертификации по стандартам ISO 9001 (системы менеджмента качества) и ISO 14001 (экологический менеджмент), что актуально для алюминиевых производств [127].

Взаимодействие FMEA с ТОиР на этапах жизненного цикла производственного процесса должно заключаться в следующем:

1) на этапе проектирования и разработки нового оборудования – анализ видов и последствий потенциальных отказов конструкции (Design FMEA, DFMEA) для оценки надежности еще до физической реализации;

2) на этапе подготовки и осуществления производственного процесса – анализ видов и последствий потенциальных отказов процесса (Process FMEA, PFMEA) для выявления скрытых проблем и продления межремонтных интервалов;

3) на этапе эксплуатации и технического обслуживания – интеграция анализа видов и последствий отказов в контексте технического обслуживания (Maintenance FMEA) в деятельность ремонтных служб, с анализом эффективности уже проведенных ремонтов и корректировкой планов.

FMEA-анализ выступает как один из центральных инструментов системы обеспечения надежности и замыкает «петлю качества»: от прогноза до контроля исполнения и снова до прогноза на основе обновленных данных.

Изучение вопросов применения FMEA-анализа для надежностно-ориентированного технического обслуживания оборудования (RCM) в производстве алюминия позволило получить следующие научно-практически результаты. FMEA-анализ является методической основой методологии RCM как вспомогательный инструмент формирования базы для принятия решений о выборе стратегий технического обслуживания, позволяет систематизировать знания об отказах оборудования, их причинах и последствиях. Использование приоритетного числа риска (RPN) дает возможность количественно ранжировать риски и обоснованно распределять ресурсы на ТОиР.

Апробация методики интеграции FMEA в RCM при организации ТОиР алюминиевых заводов на примере анодной рамы алюминиевого электролизера показала ее практическую применимость. На основе результатов FMEA-анализа могут быть разработаны дифференцированные стратегии ТОиР с интегрированным прогнозированием и плановыми ремонтами. При этом после внедрения предиктивной аналитики для наиболее критичных отказов

RPN может быть снижен в 4 раза. Для предприятий алюминиевой отрасли, стремящихся к переходу на обслуживание по фактическому состоянию, FMEA служит инструментом обоснования внедрения предиктивных технологий. Наиболее критичные отказы (RPN ≥ 200) требуют приоритетного перевода на режим предиктивного обслуживания оборудования, основанный на мониторинге состояния оборудования в реальном времени и прогнозировании отказов до их возникновения.

Разработанные подходы к FMEA-анализу могут быть рекомендованы для внедрения на алюминиевых заводах с целью повышения надежности оборудования, снижения затрат на ТОиР и улучшения качества продукции. Дальнейшие исследования будут направлены на разработку методики выбора оптимальных стратегий ТОиР для различных классов критичности отказа и создание алгоритмов автоматизированной обработки данных эксплуатации для актуализации FMEA в реальном масштабе времени.

На рисунке 2.2.3 представлена разработанная концептуальная схема проактивного управления ТОиР на основе RCM 4.0, которая состоит из четырех взаимосвязанных уровней.

Стратегический уровень (уровень 4) обеспечивает управление знаниями и ключевыми показателями эффективности. На этом уровне выполняются анализ корневых причин отказов (RCA), периодическая корректировка RCM-стратегий (обновление FMEA-таблиц и пороговых значений RPN), бенчмаркинг с лучшими мировыми практиками, а также бюджетирование ТОиР в корпоративной ERP-системе. Данный уровень замыкает долгосрочные петли улучшения, позволяя накапливать опыт и системно повышать надежность.

Тактический уровень (уровень 3) образует аналитическое ядро RCM. Он включает три основных блока. Блок 3.1 – детальная база данных отказов (FMEA) с выделением пяти категорий последствий, где отдельно классифицируется влияние на качество продукции.

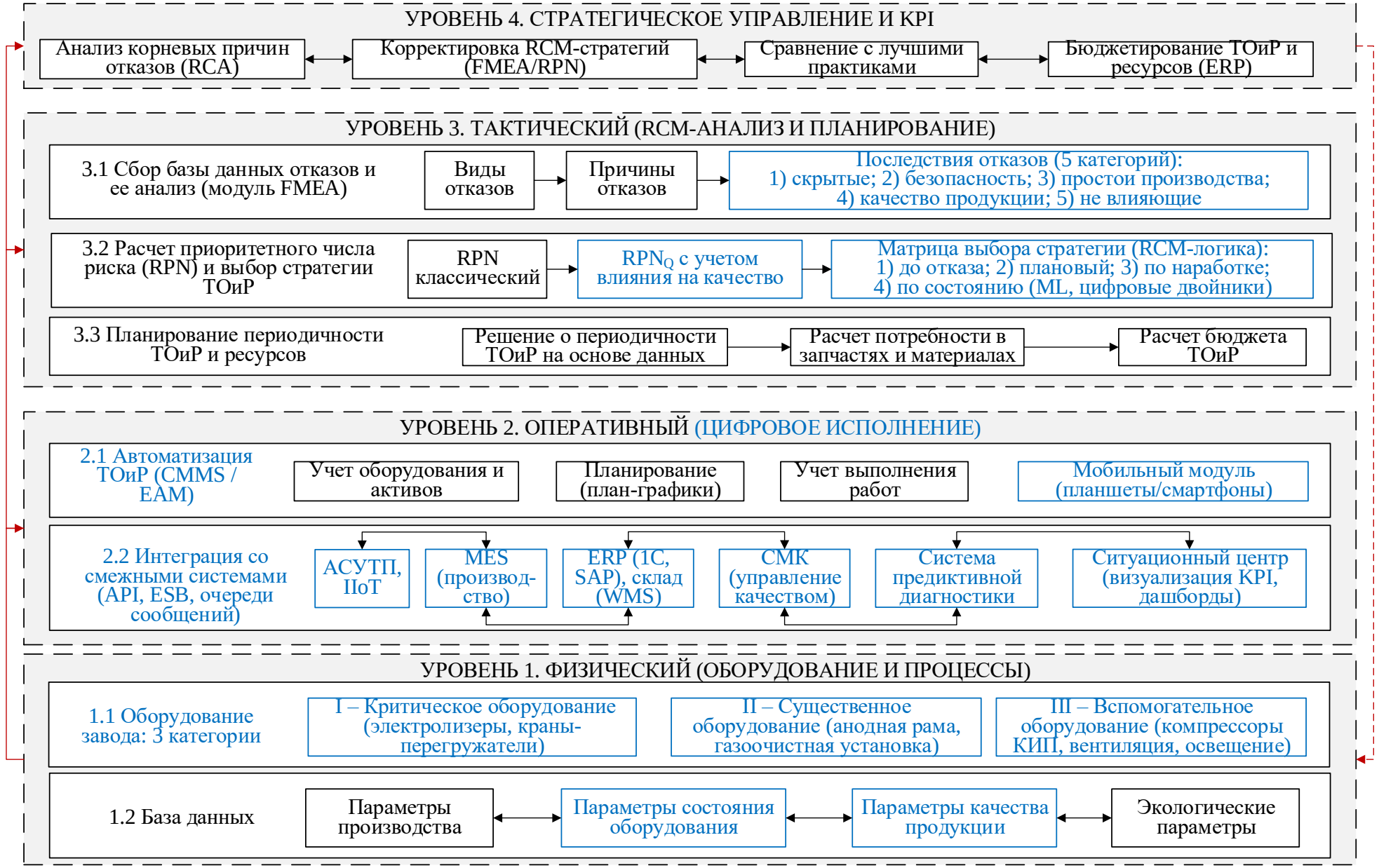


Рисунок 2.2.3 – Модель надежностно-ориентированного ТОиР на основе методологии RCM (FMEA-анализа) и цифрового управления (составлено автором)

Блок 3.2 обеспечивает расчет классического приоритетного числа риска (RPN) и модифицированного показателя RPN_Q, учитывающего влияние на качество:

$$RPN_Q = RPN * \left(1 + \frac{QS}{10}\right), \quad (2.2.2)$$

где QS – тяжесть последствий отказа для качества продукции (оценивается по шкале от 0 до 10);

RPN – классическое приоритетное число риска (S*O*D).

На этой основе осуществляет выбор оптимальной стратегии ТОиР из пяти возможных вариантов: эксплуатация до отказа, плановые ремонты, обслуживание по наработке, обслуживание по фактическому состоянию или предиктивное обслуживание с использованием цифровых двойников.

Блок 3.3 выполняет планирование периодичности ремонтных воздействий с использованием данных предиктивных моделей, формирует потребность в запасных частях и расходных материалах и рассчитывает бюджет ТОиР.

Оперативный уровень (уровень 2) отвечает за цифровую реализацию принятых решений. Блок 2.1 представляет собой CMMS/EAM-систему, которая ведет учет активов, формирует план-графики, регистрирует выполнение заказ-нарядов и предоставляет мобильный доступ ремонтному персоналу. Блок 2.2 обеспечивает интеграцию со смежными информационными системами (АСУ ТП, MES, ERP, СМК, WMS, система предиктивной диагностики PdM, ситуационный центр) через унифицированные программные интерфейсы API и корпоративную шину данных. Именно на этом уровне происходит автоматическая генерация ремонтных заданий при достижении пороговых значений RPN_Q или прогнозов отказов, а также передача данных об исполнении в смежные контуры.

Специфика алюминиевого производства требует дифференцированного подхода к RCM-анализу для различных классов оборудования. В рамках

диссертации предлагается трехуровневая классификация активов по степени влияния на организационную надежность и качество продукции. Физический уровень (уровень 1) включает три категории критичности оборудования: критическое (I) – электролизеры, главные трансформаторы, системы подачи глинозема; существенное (II) – анодные рамы, газоочистки, смесители, вибропрессы, краны-перегружатели; вспомогательное (III) – вентиляция складов, освещение, мелкий инструмент.

Ниже в этом уровне расположен блок результатов, фиксирующий четыре группы выходных параметров:

– производственные параметры (объем выпуска, энергоемкость, время простоев, общая эффективность оборудования OEE);

– параметры состояния оборудования (наработка (моточасы), достижение порогов вибрации или температуры);

– качество продукции (сортность алюминия, содержание примесей Fe и Si, индекс воспроизводимости Cpk);

– экологические параметры (выбросы фторидов, смолистых веществ, парниковых газов).

Именно эти результаты через замкнутые контуры обратной связи инициируют корректировку стратегий на вышестоящих уровнях (тактическом и стратегическом), замыкая цикл непрерывного улучшения системы ТОиР.

Завершают схему три замкнутых контура обратной связи, которые подчеркивают непрерывное улучшение системы. Контур качества замыкает передачу данных от СМК (индекс способности процесса Cpk, доля брака) в RCM-ядро, что позволяет корректировать стратегии ТОиР при ухудшении стабильности процесса. Контур надежности использует данные IIoT-датчиков для актуализации FMEA-таблиц и RPN, а после выполнения ремонта – фиксирует изменение показателей MTBF и коэффициента готовности, пересчитывая приоритеты. Контур затрат связывает бюджетирование в ERP с фактическими списаниями материалов и трудозатратами, выявляя отклонения и позволяя оптимизировать бюджет ТОиР. Так, предложенная схема

объединяет стратегические, тактические, оперативные и физические компоненты в единую цифровую среду, обеспечивая непрерывный цикл сбора данных, анализа, принятия решений и обратной связи.

Таким образом, классическая методология RCM не учитывает влияния отказов оборудования на качество продукции как отдельной категории последствий. В настоящей работе предложено расширение RCM-модели введением пятой категории отказов, влияющих на качество, но не приводящих к немедленной остановке. Соответственно предложен модифицированный показатель RPN_Q, интегрирующий данные системы менеджмента качества в приоритетное число риска.

Кроме того, в отличие от классических RCM, реализуемых на основе ежегодных экспертных сессий, предлагаемая схема базируется на трех замкнутых цифровых контурах (качество – надежность – затраты), обеспечивающих непрерывную автоматическую актуализацию FMEA-таблиц, RPN и стратегий обслуживания. Это позволяет перейти от статичного RCM-анализа, выполняемого раз в 1-2 года, к динамическому RCM 4.0, работающему в режиме реального времени с использованием IIoT, предиктивной аналитики и цифровых двойников. Применительно к алюминиевому производству предложена трехуровневая категоризация активов и приведены конкретные примеры стратегий ТОиР для электролизеров, анодных рам и газоочисток, что адаптирует общий подход к отраслевым рискам и непрерывности технологического процесса.

2.3 Методика организации процесса прогнозирования качества продукции на основе моделей машинного обучения и интеграции систем технического обслуживания и менеджмента качества

В условиях цифровой трансформации производственных систем проблема обеспечения стабильности качества продукции приобретает новое измерение. Традиционные методы статистического контроля качества,

ориентированные на обнаружение брака на выходе, уступают место предиктивным моделям, интегрированным в контур управления технологическими процессами. Одним из критических факторов, дестабилизирующих качество, является техническое состояние оборудования: его деградация, износ и внезапные отказы приводят к сбою настроек, нарушению режимов обработки и, как следствие, к появлению систематических дефектов.

Исследованиям в области прогнозирования отказов оборудования как фактора обеспечения качества продукции посвящено множество трудов. Вклад в развитие теории надежности оборудования и влияния отказов на качество продукции внесли Гусев Е.В. и Пронкин А.А. [32], Лыкасов П.В. и соавторы исследовали методы прогнозирования состояния оборудования для целей разработки автоматизированной системы технического обслуживания и ремонта [52], в том числе, Андронов А.Н. и Бадокин Т.Е. изучили перспективы использования методов машинного обучения, нейросетевого моделирования [3].

Отдельное направление составляют исследования, посвященные проблемам внедрения предиктивной аналитики в российских реалиях. Брюхова А.А. и Костюнина Т.Н. провели анализ барьеров цифровизации, включая отсутствие системного подхода, трудности с предиктивной технической диагностикой и завышенные ожидания от готовых решений [11], Ершов А.Н. предложил архитектурные решения на основе туманных и граничных вычислений, адаптированные к условиям российских промышленных предприятий [37]. Вопросы совершенствования системы управления качеством продукции на основе математической статистики и цифровых технологий представлены в статьях Малышевой Т.В. [53], применения российских цифровых систем управления качеством с использованием возможностей искусственного интеллекта и их интеграции с CAQ-системами в публикациях Метревели И.С. [60].

Традиционные системы управления качеством на алюминиевых заводах ориентированы на контроль готовой продукции (алюминий-чушки, катанка, анодная масса) по завершении производственного цикла. Для многостадийного производства алюминия, где технологическая цепочка включает десятки взаимосвязанных переделов, запаздывание сигнала о снижении качества приводит к значительным потерям.

В параграфе 2.1 было показано, что доля потерь от переделки брака в структуре простоев оборудования выросла с 2019 года по 2024 год на 2 процентных пункта, что подтверждает гипотезу о необходимости интеграции управления качеством в контур управления ТОиР. В этой связи, принципиально важным становится переход к проактивному прогнозированию на основе данных о техническом состоянии оборудования в реальном времени.

Предлагаемая методика прогнозирования качества продукции базируется на многомерном анализе связей между техническим состоянием оборудования и качественными характеристиками производимого алюминия. В качестве входных переменных (предикторов) выступают параметры, характеризующие состояние критического и существенного оборудования (категории I и II согласно классификации из параграфа 2.2):

– вибрация и температура подшипников кранов-перегружателей и электродвигателей;

– показатели работы питателей глинозема и дозаторов;

– разрежение в газоочистных установках;

– токовая нагрузка и напряжение на электролизерах;

– данные о наработке агрегатов и межремонтных интервалах;

– параметры работы анодных рам и смесительного оборудования.

Прогнозируемыми выходными переменными являются ключевые показатели качества продукции:

– содержание железа и кремния в первичном алюминии;

– фракционный состав глинозема;

– плотность анодной массы и прочность обожженных анодов;

– индекс воспроизводимости Cpk для стабильности процесса;

– доля брака по отдельным видам дефектов.

Для построения прогнозных моделей предлагается использовать гибридный подход, сочетающий классические методы регрессионного анализа и методы машинного обучения. Выбор конкретного алгоритма зависит от объема и качества доступных исторических данных, а также от требуемой интерпретируемости модели.

Ключевым элементом разрабатываемой методики выступает расширенная модель прогнозирования с модифицированным показателем качества RPN_Q, предложенная в параграфе 2.2. В контуре прогнозирования качества на основе данных о техническом состоянии оборудования RPN_Q используется как динамический предел: при превышении рассчитанного значения, определяемого по текущим данным мониторинга, система инициирует внеплановую диагностику соответствующего оборудования и формирует рекомендацию по корректировке режимов или проведению ремонтных воздействий.

В основе такого перехода лежит математический аппарат, преобразующий поток данных с сенсоров в количественные оценки надежности. Помимо модифицированного показателя RPN_Q, в состав математического аппарата методики могут входить:

- множественная линейная регрессия (для установления линейных связей между отдельными параметрами оборудования и качеством продукции);
- метод случайного леса (Random Forest) – ансамблевый алгоритм, устойчивый к мультиколлинеарности входных переменных и переобучению;
- нейронные сети (многослойный персептрон) для моделирования сложных нелинейных зависимостей при наличии достаточного объема исторических данных;

– градиентный бустинг (например, XGBoost) – метод, где каждая модель добавляется с целью минимизации функции потерь, используя градиентный спуск (используется в задачах прогнозирования качества металлургической продукции).

Общий вид прогнозной модели может быть представлен как:

$$y = (t + \Delta t) = f(x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t);\ MTBF(t), RPN_Q(t)), \qquad (2.3.1)$$

где y = (t + Δt) – прогнозируемый показатель качества на период Δt;

x_i (t) – значения параметров технического состояния оборудования в момент времени t;

MTBF(t) – средняя наработка оборудования между отказами, согласно ГОСТ Р 27.013-2019 [28];

$RPN_Q(t)$ – приоритетное число риска с учетом влияния на качество продукции.

Предлагаемая методика организации процесса прогнозирования качества продукции на основе данных о техническом состоянии оборудования представлена на рисунке 2.3.1.

Методика включает шесть последовательных шагов. На первом этапе формируется единая база данных, на основе записей о работе оборудования (АСУ ТП, данные IIoT-датчиков) и результатов контроля качества продукции создается интегрированное хранилище. В рамках этого хранилища временные ряды параметров оборудования и показателей качества синхронизируются по времени, после чего производится обработка данных с целью удаления пропусков и выбросов, и их нормализация.

Второй этап посвящен выбору целевых показателей качества. Для каждого технологического передела алюминиевого завода определяются наиболее значимые характеристики качества. Например, для электролизного цеха такими показателями выступают содержание железа и кремния в алюминии-сырце, для анодомастерской – плотность анодной массы. Для

каждого выбранного показателя устанавливаются допустимые пределы (классы сортности) и целевые значения индекса воспроизводимости Cpk.

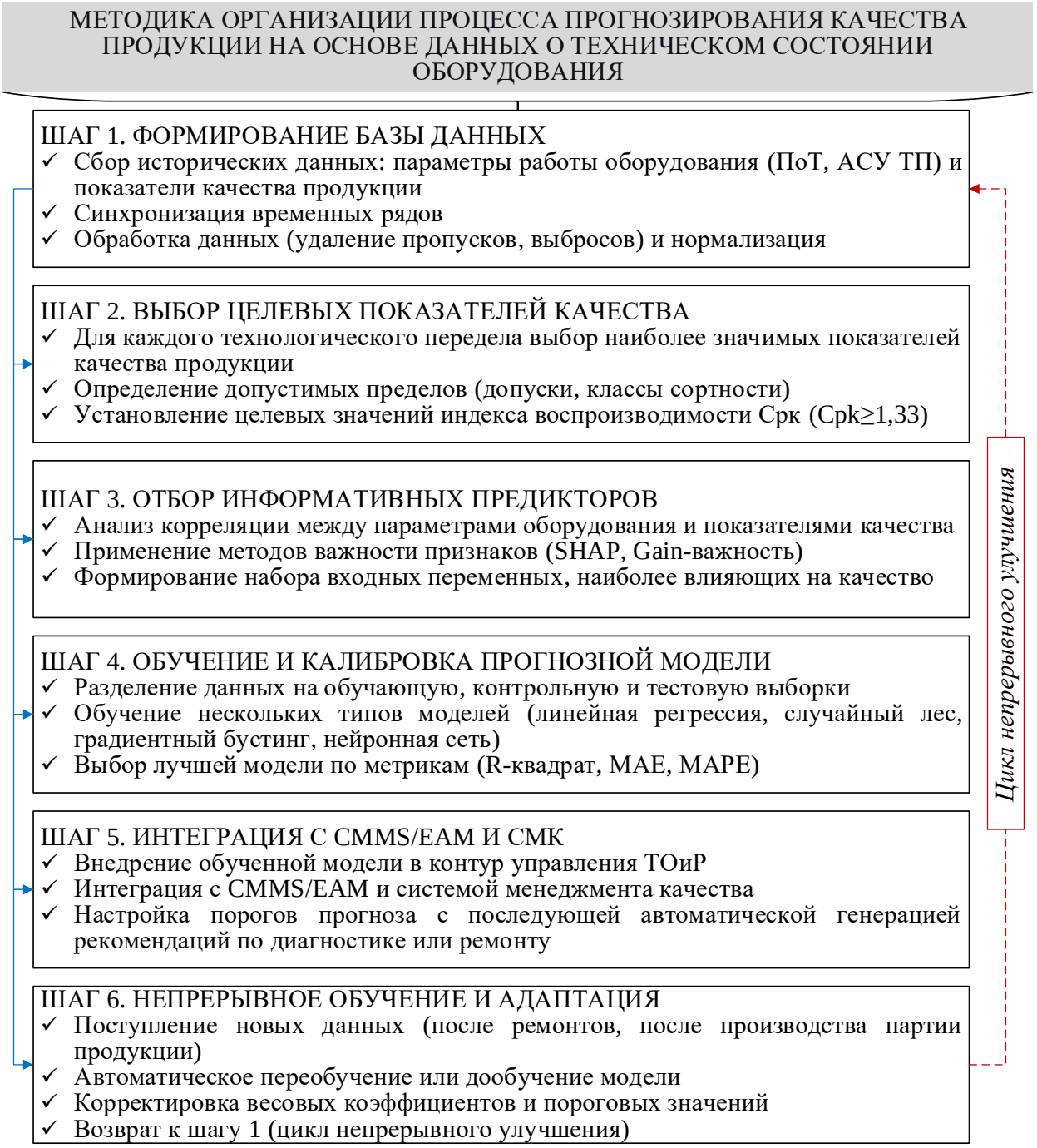


Рисунок 2.3.1 – Методика организации процесса прогнозирования качества продукции на основе данных о техническом состоянии оборудования в цифровой среде (составлено автором)

Индекс воспроизводимости Cpk показывает, насколько стабильно технологический процесс укладывается в заданные технические допуски (поле между верхней и нижней границей допуска). Он учитывает не только разброс значений (σ), но и центрирование процесса относительно середины поля допуска. Для стабильных процессов в международной практике рекомендован уровень не ниже 1,33. Ранее, в ГОСТ Р 50779.42-99 «Статистические методы. Контрольные карты Шухарта» (недействителен с 2022 года) было прямо указано минимальное приемлемое значение индекса 1,33. На сегодняшний день, показатель Cpk упоминается в стандартах ГОСТ Р ИСО 22514-4-2021 [24], ГОСТ Р ИСО 22514-2-2015 [23], ГОСТ Р ИСО 21747-2010 [22]. Значение Cpk≥1,33 является в них общепринятым бенчмарком. Данный показатель означает, что разброс параметров качества занимает 75% от всего поля технического допуска, т.е. процесс обладает достаточным запасом прочности, позволяющим выпускать продукцию с предсказуемо малым уровнем брака даже при естественных колебаниях.

На третьем этапе производится отбор информативных предикторов. С помощью методов корреляционного анализа и оценки важности признаков (SHAP-значения, Gain-важность) из нескольких десятков потенциальных параметров выделяются те, которые наиболее сильно влияют на целевые показатели качества. Применительно к алюминиевому производству в число таких ключевых предикторов входят стабильность подачи глинозема (может вызывать рост примесей Fe и Si), температура анодной рамы, равномерность токораспределения и другие технологические переменные.

Четвертый этап – обучение и калибровка прогнозной модели. Исторические данные разбиваются на обучающую, контрольную и тестовую выборки, на которых обучаются несколько типов моделей: линейная регрессия, случайный лес, градиентный бустинг (XGBoost), нейронная сеть. Выбор лучшей модели осуществляется по метрикам качества – коэффициенту детерминации (R2), средней абсолютной ошибке (MAE), средней абсолютной процентной ошибке (MAPE).

На пятом этапе обученная модель интегрируется в контур управления техническим обслуживанием и ремонтами. Происходит ее интеграция с CMMS/EAM и системой менеджмента качества (СМК). Далее система автоматически отслеживает прогнозируемые показатели качества, и при достижении порогового значения (например, ожидаемый брак превышает 2%) генерирует рекомендацию по внеочередной диагностике или ремонту оборудования.

Шестой этап обеспечивает непрерывное обучение и адаптацию. По мере поступления новых данных (после каждого выполненного ремонта или после каждой партии продукции) модель автоматически переобучается (или дообучается), корректируя весовые коэффициенты и пороговые значения. Тем самым достигается постоянное повышение точности прогнозов и устойчивость работы системы в изменяющихся производственных условиях.

На рисунке 2.3.2 представлена организационная схема количественной оценки зависимости качества от отклонения параметров работы оборудования на примере производства блока цилиндров из алюминия для двигателей внутреннего сгорания для изделий машиностроения. Износ подшипников или нарушение его балансировки приводит к биению инструмента, что вызывает овальность при точении или разбивку отверстия при фрезеровании, в результате возникает до 12% брака на высоких вибрациях [43].

Процедура организована в пять последовательных этапов таким образом, чтобы замкнуть «петлю качества»: от сбора данных с подшипника до предотвращения брака блока цилиндров. Ключевая задача первого этапа заключается в установлении математической взаимосвязи уровня вибрации подшипника (X) с ожидаемой величиной овальности (Y) для определения критического параметра мониторинга. Ограничения по уровню вибрации регламентированы ГОСТ 34905.4-2022 [18]. Зависимость между параметрами имеет вид уравнения линейной регрессии: $y=3{,}5415x–6{,}7976$ (рисунок 2.3.3).

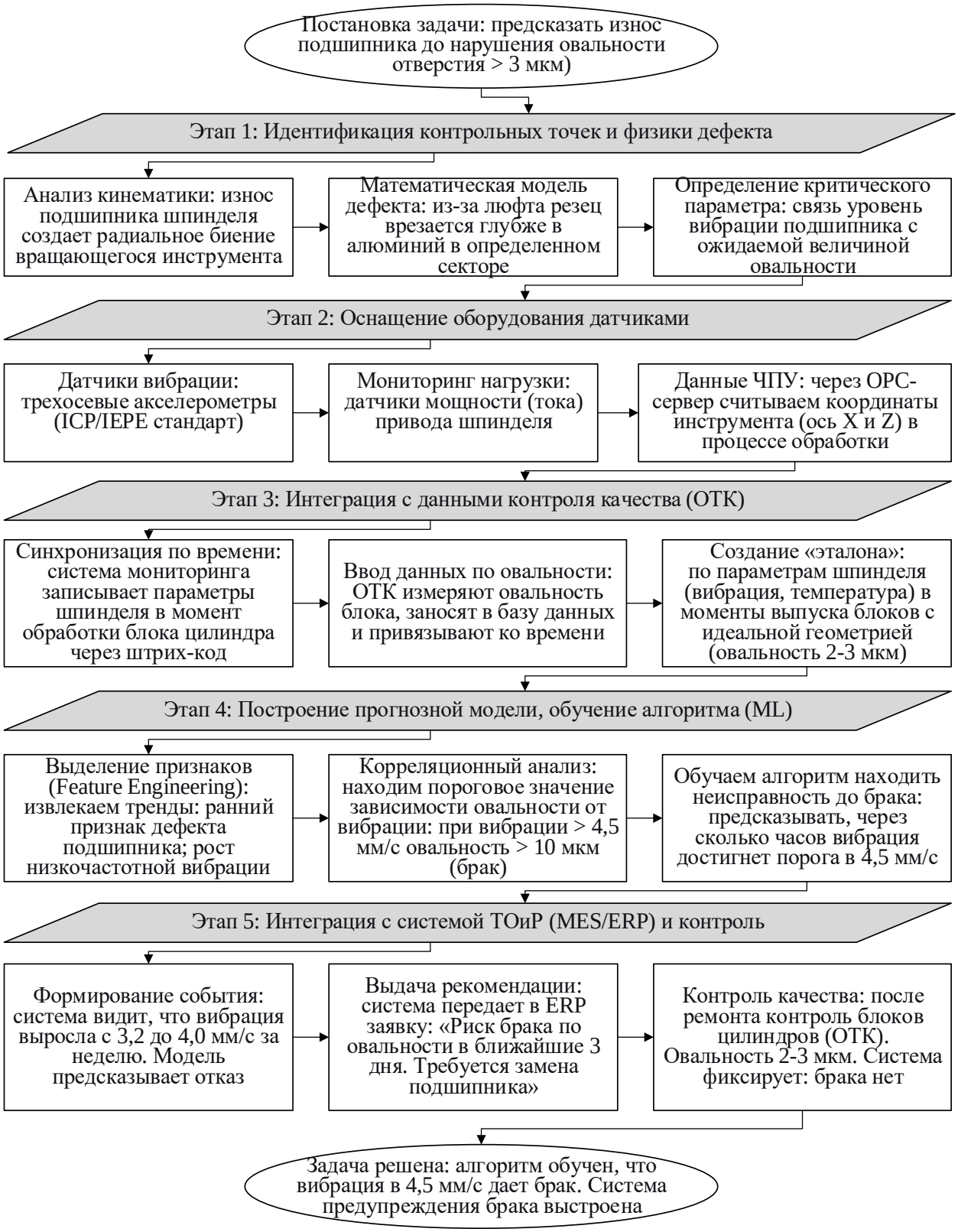


Рисунок 2.3.2 – Последовательность этапов предупреждения брака на примере выстраивания зависимости между износом оборудования и качеством изделия (составлено автором с использованием [43,18])

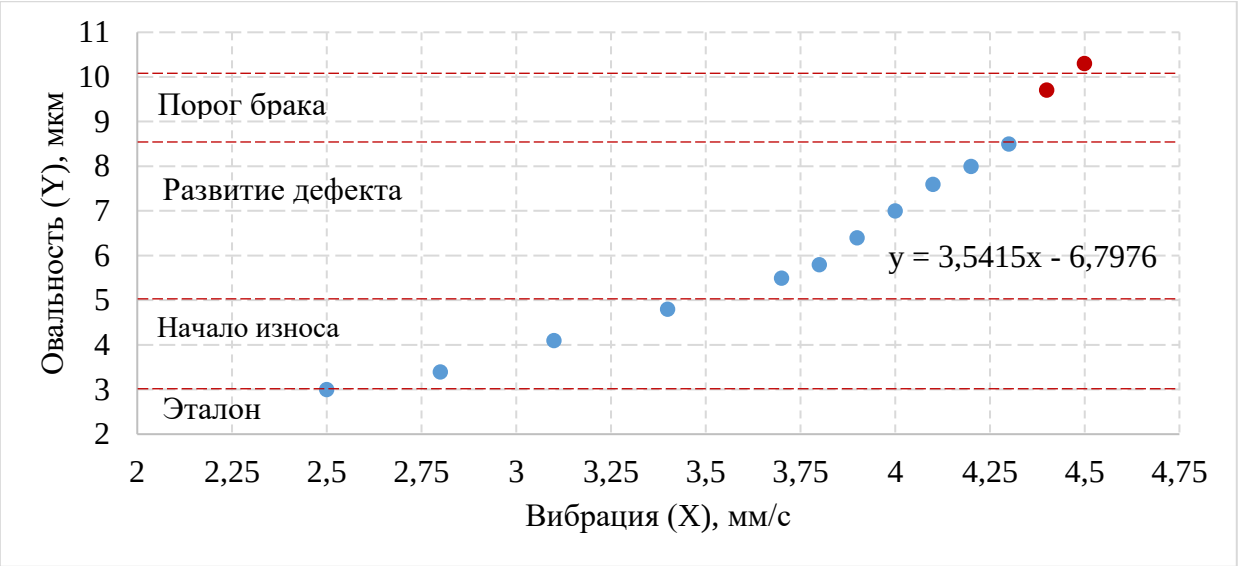


Рисунок 2.3.3 – Зависимость уровня вибрации подшипника (X) и овальности отверстия блока цилиндра (Y) (составлено автором)

На втором шаге подшипник оснащается системой мониторинга, выполняется подключение к системе ЧПУ для отслеживания фактических координат инструмента, чтобы визуализировать возможное затягивание резца из-за люфта. Самый важный шаг для привязки прогнозов к качеству – это синхронизация данных мониторинга с результатами измерений ОТК (3 этап). Координатно-измерительная машина заносит в базу фактическую овальность каждого блока цилиндра и привязывает ее к временному штампу производства для создания «эталона» изделия с идеальной геометрией. В таблице 2.3.1 представлены замеры по мере износа подшипника и эталонные значения после замены узла.

На четвертом шаге путем выделения признаков из сигнала вибрации извлекаются тренды и строится корреляционная зависимость овальности блока от уровня вибрации. Это позволяет найти пороговое значение, например, при вибрации более 4,5 мм/с овальность стабильно превышает допуск и составляет 10 мкм. Далее, модель регрессии обучается предсказывать остаточный ресурс времени, через которое вибрация достигнет критического порога и допустит выпуск изделия с браком.

Заключительный пятый этап интегрирует прогноз с производственной системой планирования для подачи в ERP-систему заявки на ремонт и предотвращения брака. Процедура завершается интеграцией полученных прогнозных данных с ТОиР оборудования, где после замены подшипника система валидирует его эффективность: вибрация должна снизиться до эталонных значений, а овальность обработанных блоков вернуться в нормативное значение.

Таблица 2.3.1 – Этапы состояния оборудования и его влияние на овальность отверстия блока цилиндра (составлено автором)

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

Представленный порядок внедрения системы прогнозирования отказов демонстрирует фундаментальный сдвиг парадигмы в организации производства: переход от реактивного обслуживания к проактивному управлению качеством на основе данных. Результаты количественного анализа связи вибрации подшипника (4,5 мм/с) и овальности блока (10 мкм), превращают показания датчиков в измеримый прогноз остаточного ресурса оборудования. Критическим фактором выступает интеграция разнородных информационных потоков – данных мониторинга состояния оборудования в реальном времени и результатов измерений координатно-измерительной машины, что позволяет фиксировать отклонения, определять пороговые

значения, при которых технологический процесс выходит за границы поля допуска.

Практическая ценность организации ТОиР раскрывается в интеграции работы производственной системы планирования (ERP/MES) и фактическими результатами ремонта. Система формирует предиктивную заявку на замену подшипника до момента возникновения брака и валидирует эффективность проведенных работ через повторный замер эталонных параметров. Такой подход создает самообучающийся контур управления качеством, где каждый цикл «диагностика – прогноз – обслуживание – контроль» вносит в модель новые данные, повышая точность последующих прогнозов и минимизируя риск выпуска несоответствующей продукции.

Таким образом, прогнозирование отказов оборудования представляет собой процесс перехода от планово-предупредительных ремонтов к ремонту «по состоянию». Это напрямую влияет на качество продукции, так как неисправное оборудование является главным источником брака. В основе такого перехода лежит математический аппарат, преобразующий поток данных с сенсоров в количественные оценки надежности.

Методы регрессионного анализа и теории временных рядов (экспоненциальное сглаживание) позволяют моделировать тренды деградации параметров, в то время как алгоритмы машинного обучения, такие как ансамбли случайного леса или градиентный бустинг, классифицируют предаварийные состояния по спектральным характеристикам вибрации и тепловым сигналам. Байесовские подходы и скрытые марковские модели дают возможность не только детектировать отклонения от параметров работы оборудования, но и вычислять остаточный ресурс с оценкой вероятности отказа на заданном горизонте планирования, превращая разрозненные показания датчиков в математически обоснованный прогноз [15].

В параграфе представлен математический аппарат, объединяющий методы регрессионного анализа, машинного обучения и байесовского оценивания для преобразования разнородных диагностических данных в

прогноз остаточного ресурса и вероятности отказа оборудования для установления статистической зависимости с риском возникновения брака. Разработана организационная схема процедуры предупреждения брака на основе зависимости между износом оборудования и качеством изделия на примере производства блока цилиндров из алюминия для двигателей внутреннего сгорания, имеющий контур цикла «диагностика – прогноз – обслуживание – контроль».

Практической реализацией предложенного подхода является установление зависимости овальности отверстия блока цилиндра от уровня вибрации подшипника по зонам развития дефекта на основе обучения модели регрессии предсказывать остаточный ресурс времени до критического порога изделия с браком.

ВЫВОДЫ ПО ВТОРОЙ ГЛАВЕ

1. Диагностика проблем ТОиР в алюминиевом производстве показала, что доля внеплановых простоев, связанных с отказами оборудования, достигает 48% в структуре потерь, при этом особенно критичны камерные смесители (MTBF 120 ч, коэффициент готовности 75%) и системы подачи глинозема (рост брака по Fe и Si до 3,5 п.п.). Выявлен значительный разрыв между российскими предприятиями и мировыми лидерами (OEE 67% против 87%, доля плановых ремонтов 55% против 80%, внеплановые простои в 2,8 раза выше), что обосновывает необходимость перехода от реактивного обслуживания к проактивному управлению надежностью.

2. Разработана концептуальная 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 (стратегический, тактический, оперативный, физический) и три замкнутых контура непрерывного улучшения, что позволяет перейти от статичного RCM-анализа к динамическому управлению в реальном времени.

3. Предложена трехуровневая классификация активов алюминиевого производства (критическое, существенное, вспомогательное оборудование) и для каждого класса определена оптимальная стратегия ТОиР – от предиктивного обслуживания с цифровыми двойниками (электролизеры, главные трансформаторы) до ремонта по состоянию или эксплуатации до отказа. На примере анодной рамы электролизера апробирован FMEA-анализ с расчетом приоритетного числа риска (RPN): критический отказ «трещина анодной рамы» (RPN = 240) после внедрения предиктивного мониторинга снижен в 4 раза (до RPN = 60).

4. Введена пятая категория последствий отказов – влияние на качество продукции, не приводящее к немедленной остановке, что расширяет классическую методологию RCM. Соответственно предложен модифицированный показатель RPN_Q, рассчитываемый с учетом тяжести последствий для качества. Это позволяет количественно ранжировать риски с учетом ухудшения сортности алюминия, доли брака и индекса воспроизводимости Cpk.

5. Разработана методика организации прогнозирования качества продукции на основе данных о техническом состоянии оборудования (вибрация, температура, ток, наработка) и методов машинного обучения (множественная регрессия, случайный лес, нейронные сети). Методика включает 6 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.

6. Практическая реализация подхода апробирована на примере установления зависимости овальности отверстия блока цилиндра из алюминия от уровня вибрации подшипника (уравнение регрессии $y = 3{,}5415x – 6{,}7976$, порог брака – вибрация 4,5 мм/с). Показано, что интеграция данных мониторинга оборудования и результатов измерений ОТК позволяет создать

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

3 РАЗРАБОТКА СТРУКТУРЫ ПОДСИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ И РЕМОНТА В КОНТУРЕ ЕДИНОЙ ЦИФРОВОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВОМ

3.1 Системный подход к организации технического обслуживания в производстве алюминия на основе АСУ ТОиР (CMMS-систем)

Цифровая трансформация производственных активов открывает новую эру в управлении техническим обслуживанием и ремонтом на алюминиевых заводах. Современные инструменты анализа и планирования технического обслуживания и ремонта, интегрирующие данные с датчиков вращающегося оборудования, электролизеров, литейных и прокатных станов, преобразуют массивы информации в стратегические решения. Переход от календарного и корректирующего обслуживания к предиктивным моделям, основанным на машинном обучении и анализе больших данных, является необходимым условием для минимизации простоев, снижения затрат и обеспечения стабильного качества металла.

Множество трудов авторов и научных школ внесли значительный вклад в разработку и адаптацию инструментов ТОиР именно для алюминиевых производств. Их работы зачастую имеют междисциплинарный характер и связаны с теорией надежности, промышленного инжиниринга и наукой о данных. В мировом масштабе особо значимы для металлургических производств работы научного коллектива Лулеоского технологического университета под руководством профессора Кумара У. в области управления активами и ТОиР. В частности, авторами разработаны модели оптимизации жизненного цикла электролизеров, а также методики интеграции рисков (выход из строя выпрямительных агрегатов или системы газоочистки) в планирование ТОиР [120]. В России научная школа исследований в области производства алюминия широко представлена в институте легких материалов и технологий РУСАЛа, МГУ им. М.В. Ломоносова, Сибирском федеральном

университете и др., чьи разработки тесно связаны с цифровизацией, предиктивной аналитикой ТОиР и новыми материалами [80].

Крупные производители алюминия зачастую имеют собственные научно-исследовательские центры. Инженеры и ученые РУСАЛа (Россия), ученики профессора Полякова П.В., активно публикуются в области CMMS-систем и систем предиктивного мониторинга для электролизного производства. Они разрабатывали специализированные модули для анализа теплового режима электролизеров, прогнозирования износа анодных узлов и оптимизации графиков обслуживания [144].

В российской практике класс систем CMMS (компьютеризированная система управления техническим обслуживанием) в основном обозначают аббревиатурой АСУ ТОиР – «Автоматизированная система управления техническим обслуживанием и ремонтом». Ее применяют как к самому классу ПО, так и к конкретным информационным системам. Содержание АСУ ТОиР как класса информационных систем соответствует фундаментальным требованиям серии ГОСТ 34 по информационным технологиям.

Ларсен Т. и соавторы из Hydro Aluminium (Норвегия) посвятили публикации внедрению предиктивной аналитики для вращающегося оборудования на литейном и прокатном переделах. Они разрабатывают алгоритмы раннего обнаружения дисбаланса и дефектов подшипников на основе анализа вибрации и данных SCADA-систем [121]. Миллер Р. и соавторы из Alcoa (США) известны работами по созданию цифровых двойников критических узлов. Их модели позволяют в реальном времени оценивать остаточный ресурс валков и подшипниковых узлов, оптимизируя графики их замены и тем самым снижая риски отказа [124].

Однако, при всем многообразии исследований в массиве изученных публикаций и отчетов об организации производства в алюминиевой промышленности не достает комплексных, системно-инженерных работ, которые бы рассматривали ТОиР не как набор инструментов, а как целостную бизнес-функцию, интегрированную в производственную систему

предприятия. В российских и зарубежных трудах фокус смещается на технологические инновации и цифровые инструменты, упуская системные аспекты в организации производства.

Современное производство алюминия характеризуется экстремальными технологическими средами, высокой капиталоемкостью и непрерывностью циклов. В таких условиях эффективность ТОиР является критическим фактором устойчивости производства. В этой связи предприятия алюминиевой отрасли внедряют цифровые инструменты анализа и планирования: системы CMMS/EAM, SCADA, отдельные модули предиктивной аналитики вибрации или термографии, цифровые чек-листы. Однако зачастую данные инструменты внедряются фрагментарно, порождая «лоскутную автоматизацию», при которой разные задачи решаются отдельными специализированными IT-решениями [4]. При таком подходе могут возникать ситуации, когда при большом объеме данных качество управленческих решений по ТОиР не улучшается:

– данные остаются в изолированных хранилищах и не взаимодействуют;

– прогнозы имеют разрозненный характер, не учитывают влияния прогноза состояния одного узла на всю систему (например, систему газоочистки электролиза);

– планы ремонтов, сформированные ИТ-системой, могут противоречить технологическим графикам или логистическим возможностям.

Для преодоления указанных проблем необходим системно-инженерный подход, рассматривающий инструменты анализа и планирования не как набор независимых продуктов, а как элементы единой целенаправленной системы [45].

Системная инженерия фокусируется на проектировании, интеграции и управлении сложными системами на протяжении всего жизненного цикла. Применительно к развитию инструментов ТОиР в алюминиевой промышленности, ключевыми принципами системной инженерии являются:

1) сквозная прослеживаемость, т.е. техническое требование к функционалу аналитического модуля (например, «прогнозировать термическое напряжение катодного устройства») должно быть выведено из бизнес-требования («снизить риск внепланового останова электролизера») и обеспечено конкретными данными, моделями и организационными процедурами;

2) рассмотрение системы в целом как «техника – человек», т.е. параллельно с внедрением цифровых инструментов анализа и планирования необходимо обучение персонала и готовность организации изменять процессы на основе ИТ-заключений.

3) архитектурно-центричный подход, т.е. разработка целостной архитектуры данных и сервисов, которая определяет взаимодействие модулей анализа, например, модулей вибрации, расхода сырья, календарных планов, заказов на складе и пр.;

4) итеративность и верификация, т.е. развитие ТОиР должно происходить циклами и иметь обратную связь от технологов, механиков, экономистов для доработки архитектуры моделей ТОиР и их масштабирования.

Системный подход к ТОиР в алюминиевой промышленности реализуется на всех стадиях жизненного цикла производства. Он начинается уже на этапе проектирования и закупок, где в технические задания закладываются требования к надежности, ремонтопригодности и стандартизации оборудования, а также оцениваются его будущие эксплуатационные расходы по методологии совокупной стоимости владения (TCO). Последующие этапы – это монтаж и ввод в действие, длительная эксплуатация, модернизация или вывод из эксплуатации – представляют собой непрерывный цикл, в котором решения и данные каждого предыдущего этапа напрямую влияют на эффективность и затраты последующих (рисунок 3.1.1).



Рисунок 3.1.1 – Системный подход к организации ТОиР жизненного цикла производства алюминия (составлено автором)

Сквозное системное управление ТОиР жизненного цикла заключается в создании и применении единой стратегии, методологии и цифровой среды, которая связывает все этапы, обеспечивая передачу критически важной информации и принятие решений, основанных на данных. На этапе монтажа фиксируются базовые параметры состояния оборудования для будущего сравнения, а в период эксплуатации ядром системы становится программное обеспечение (CMMS/EAM), которое интегрирует различные стратегии ТОиР – от прогнозного мониторинга критического оборудования до регламентных ремонтов. Накопленная за время эксплуатации статистика отказов, затрат и эффективности оборудования завершает петлю обратной связи, предоставляя данные для обоснованных решений о модернизации, реновации или безопасном выводе оборудования из эксплуатации.

Системы класса CMMS/EAM, ставшие стандартом для автоматизации ремонтов, в контексте алюминиевого производства требуют серьезной трансформации. Полагаем, что для развития АСУ ТОиР в новом качестве необходима глубокая интеграция с другими технологиями (рисунок 3.1.2).

Во-первых, интеграция с предиктивной аналитикой на основе машинного обучения для перехода от ручного анализа к полностью автоматическому контуру управления. Опыт компании по производству плоского алюминиевого проката и переработке алюминия Novelis показывает, что интеграция обнаружения аномалий с помощью машинного обучения напрямую в SAP CMMS для автоматического создания ремонтных заявок позволила сократить незапланированные простои на 84% [126]. Интеграцию с предиктивной аналитикой можно дополнить разработкой гибридных рекомендательных систем, использующих данные с сенсоров, текстовые записи о ремонтах и физические модели для выбора оптимального типа обслуживания в реальном времени.

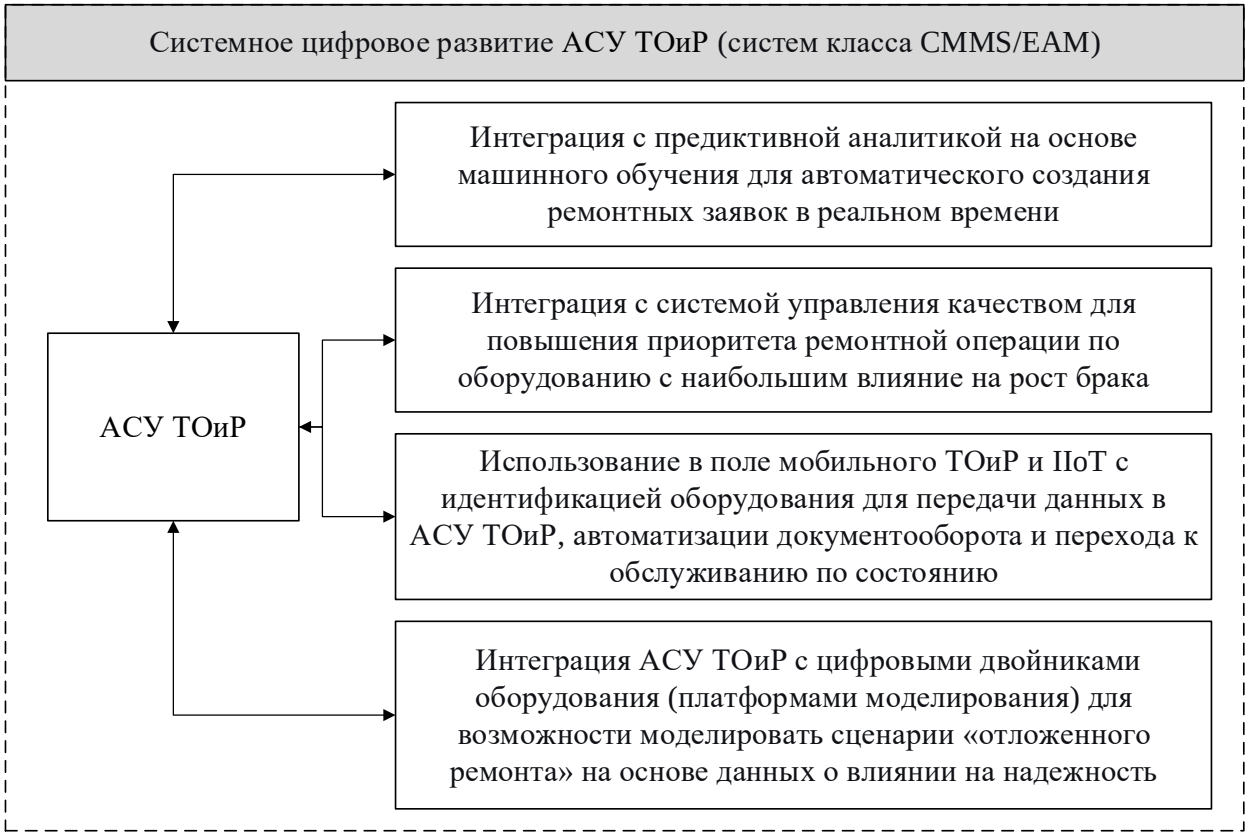


Рисунок 3.1.2 – Системное цифровое развитие АСУ ТОиР (систем класса CMMS/EAM) (составлено автором)

Во-вторых, интеграция с системой управления качеством (СМК). Это позволит интегрировать показатели, например, RPN_Q, в процессы АСУ ТОиР.

Такой подход позволяет системе автоматически повышать приоритет ремонтной операции, если модель предсказывает рост брака при сохранении текущего состояния оборудования.

В-третьих, переход к сбору данных в поле с использованием мобильного ТОиР и интернета вещей IIoT (планшетов и смартфонов с функциями автоидентификации оборудования) позволит автоматизировать документооборот. Кроме того, внедрение беспроводных сетей датчиков с интеграцией в АСУ ТОиР создает основу для перехода к обслуживанию по фактическому состоянию.

В-четвертых, создание цифровых двойников активов. Интегрируя АСУ ТОиР с платформами моделирования, можно получить не просто сигнал о необходимости ремонта, а инструмент для оценки последствий его отсрочки. Система сможет моделировать сценарии «отложенного ремонта», что позволяет принимать решения, основанные на данных о влиянии на надежность.

Вместо универсальных систем возможна разработка готовых модулей для алюминиевой промышленности (MES-решение), охватывающих производственные цепочки алюминиевых заводов. Такие системы, включая и АСУ ТОиР-функционал, могут использоваться как база для интеграции с предиктивными сервисами [92]. Также актуальна разработка продуктов с учетом российских ГОСТ и регламентов, например создание гибридной системы, которая объединяет лучшие мировые практики (например, ML-аналитика) с российским ядром, построенным на платформах 1С:ТОИР КОРП. Подобное решение реализуется в группе компаний «Алютех».

Примером сквозного управления в производстве алюминия является работа с катодной сборкой электролизера, являющейся основным активом. Жизненный цикл сборки начинается с проектного выбора типа блоков и целевой стойкости, которая проверяется на этапе монтажа контролем качества работ. В ходе длительной эксплуатации непрерывный мониторинг состояния генерирует данные, которые позже, на этапе модернизации, позволяют

выявить истинную причину отклонения фактического срока службы от проектного, например, конструктивный недостаток узла крепления [49]. Полученные выводы напрямую передаются в новый проект, где дефектная конструкция заменяется на усовершенствованную, замыкая петлю обратной связи и непрерывно улучшая ключевой технологический актив.

Аналогичный системный подход реализуется и при управлении вспомогательным оборудованием, таким как насосы циркуляции пульпы в системе газоочистки. Здесь сквозное управление проявляется в организации сравнительных испытаний различных типов насосов с момента их проектного выбора. Данные об их реальных характеристиках, фиксируемые при вводе в эксплуатацию, дополняются в процессе работы операционной статистикой: наработкой, затратами на ремонт и простоями. Накопленный массив информации позволяет на этапе замены принять обоснованное решение о стандартизации оптимального варианта насоса. Таким образом, эмпирические данные с «конца» цикла напрямую определяют решения на его «старте», обеспечивая постоянную оптимизацию парка оборудования.

Пример сквозного процесса ТОиР: на модернизируемом участке мокрой газоочистки алюминиевого завода необходимо заменить парк изношенных шламовых насосов, перекачивающих абразивную пульпу (смесь воды, фторидов и твердых частиц) [102]. Для этого, в компьютерную систему управления техническим обслуживанием CMMS вводится задача выбора и стандартизации шламового насоса для системы мокрой газоочистки. Схема сквозного цикла анализа ТОиР и принятия решения по стандартизации шламовых насосов в системе CMMS представлена на рисунке 3.1.3.

Параметры и анализ данных операционной статистики эксплуатации шламовых насосов разного типа в производстве алюминия и неструктурированных данных (записей журналов механиков) представлены в таблице 3.1.1. Как видно, насос типа С имеет наименьшую совокупную стоимость владения, но при этом анализ неструктурированных данных (отчетов механиков) выявил, что его частые отказы создают риски для

системы газоочистки и экологии. Насос типа А, несмотря на высокую цену, показывает максимальную надежность и наименьший операционный риск.

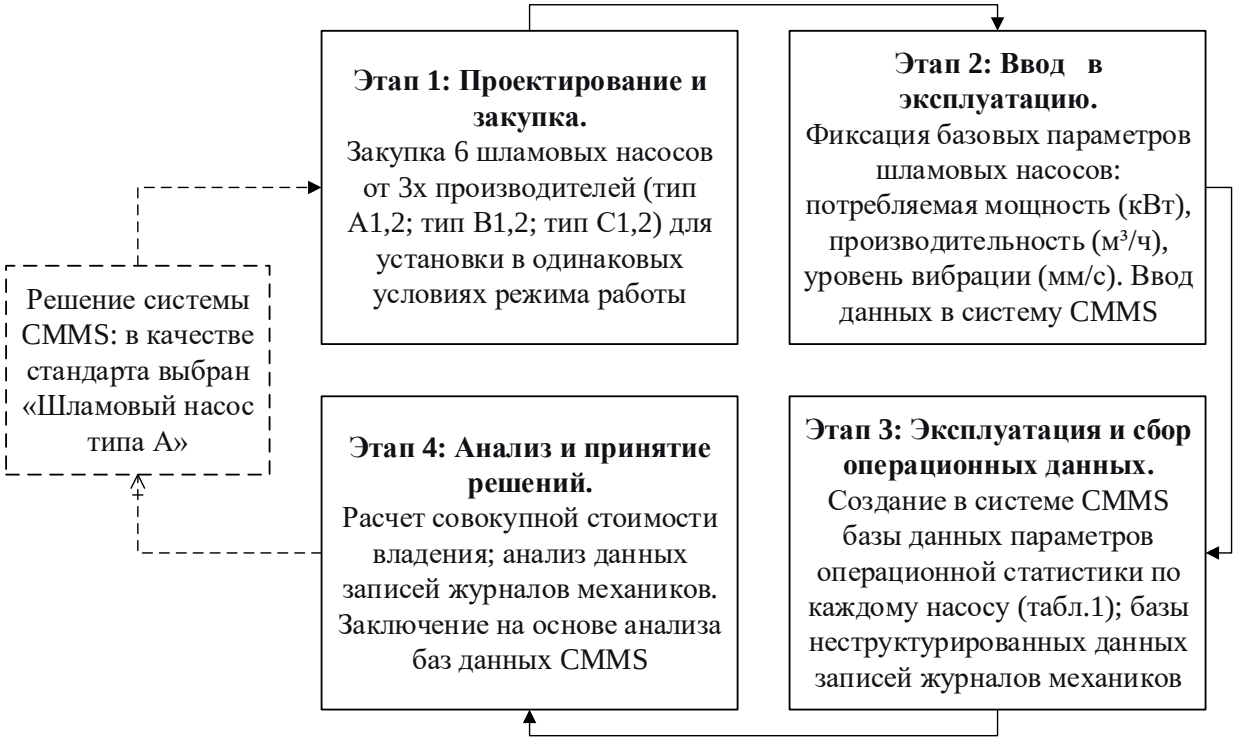


Рисунок 3.1.3 – Схема сквозного цикла анализа ТОиР и принятия решения по стандартизации шламовых насосов в системе CMMS в производстве алюминия (составлено автором)

Итоговым решением является выбор в качестве стандарта «Шламового насоса Типа А». Его надежность и минимальные простои являются приоритетом для системы газоочистки и экологической безопасности [19]. Информация о выборе насоса заносится в корпоративный стандарт и становится входным требованием для всех новых проектов. Таким образом, эмпирические данные (наработка, затраты, простои), собранные в единой системе CMMS на этапе эксплуатации, позволили принять обоснованное стратегическое решение на этапе закупок и стандартизации. Сквозной цикл анализа ТОиР и принятия решения по стандартизации закрылся: на основе опыта эксплуатации оборудования сформирован корпоративный стандарт для будущих проектов, обеспечив улучшение парка оборудования.

Таблица 3.1.3 – Параметры базы данных системы CMMS об эксплуатации шламовых насосов в производстве алюминия (составлено автором)

Параметры базы данных	Шламовые насосы		
	A1, A2	B1, B2	C1, C2
Наработка, час.	43800	43800	40200 (досрочный вывод из эксплуатации C2)
Количество отказов, ед.	2	5	8
Простои, час.	14	65	120
Затраты на запчасти и ремонтные работы, тыс. руб.	1141,3	2130,5	3424,1
Число замен рабочего колеса, ед.	2	5	8
Стоимость рабочего колеса, тыс. руб.	91,3	53,3	30,4
Совокупная стоимость владения TCO (первоначальная стоимость, затраты на ремонт, стоимость простоя) одного насоса, тыс. руб.	3 644,7	3 013,2	2 891,4
Анализ данных операционной статистики и неструктурированных данных (записей журналов механиков)	Наивысшая TCO, мало отказов, низкие операционные риски для системы газоочистки	Средняя TCO, средние отказы, средние операционные риски для системы газоочистки	Наименьшая TCO, много отказов, высокие операционные риски для системы газоочистки

Современные тенденции в ТОиР алюминиевого производства направлены на радикальный переход от устаревшей реактивной парадигмы («ремонт после поломки»), ведущей к катастрофическим простоям, через неэффективное проактивное обслуживание («ремонт по расписанию»), которое зачастую означает преждевременную замену еще исправных узлов и

избыточные затраты, к предиктивному планированию [62]. Его суть заключается в планировании ремонтов на основе непрерывного мониторинга и анализа реального состояния оборудования с помощью датчиков и алгоритмов искусственного интеллекта, что позволяет прогнозировать отказ на ранней стадии, минимизировать незапланированные простои и оптимизировать расходы на жизненный цикл активов (рисунок 3.1.4).

Можно выделить пять направлений перспективных инструментов, возможных к применению в организации ТОиР производства алюминия:

– индустриальный интернет вещей (IIoT) и датчики;

– цифровые двойники;

– большие данные, искусственный интеллект (ИИ) и машинное обучение (ML);

– RCM-анализ;

– мобильные решения и дополненная реальность (AR).

Интернет вещей и интегрированные датчики кардинально трансформируют систему ТОиР в производстве алюминия, переводя ее на принципы предиктивной аналитики и непрерывного мониторинга состояния оборудования [107]. Создаваемая с их помощью распределенная сенсорная сеть в реальном времени собирает и передает критически важные диагностические данные: от вибрации редукторов и температуры электролизерной ошиновки до акустических сигналов утечек и состава смазочных масел. Эта информация позволяет не просто фиксировать факт отказа, а прогнозировать его развитие на ранних стадиях, предотвращая внеплановые простои, сокращая затраты на экстренный ремонт и формируя надежную основу для перехода к управляемому по состоянию техническому обслуживанию.

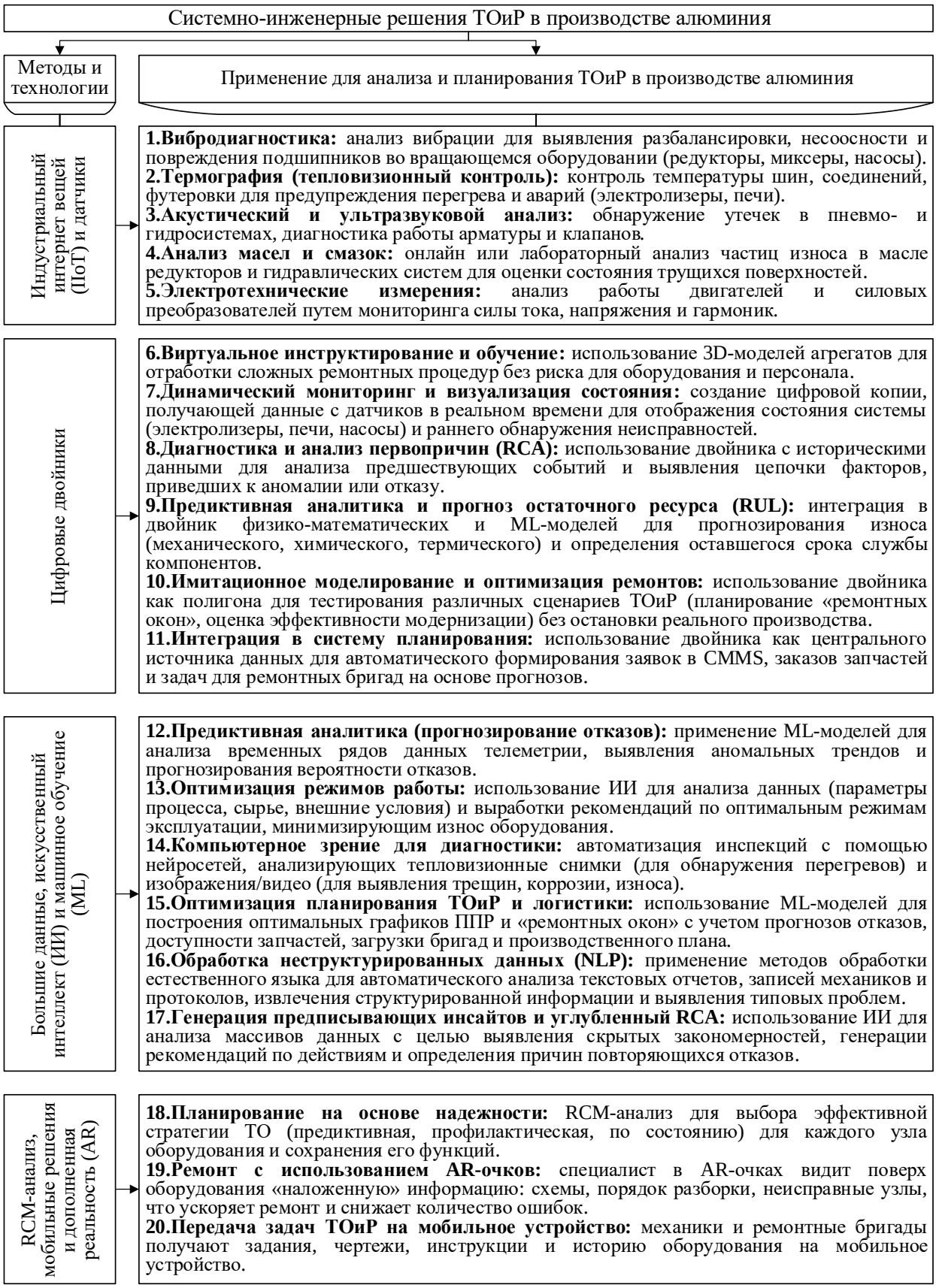


Рисунок 3.1.4 – Прогрессивные системно-инженерные решения анализа и планирования ТОиР жизненного цикла производства алюминия (составлено автором)

Цифровой двойник для ТОиР представляет собой не просто визуализацию, а интеллектуальную управляющую систему, объединяющую виртуальную модель с реальными данными в масштабе реального времени. Он обеспечивает глубокий контроль над активами, начиная от трехмерного виртуального инструктажа для подготовки персонала до динамической визуализации текущего состояния оборудования, где тепловые карты и вибрационные профили накладываются на 3D-геометрию.

Важную роль двойник играет в аналитике: выявляет первопричины отказов через ретроспективный анализ данных, путем интеграции физических и ML-моделей переходит к прогнозу, рассчитывая остаточный ресурс критических узлов. Цифровой двойник является базой для имитации и оптимизации сценариев ремонтов, а его прогнозы служат основой для системы CMMS, формируя замкнутый контур от прогнозирования износа до планирования и выполнения оптимальных ремонтных операций.

Большие данные, искусственный интеллект и машинное обучение становятся интеллектуальным ядром современной системы ТОиР, повышая ее точность и проактивность. Данные технологии обрабатывают как структурированные данные телеметрии, так и неструктурированных отчеты, выявляя закономерности. Методы машинного обучения, анализируя временные ряды, предсказывают вероятные отказы и генерируют рекомендации по оптимизации рабочих режимов электролизеров, построению графика ремонта с учетом производственных ограничений и др. Искусственный интеллект помогает трансформировать данные в действия: диагностировать дефекты по тепловизору на основе нейросети, выявлять причину поломки с помощью NLP-алгоритма и т.д.

Современные методики управления, такие как RCM-анализ, и передовые технологии взаимодействия персонала формируют новый уровень эффективности ТОиР. RCM-анализ обеспечивает стратегическую основу, позволяя на основе оценки критичности и режимов отказов оборудования обоснованно выбрать наилучшую тактику обслуживания: прогнозную,

планово-профилактическую или по фактическому состоянию. На тактическом и операционном уровне данную стратегию реализуют мобильные решения и дополненная реальность. Специалисты ТОиР получают ремонтные задания и всю необходимую информацию напрямую на планшеты, а AR-очки накладывают интерактивные схемы и пошаговые инструкции на физическое оборудование, что сводит к минимуму время простоя и человеческие ошибки, особенно при сложных операциях в условиях цеха.

Таком образом, в процессе разработки перспективных инструментов анализа и планирования технического обслуживания и ремонта в производстве алюминия с позиции системной инженерии были формализованы случаи «лоскутной автоматизации» в организации анализа и планирования технического обслуживания и ремонта, принципиально не улучшающие качество управленческих решений ТОиР. Обоснована необходимость системно-инженерного подхода и выделены ключевые принципы системной инженерии в развитии инструментов ТОиР в алюминиевой промышленности: сквозная прослеживаемость, рассмотрение системы в целом как «техника – человек», архитектурно-центричный подход, итеративность и верификация.

Визуализирована типовая модель системно-инженерного подход к организации ТОиР жизненного цикла производства алюминия. Представлен пример сквозного процесса ТОиР на примере замены парка изношенных шламовых насосов на модернизируемом участке мокрой газоочистки алюминиевого завода. Показано, как эмпирические данные (наработка, затраты, простои), собранные в единой системе CMMS на этапе эксплуатации, позволяют принять стратегическое решение по стандартизации оборудования. Структурированы прогрессивные системно-инженерные решения для анализа и планирования ТОиР жизненного цикла производства алюминия: индустриальный интернет вещей и датчики, цифровые двойники, большие данные, искусственный интеллект, машинное обучение, RCM-анализ, мобильные решения и дополненная реальность. По каждой технологии

предложены специфичные решения ее применения в ТОиР производства алюминия.

Результаты исследования могут быть использованы при модернизации службы технического обслуживания и ремонта на алюминиевых заводах, ее интеграции в производственную систему предприятия в эпоху перехода от календарного и корректирующего обслуживания к предиктивным моделям.

3.2. Архитектура автоматизированной системы технического обслуживания и ремонта в контуре единой системы управления производством алюминия

Современное алюминиевое производство представляет собой сложную технико-экономическую систему, характеризующуюся высокой степенью непрерывности технологических процессов, взаимосвязанностью множества агрегатов и территориальной распределенностью объектов управления. Эффективное функционирование такой системы невозможно без интеграции локальных автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП) в единое информационно-управляющее пространство. В качестве основного средства такой интеграции выступает автоматизированная система операционного управления (АСОУ), которая в иерархической структуре управления предприятием занимает верхний уровень и обеспечивает централизованный мониторинг, координацию и оптимизацию производственной деятельности.

Теоретической базой разработки АСОУ служат принципы системного анализа, кибернетики и теории автоматического управления, а также концепции интеграции информационных систем в промышленности (ГОСТ Р МЭК 62264-1-2014) [30]. Согласно этим принципам, любая производственная система может быть представлена как иерархическая структура, в которой каждый уровень решает задачи определенного временного горизонта и степени агрегации данных. АСОУ в этой иерархии соответствует уровню управления производством (MES) и частично уровню диспетчерского

управления (SCADA). Ее ключевая роль заключается в обеспечении информационной связи между нижним технологическим уровнем и верхним уровнем управления.

С методологической точки зрения АСОУ является человеко-машинной системой, то есть включает не только программно-технические средства, но и оперативно-диспетчерский персонал, участвующий в принятии решений. Это определяет требования к эргономике, надежности, защите от ошибок и распределению функций между человеком и автоматикой. В рамках настоящего исследования проектирование АСОУ рассматривается как инструмент повышения организационной надежности, поскольку централизованный контроль и автоматизация алгоритмов управления снижают влияние человеческого фактора и сокращают время реакции на отклонения.

АСОУ проектируется для автоматизации процессов оперативного мониторинга, контроля, управления и оптимизации производства на всех объектах основной и вспомогательной технологии алюминиевого производства. Система должна выполнять следующие пять ключевых функций:

1) контроль движения материальных и энергетических потоков – отслеживание расхода сырья (нефтяной кокс, пек), промежуточных продуктов (анодная масса, обожженные аноды) и готовой продукции, а также учет потребления электроэнергии, пара, воды, сжатого воздуха.

2) мониторинг работы технологического и производственного оборудования – сбор данных о режимах работы дробилок, мельниц, смесителей, прокалочных печей, обжиговых печей, вибропрессов, систем газоочистки и транспортных механизмов;

3) архивирование производственной и технологической информации – долговременное хранение параметров процесса для последующего анализа, построения трендов и выявления причин сбоев;

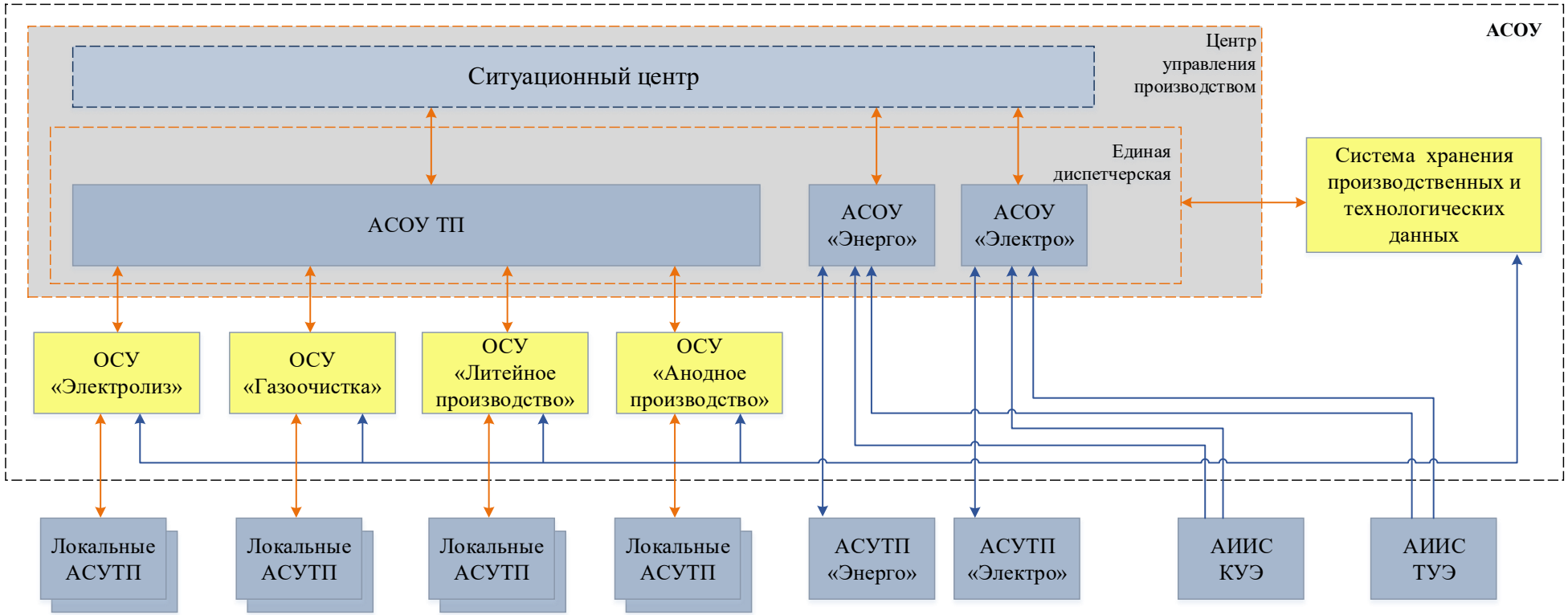
4) согласование режимов работы (производительности) отдельных участков – обеспечение синхронизации работы прокалочного отделения, смесительно-прессового отделения, обжигового отделения и других подразделений для устранения «узких мест» и простоев;

5) анализ ситуаций и формирование автоматических командных воздействий – разработка алгоритмов, которые по совокупности параметров (температура, давление, расход, вибрация) вычисляют оптимальные параметры и передают их в локальные АСУ ТП.

Основные цели создания АСОУ в контексте обеспечения организационной надежности производства алюминия можно сгруппировать по трем направлениям. Во-первых, это информационная интеграция и повышение качества данных: увеличение уровня достоверности и доступности информации от локальных АСУ ТП, сокращение времени взаимодействия между подразделениями благодаря единому информационному пространству, повышение качества принятия решений за счет оперативности, полноты и удобства отображения данных.

Во-вторых, это снижение трудоемкости и оптимизация затрат: сокращение непроизводительных и дублирующих операций, сокращение влияния человеческого фактора, сокращение времени разработки и внедрения изменений при модернизации за счет единого распределенного программного решения. В-третьих, это повышение эффективности и надежности производства: увеличение межремонтного срока работы оборудования; сокращение времени анализа аварийных ситуаций, улучшение условий труда персонала за счет автоматизации рабочих мест, сокращение использования электрических и энергетических ресурсов за счет применения эффективных алгоритмов распределения энергоснабжения.

Структурная схема автоматизированной системы операционного управления производством первичного алюминия представлена на рисунке 3.2.1.



АСОУ ТП	автоматизированная система операционного управления
ОСУ «Электролиз»	операторская система управления процессом электролиза (гальванический цех)
ОСУ «Газоочистка»	операторская система управления процессом газоочистки
ОСУ «Литейное производство»	операторская система управления литейным производством
ОСУ «Анодное производство»	операторская система управления анодным производством
АСОУ «Электро»	автоматизированная система операционного управления электроснабжением
АСОУ «Энерго»	автоматизированная система операционного управления энергоснабжением
АИИС КУЭ	автоматизированная информационно-измерительная система коммерческого учета электроэнергии
АИИС ТУЭ	автоматизированная информационно-измерительная система технического учета электроэнергии

Рисунок 3.2.1 – Структурная схема автоматизированной системы операционного управления производством первичного алюминия (составлено автором с использованием [30])

В соответствии с международной стандартной моделью интеграции систем управления (серия ГОСТ Р МЭК 62264, ISA-95), АСОУ занимает два верхних уровня в пятиуровневой иерархии автоматизации – уровень 2 (супервизорное управление) и уровень 3 (управление производством). Нижним уровнем являются датчики, исполнительные механизмы и программируемые логические контроллеры локальных АСУ ТП отдельных агрегатов. Над ним располагается уровень АСУ ТП, на котором функционируют локальные системы автоматического регулирования технологических параметров (температуры, давления, расхода и др.), работающие в реальном времени. Вышестоящим по отношению к ним является уровень АСОУ, представляющий собой централизованную систему сбора данных и управления, интегрирующую в единый контур несколько локальных АСУ ТП. На этом уровне реализуются следующие ключевые функции: мониторинг состояния всех производственных участков, расчет технико-экономических показателей, выдача заданий на изменение режимов работы, а также фиксация и сигнализация аварийных отклонений.

В составе АСОУ присутствует уровень MES, который решает задачи планирования сменных заданий, отслеживания выполнения производственных заказов, управления качеством продукции и ведения электронной технологической документации. Завершает иерархию уровень ERP – корпоративная система, охватывающая управление финансами, закупками, продажами и кадрами. АСОУ передает на этот уровень обобщенные данные о фактическом выпуске продукции, расходе сырья и энергоресурсов, а также о времени простоев оборудования, обеспечивая тем самым информационную основу для стратегического и тактического планирования деятельности предприятия.

Автоматизированная система управления обслуживанием и ремонтами предназначена для централизованного планирования, учета и контроля ремонтных работ основного и вспомогательного оборудования производства алюминия. В основу создания такой системы положены принципы системного

подхода, интеграции информационных потоков и стандартизации. Ее функциональное назначение заключается в сохранении заданных показателей производительности, точности и других эксплуатационных характеристик оборудования в течение нормативного срока службы за счет управления нормативно-технической документацией, формирования графиков планово-предупредительных ремонтов, ведения нарядов на работы и фиксации выполненных операций.

С позиций обеспечения организационной надежности автоматизация системы ТОиР направлена на снижение технологических рисков преждевременного износа и аварийных поломок оборудования, а также на уменьшение числа внеплановых простоев и аварийных ремонтов благодаря выявлению отклонений в работе оборудования. Кроме того, автоматизация позволяет увеличить межремонтные интервалы посредством своевременного проведения планового технического обслуживания на основе данных о наработке и фактическом состоянии агрегатов. Наконец, система способствует повышению прозрачности и обоснованности затрат на ремонты и сокращению простоев ремонтных служб за счет автоматизированного формирования заявок на материально-техническое обеспечение. Таким образом, система ориентирована на переход от реактивного обслуживания к проактивному управлению, базирующемуся на принципах RCM.

В таблице 3.2.1 систематизированы функциональные модули подсистемы управления ТОиР, охватывающие полный жизненный цикл ремонтных процессов.

Ключевой особенностью разрабатываемой подсистемы ТОиР является ее встроенность в единое информационно-управляющее пространство предприятия. Согласно требованиям, система должна обмениваться данными с автоматизированной системой оперативно-диспетчерского управления (АСОУ), ситуационным центром, системой оперативного планирования, системой предиктивной диагностики, системой управления производственным процессом с-MES с функцией оперативного контроля

качества, системой производственной отчетности и аналитики, а также с модулями корпоративной системы хранилищ данных и бизнес-аналитики (SAP): управление основными данными, управление материальными потоками, управленческий и финансовый учет.

Таблица 3.2.1 – Функциональные модули системы управления ТОиР, охватывающие жизненный цикл ремонтных процессов (составлено автором)

Наименование модуля	Функциональное назначение
Модуль ведения справочной информации	Централизованное управление данными об оборудовании (типы, экземпляры, иерархические связи), видах отказов, сервисных операциях, нормативах времени, квалификации персонала и механизмах деградации
Модуль планирования ремонтов	Формирование планов-графиков на основе данных о наработке, результатах предиктивной диагностики и с учетом ограничений производственного процесса. Поддерживает стратегии: плановое обслуживание по интервалам, обслуживание по состоянию, по наработке, по рискам
Модуль учета выполнения ремонтов	Регистрация фактически выполненных работ, заполнение наряд-допусков, формирование дефектных ведомостей, отслеживание статусов заказов
Модуль мобильного ТОиР	Обеспечение ремонтного персонала доступом к заданиям через планшеты и смартфоны с идентификацией оборудования, ввод данных непосредственно на рабочих местах
Модуль учета складских запасов	Автоматизация учета расходных материалов и запасных частей, формирование рекомендаций по пополнению запасов на основе истории ремонтов
Модуль формирования отчетов	Генерация аналитических отчетов по затратам ресурсов, выявленным дефектам, выполненным работам и их стоимости
Модуль интеграции со смежными автоматизированными системами	Обеспечение информационного обмена с АСОУ, ситуационным центром, системами предиктивной диагностики, MES, ERP и другими модулями

Архитектура автоматизированной системы технического обслуживания и ремонта в контуре единой системы управления производством алюминия представлена на рисунке 3.2.2.

Обмен данными со смежными системами осуществляется через корпоративную шину данных, где используется механизм очередей с обязательным подтверждением доставки и буферизацией данных при временном отсутствии соединения. Такой подход гарантирует целостность и синхронность распределенных данных даже в условиях нестабильных каналов связи, что критически важно для непрерывного производства.

Система управления обслуживанием и ремонтами (ТОиР) имеет двусторонние информационные связи с ключевыми подсистемами автоматизированной архитектуры предприятия (таблица 3.2.2). В частности, с автоматизированной системой оперативно-диспетчерского управления (АСОУ) она обменивается оперативными и историческими данными о технологических параметрах оборудования, что необходимо для точного планирования сервисных операций. Ситуационный центр получает от системы ТОиР сведения о текущих графиках выполнения ремонтов для их отображения на ситуационных панелях и оперативного контроля. Система оперативного планирования, в свою очередь, использует графики ремонтов для синхронизации производственных заданий с плановыми остановками оборудования, а система предиктивной диагностики поставляет в контур ТОиР информацию о необходимости проведения ремонтов (прогнозы отказов, оценки остаточного ресурса).

Для интеграции с производственным уровнем система ТОиР взаимодействует с системой управления производством и качеством продукции, а также с системой производственной отчетности и аналитики, получая от нее сводные данные о ремонтах (время простоев, затраты, виды работ), необходимые для формирования аналитической отчетности.

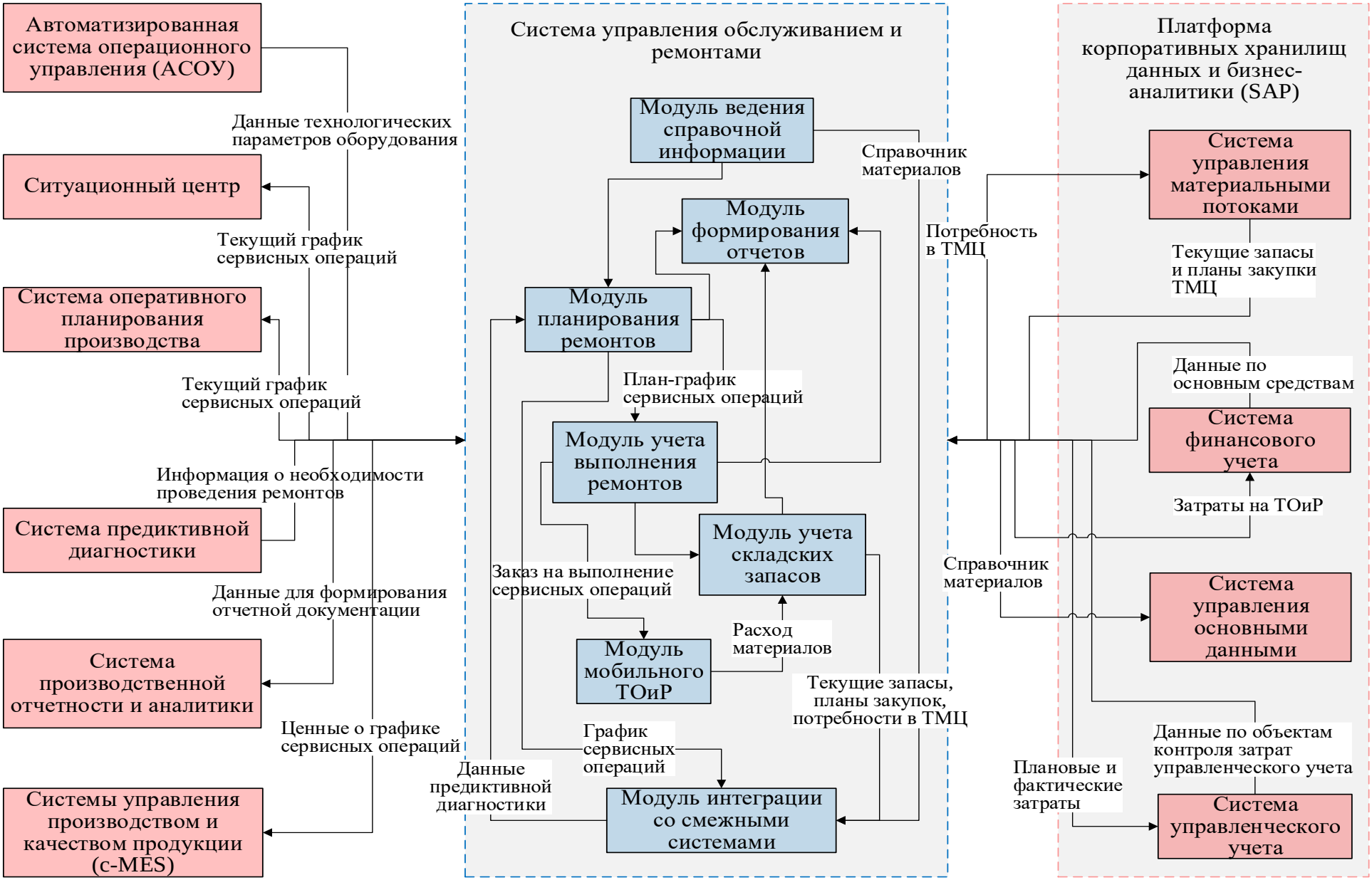


Рисунок 3.2.2 – Архитектура автоматизированной системы технического обслуживания и ремонта в контуре единой системы управления производством алюминия (составлено автором)

Такое взаимодействие обеспечивает синхронизацию ремонтных циклов с операционной деятельностью цехов и позволяет оценивать влияние технического обслуживания на показатели качества выпускаемой продукции. Система c-MES берет на себя функции оперативного контроля качества. В ее задачи входит отслеживание параметров процесса, регистрация результатов лабораторных анализов и управление действиями при обнаружении дефектов.

Таблица 3.2.2 – Взаимосвязь системы управления обслуживанием и ремонтами со смежными системами (составлено автором)

Смежная система	Информационные потоки
Автоматизированная система оперативно-диспетчерского управления (АСОУ)	Оперативные и исторические данные технологических параметров оборудования для планирования сервисных операций
Ситуационный центр	Сведения о текущем графике сервисных операций для отображения на ситуационных панелях
Система оперативного планирования	Графики ремонтов для синхронизации с производственными заданиями
Система предиктивной диагностики	Информация о необходимости проведения ремонтов (прогнозы отказов, остаточный ресурс)
Система управления производством и качеством продукции (c-MES)	Данные о текущем графике сервисных операций для учета в производственном расписании
Система производственной отчетности и аналитики	Сводные данные о ремонтах для формирования отчетности (время простоя, затраты, виды работ)
Платформа данных: управление основными данными	Справочник материалов, оборудования, контрагентов
Платформа данных: управление материальными потоками	Данные о текущих запасах ТМЦ, планах закупок, контрактах с подрядчиками
Платформа данных: управленческий учет	Объекты контроля затрат, связь со справочником оборудования и исполнителями
Платформа данных: финансовый учет	Данные по основным средствам, инвентарные номера для синхронизации справочников

Завершающий уровень интеграции составляет обмен данными с платформенными решениями корпоративного учета. Модуль управления основными данными поставляет справочники материалов, оборудования и контрагентов, модуль управления материальными потоками предоставляет сведения о текущих запасах товарно-материальных ценностей, планах закупок и контрактах с подрядчиками. Модули управленческого и финансового учета передают объекты контроля затрат, связь со справочником оборудования, данные по основным средствам и инвентарные номера для синхронизации. Благодаря этим связям система ТОиР получает возможность автоматизировать расчет потребности в запасных частях, планировать бюджет ремонтов и обеспечивать достоверный учет затрат на техническое обслуживание в контуре корпоративной ERP-системы.

Таким образом, разработанная архитектура подсистемы технического обслуживания и ремонта интегрирована в единую автоматизированную систему оперативно-диспетчерского управления алюминиевым производством. Определено место подсистемы ТОиР в общей иерархии управления предприятием, установлены ее функциональные модули (ведение справочной информации, планирование ремонтов, учет выполнения, мобильный ТОиР, складской учет, формирование отчетов и интеграция со смежными системами).

Обоснована необходимость автоматизации процессов ТОиР как ключевого фактора повышения организационной надежности производства, снижения внеплановых простоев и оптимизации затрат на техническое обслуживание. Показаны информационные связи подсистемы с АСОУ, ситуационным центром, системами предиктивной диагностики, MES и корпоративными платформами управления данными, что обеспечивает целостность информационного пространства и синхронизацию ремонтных циклов с производственными заданиями и финансовым учетом. Разработанная подсистема создает основу для перехода от реактивного к проактивному

управлению техническим обслуживанием на основе данных о состоянии оборудования и предиктивной аналитике.

3.3 Методика интеграции анализа надежности и времен отказов оборудования на основе распределения Вейбулла в цифровую систему управления техническим обслуживанием

Анализ надежности оборудования является неотъемлемой частью повышения организационной надежности производства и внедрения систем предиктивного технического обслуживания. Одним из наиболее эффективных статистических инструментов для моделирования времен отказов является распределение Вейбулла, которое гибко описывает различные периоды эксплуатации технических объектов и широко применяется в задачах прогнозирования ресурса оборудования и оптимизации стратегий ТОиР.

Аппарат распределения Вейбулла является стандартизированным методом, который регламентируется национальным стандартом ГОСТ Р 50779.27-2017 (МЭК 61649:2008) «Статистические методы. Распределение Вейбулла. Анализ данных» [20]. Данный стандарт устанавливает методы статистического анализа данных, подчиняющихся распределению Вейбулла, и предназначен для анализа непрерывных показателей, таких как наработка до отказа, время до отказа, количество циклов до отказа и т.п. Документ охватывает такие аспекты статистического анализа, как оценка параметров, проверка гипотез и построение доверительных интервалов для функции распределения, что составляет основу для проведения анализа надежности и времен отказов оборудования в цифровой системе управления ТОиР.

В теории надежности для вероятностного описания случайной наработки технической системы до отказа широко используется двухпараметрическое распределение Вейбулла. Высокая гибкость этого закона позволяет аппроксимировать различные периоды эксплуатации

оборудования. Согласно распределению Вейбулла рассчитаем плотность вероятности наступления отказа и вероятность безотказной работы.

Функция плотности распределения (*f(t)*), характеризующая мгновенную интенсивность отказов, имеет вид уравнения:

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta}(\frac{t}{\eta})^{\beta-1} e^{-(\frac{t}{\eta})^{\beta}},\ t \geq 0,\ \beta > 0,\ \eta > 0, \quad (3.3.1)$$

где β – параметр формы, а η – параметр масштаба.

Функция надежности (*R(t)*) или вероятность безотказной работы в течение времени t определяется из интегральной функции распределения:

$$R(t) = e^{-(\frac{t}{\eta})^{\beta}}. \quad (3.3.2)$$

Функция интенсивности отказов (*h(t)*) (мгновенная вероятность отказа элемента, не отказавшего к моменту времени t) выражается как:

$$h(t) = \frac{\beta}{\eta}(\frac{t}{\eta})^{\beta-1}. \quad (3.3.3)$$

Ключевым преимуществом данного закона является способность параметра формы β характеризовать природу и стадию жизненного цикла оборудования:

– при $\beta<1$ интенсивность отказов убывает, что соответствует периоду приработки, когда дефекты проявляются на ранних этапах эксплуатации;

– при $\beta=1$ распределение Вейбулла трансформируется в экспоненциальное распределение, соответствующее периоду нормальной эксплуатации с постоянным уровнем интенсивности отказов;

– при $\beta>1$ интенсивность отказов возрастает, что характерно для периода старения и износа элементов технических систем.

Путем подбора параметра формы распределение Вейбулла позволяет создать теоретическую модель, максимально приближенную к эмпирическим

данным об отказах конкретных агрегатов, что важно для создания предиктивной системы ТОиР.

Для оценки параметров распределения β и η по статистическим данным времен отказов оборудования используются метод максимального правдоподобия как наиболее эффективный для больших выборок с цензурированными (неполными) данными наблюдений, и метод регрессии медиан рангов – более простой и применимый для неполных выборок при предварительном анализе данных на стадии жизненного цикла.

Оценка адекватности модели производится с помощью визуальных гистограмм и статистических критериев согласия (критерии Хи-квадрат и Колмогорова-Смирнова), проверяющих совпадение смоделированного распределения с фактическими выборками.

Для превращения полученных статистических оценок параметров распределения Вейбулла в действенный инструмент управления техническим обслуживанием и ремонтами (ТОиР) необходима их интеграция в цифровую среду предприятия. Разработанная методика устанавливает порядок передачи, хранения и интерпретации значений параметра формы β, масштаба η и средней наработки до отказа (MTTF) в рамках единой информационной системы (на базе существующих решений класса MES, EAM или 1С:ТОиР). Целью интеграции является автоматизация расчета и актуализации показателей надежности по мере накопления данных об отказах, а также обоснованное назначение периодичности планово-предупредительных ремонтов с учетом доверительных интервалов.

На рисунке 3.3.1 представлена архитектура предлагаемой системы производственной отчетности и аналитики, интегрирующей результаты анализа надежности на основе распределения Вейбулла в контур управления техническим обслуживанием и ремонтами (ТОиР). Центральным элементом является база данных о работе оборудования, аккумулирующая по каждой единице оборудования дату ввода в эксплуатацию, даты и типы отказов,

длительность ремонтов и простои. Из этой базы данные передаются в два основных контура.

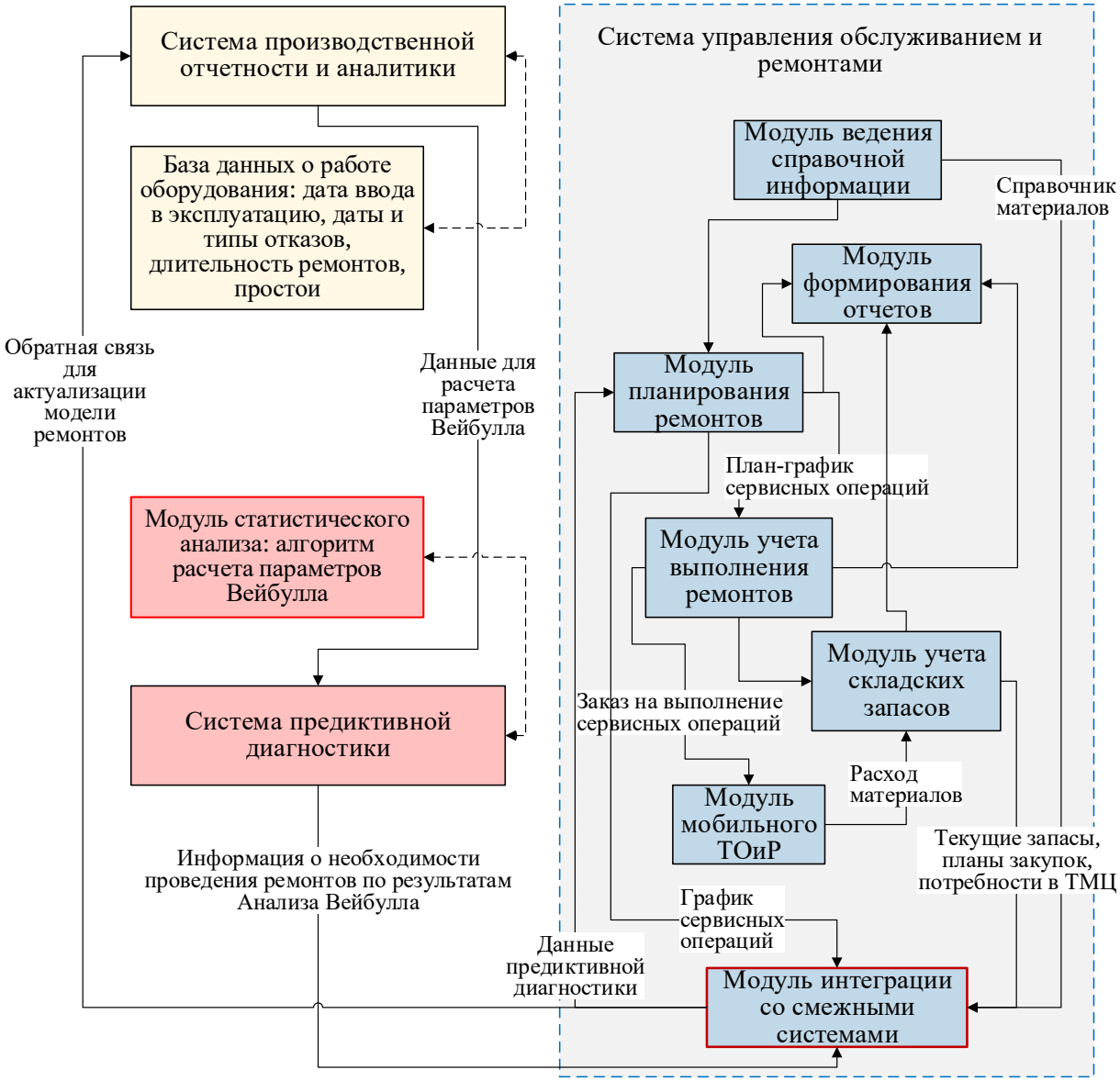


Рисунок 3.3.1 – Архитектура системы производственной отчетности и аналитики, интегрирующей результаты анализа надежности на основе распределения Вейбулла в контур управления ТОиР (составлено автором)

Первый контур – модуль статистического анализа, содержащий алгоритм расчета параметров распределения Вейбулла (формы β и масштаба η) методом максимального правдоподобия с учетом цензурированных наблюдений. Рассчитанные параметры поступают в систему предиктивной

диагностики, которая на основе значений β и η (в частности, средней наработки до отказа MTTF) формирует информацию о необходимости проведения ремонтов по результатам анализа Вейбулла. Эта информация направляется в модуль планирования ремонтов и одновременно в модуль учета складских запасов для своевременного заказа запасных частей и материалов. Второй контур – модуль предиктивной диагностики, который также получает данные из базы и результаты статистического анализа, а также обменивается данными с модулем интеграции со смежными системами, модулем ведения справочной информации и модулем формирования отчетов.

На основе данных о потребности в ремонтах и диагностике формируется график сервисных операций, который передается в модуль планирования ремонтов. Результаты выполнения ремонтов фиксируются в модуле учета выполнения ремонтов, который обновляет базу данных о работе оборудования (замыкая цикл обратной связи). Параллельно модуль учета выполнения ремонтов взаимодействует с модулем учета складских запасов, отслеживая расход материалов, а также с модулем планирования ремонтов для корректировки будущих графиков.

Модуль учета складских запасов аккумулирует информацию о текущих запасах, планах закупок и потребностях в ТМЦ (товарно-материальных ценностях), которая используется как для обеспечения ремонтов, так и для передачи в модуль интеграции со смежными системами (например, с ERP-системой предприятия). Данные из модуля учета складских запасов также поступают в модуль формирования отчетов, который формирует итоговую аналитику для управленческих решений.

Вся информация из системы предиктивной диагностики, модуля статистического анализа и базы данных поступает в модуль формирования отчетов, а также в модуль интеграции со смежными системами (для обмена с внешними информационными контурами – планово-экономическим отделом, отделом материально-технического снабжения). Модуль ведения справочной информации обеспечивает единую нормативную базу (номенклатура

оборудования, типы отказов, регламенты ремонтов). Обратная связь от модулей учета выполнения ремонтов и планирования позволяет непрерывно актуализировать модель надежности (пересчитывать параметры Вейбулла при поступлении новых данных об отказах), что делает систему адаптивной к изменяющимся условиям эксплуатации.

Таким образом, предложенная архитектура обеспечивает полный цикл управления ТОиР на основе количественных показателей надежности – от сбора первичных данных до формирования планов ремонтов и контроля их исполнения, с интеграцией в смежные бизнес-процессы предприятия.

Разработанная методика интеграции анализа надежности и времен отказов оборудования на основе распределения Вейбулла в цифровую систему управления ТОиР включает пять последовательных этапов (рисунок 3.3.2): формирование базы данных отказов, периодический пересчет параметров Вейбулла, хранение и визуализацию, интеграцию с планированием ремонтов и механизм обратной связи для актуализации модели. В результате обеспечивается переход от реактивного (аварийного) обслуживания к стратегии, основанной на количественных оценках износа и старения оборудования.

На этапе 1 «Формирование базы данных отказов» в единой цифровой системе аккумулируются первичные данные о работе оборудования: дата ввода в эксплуатацию, даты и типы отказов, длительность ремонтов и простои. Система поддерживает как полные наблюдения (отказы), так и цензурированные (оборудование, продолжающее работу на контрольную дату), что позволяет корректно применять метод максимального правдоподобия. На этапе 2 «Периодический автоматизированный расчет параметров Вейбулла» в цифровую систему встраивается модуль статистического анализа, который с заданной периодичностью пересчитывает параметры формы β и масштаба η методом максимального правдоподобия с учетом вновь поступающих данных об отказах. Результаты расчетов сохраняются в базе данных с меткой времени.

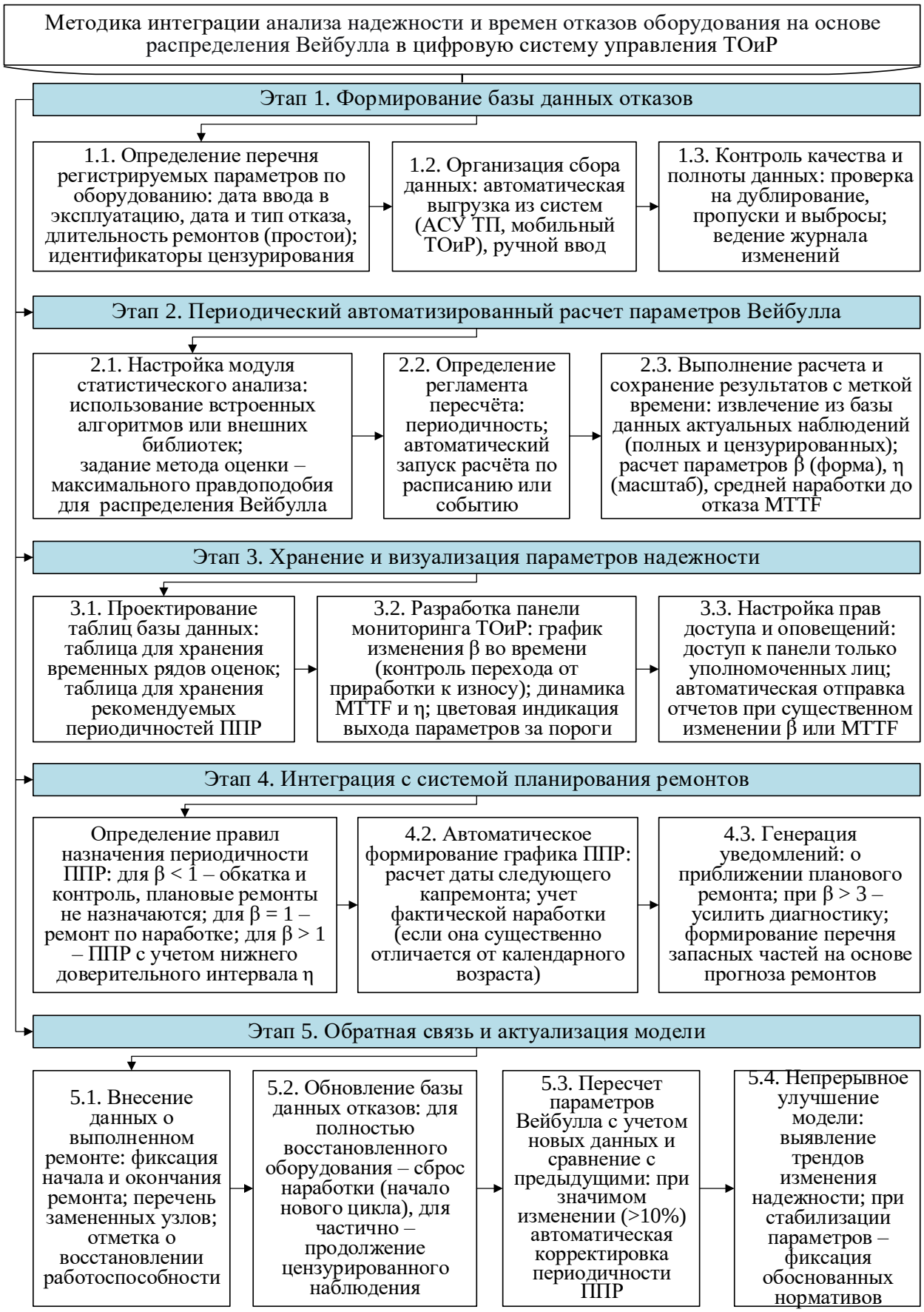


Рисунок 3.3.2 – Методика интеграции анализа надежности и отказов оборудования на основе распределения Вейбулла в цифровую систему управления ТОиР (составлено автором)

Этап 3 «Хранение и визуализация параметров надежности» характеризуется созданием в базе данных специализированных таблиц для хранения текущих и исторических значений β, η, их доверительных интервалов, а также вычисленной средней наработки до отказа (MTTF) и рекомендуемой периодичности планово-предупредительных ремонтов. На рабочем месте инженера по ТОиР организуется панель мониторинга с графиками изменения параметра формы β во времени и динамики MTTF.

На этапе 4 «Интеграция с системой планирования ремонтов» рассчитанное значение MTTF (с учетом нижней границы доверительного интервала) автоматически подставляется в алгоритм формирования годового графика ППР. Система генерирует уведомления о необходимости капитального ремонта для оборудования, наработка которого приближается к пороговой, а также формирует предложения по корректировке состава ремонтных операций в зависимости от полученного параметра формы.

После проведения ремонта информация о его результатах (фактическое состояние оборудования, замененные узлы) вносится в базу данных. При следующем плановом пересчете параметров Вейбулла эти данные учитываются как новые наблюдения (цензурированные или восстановленные), что обеспечивает непрерывную адаптацию модели к изменяющимся условиям эксплуатации и повышает точность прогнозирования отказов. Эти действия производятся на этапе 5 «Обратная связь и актуализация модели».

В практике технической эксплуатации промышленного оборудования большинство единиц находится в периоде нормальной эксплуатации с постепенным развитием износа, когда интенсивность отказов монотонно возрастает со временем. Такое поведение описывается распределением Вейбулла с параметром формы $\beta > 1$. Для нового оборудования возможен кратковременный этап приработки ($\beta < 1$), а для некоторых видов электронных или случайно отказывающих систем – период с постоянной интенсивностью отказов ($\beta = 1$). Однако для основного технологического оборудования

(электролизеры, насосы, компрессоры, металлорежущие станки, транспортные машины и т.п.) доминирующим является износовый тип отказов ($\beta > 1$), что подтверждается многочисленными исследованиями надежности.

Именно для этого наиболее распространенного случая ниже нами разработан типовой алгоритм назначения периодичности планово-предупредительных ремонтов (рисунок 3.3.3). Предложенный порядок действий может быть адаптирован для $\beta \leq 1$ путем замены стратегии (например, ремонт по наработке или по состоянию) без изменения общей логики интеграции с цифровой системой ТОиР.

Шаг 1. Расчет средней наработки до отказа (MTTF). На основе полученных статистических оценок параметров распределения Вейбулла (параметра формы β, который больше единицы, и параметра масштаба η) вычисляется средняя наработка до отказа. Полученная величина представляет собой средний ресурс оборудования до достижения предельного состояния.

Шаг 2. Выбор базовой периодичности ППР. Периодичность ремонтов (интервал между капитальными ремонтами) назначается в диапазоне 70-80% от рассчитанной средней наработки до отказа. Этот диапазон является сложившимся в инженерной практике компромиссом между двумя противоречивыми требованиями: с одной стороны, необходимо максимально использовать ресурс оборудования, с другой – не допустить резкого возрастания интенсивности отказов, характерного для второй половины срока службы при $\beta > 1$ [145]. Для большинства типов оборудования достаточным является оптимистичный (экономичный) подход, при котором периодичность принимается равной 0,7-0,8 от MTTF.

Шаг 3. Применение консервативного (безопасного) подхода для критического оборудования. Для электролизеров и других агрегатов непрерывного алюминиевого производства, где внезапный отказ влечет за собой особо высокие потери, риски для персонала и экологические последствия, целесообразно использовать консервативный подход.

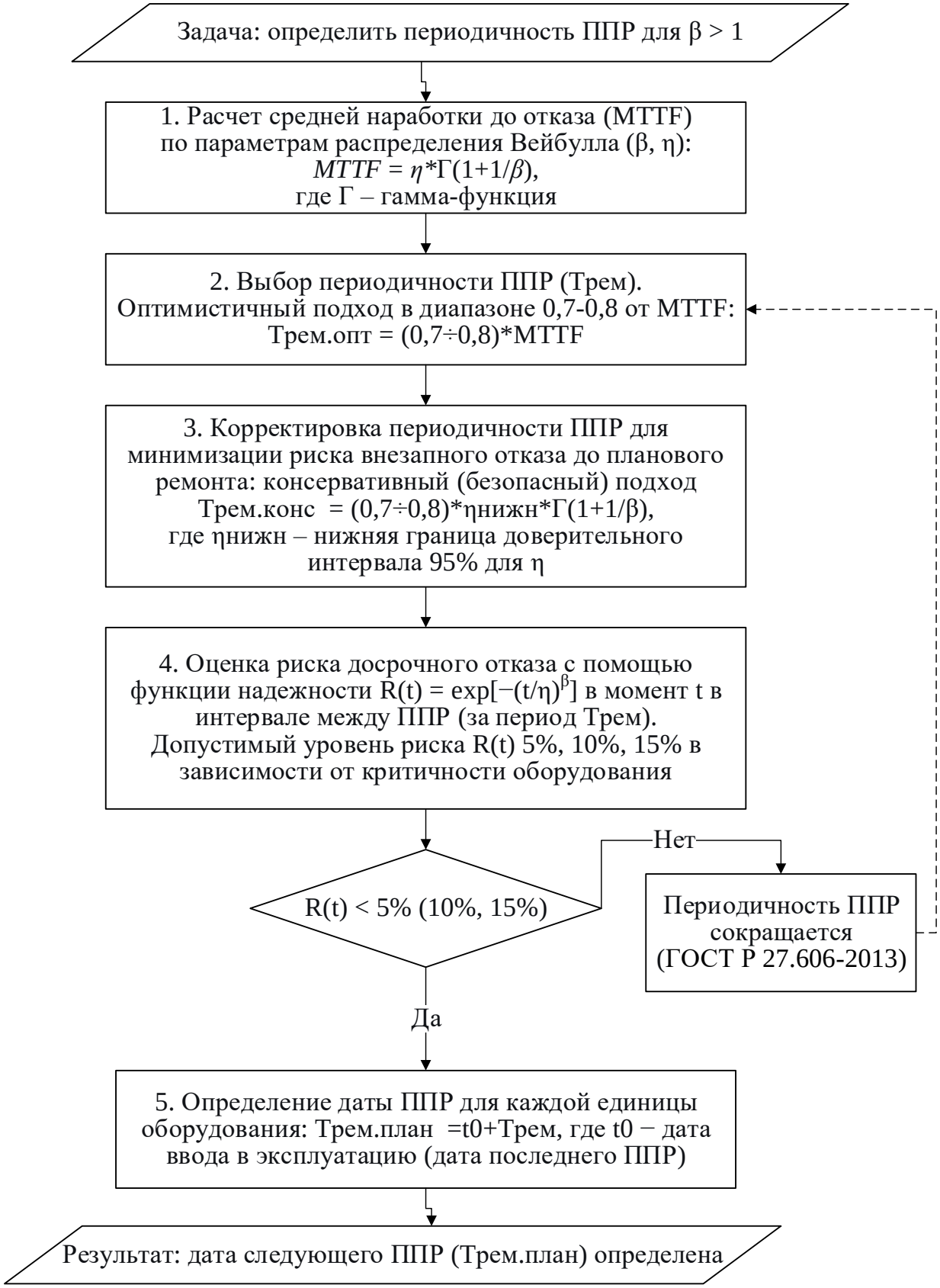


Рисунок 3.3.3 – Типовой алгоритм определения периодичности ППР для оборудования с износовым типом отказов (β > 1) (составлено автором)

В этом случае периодичность ремонтов рассчитывается не через точечную оценку MTTF, а через нижнюю границу 95% доверительного интервала параметра масштаба η. Фактически, это означает, что за базовый принимается наихудший (с заданной доверительной вероятностью) сценарий долговечности оборудования. Периодичность назначается в том же диапазоне 70-80 %, но от минимального характерного ресурса. Такой подход дает более короткий межремонтный интервал и существенно снижает риск отказа до наступления планового ремонта.

Шаг 4. Оценка риска досрочного отказа с помощью функции надежности. Для выбранной периодичности ППР вычисляется значение функции надежности $R(t)$ в момент времени, равном установленному межремонтному интервалу. Функция надежности показывает вероятность того, что оборудование проработает без отказа в течение этого периода. Соответственно, риск отказа или вероятность того, что отказ произойдет, равен $1-R(t)$. В зависимости от категории критичности оборудования предприятие устанавливает допустимый уровень риска – 5%, 10% или 15%. Чем критичнее агрегат, тем ниже должна быть допустимая вероятность отказа (например, для электролизеров рекомендуется риск не более 5%, что соответствует $R(t) \geq 0{,}95$).

Согласно ГОСТ Р 27.606-2013, если фактический риск, вычисленный для выбранного межремонтного интервала, не превышает установленного регламентом допустимого значения, то периодичность считается приемлемой [19]. Если же риск превышает допустимый уровень, периодичность ППР необходимо сократить (уменьшить межремонтный интервал) и заново выполнить оценку риска. Итерационная процедура продолжается до достижения приемлемого риска.

Шаг 5. Определение плановой даты ремонта для каждой единицы оборудования. После того как приемлемая периодичность ППР определена, для каждого конкретного агрегата рассчитывается плановая дата следующего капитального ремонта. Полученная дата вносится в график ППР, и система

технического обслуживания формирует соответствующие уведомления и заявки на подготовку ремонта.

Результатом алгоритма является научно обоснованная, статистически и экономически 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.

ВЫВОДЫ ПО ТРЕТЬЕЙ ГЛАВЕ

1. Обоснован системный подход к организации технического обслуживания и ремонта в производстве алюминия. Выявлены случаи «лоскутной автоматизации», когда внедрение отдельных цифровых инструментов (CMMS, SCADA, предиктивная аналитика) 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. На примере замены шламовых насосов в системе мокрой газоочистки показано, как эмпирические данные (наработка, затраты, простои), собранные в CMMS на этапе эксплуатации, позволяют принимать стратегические решения по стандартизации оборудования и замыкать петлю обратной связи жизненного цикла активов.

2. Структурированы прогрессивные системно-инженерные решения для анализа и планирования ТОиР алюминиевого производства: индустриальный интернет вещей (IIoT) и датчики для непрерывного мониторинга (вибрация, температура, ток); цифровые двойники для прогнозирования остаточного ресурса и имитации сценариев ремонтов; большие данные, искусственный интеллект и машинное обучение для выявления скрытых закономерностей и

предиктивного обнаружения дефектов; RCM-анализ для выбора оптимальной стратегии обслуживания; мобильные решения и дополненная реальность для повышения эффективности полевого персонала. По каждой технологии предложены специфичные варианты применения в условиях алюминиевого завода.

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

4. Разработана методика интеграции анализа надежности на основе распределения Вейбулла в цифровую систему управления ТОиР**,** включающая пять этапов: формирование единой базы данных отказов с учетом цензурированных наблюдений; периодический автоматизированный расчет параметров β (форма) и η (масштаб) методом максимального правдоподобия; хранение и визуализация параметров, доверительных интервалов, средней наработки до отказа (MTTF) на панели мониторинга; интеграция с системой планирования ремонтов для автоматической подстановки периодичности ППР; обратная связь и актуализация модели после выполнения ремонтов. Методика базируется на требованиях ГОСТ Р 50779.27-2017 (распределение Вейбулла. Анализ данных) и позволяет использовать количественные оценки надежности для планирования обслуживания.

5. Предложен типовой алгоритм назначения периодичности планово-предупредительных ремонтов для оборудования с износовым типом отказов ($\beta > 1$). Алгоритм включает: расчет MTTF через параметры Вейбулла; выбор базовой периодичности в диапазоне 70-80% от MTTF; для критического оборудования – консервативный подход с использованием нижней границы 95% доверительного интервала η; оценку риска досрочного отказа с помощью функции надежности $R(t)$ и сравнение с допустимым уровнем (5-15% в зависимости от критичности); определение плановой даты ремонта для каждой единицы оборудования. Алгоритм реализует требования ГОСТ Р 27.606-2013 по надежностно-ориентированному обслуживанию (RCM) и обеспечивает автоматическую корректировку графиков при обновлении данных об отказах.

6. Разработана архитектура системы производственной отчетности и аналитики, интегрирующей результаты анализа Вейбулла в контур управления ТОиР. Центральным элементом является база данных о работе оборудования. Два контура – модуль статистического анализа (расчет β и η) и система предиктивной диагностики – формируют информацию о необходимости ремонтов и передают ее в модули планирования, учета выполнения и складского учета. Обратная связь от выполненных ремонтов обеспечивает непрерывную актуализацию модели надежности. Предложенная архитектура может быть реализована на базе существующих CMMS/EAM-решений (например, 1С:ТОиР) с доработкой модулей статистического анализа и предиктивной диагностики, что создает фундамент для перехода к обслуживанию по фактическому состоянию и повышению организационной надежности алюминиевого производства.

4 АПРОБАЦИЯ ПРЕДЛОЖЕННЫХ РЕШЕНИЙ ПО НАДЕЖНОСТНО-ОРИЕНТИРОВАННОМУ УПРАВЛЕНИЮ ТЕХНИЧЕСКИМ ОБСЛУЖИВАНИЕМ ОБОРУДОВАНИЯ

4.1 Прогнозирование периодичности ремонтов электролизеров завода по производству алюминия на основе оценок средней наработки до отказа (анализ Вейбулла)

В качестве оборудования для анализа надежности и времен отказов выбраны алюминиевые электролизеры как ключевые агрегаты электролизного производства, определяющие общий объем выпуска первичного алюминия и уровень производственных затрат. Выбор электролизеров в качестве объекта обусловлен высокой практической значимостью: повышение организационной надежности их работы напрямую влияет на стабильность производственного процесса, снижение внеплановых простоев и эффективность системы технического обслуживания и ремонта.

Модуль «Анализ Вейбулла и анализ надежности / времен отказов» программного комплекса Statistica Professional 10 Russian представляет собой мощный инструмент статистического моделирования в области технической диагностики. Основные возможности данного модуля включают:

- подгонка двух- и трехпараметрического распределения Вейбулла к массивам времен отказов и наработок оборудования;
- визуализация функций надежности и интенсивности отказов для интегральной оценки текущего технического состояния систем;
- расчет доверительных интервалов и интервальных оценок наработки на отказ и средней наработки до отказа, что является основой для принятия решений по сервисному обслуживанию;
- обработка цензурированных данных, характерных для мониторинга промышленного оборудования, когда часть наблюдений остается работоспособной в период проведения исследования.

Результаты, получаемые в ходе статистического анализа распределения Вейбулла, имеют прямое прикладное значение для развития системы технического обслуживания производства:

1) идентификация критичного оборудования – определение агрегатов с наихудшими показателями надежности (наибольшей интенсивностью отказов) для их первоочередной модернизации или включения в план первоочередного обслуживания;

2) обоснование типа стратегии ремонта – в зависимости от полученного значения параметра формы β (износ и случайные отказы) выбирается стратегия обслуживания (по наработке, по состоянию или по регламенту);

3) оптимизация периодичности ТОиР – на основе полученных оценок средней наработки до отказа определяются оптимальные интервалы между плановыми ремонтами для минимизации внезапных отказов.

4) прогнозирование остаточного ресурса и управление запасными частями – знание распределения времен отказов позволяет планировать потребности в ремонтах и материально-техническое снабжение.

Для построения распределения Вейбулла были взяты данные по 40 высокоамперным электролизерам с обожженными анодами по технологии РА-300, введенным в эксплуатацию в период с 2018 по 2024 год (Хакасский алюминиевый завод ОК РУСАЛ). Такой объем выборки достаточен для получения устойчивых оценок параметров распределения методом максимального правдоподобия, а также позволяет учесть цензурированные наблюдения (оборудование, продолжающее работу на контрольную дату) (таблица 4.1.1).

Для отказавшего электролизера в графе «Контрольная дата» указана дата выбытия (отказа), для работоспособного – дата окончания наблюдений. Длительность пребывания в работе рассчитана как разность между контрольной датой и датой ввода в действие. Цензурирование обозначено следующим образом: «Отк» – отказавшее оборудование (полное наблюдение)

(11 случаев), «Раб» – оборудование, остающееся работоспособным на дату окончания наблюдений (цензурирование справа) (29 случаев).

Таблица 4.1.1 – Исходные данные для анализа надежности электролизеров с обожженными анодами РА-300 (составлено автором по данным [68])

№ п/п	Дата ввода в действие	Контрольная дата	Длительность пребывания в работе, дней	Цензурирование (Раб/Отк)
1	15.01.2018	01.05.2026	3029	Раб
2	03.03.2018	15.10.2024	2417	Отк
3	22.06.2018	01.05.2026	2871	Раб
4	11.08.2018	01.05.2026	2820	Раб
5	05.10.2018	20.02.2025	2330	Отк
6	19.12.2018	01.05.2026	2691	Раб
7	14.02.2019	01.05.2026	2634	Раб
8	09.04.2019	01.05.2026	2580	Раб
9	03.06.2019	10.11.2024	1987	Отк
10	28.07.2019	01.05.2026	2470	Раб
11	15.09.2019	01.05.2026	2421	Раб
12	10.11.2019	02.03.2025	1939	Отк
13	05.01.2020	01.05.2026	2308	Раб
14	02.03.2020	01.05.2026	2252	Раб
15	20.04.2020	18.07.2024	1550	Отк
16	15.06.2020	01.05.2026	2147	Раб
17	10.08.2020	01.05.2026	2091	Раб
18	05.10.2020	10.10.2025	1831	Отк
19	01.12.2020	01.05.2026	1978	Раб
20	20.01.2021	01.05.2026	1928	Раб
21	18.03.2021	01.05.2026	1871	Раб
22	10.05.2021	15.01.2026	1711	Отк
23	05.07.2021	01.05.2026	1762	Раб
24	30.08.2021	01.05.2026	1705	Раб
25	20.10.2021	01.05.2026	1655	Раб
26	15.12.2021	05.09.2025	1360	Отк
27	10.02.2022	01.05.2026	1542	Раб
28	05.04.2022	01.05.2026	1488	Раб
29	01.06.2022	20.02.2026	1360	Отк
30	20.07.2022	01.05.2026	1382	Раб
31	15.09.2022	01.05.2026	1325	Раб
32	10.11.2022	10.12.2025	1126	Отк
33	05.01.2023	01.05.2026	1213	Раб
34	03.03.2023	01.05.2026	1156	Раб
35	20.04.2023	01.05.2026	1107	Раб
36	10.06.2023	20.03.2026	1015	Отк
37	05.08.2023	01.05.2026	1001	Раб
38	01.10.2023	01.05.2026	944	Раб
39	15.11.2023	01.05.2026	899	Раб
40	10.01.2024	01.05.2026	843	Раб

По результатам анализа надежности электролизеров с использованием двухпараметрического распределения Вейбулла (метод максимального правдоподобия, N=40, число цензурированных наблюдений – 29) получены следующие оценки параметров (таблица 4.1.2):

– параметр формы β равен 3,05 (95% доверительный интервал 1,90 – 4,90);

– параметр масштаба η равен 3065 дней (95% доверительный интервал 2409 – 3899 дней).

Таблица 4.1.2 – Оценки параметров распределения Вейбулла по данным о длительности эксплуатации электролизеров (составлено автором)

Параметр	Значение	Стандартная ошибка	Граница 95% доверительного интервала	
			нижняя	верхняя
Форма (β)	3,047	0,7374	1,896	4,897
Масштаб (η)	3065,142	376,3870	2409,498	3899,193

Значение β>1 (β=3,05) свидетельствует о том, что отказы электролизеров происходят преимущественно из-за износа и старения, т.е. интенсивность отказов возрастает со временем. Это полностью соответствует физике процесса: деградация футеровки, износ подины, коррозия конструкций, усталостные повреждения катодных стержней.

Параметр масштаба η= 3065 дней, означает, что к моменту времени 3065 дней (около 8,4 года) откажут около 63,2% электролизеров. Или вероятность того, что электролизер проработает 8,4 года без отказа, составляет 36,8%.

Среднюю наработку до отказа MTTF (среднее время до отказа согласно ГОСТ Р 27.010-2019 [27]) для распределения Вейбулла с β = 3,05 вычислим по формуле:

$$\mathrm{MTTF} = \eta * \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right), \qquad (3.3.4)$$

где Γ – гамма-функция.

Для полученных значений $\beta = 3,05$ и $\eta = 3065$ дней:

$1/\beta = 0,3279$;

$1 + 1/\beta = 1,3279$;

$\Gamma(1,3279) = 0,892$.

Тогда MTTF = 3065 * 0,892 = 2735 дней (7,5 лет).

Таким образом, средняя наработка до отказа, рассчитанная с учетом гамма-функции, составляет 2735 дней (7,5 лет). Полученные результаты обосновывают целесообразность проведения плановых капитальных ремонтов с периодичностью 6-7 лет, что позволяет минимизировать риски внезапных отказов и оптимизировать затраты на техническое обслуживание.

Доверительные интервалы относительно широкие (β от 1,9 до 4,9; η от 2409 до 3899 дней), что является нормальным для выборки с 11 отказами (при 40 наблюдениях, из которых 29 цензурированы). Чем больше отказов, тем точнее оценки. Тем не менее, даже нижняя граница β (1,9) значительно больше 1, поэтому вывод об износовом характере отказов является статистически надежным.

Для проверки адекватности подобранного двухпараметрического распределения Вейбулла использован тест Холландера-Прошана (критерий согласия). Расчетное значение критерия составило 0,978, p-value = 0,328. Поскольку $p > 0,05$, нулевая гипотеза о соответствии эмпирических данных теоретическому распределению не отвергается. Таким образом, распределение Вейбулла с параметрами $\beta = 3,05$ и $\eta = 3065$ дней адекватно описывает статистику отказов электролизеров и может быть использовано для дальнейших расчетов показателей надежности.

Максимум коэффициента детерминации (RI = 0,9883) наблюдается при нулевом значении параметра положения, что дополнительно свидетельствует в пользу адекватности двухпараметрической модели Вейбулла для описания отказов электролизеров (рисунок 4.1.1).

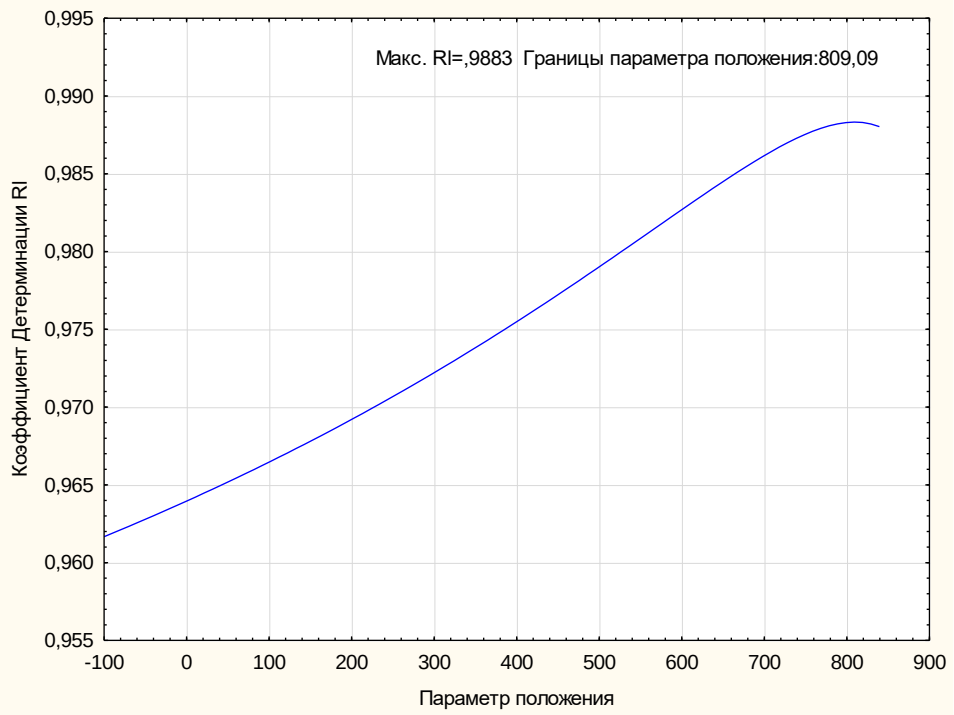


Рисунок 4.1.1 – Зависимость коэффициента детерминации (RI) от значения параметра положения (сдвига) при подгонке распределения Вейбулла к данным о длительности эксплуатации электролизеров (составлено автором)

Квантильный график (Q-Q) на рисунке 4.1.2 демонстрирует близкое расположение эмпирических квантилей к диагональной линии, что подтверждает адекватность двухпараметрического распределения Вейбулла для описания отказов электролизеров.

На рисунке 4.1.3 представлена гистограмма, где по оси абсцисс – наработка (длительность пребывания в работе, дней), по оси ординат – количество единиц оборудования, попавших в каждый временной интервал.

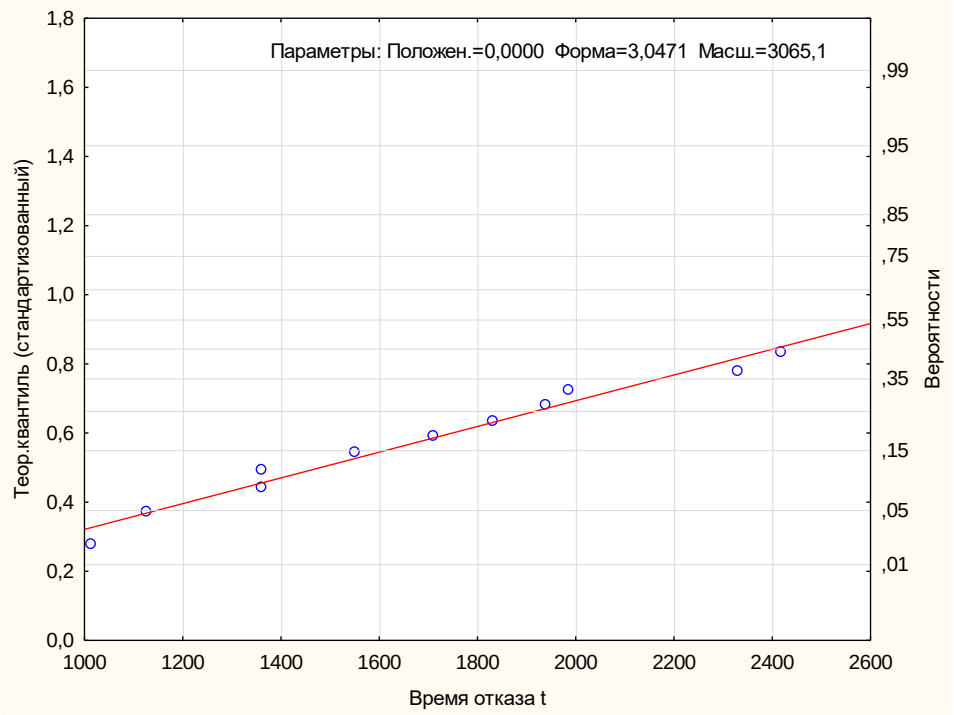


Рисунок 4.1.2 – Квантильный график (Q-Q) соответствия эмпирических данных об отказах двухпараметрическому распределению Вейбулла (составлено автором)

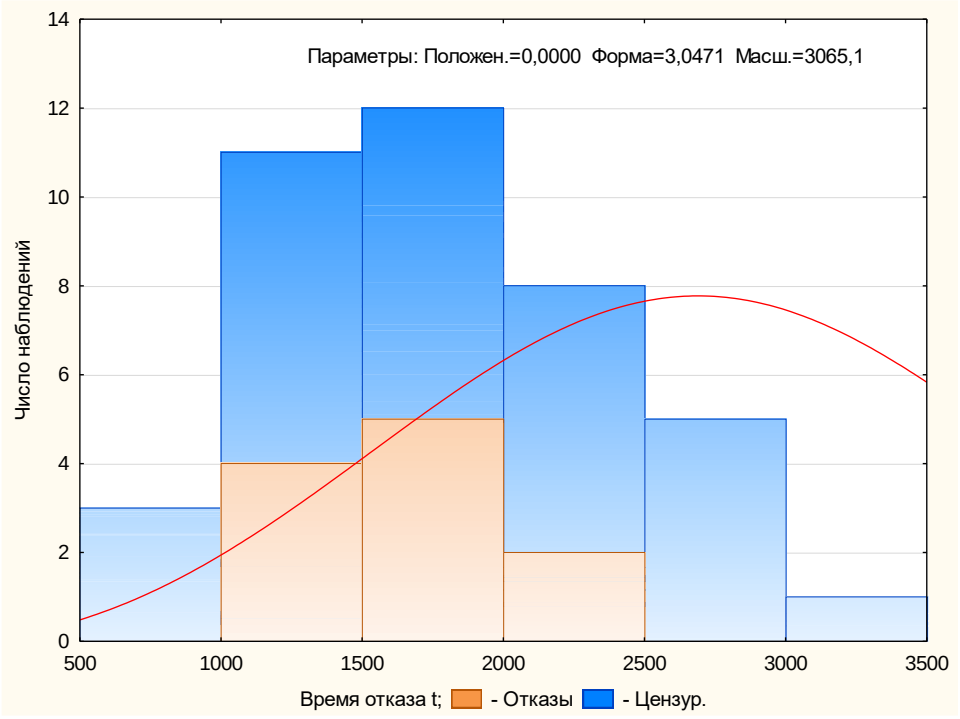


Рисунок 4.1.3 – Гистограмма распределения длительности пребывания в работе электролизеров с выделением отказов и цензурированных наблюдений (составлено автором)

Как видно из гистограммы, цензурированные наблюдения распределены по всему диапазону наработок, причем их количество возрастает в интервалах свыше 2000 дней, что отражает постепенный вывод части электролизеров в ремонт или их продолжительную безаварийную работу. Отказавшие электролизеры сосредоточены в интервалах от 1000 до 2400 дней, с наибольшей частотой отказов в диапазоне 1350-1550 дней и 1700-1950 дней. Отсутствие отказов после 2500 дней может быть связано как с малым количеством наблюдений в этой области (большинство агрегатов были введены в эксплуатацию позднее), так и с эффектом цензурирования.

Кривая плотности распределения Вейбулла в целом удовлетворительно аппроксимирует эмпирическое распределение отказов, что согласуется с результатами теста Холландера–Прошана (p = 0,328). Гистограмма наглядно демонстрирует, что большинство отказов приходится на интервал от 1000 до 2400 дней, а цензурированные наблюдения доминируют в области больших наработок, что характерно для корректно сформированной выборки с правым цензурированием.

На рисунке 4.1.4 представлена функция надежности $R(t) = exp\left[-(\frac{t}{\eta})^{\beta}\right]$, показывающая вероятность того, что электролизер не откажет к моменту времени t. Как видно из графика, функция надежности убывает с увеличением наработки, причем характер убывания замедляется после 2000 дней, что соответствует износовому типу отказов (β>1). Можно выделить ключевые точки, где вероятность безотказной работы к моменту 5 лет (1825 дней) составляет около 92%, к 7 годам (2555 дней) – около 55%, а к 8,4 годам (3065 дней) – около 37%. Доверительные интервалы расширяются с ростом наработки, что обусловлено уменьшением числа наблюдаемых электролизеров в области больших сроков службы (эффект правого цензурирования).

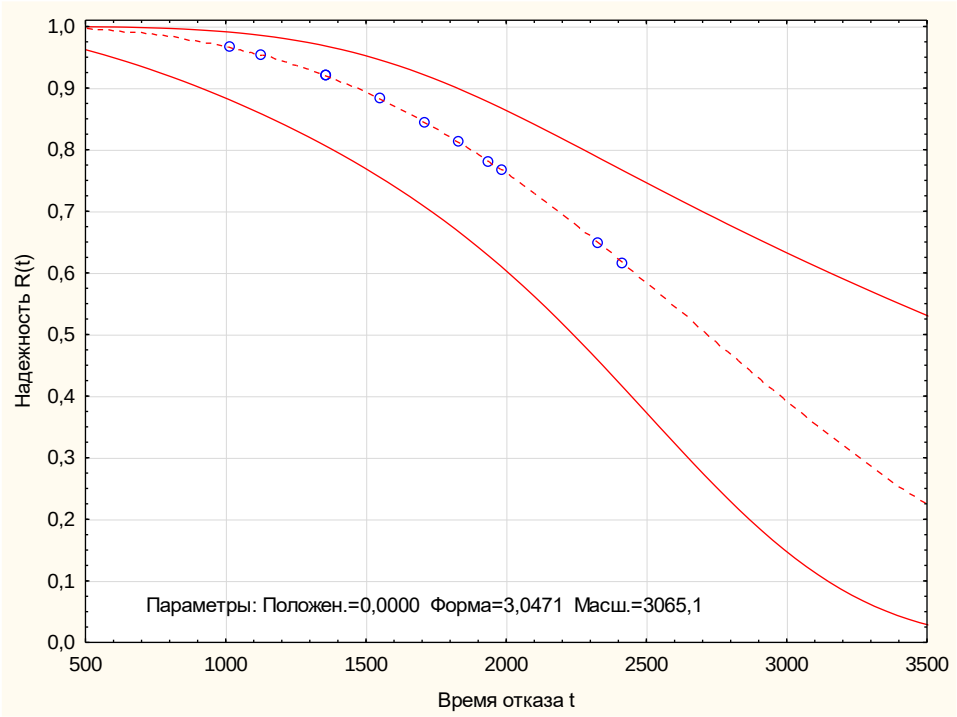


Рисунок 4.1.4 – Функция надежности (вероятность безотказной работы) по распределению Вейбулла (метод максимального правдоподобия) (составлено автором)

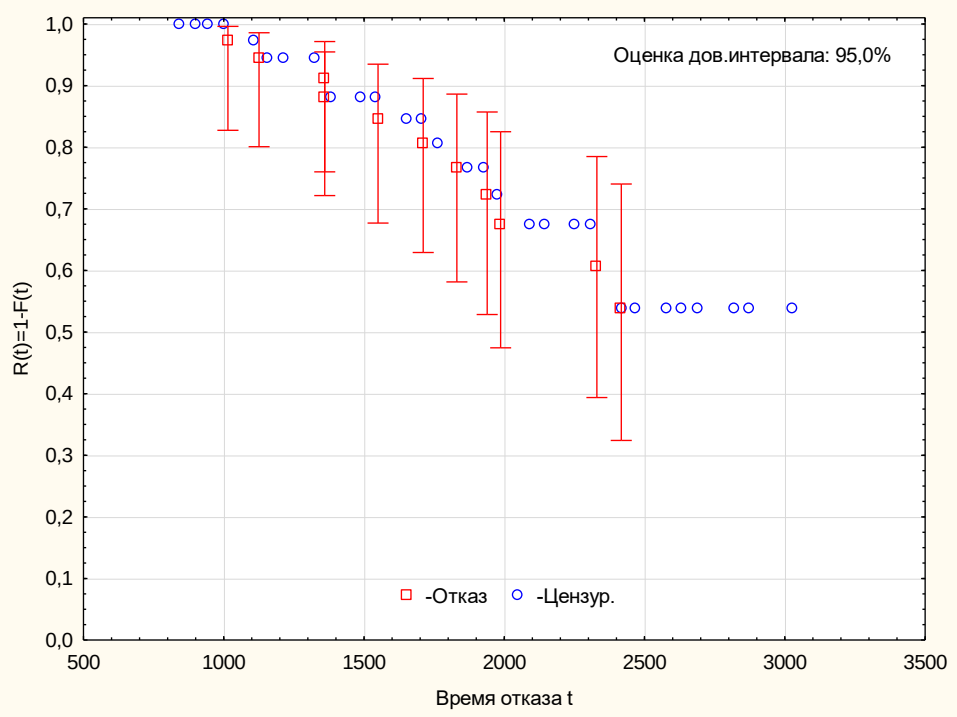


Рисунок 4.1.5 – Оценка функции надежности R(t) с 95% доверительными интервалами (метод максимального правдоподобия) и эмпирическими данными

Полученная функция надежности может быть использована для обоснования периодичности капитальных ремонтов и прогнозирования доли электролизеров, потребующих ремонта в заданном временном интервале (Приложение А). В приложении Б показаны значения процентилей, полученных из адекватной модели, подтвержденной тестом Холландера-Прошана, что позволяет перейти от статистического вывода к количественному управлению рисками и планированию ТОиР.

Рисунок 4.1.5 показывает хорошее соответствие эмпирических отказов теоретической кривой надежности Вейбулла (β = 3,047; η = 3065 дней). Цензурированные наблюдения располагаются в области больших наработок, что характерно для корректно сформированной выборки, а отклонения точек не выходят за границы 95% доверительного интервала.

Проведенный анализ надежности электролизеров с использованием двухпараметрического распределения Вейбулла (метод максимального правдоподобия, N = 40, число цензурированных наблюдений – 29) позволил получить статистически значимые оценки параметров (таблица 4.1.3):

– параметр формы β = 3,05 > 1 свидетельствует о доминировании износовых механизмов отказов, когда интенсивность отказов возрастает с увеличением наработки, что соответствует физике эксплуатации электролизеров (деградация футеровки, износ подины, коррозия конструкций, усталостные повреждения катодных стержней);

– параметр масштаба η = 3065 дней (8,4 года) означает, что к этому моменту откажут около 63,2% оборудования, а вероятность безотказной работы составляет 36,8%;

– средняя наработка до отказа (MTTF), рассчитанная с учетом гамма-функции, составляет 2735 дней (7,5 лет).

Таблица 4.1.3 – Основные показатели надежности электролизеров (распределение Вейбулла) (составлено автором)

Показатель	Значение	95% доверительный интервал	Интерпретация
Параметр формы β	3,05	1,90 – 4,90	при β > 1 характерны износовые отказы
Параметр масштаба η, дней	3065	2409 – 3899	время, к которому откажут 63,2% электролизеров
Средняя наработка до отказа MTTF, дней	2735	–	среднее время до отказа составляет 7,5 лет
Рекомендуемая периодичность капитальных ремонтов, лет	6-7	–	показано с учетом нижней границы доверительного интервала

Полученные результаты обосновывают целесообразность проведения плановых капитальных ремонтов с периодичностью 6-7 лет, что позволяет минимизировать риски внезапных отказов и оптимизировать затраты на техническое обслуживание.

Таким образом, подтверждена гипотеза о преобладании износовых отказов (β > 1). Это обосновывает переход от стратегии «по факту отказа» к планово-предупредительному или предиктивному обслуживанию. Рекомендуемая периодичность капитальных ремонтов – 6-7 лет (с учетом нижней границы доверительного интервала). После 7 лет интенсивность отказов резко возрастает, что увеличивает риски внезапных простоев. Полученные параметры можно использовать для прогнозирования количества запасных частей и планирования ремонтного бюджета.

4.2 Имитационное моделирование процесса технического обслуживания в производстве алюминия в среде AnyLogic на основе времени операций и параметров процесса

Эффективность функционирования алюминиевого производства в значительной степени определяется надежностью и бесперебойностью работы технологического оборудования, что делает задачу оптимизации процессов технического обслуживания и ремонта (ТОиР) критически важной для обеспечения стабильного качества продукции и сокращения внеплановых простоев. Традиционные аналитические методы расчета и оптимизации, основанные на формулах и упрощенных допущениях, зачастую не способны адекватно отразить сложное поведение технических систем, где сочетаются случайные события, ограниченные ресурсы, человеческий фактор и технологические зависимости. В связи с этим в настоящей статье использовано имитационное моделирование процесса ТОиР в среде AnyLogic на основе временных и технологических параметров алюминиевого производства. Модель позволяет оценивать влияние различных стратегий обслуживания на продолжительность ремонтных циклов, загрузку персонала и общую эффективность оборудования (OEE) [2].

Имитационное моделирование является инструментом анализа, который воспроизводит поведение системы во времени на основе заданных правил, закономерностей и случайных воздействий [92]. В отличие от аналитических моделей, дающих усредненные или статические оценки, имитационные модели позволяют увидеть, как система ведет себя в динамике, как распределяются случайные величины, где возникают очереди и узкие места, как изменения в одном узле влияют на работу всей системы. Таким образом, имитационное моделирование учитывает вариативность, случайность и взаимозависимости отдельных элементов системы, что традиционные методы не позволяют выполнить.

В промышленности, особенно в непрерывных производствах, простои оборудования могут приносить значительные потери. При этом система ТОиР представляет собой классический пример сложной системы с элементами случайности:

– отказы оборудования происходят не регулярно, а в соответствии с некоторой случайностью;

– в широких пределах варьируется длительность ремонта, факторами являются доступность запасных частей, сложность неисправности;

– ограниченность доступных трудовых ресурсов, которые одновременно не могут обслуживать несколько объектов, что порождает возникновение очереди, необходимость определения приоритетов;

– наложение по времени планового технического обслуживания и аварийных ремонтов.

Имитационное моделирование позволяет объединить все эти аспекты в одной модели, провести эксперименты и получить количественные оценки эффективности различных стратегий ТОиР. Процессное управление и эффективное встраивание системы ТОиР в структуру производственной системы определяет целесообразность построения имитационной модели, позволяющей оценивать те или иные решения в области использования

Задачей построения имитационной модели является повышение операционной эффективности ТОиР алюминиевого производства за счет количественной оценки влияния различных стратегий обслуживания, ремонтных политик и ресурсных ограничений на ключевые показатели надежности оборудования и производственных простоев. Результатом задачи имитационного моделирования должно стать:

– описание системы ТОиР и определение оборудования с наибольшими потерями;

– учет законов распределения отказов, сценариев периодичности ремонтов и влияния приоритизации;

– анализ загруженности персонала и оборудования при плановых и аварийных ремонтах;

– расчет OEE, коэффициента технического использования, времени простоев и ожидания ресурсов;

– сценарный анализ и визуализация.

Важной составляющей процесса построения имитационной модели является выбор подхода к имитационному моделированию. Поскольку инструментом имитационного моделирования является ПО Anylogic, то доступными подходами является агентный или процессный подход (с учетом задач построения модели).

Выбор процессного (дискретно-событийного) подхода обоснован рядом особенностей имитационной модели:

– высокая интенсивность событий, а именно очередей и загрузки ресурсов при множестве однотипных ремонтов;

– технологическая зависимость, т.е. описание захвата ресурсов, блокировок и простоев оборудования по расписанию или наработке;

– эффективность вычислений за счет снижения затрат времени и мощности по сравнению с агентным подходом при сохранении точности.

Использование агентного подхода предполагается для учета следующих факторов:

– человеческого фактора при выполнении ремонтов и принятии решений;

– сложной логики отказов оборудования, где техническое состояние одного объекта может зависеть от использования или технического состояния соседнего объекта;

– маршрутизации мобильных бригад и особенности их физического перемещения.

В рамках обозначенных задач имитационной модели ключевым фактором выбора является характер отказов и логика принятия решений при планировании и осуществлении плановых и аварийных ремонтов. В это связи

предложено использовать гибридный подход, где основные этапы ремонтов и генерирующие их события являются процессными моделями, и на них надстраиваются агенты, имитирующие более сложные объекты (ремонтные бригады, оператор ТОиР, осуществляющий планирование ТОиР и т.п.).

Объектом моделирования является система ТОиР алюминиевого производства. В таблице 4.2.1 приведен состав входных параметров имитационной модели ТОиР: идентификаторы и типы оборудования, периодичность планового ТО, законы распределения наработки до отказа и длительности ремонта, данные о ремонтных бригадах, стратегия обслуживания и их количество.

Таблица 4.2.1 – Входные данные имитационного моделирования (составлено автором)

Параметр	Тип	Источник
ID оборудования	Строковый	Реестр основных средств
Тип	Категория	Технический справочник
Периодичность планового ТО (часов)	Число, распределение	Регламент ТО
Распределение наработки до отказа	Распределение	Статистика отказов
Средняя длительность ремонта (часов)	Распределение	Хронометраж
ID бригады	Строковый	Данные по бригадам
Стратегия ТОиР	0 – аварийный 1 – по наработке	–
Количество бригад	1–10	–

Постановка задачи. Имеется множество единиц оборудования $E=\{e_1,e_2,...,e_n\}$, каждая из которых характеризуется:

– средней наработкой на отказ $MTBF_i$;

– средним временем восстановления $MTTR_i$;

– периодичностью планового ТО PM_i;

– типом оборудования $type_i \in \{ELECTROLYZER,PUMP,CRANE\}$;

– количеством ремонтных бригад $B=\{b_1,...,b_m\}$ с одинаковой квалификацией в базовой модели.

Цель имитационного моделирования заключается в оценке:

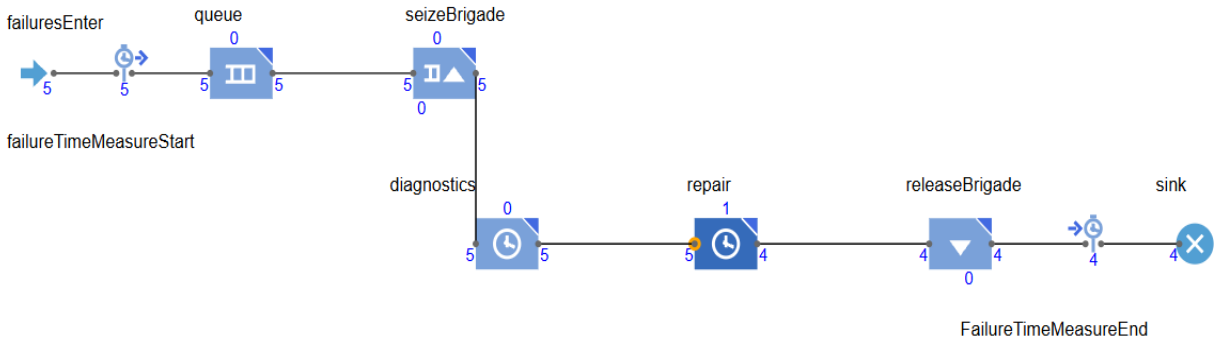
1) среднего времени простоя оборудования (суммарная длительность ожидания и ремонта);

2) распределения длительности ремонтов;

3) влияния численности бригад на очередь заявок;

4) эффективности различных стратегий приоритизации (значимость аварийного ремонта относительно планового технического обслуживания).

Дополнительные задачи моделирования заключаются в верификации модели на реальных данных, проведении сценарных экспериментов и выдача рекомендаций.



failuresEnter – заявки на аварийный ремонт на основе сообщений от оборудования
queue – очередь заявок на аварийный ремонт
siezeBrigade – привлечение ремонтных бригад
diagnostic – длительность выполнения диагностики причин аварии
repair – длительность процесса ремонта
releaseBrigade – высвобождение ремонтной бригады
sink – завершение процесса
failureTimeMeasureStart – время начала отказа (аварии) оборудования
failureTimeMeasureEnd – время окончания отказа (оборудование отремонтировано и готово к работе)

Рисунок 4.2.1 – Схема процессной части имитационной модели ТОиР: модель процесса аварийных ремонтов (составлено автором)

Разработанная имитационная модель внепланового аварийного ремонта представлена на рисунке 4.2.1. Процесс аварийных ремонтов включает пять основных блоков.

Блок «Заявки на аварийный ремонт» (failures) генерирует заявки на аварийный ремонт на основе сообщений от оборудования (агентов) через интервалы времени заданные на основе закона распределения. Для аварийных ремонтов на начальном этапе использована вероятность Вейбулла. Далее, распределение основано регрессионном анализе зависимости параметров работы оборудования и частоты возникновения аварийных ситуаций.

Блок Enter (тип обрабатываемого агента «Запрос на ремонт» (RepairRequest)) используется для приема заявок, создаваемых оборудованием при отказе. Заявки создаются в агенте «Оборудование» (Equipment) при переходе в состояние «Отказ» (FAILURE) и передаются через вызов «Поступление заявки на отказ в модель» (failuresEnter.take(request)).

Блок «Очередь заявок на аварийный ремонт» (queue) отражает очередь заявок на случай одновременного выхода из строя оборудования, а также в условиях ограниченности ресурсов. Тип очереди – «первым пришел – первым обслужен» (FIFO). Приоритет определяется полем priority заявки (0 – авария, 1 – плановое техническое обслуживание). Такой подход гарантирует, что аварийные ремонты обслуживаются раньше плановых.

Блок «Привлечение ремонтных бригад» (siezeBrigade) отражает захват бригад из пула brigadePool, где в момент захвата заявке отправляется сообщение, которое переводит оборудование из состояния «Отказ» (FAILURE) в «Ожидание доступной ремонтной бригады» (AWAIT_CREW). Бригада считается занятой до момента освобождения. Данный блок необходим для оценки загруженности ресурсов и влияния величины доступных человеческих ресурсов на параметры эффективности системы ТОиР.

Блок «Длительность выполнения диагностики» (diagnostic) отражает время выполнения диагностики причин аварии для дальнейшего принятия

решения. Определяет параметр длительности процесса в рамках заданного закона распределения. Блок выделен отдельно, так как целесообразно отслеживать эффективность процесса диагностики для оценки степени влияния данного этапа на параметры эффективности ТОиР.

Блок «Длительность процесса ремонта» (repair) отражает непосредственно время процесса ремонта. Длительность данного блока также определена законом распределения (треугольным законом распределения), который выбран в соответствии с наблюдаемыми параметры существующего физического процесса. На входе в блок фиксируется время начала ремонта (agent.repairStartTime), а на выходе считается фактическая длительность. Данный блок является ключевым в контексте оценки общей длительности ремонтов и их влияния на длительность простоев оборудования.

Блок «Высвобождение ремонтной бригады» (releaseBrigade) отражает событие высвобождение ресурсов или ремонтной бригады, задействованной в рамках текущего аварийного ремонта. На входе в блок рассчитывается длительность ремонта (time() - agent.repairStartTime), после чего данная информация используется для сбора статистики. Оборудованию отправляется сообщение о завершении ремонта.

Имитационная модель планового ремонта представлена на рисунке 4.2.2. В модели плановых ремонтов логика генерации заявок на ремонт определена в соответствии с заданными интервалами между ремонтами (часы работы), что отражено в блоке «Заявки на плановое техническое обслуживание» (PMentry). Логика остальных блоков аналогично модели аварийных ремонтов. Также особенностью модели является то, что приоритет заявок планового ремонта ниже (1 против 0 у аварийного отказа), поэтому они обрабатываются после аварийных. Длительность ремонта задается параметром продолжительности плавного ремонта оборудования (pmDuration).

В рамках агентного подхода в модели функционируют следующие агенты: оборудование (Equipment), заявка на ремонт (RepairRequest), заявка на плановое ТО (PMRequest).

Агент «Оборудование» (Equipment) является центральным элементом модели и представляет собой единицу производственного оборудования. В рамках разработанной модели имитировано функционирование трех типов оборудования: электролизер, насос и кран. Каждый экземпляр оборудования обладает набором параметров:

equipmentID – уникальный идентификатор оборудования;

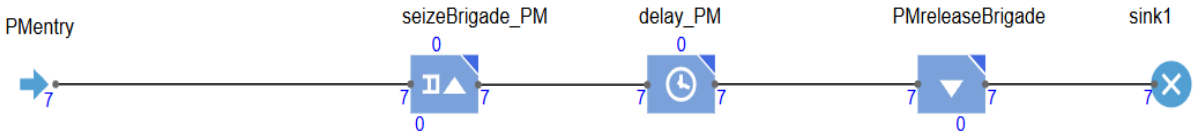
equipmentType – тип оборудования;

mtbfHours – средняя наработка на отказ (часов);

mttrHours – среднее время восстановления (часов);

pmIntervalHours – периодичность планового технического обслуживания (часов);

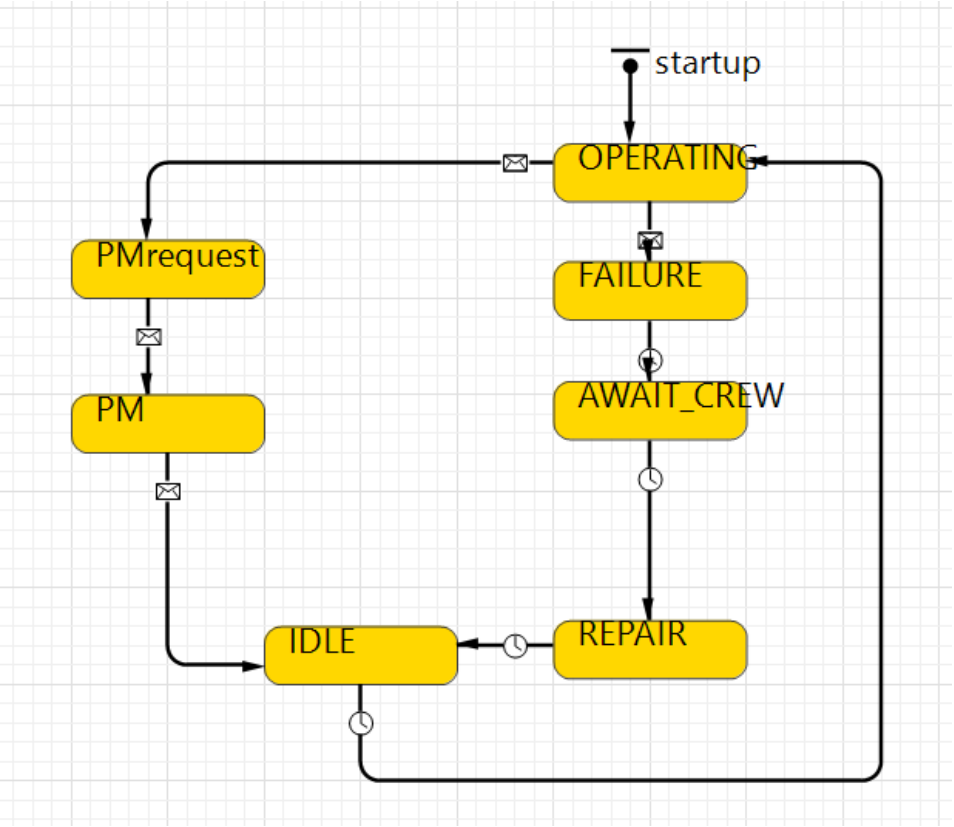
pmDuration – длительность планового обслуживания (часов).



PMentry – заявки на плановое техническое обслуживание
siezeBrigade_PM – привлечение ремонтных бригад для планового технического обслуживания
delay_PM – длительность процесса планового технического обслуживания
PMreleaseBrigade – высвобождение ремонтной бригады после планового технического обслуживания
sink1 – завершение процесса планового технического обслуживания

Рисунок 4.2.2 – Схема процессной части имитационной модели ТОиР: модель процесса планового ремонта (составлено автором)

Для описания изменения состояния оборудования в рамках реализации эксперимента была построения диаграмма состояний (рисунок 4.2.3).



STARTUP – начальное состояние
OPERATING – работа оборудования в штатном режиме
FAILURE – оборудование находится в отказе
AWAIT_CREW – состояние ожидания прибытия ремонтной бригады
REPAIR – выполняется ремонт
IDLE – оборудование готово к запуску
PM – проводится плановое техническое обслуживание

Рисунок 4.2.3 – Диаграмма состояний оборудования производства алюминия (агент Equipment) (составлено автором)

Диаграмма состояний оборудования производства алюминия (агент Equipment) включает последовательность состояний и переходов. Начальное состояние (STARTUP) инициирует переменные агента. После инициализации оборудование переходит в состояние работы в штатном режиме (OPERATING). Из состояния OPERING возможны два перехода:

– при получении сообщения «failure» от таймера оборудование переходит в состояние отказа (FAILURE), в момент которого фиксируется время отказа и увеличивается счетчик отказов;

– при достижении наработкой значения «pmIntervalHours» и получении сообщения «pm_needed» оборудование переходит в состояние запроса планового обслуживания (PMrequest).

Из состояния FAILURE после того, как заявка на ремонт захватила ремонтную бригаду, происходит переход в состояние ожидания прибытия бригады (AWAIT_CREW). Из AWAIT_CREW при появлении свободной бригады оборудование переходит в состояние выполнения ремонта (REPAIR). По завершении ремонта осуществляется переход в состояние готовности к запуску (IDLE), а из IDLE по команде запуска оборудование возвращается в OPERING. Отдельно из состояния PMrequest оборудование переходит в состояние планового технического обслуживания (PM), после завершения которого оно также возвращается в OPERING.

Такой набор состояний позволяет детально моделировать все этапы жизненного цикла оборудования. от нормальной работы до аварийного ремонта и планового обслуживания.

Агент запроса на ремонт (RepairRequest) используется в цепи блоков дискретно-событийного моделирования (DES-цепи) аварийного ремонта. Он содержит следующие поля:

- Equipment – ссылка на оборудование, которое сломалось;
- Priority – приоритет заявки (0 – авария, 1 – плановое ТО);
- creationTime – время создания заявки;
- brigadeStartTime – время начала обслуживания бригадой.

Агент запроса на ремонт PMRequest используется в процессной модели планового ремонта и содержит аналогичные поля.

Ключевая особенность модели заключается в тесной связи между цепями дискретно-событийного моделирования и агентами Equipment. Заявки, проходящие через блоки привлечения ремонтных бригад (seizeBrigade, releaseBrigade) отправляют сообщения напрямую в диаграмму состояний соответствующего оборудования. Это позволяет синхронизировать состояние оборудования с этапами выполнения ремонта.

Отказы генерируются не централизованно, а каждым агентом Equipment самостоятельно. В состоянии работы оборудования в штатном режиме (OPERATING) запускается циклическое событие uptimeEvent, которое генерирует периодические срабатывания для отслеживания времени работы оборудования без отказа. Циклическое событие uptimeEvent каждый час увеличивает переменную текущей наработки (currentUptime). Кроме того, запускается событие «Отказ оборудования» (failureEvent), которое через случайный интервал, распределенный по экспоненте или Вейбуллу, инициирует переход в состояние отказа FAILURE.

Плановый ремонт также инициируется самим оборудованием. В состоянии работы оборудования в штатном режиме (OPERATING) запущено событие pmCheckEvent, которое периодически проверяет, достигла ли текущая наработка оборудования (currentUptime) заданного интервала планового технического обслуживания. Событие pmCheckEvent каждый час проверяет условие: текущая наработка оборудования достигла или превысила заданный интервал планового технического обслуживания (currentUptime >= pmIntervalHours). Как только условие выполняется, агент Equipment создает заявку на плановое техническое обслуживание (PMRequest) и отправляет ее в соответствующий блок заявок PMentry, после чего переходит в состояние запроса планового технического обслуживания (PMrequest).

Разработанная модель позволяет собирать статистики процесса, в частности, представлена статистика простоев оборудования (рисунок 4.2.4). Для этого в агенте Equipment созданы переменные:

isDown – бинарная переменная, указывающая, что оборудование сейчас в простое;

downtimeStart – время начала текущего простоя;

totalDowntime – суммарное время простоя.

При входе в состояние FAILURE фиксируется переменная начала простоя оборудования downtimeStart = time(). При выходе из ремонта (возврат в OPERATING) вычисляется длительность простоя и добавляется к

суммарному времени простоев оборудования за весь период моделирования (totalDowntime).

Для сбора статистики длительностей простоя созданы переменные:

totalDowntimeAll – суммарный простой всего оборудования;

downtimeEventCount – количество событий простоя;

avgDowntime – средняя длительность одного простоя.

Для расчета соответствующего показателя функция модели, которая добавляет текущий простой к общей переменной (addDowntime), вызывается из агента Equipment при завершении каждого простоя и обновляет глобальные счетчики.

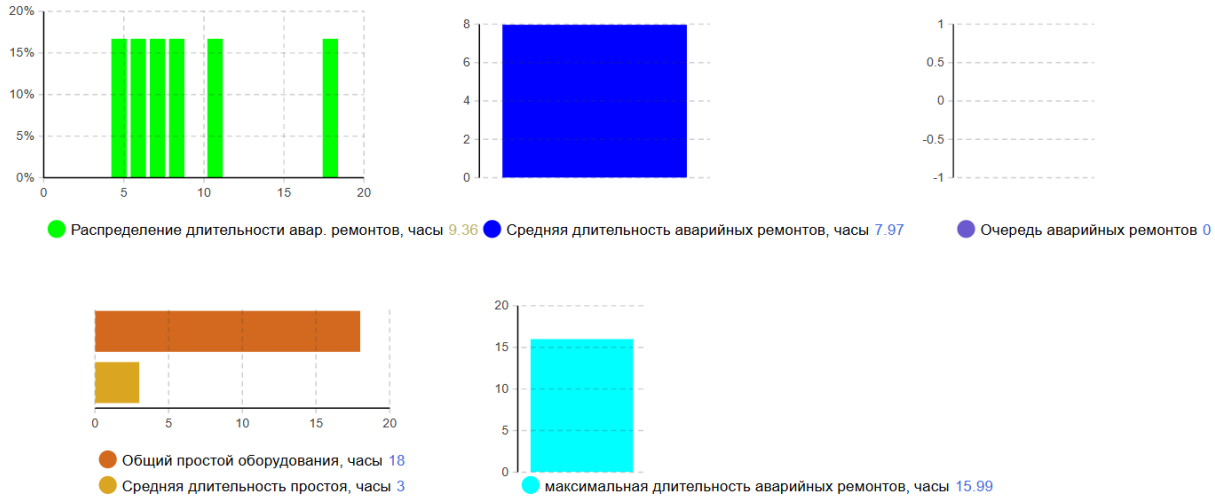


Рисунок 4.2.4 – Панель визуализации имитационной модели ТОиР (разработано автором)

Для сбора длительности ремонтов в заявку на ремонт (RepairRequest и PMRequest) добавлена переменная, фиксирующая момент начала выполнения ремонта (repairStartTime). В блоке «ремонт» (repair) на входе фиксируется присвоение переменной конкретного оборудования текущего модельного времени agent.repairStartTime = time(). В блоке «освобождение бригады» (releaseBrigade) на входе вычисляется продолжительность ремонта для оборудования как разность между текущим модельным временем и моментом

начала ремонта duration = time() - agent.repairStartTime и вызывается метод добавления длительности выполненного ремонта к общей статистике addRepairDuration.

На панели визуализации модели отображаются следующие показатели: общий простой оборудования, средняя длительность одного простоя, средняя длительность ремонта, максимальная длительность ремонта, распределение длительностей выполненных ремонтов.

Применение разработанной имитационной модели технического обслуживания и ремонта

Далее представлен пример использования модели для различных сценариев по количеству бригад. Результаты моделирования сведены в таблице 4.2.2, где применение полученной модели позволяет наблюдать количественную оценку и характер воздействия используемых ресурсов (ремонтных бригад) на показатели результативности системы ТОиР. Так, увеличение количества бригад приводит к снижению общего простоя оборудования на 15%, средней длительности аварийных работ на 6% и средней длительности простоя на плановый ремонт на 25%.

Таблица 4.2.2 – Моделирование параметров эффективности ТОиР при различном количестве доступных ремонтных бригад (составлено 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

Для принятия окончательного решения об организации системы ТОиР следует учесть финансовые потери, связанные с указанными изменениями и объем финансовых ресурсов, необходимых для формирования дополнительной единицы трудовых ресурсов.

Ограничения и развитие имитационной модели технического обслуживания и ремонта

Следует также отметить границы применимости модели и использованные при ее построении упрощения. Во-первых, в модели используются однородные бригады, то есть они имеют одинаковую квалификацию и взаимозаменяемы. В реальности могут быть ограничения, обусловленные специализацией бригад (механики, электрики и т.п.). Введение специализаций увеличит точность, но потребует более сложной логики назначения. Во-вторых, в модели не отражена логика использования запасных частей, что может несколько искажать результаты при условии значительного влияния доступности запчастей на реальных объектах. Для заводов, удаленных от поставщиков, этот фактор может быть критичным. В-третьих, в модели реализована постоянная интенсивность эксплуатации, т.е. оборудование работает с полной нагрузкой все время эксплуатации. На реальном объекте интенсивность эксплуатации может иметь цикличный характер, что влияет на показатели износа и планового технического обслуживания.

Несмотря на ряд ограничений, разработанная модель позволяет оценить текущую эффективность ТОиР через измерение средней длительности простоя, загрузку бригад и количество ремонтов. Кроме того, на основании модели возможно сравнение стратегий обслуживания (аварийный и плановый ремонт), оптимизация количества бригад и их влияние на время ожидания ремонта, а также анализ чувствительности варьирования параметров распределений отказов и ремонтов.

Развитие разработанной имитационной модели видится во встраивании в нее модуля использования трудовых ресурсов с учетом параметров

перемещения и сменности, оценки потребности в запасных частях и расходных материалах с учетом вероятности аварийных ремонтов и различных вариантов распределения плановых ремонтов и др.

Проведенное исследование позволило получить следующие научно-практические результаты. Разработанная в среде AnyLogic имитационная модель технического обслуживания и ремонта алюминиевого производства, базирующаяся на временных и технологических параметрах, позволяет количественно оценивать влияние различных стратегий ТОиР (аварийной и плановой) на ключевые показатели эффективности оборудования, включая OEE, коэффициент технического использования, простои и загрузку персонала.

Обоснован и реализован гибридный подход к моделированию, сочетающий дискретно-событийную (процессную) модель для основных ремонтных операций и агентную модель для оборудования и ремонтных бригад, что обеспечивает адекватный учет случайных отказов, ограниченности ресурсов, приоритизации заявок и технологических зависимостей.

С помощью модели проведен сценарный анализ для различного количества ремонтных бригад (от одной до двух), который показал, что увеличение числа бригад позволяет снизить общий простой оборудования по причине ТОиР на 15,6%, среднюю длительность аварийных ремонтов на 6,1%, а среднюю длительность простоя на плановый ремонт на 25%. Установлены границы применимости модели (однородные бригады, отсутствие учета запасных частей и переменной интенсивности эксплуатации), а также определены направления ее дальнейшего развития: включение специализации бригад, логистики запасных частей, сменности и маршрутизации мобильных ремонтных бригад. Модель готова к использованию для анализа эффективности системы ТОиР и выработки рекомендаций по ее улучшению.

4.3 Оценка эффекта от внедрения организационно-технических решений по развитию цифровой системы технического обслуживания и ремонта

На основе разработанных решений выполнена комплексная оценка организационно-технической эффективности по развитию цифровой системы ТОиР в производстве алюминия. Оценка базируется на сравнении исходного состояния (реактивное обслуживание, ППР по календарным циклам) с целевым состоянием, достигаемым при реализации предложенной концепции RCM 4.0, интеграции предиктивной аналитики, распределения Вейбулла и имитационного моделирования в единой цифровой среде (АСУ ТОиР как подсистема уровня MES/ERP).

Во-первых, это снижение внеплановых простоев, рост коэффициента готовности и наработки оборудования на отказ. Исходная диагностика (параграф 2.1) показала, что доля внеплановых простоев, связанных с отказами оборудования, достигает 48% в структуре потерь, при этом коэффициент готовности наиболее критичных узлов (камерные смесители) составляет 75%, а наработка на отказ (MTBF) – 120 часов. Внеплановые простои на российских алюминиевых предприятиях в 2,8 раза выше, чем в мировой практике (Alcoa, Hydro, Rio Tinto), а доля плановых ремонтов составляет 55% против 80%.

Внедрение разработанных решений по развитию системы ТОиР позволяет снизить риск внезапных отказов за счет перехода от календарных ППР к назначению периодичности на основе распределения Вейбулла, сократить долю реактивных ремонтов благодаря интеграции предиктивной диагностики и самообучающихся моделей (регрессия, случайный лес), сократить общий простой оборудования и средний простой на плановый ремонт на основе имитационного моделирования. В таблице 4.3.1 обобщены количественные результаты.

Таблица 4.3.1 – Оценка эффекта от внедрения организационно-технических решений по развитию цифровой системы технического обслуживания и ремонта (составлено 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% доверительного интервала	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 в AnyLogic)	Сокращение общего простоя оборудования	Результативный (временной)	на 15,6%
	Сокращение среднего простоя на плановый ремонт	Операционный	на 25%

Каждый показатель отражает разный аспект системы ТОиР, но они работают в одном направлении и усиливают друг друга. Снижение риска внезапных отказов ведет к уменьшению количества аварийных остановок, что автоматически сокращает долю реактивных ремонтов. В свою очередь, уменьшение числа аварийных остановок в сочетании с оптимизацией количества ремонтных бригад позволяет сократить общий простой оборудования; при этом эффект от двух факторов суммируется нелинейно, давая дополнительный синергетический результат. Наконец, оптимизация числа бригад (например, с 1 до 2) напрямую уменьшает длительность выполнения плановых ремонтов, что также положительно влияет на общий простой, но данный эффект измеряется отдельно – для диагностики узких мест и более точной настройки системы ТОиР. Таким образом, все показатели взаимодополняют друг друга, а их совместное использование дает

многокритериальную оценку эффективности, что рекомендуется для систем ТОиР (по стандарту ГОСТ Р 27.606-2013).

Одним из ключевых интегральных показателей надежности оборудования является коэффициент готовности (отношение времени нахождения оборудования в работоспособном состоянии к общей продолжительности периода). Для непрерывных металлургических производств, каким является получение первичного алюминия, коэффициент готовности непосредственно влияет на стабильность технологического процесса, удельные затраты и выполнение производственной программы. Низкая готовность (особенно критического оборудования) ведет к внеплановым остановам, потерям металла, повреждению футеровки и росту брака.

Проведенная во 2ой главе диссертации диагностика показала, что для камерных смесителей, работающих в агрессивной среде шихты, коэффициент готовности составляет 0,75, а для высокоамперных электролизеров РА-300 оценивается на уровне 0,82-0,85, что существенно ниже значений мировых лидеров (0,92-0,95).

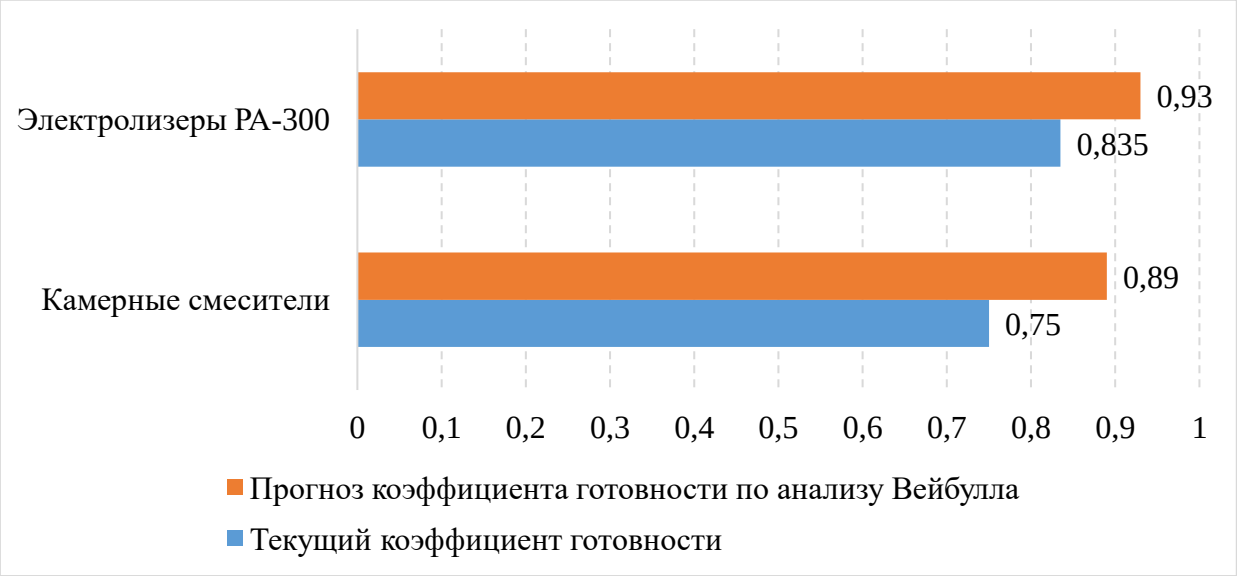


Рисунок 4.3.1 – Оценка нахождения оборудования в работоспособном состоянии (коэффициент готовности оборудования) по результатам анализа Вейбулла (составлено автором)

Внедрение предложенной цифровой системы ТОиР, включающей переход к назначению периодичности ремонтов на основе распределения Вейбулла позволяет спрогнозировать рост коэффициента готовности за счет выполнения плановых капитальных ремонтов с периодичностью 6-7 лет (вместо ранее практиковавшейся эксплуатации до отказа):

– для камерных смесителей с 0,75 до 0,89;

– для электролизеров РА-300 с 0,835 до 0,93.

Во-вторых, в параграфе 4.1 для высокоамперных электролизеров РА-300 подтверждено, что отказы подчиняются распределению Вейбулла с параметром формы $\beta = 3{,}05 > 1$, что доказывает доминирование износовых механизмов. Рассчитанная средняя наработка до отказа (MTTF) составила 7,5 лет.

При традиционной системе ППР без учета реального состояния фактическая наработка между отказами часто оказывалась ниже расчетной (до 4-5 лет) из-за внеплановых аварийных остановок. Внедрение предложенного алгоритма назначения периодичности (70-80% от MTTF с контролем функции надежности R(t) на уровне 5-15% в зависимости от критичности) позволяет:

– увеличить среднюю наработку на отказ для электролизеров с 4-5 лет до 6-7 лет (рост до 40%);

– для оборудования с $\beta < 1$ (приработочные отказы) – внедрить усиленный входной контроль и сократить MTBF за счет исключения ранних поломок;

– на основе FMEA-анализа (раздел 2.3) снизить приоритетное число риска (RPN) для критических узлов (анодная рама) в 4 раза (с 240 до 60), что прямо коррелирует с ростом безотказности.

Таблица 4.3.2 – Ожидаемое улучшение показателей надежности электролизеров РА-300 в условиях цифровой системы ТОиР (составлено 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)	

В-третьих, получен качественный эффект от оценки качества продукции на основе диагностики оборудования (по результатам параграфа 2.3). На примере зависимости овальности отверстия блока изготавливаемого цилиндра от уровня вибрации подшипника показан алгоритм предупреждения брака. Определен порог брака по вибрации: при 4,5 мм/с овальность достигает 10 мкм, что соответствует выходу за пределы допуска. При превышении данного порога доля брака может достигать 12%. Разработанный самообучающийся контур «диагностика – прогноз – обслуживание – контроль» обеспечивает снижение риска выпуска бракованных изделий, а каждый цикл эксплуатации повышает точность прогнозных моделей (снижение брака с 12% до менее 1% после замены подшипника по прогнозу).

Подобная предиктивная диагностика дает возможность управлять качеством на опережение – через корректировку ТОиР. В таблице 4.3.3 для алюминиевого производства обобщены примеры причинно-следственных связей, когда состояние оборудования определяет качество продукции. Эти связи носят качественный или порядковый характер, но их систематизация позволяет выявить критические точки контроля и обосновать переход от

реактивного управления качеством к проактивному, базирующемуся на данных о техническом состоянии оборудования.

Таблица 4.3.3 – Примеры причинно-следственных связей влияния состояние оборудования на качество продукции (составлено автором)

Оборудование и параметр	Влияние на качество продукции	Характер воздействия
Дробильно-размольное оборудование (уровень вибрации, износ футеровки)	Тонкость помола и фракционный состав глинозема – исходного сырья для электролиза	Изменение гранулометрического состава критически влияет на растворимость и скорость протекания реакции в электролизере
Электролизер (температура расплава, токовая нагрузка)	Выход по току и химический состав металла	Отклонения от заданного тока приводят к снижению выхода по току и чистоты металла
Система подачи глинозема (стабильность дозирования)	Чистота металла по примесям Fe и Si	Отказы оборудования увеличивают попадание нерастворившихся частиц глинозема в готовый алюминий
Система газоочистки (разрежение)	Концентрация вредных примесей в электролите и металле	Разрежение определяет эффективность очистки отходящих газов, влияя на химический состав ванны
Анодная рама (равномерность токораспределения)	Равномерность съема металла и доля брака	Неравномерность распределения тока ведет к локальным перегревам и снижению выхода по току
Футеровка электролизера (температура кожуха)	Долговечность агрегата и риск попадания примесей	Деградация футеровки ведет к потерям тепла, снижению КПД и риску аварийных остановок
Краны-перегружатели (температура подшипников)	Ритмичность подачи шихты	Перегрев ведет к остановкам и сбоям в дозировании сырья

Следует отметить, что достоверная количественная оценка снижения брака непосредственно от внедрения предиктивной диагностики в многопередельном алюминиевом производстве сопряжена с объективными

трудностями. Брак формируется под влиянием множества взаимосвязанных факторов (качество сырья, режимы электролиза, человеческий фактор, точность дозирования и др.), выделить вклад каждого из них в чистом виде без длительных промышленных испытаний и статистически значимой выборки крайне затруднительно. Поэтому в диссертации сделан акцент на качественном эффекте от оценки качества продукции на основе диагностики оборудования.

В-четвертых, внедрение цифровой системы ТОиР обеспечивает трехкомпонентный экономический эффект: сокращение затрат за счет снижения избыточности ремонтов, потерь от внеплановых простоев, оптимизации ресурсов ремонтных служб. Произведена оценка экономического эффекта от внедрения цифровой системы ТОиР для алюминиевого завода мощностью 300 тыс. тонн в год (Хакасский алюминиевый завод), где годовые затраты на ТОиР составляют в среднем 375 млн рублей, а стоимость 1 часа простоя достигает 60 тыс. рублей. Затраты на цифровизацию системы ТОиР (CMMS, датчики, аналитика, обучение), амортизация и ее эксплуатация составят от 25 млн руб. в год (таблица 4.3.4).

Таблица 4.3.4 – Экономический эффект от развития цифровой системы ТОиР по направлениям (составлено автором)

Показатель		Эффект, млн руб. в год
Снижение избыточности ремонтов (сокращение плановых ремонтов на 22%)		85,0
Снижение потерь от внеплановых простоев (сокращение простоев на 350 ч/год)		21,5
Оптимизация ресурсов ремонтных служб (переход на две бригады)	Рост затрат на фонд оплаты труда	35,0
	Снижение потерь от простоев	65,0
	Баланс ресурсов ремонтных служб	30,0

Сокращение числа необоснованных плановых ремонтов на 22% дает экономию 85 млн руб./год. Снижение внеплановых простоев на 350 часов в год приносит 21,5 млн руб./год. Оптимизация ремонтных служб обеспечивает эффект в 30 млн руб./год. По оценке, суммарный экономический эффект от внедрения цифровой системы ТОиР (без учета дополнительных эффектов от повышения качества продукции) может достигать 136,5 млн руб. в год. При прогнозируемых капитальных затратах на цифровизацию (CMMS, датчики, аналитика, обучение) на уровне 250 млн руб. срок окупаемости составит 2,2 года.

Таким образом, разработанные организационно-техничские решения по развитию цифровой системы ТОиР, объединяющей методологию RCM 4.0, распределение Вейбулла для назначения периодичности, предиктивную аналитику на базе машинного обучения и имитационное моделирование в среде AnyLogic, обеспечивает:

– снижение внеплановых простоев в 2,4 раза (с 45% до 20%);

– рост коэффициента готовности критического оборудования на 0,13-0,15;

– увеличение наработки на отказ электролизеров на 40%.

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.

ВЫВОДЫ ПО ЧЕТВЕРТОЙ ГЛАВЕ

1. На примере выборки из 40 высокоамперных электролизеров РА-300 подтверждена адекватность двухпараметрического распределения Вейбулла для описания отказов оборудования. Получены статистически значимые оценки параметров: форма $\beta = 3,05$ (95% ДИ: 1,90-4,90) > 1, что доказывает доминирование износовых механизмов отказов (деградация футеровки,

коррозия, усталостные повреждения), а масштаб η = 3065 дней (95% ДИ: 2409-3899) характеризует наработку, к которой отказывают около 63% агрегатов.

2. Рассчитана средняя наработка до отказа (MTTF) электролизеров по формуле Вейбулла с учетом гамма-функции (7,5 лет). На этой основе обоснована рекомендуемая периодичность капитальных ремонтов – 6-7 лет (с учетом нижней границы доверительного интервала η). Принятие такой периодичности позволяет минимизировать риск внезапных отказов, оптимизировать затраты на ТОиР и планово переходить от стратегии «по факту отказа» к планово-предупредительному и предиктивному обслуживанию.

3. 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. Интерактивная визуализация позволяет в реальном времени наблюдать ключевые показатели: общий простой, среднюю и максимальную длительность ремонтов.

4. 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%. Полученные количественные оценки дают возможность обоснованно выбирать ресурсное обеспечение ремонтной службы, обеспечивая рациональное соотношение между затратами на персонал и потерями от простоев. Модель также пригодна для анализа чувствительности к законам распределения отказов, сравнения стратегий обслуживания и оптимизации периодичности плановых ремонтов.

5. Разработанные организационно-технические решения (переход от календарных ППР к назначению периодичности на основе распределения

Вейбулла, интеграция предиктивной диагностики и самообучающихся моделей, оптимизация числа ремонтных бригад с помощью имитационного моделирования) позволяют снизить риск внезапных отказов на 27,5%, сократить долю реактивных ремонтов с 45% до 20%, уменьшить общий простой оборудования на 15,6%, а средний простой на плановый ремонт – 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).

6. Экономическая эффективность внедрения цифровой системы ТОиР для алюминиевого завода мощностью 300 тыс. т/год (на примере Хакасского алюминиевого завода) выражается в трехкомпонентном годовом эффекте: снижение избыточности ремонтов – 85 млн руб., сокращение потерь от внеплановых простоев – 21,5 млн руб., чистый эффект от оптимизации ремонтных служб (переход с 1 на 2 бригады) – 30 млн руб. Суммарный прямой эффект (без учета повышения качества) может составить 136,5 млн руб./год. При капитальных затратах на цифровизацию 250 млн руб. срок окупаемости оценивается в 2,2 года, что подтверждает целесообразность предлагаемых решений.

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 с-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 ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абдусаломов, А. Г. у. Применения FMEA-анализа на металлургических предприятиях / А. Г. у. Абдусаломов // Качество и жизнь. – 2025. – № 1(45). – С. 54-60.

2. Акопов, А. С. Имитационное моделирование : учебник и практикум для вузов / А. С. Акопов. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Издательство Юрайт, 2026. – 426 с.

3. Андронов А.Н., Бадокина Т.Е. Методы анализа выживаемости в задаче прогнозирования выхода из строя оборудования промышленных предприятий // Вестник Тверского государственного университета. Серия: Прикладная математика. – 2025. – № 2. – С. 65-83.

4. Антоненко, И. Н. Информационная система ТОиР: задачи, возможности, внедрение / И. Н. Антоненко // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2022. – № 10. – С. 13-19.

5. Антоненко, И. Н. К вопросу о надежностно-ориентированном техническом обслуживании / И. Н. Антоненко // Автоматизация в промышленности. – 2020. – № 10. – С. 43-48. – DOI 10.25728/avtprom.2020.10.08.

6. Антоненко, И. Н. Методология RCM: ретроспектива и перспектива надежностно-ориентированного технического обслуживания / И. Н. Антоненко // Энергия единой сети. – 2019. – № 1(43). – С. 34-46.

7. Барсегян, Н. В. Методическое обеспечение оценки эффективности сопутствующих процессов в промышленности / Н. В. Барсегян, С. С. Кудрявцева, Р. А. Халиулин // Компетентность. – 2026. – № 1. – С. 32-37. – DOI 10.24412/1993-8780-2026-1-32-37.

8. Баурова, Н. И. Диагностирование и ремонт машин с применением полимерных материалов : монография / Н. И. Баурова ; Н. И. Баурова. – Москва : Техполиграфцентр, 2008. – 280 с. – ISBN 978-5-94385-038-7.

9. Бильданов, Р. Г. Поиск множества прецедентных комплектов технологической документации / Р. Г. Бильданов, Т. В. Малышева // Автоматизация в промышленности. – 2023. – № 8. – С. 34-40. – DOI 10.25728/avtprom.2023.08.07.

10. Бочкарев, С. В. Управление качеством. Системный подход к проблеме качества: Учебник / С. В. Бочкарев, А. Б. Петроченков, А. Г. Схиртладзе. – Старый Оскол : ООО «Тонкие наукоемкие технологии», 2026. – 332 с.

11. Брюхова А.А., Костюнина Т.Н. Проблемы предективной диагностики и аналитики // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2023. – № 7. – С. 335-338.

12. Васильев, В. А. Сбор и анализ данных в управлении качеством технологического процесса / В. А. Васильев, С. А. Одиноков // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2023. – № 7. – С. 234–237.

13. Воронин, В. В. Диагностические принципы в системах технического обслуживания / В. В. Воронин // Информатика и системы управления. – 2021. – № 4(70). – С. 67-80. – DOI 10.22250/isu.2021.70.67-80.

14. Годунова, М. С. Совершенствование производства за счет внедрения концепции всеобщего ухода за оборудованием (TPM) / М. С. Годунова, М. С. Копосова // Вектор экономики. – 2022. – № 12(78).

15. Горохова В.Ф., Магазев А.А., Касенов А.А., Титова Е.К. Непрерывные марковские модели кибератак для оценки времени до отказа безопасности // Динамика систем, механизмов и машин. – 2024. – Т. 12, № 1. – С. 94-100.

16. ГОСТ 18322-2016 «Система технического обслуживания и ремонта техники. Термины и определения». Введ. 2017-04-01. М.: Стандартинформ, 2017. –16 с.

17. ГОСТ 34196-2017 «Электролизеры для производства алюминия. Общие технические условия». Введ. 2018-07-01. М.: Стандартинформ, 2018. – 12 с.

18. ГОСТ 34905.4-2022 «Подшипники качения. Методы измерения вибрации. Часть 4. Цилиндрические подшипники». – М.: Российский институт стандартизации, 2023. – 16 с.

19. ГОСТ Р 27.606–2013. Надежность в технике. Управление надежностью. Техническое обслуживание, ориентированное на надежность. М.: Стандартинформ, 2021. – 28 с.

20. ГОСТ Р 50779.27-2017 (МЭК 61649:2008) Статистические методы. Распределение Вейбулла. Анализ данных. – М.: Российский институт стандартизации, 2017. – 57 с.

21. ГОСТ Р 56020-2020 «Бережливое производство. Основные положения и словарь». Введ. 2015-06-01. М.: Стандартинформ, 2015. – 32 с.

22. ГОСТ Р ИСО 21747-2010 Статистические методы. Статистики пригодности и воспроизводимости процесса. – М.: Стандартинформ, 2019. – 28 с.

23. ГОСТ Р ИСО 22514-2-2015 Статистические методы. Управление процессами. Показатели воспроизводимости и пригодности процесса. Часть 2. Методы оценки пригодности и воспроизводимости процесса. – М.: Стандартинформ, 2019. – 32 с. (переиздание с поправкой)

24. ГОСТ Р ИСО 22514-4-2021 Статистические методы. Управление процессами. Показатели воспроизводимости и пригодности процесса. Часть 4. Оценка показателей воспроизводимости и пригодности процесса. – М.: Российский институт стандартизации, 2021. – 20 с.

25. ГОСТ 24.104-2023 «Единая система стандартов автоматизированных систем управления. Автоматизированные системы управления. Общие требования». М.: Стандартинформ, 2023. – 22 с.

26. ГОСТ 34.602-2020 «Информационные технологии. Комплекс стандартов на автоматизированные системы. Техническое задание на создание автоматизированной системы. М.: Стандартинформ, 2020. – 12 с.

27. ГОСТ Р 27.010-2019 (МЭК 61703:2016) Надежность в технике. М атематические выражения для показателей безотказности, готовности, ремон топригодности. – М.: Российский институт стандартизации, 2019. – 79 с.

28. ГОСТ Р 27.013-2019 «Безотказность оборудования. Методы оценки безотказности». – Москва, Стандартинформ. – 2019. – 41 с.

29. ГОСТ Р 27.303-2021 «Надежность в технике. Анализ видов и последствий отказов». – Москва, Стандартинформ. – 2021. – 65 с.

30. ГОСТ Р МЭК 62264-1-2014. Интеграция систем управления предприятием. Часть 1. Модели и терминология. – М.: Российский институт стандартизации, 2015. – 74 с.

31. Громова, Е. А. Цифровая трансформация металлургической отрасли: состояние и перспективы / Е. А. Громова // Вестник Академии знаний. – 2024. – № 6(65). – С. 292-295.

32. Гусев Е.В., Пронкин А.А. Оценка надежности аппаратуры с учетом характера отказов // Научно-технический вестник Поволжья. – 2025. – № 4. – С. 43-46.

33. Гусева, Т. В. Наилучшие доступные технологии: аспекты менеджмента и оценки соответствия / Т. В. Гусева, Д. О. Скобелев, О. Ю. Чечеватова // Менеджмент в России и за рубежом. – 2017. – № 4. – С. 29–38.

34. Гусева, Т. В. Реализация принципа последовательного улучшения ресурсной и экологической эффективности производства цемента: ситуационное исследование / Т. В. Гусева, Е. Н. Потапова, А. В. Малков, Я. П. Молчанова // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2025. – Т. 27, № 4. – С. 203–214.

35. Дзедик, В. А. Важный вектор развития систем менеджмента - применение информационных технологий и искусственного интеллекта / В. А. Дзедик // Методы менеджмента качества. – 2022. – № 3. – С. 14-19.

36. Дзедик, В. А. ГОСТ Р 58139-2024 как основа модели управления импортозамещением в автомобильной промышленности / В. А. Дзедик, А. А. Джикия, И. В. Усачева, А. В. Демидова // Стандарты и качество. – 2025. – № 4(1054). – С. 26–29.

37. Ершов А.Н. Актуальные проблемы развития предиктивной аналитики в промышленности // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2025. – Т. 23. – №3. – С. 187-194.

38. Зажигалкин, А. В. Алюминиевая Ассоциация: создание системной работы в сфере стандартизации / А. В. Зажигалкин, И. С. Казовская // Стандарты и качество. – 2020. – № 10. – С. 46-50.

39. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям ИТС 11-2019 «Производство алюминия». Бюро НТД, 2019. – 238 с.

40. Искусственный интеллект под контролем алюминщиков. РУСАЛ активно внедряет собственные нейросетевые модели в производство [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://nvo.ng.ru/economics/2025-02-13/100_183213022025.html?print=Y (дата обращения: 30.04.2026).

41. Клентак, А. С. Актуализация проблемы создания методологии обеспечения конкурентоспособности автопроизводителя в условиях развития промсборки / А. С. Клентак // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2024. – Т. 26, № 4. – С. 105–108.

42. Клентак, А. С. Развитие системы менеджмента качества автопроизводителя в условиях создания промсборки / А. С. Клентак // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2024. – № 10. – С. 151–161.

43. Колганов К.А. Микрюков И.В., Марков А.С. Разработка технологии изготовления деталей/компонентов двигателя внутреннего сгорания с применением аддитивных методов производства // Силовое и

энергетическое оборудование. Автономные системы. – 2019. – Т. 2, № 3. – С. 166-184.

44. Колыхалин, В. М. О методе назначения корректирующего технического обслуживания элементам АЭС при реализации методологии RCM / В. М. Колыхалин // Технологии обеспечения жизненного цикла ядерных энергетических установок. – 2024. – № 1(35). – С. 40-50.

45. Костогрызов А.И., Нистратов А.А. О приоритетных направлениях развития системной инженерии // Современные информационные технологии и ИТ-образование. – 2021. – Т. 17, № 2. – С. 223-240. – DOI 10.25559/SITITO.17.202102.223-240.

46. Кривякин, К. С. Алгоритм проведения FMEA-анализа рисков в системе экономической безопасности предприятия / К. С. Кривякин // Сборник материалов Всероссийской юбилейной научно-практической конференции, Воронеж, 29 ноября 2024 года. – Курск: ЗАО «Университетская книга», 2025. – С. 92-97.

47. Крюковский, В. А. Современные технологии производства алюминия : монография / В. А. Крюковский; Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. – Санкт-Петербург : Политех-Пресс, 2020. – 240 с.

48. Кудрявцева, С. С. Анализ трендов инновационной деятельности в машиностроительной отрасли / С. С. Кудрявцева, М. Ф. Сафаргалиев, А. И. Ван // Инновации в менеджменте. – 2024. – № 2(40). – С. 22-29.

49. Курошев И.С. Об организации ресурсоэффективных производственных систем в металлургической отрасли // Компетентность. – 2025. – № 4. – С. 22-27. – DOI 10.24412/1993-8780-2025-4-22-27.

50. Курошев И.С. Разработка организационно-технических решений по стандартизации процесса выбора ресурсоэффективных технологий производства алюминия: автореф. дис. … канд. техн. наук. Казань: КНИТУ, 2026. – 22 с.

51. Леунов, А. А. Практическое использование искусственного интеллекта для повышения эффективности металлургического предприятия. Тренды 2023-2024 / А. А. Леунов // Вестник ГГУ. – 2025. – № 1. – С. 475-487.

52. Лыкасов П.В. Лейзгольд К.А., Бочкарев С.В. Анализ методов прогнозирования отказов оборудования // Инновационные технологии: теория, инструменты, практика. – 2022. – Т. 1. – С. 148-154.

53. Малышева Т.В., Лысенков А.И. Развитие системы управления качеством на основе предиктивной аналитики предупреждения рисков несоответствия продукции // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2024. – Т. 26, № 2(118). – С. 39-47.

54. Малышева Т.В., Чиж Д.В. Нейросетевое прогнозирование перехода предприятий с цифровым администрированием на отечественные операционные системы Linux // Математические методы в технологиях и технике. – 2024. – № 1. – С. 105-108.

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

56. Малышева, Т. В. Разработка алгоритма классификации производств по типу внутризаводского кооперирования основных и вспомогательных процессов методом машинного обучения / Т. В. Малышева // Омский научный вестник. – 2024. – № 1(189). – С. 12-19. – DOI 10.25206/1813-8225-2024-189-12-19.

57. Малышева, Т. В. Ресурсосберегающие производственные системы. Управление информационными потоками / Т. В. Малышева // Компетентность. – 2020. – № 4. – С. 24-27.

58. Мартусевич, Е. А. Совершенствование технологии получения алюминиевых сплавов в миксерах литейного отделения с использованием программно-инструментальной системы моделирования и оптимизации / Е. А. Мартусевич, И. А. Рыбенко // Вестник Южно-Уральского государственного

университета. Серия: Металлургия. – 2022. – Т. 22, № 4. – С. 31-37. – DOI 10.14529/met220404.

59. Машинное обучение и искусственный интеллект как инструмент оптимизации в инженерии / Я. С. Гончарова, Д. В. Цуриков, Д. А. Ставцев, А. В. Терпенев // Перспективы науки. – 2025. – № 1(184). – С. 10-13.

60. Метревели И.С. Обзор современного уровня применения российских цифровых систем управления качеством с использованием возможностей искусственного интеллекта // Петербургский экономический журнал. – 2025. – № 2. – С. 18-31.

61. Мешалкин, В. П. Развитие системы контроля качества полимерных покрытий в микроэлектронике / В. П. Мешалкин, А. И. Шинкевич, Т. В. Малышева, Н. Н. Карзаева // Контроль качества продукции. – 2026. – № 3. – С. 34-41.

62. Михин В.Ф. Современные решения вопросов ТОиР // Металлург. – 2025. – № 4. – С. 115-116.

63. Мусина, Г. Р. Жизненный цикл изделия и система контроля качества / Г. Р. Мусина, М. В. Шинкевич // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. – 2025. – Т. 28, № 3. – С. 53-63. – DOI 10.22213/2413-1172-2025-3-53-63.

64. На ВИЗ-Стали подвели итоги цифровой трансформации ремонтных процессов / ВИЗ-Сталь [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://viz-steel.nlmk.com/ru/media-center/press-releases/na-viz-stali-podveli-itogi-tsifrovoy-transformatsii-remontnykh-protsessov/ (Дата обращения: 01.05.2026).

65. Нугманов, Д. И. Структурно-параметрическая модель цифровой фабрики как основа организации алюминиевого производства / Д. И. Нугманов, Р. К. Нургалиев // Информационно-экономические аспекты стандартизации и технического регулирования. – 2026. – № 2(89). – С. 38-43.

66. Нургалиев, Р. К. Функциональная перестройка структурных подразделений коммерческих организаций как инновационный подход к

управлению производственной системой /, А. А. Гнеденков, Е. Ю. Климанова, О. В. Зеленко // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2024. – Т. 26, № 3(119). – С. 34-38.

67. Одиноков, С. А. Разработка и применение метода управления рисками для прогнозирования качества продукции и индекса лояльности потребителей / С. А. Одиноков [и др.] // Качество. Инновации. Образование. – 2023. – № 3(185). – С. 3–10.

68. Официальный сайт АО «РУСАЛ». Отчеты [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://rusal.ru/sustainability/reports/ (дата обращения: 26.04.2026).

69. Официальный сайт ТК 099 «Алюминий» [Электронный ресурс]: Режим доступа: https://www.aluminas.ru/association/tk099/?ysclid=mopefbemn3417057581 (дата обращения: 26.04.2026).

70. Перспективная программа стандартизации алюминиевой промышленности на 2022–2026 годы [Электронный ресурс] : Режим доступа: https://www.aluminas.ru/upload/documents/Программа%20стандартизации%20 2022-2026.pdf

71. Пичугин, Я. Е. Диагностика и надежность: эволюция технического обслуживания от традиционных методов к RCM / Я. Е. Пичугин, С. М. Чекардовский // Проблемы функционирования систем транспорта : материалы Всероссийской (национальной) научно-практической конференции: сборник статей, Тюмень, 18–19 декабря 2025 года. – Тюмень: Тюменский индустриальный университет, 2026. – С. 84-87.

72. Поляков П.В., Власов А.А., Юшкова О.В., Завадяк А.В., Пузанов И.И., Безруких А.И., Горев А.А. Способ подготовки обожженных анодов для электролиза алюминия. Патент на изобретение RU 2650359 C1, 11.04.2018. Заявка № 2016143288 от 02.11.2016.

73. Попов, Е. В. Процессный каркас внедрения искусственного интеллекта в металлургии / Е. В. Попов // Дискуссия. – 2025. – № 7(140). – С. 51-60. – DOI 10.46320/2077-7639-2025-7-140-51-60.

74. Программные решения Wonderware: новый подход к проектам // Control Engineering Россия. – 2019. – № 5(83). – С. 20-21.

75. Рахманов, М. Л. Показатели ресурсной и энергетической эффективности в информационно-технических справочниках по наилучшим доступным технологиям в области черной металлургии / М. Л. Рахманов, И. С. Курошев, А. С. Курчакова // Стандарты и качество. – 2021. – № 10. – С. 54-57.

76. Репин, С. В. Методология совершенствования системы технической эксплуатации строительных машин : диссертация ... доктора технических наук : 05.05.04 / Репин Сергей Васильевич. – Санкт-Петербург, 2008. – 405 с.

77. Русин, М. Ю. Оптимизация процесса входного контроля: ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина / М. Ю. Русин, Д. В. Харитонов, Д. А. Анашкин, А. И. Амосов, А. Н. Блинов // Методы менеджмента качества. – 2021. – № 5. – С. 36–42.

78. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023685152 Российская Федерация. Программа для оценки уровня внутризаводской кооперации основных и вспомогательных производственных процессов : № 2023684707 : заявл. 21.11.2023 : опубл. 23.11.2023 / Т. В. Малышева, А. И. Шинкевич ; заявитель ФГБОУ ВО «КНИТУ».

79. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022680417 Российская Федерация. Программа для оценки эффективности управления качеством и несоответствующей продукцией в производстве резинометаллических изделий : № 2022669511 : заявл. 24.10.2022 : опубл. 01.11.2022 / А. И. Шинкевич, Т. В. Малышева ; заявитель ФГБОУ ВО «КНИТУ».

80. Сизяков В.М., Поляков П.В., Бажин В.Ю. Современные тенденции и стратегические задачи в области производства алюминия и его сплавов в России // Цветные металлы. – 2022. – № 7. – С. 16-23.

81. Скобелев, К. Д. Формирование доверенного искусственного интеллекта. Социальные аспекты и система организационного управления / К. Д. Скобелев, Т. И. Аникиенко // Стандарты и качество. – 2026. – № 9. – С. 25-29. – DOI 10.35400/0038-9692-2026-9-144-26.

82. Стратегия развития металлургической промышленности Российской Федерации на период до 2030 года» // Распоряжение Правительства РФ № 4260-р от 28 декабря 2022 года.

83. Сызранцев, В. Н. Расчет прочностной надежности изделий на основе методов непараметрической статистики / В. Н. Сызранцев, Я. П. Невелев, С. Л. Голофаст ; В. Н. Сызранцев, Я. П. Невелев, С. Л. Голофаст ; М-во образования и науки Российской Федерации, Тюменский гос. нефтегазовый ун-т. – Новосибирск : Наука, 2008.

84. Тарасов, И. В. Индустрия 4.0: Трансформация производственных фабрик / И. В. Тарасов, Н. А. Попов // Стратегические решения и риск-менеджмент. – 2018. – № 3(106). – С. 38-53.

85. Требования к футеровочным материалам подины алюминиевых электролизеров / Н. В. Немчинова, Е. В. Усатых, И. А. Орлов, И. С. Леонов // Молодежный вестник ИрГТУ. – 2023. – Т. 13, № 1. – С. 245-252.

86. Тулинов, А. Б. Основы эффективной эксплуатациипроизводственного оборудования / А. Б. Тулинов, Ю. Я. Тюменев // Промышленный сервис. – 2019. – № 1(70). – С. 36-39.

87. Удальцова, Н. Л. Анализ современных подходов к интеграции технологий искусственного интеллекта в процессах оптимизации производственных линий тяжелой промышленности / Н. Л. Удальцова // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2025. – № 10. – С. 124-131.

88. Управление сроками службы машин в эксплуатации с помощью информационной автоматизированной системы / С. В. Репин, К. В. Рулис, А. В. Зазыкин [и др.] // Вестник гражданских инженеров. – 2009. – № 1(18). – С. 85-94.

89. Фомин, Н. Ю. Модель оптимизации ресурсоэффективности мезоэкономических производственных систем / Н. Ю. Фомин, Ю. Н. Хакимуллин, М. И. Фарахов // Компетентность. – 2024. – № 3. – С. 32-36.

90. Фомина, О. Н. Международная стандартизация в области черной и цветной металлургии*к 75-летию работпомеждународнойстандартизации / О. Н. Фомина // Металлург. – 2023. – № 4. – С. 4-7.

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

92. Хроль, Е. В. Разработка имитационных моделей с помощью AnyLogic / Е. В. Хроль, А. Г. Уварова, А. В. Кужильный // Современные инновации, системы и технологии. – 2023. – Т. 3, № 4. – С. 119-130.

93. Цифра представила обновленный «Конструктор MES» с готовыми отраслевыми решениями / АРПП «Отечественный софт» [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://arppsoft.ru/news/members/21325/ (дата обращения: 26.05.2026).

94. Цифровизация и программное обеспечение в условиях технологического суверенитета: государственное управление и современное состояние / М. А. Троянская, В. В. Варзин, Г. И. Шепелин [и др.] // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2025. – № 10. – С. 238-244.

95. 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.

96. 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.

97. 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.

98. 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. – №2.

99. Чиж, Д. В. Системный подход к развитию организации технического обслуживания и ремонта / Д. В. Чиж, Т. В. Малышева // Компетентность. – 2026. – № 4. – С. 48-54. – DOI 10.24412/1993-8780-2026-4-48-54.

100. 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.

101. 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.

102. Шадрин Ю.И., Богомолов А.В. Повышение производительности индукционных печей при плавке алюминиевых сплавов в условиях ТОО «Вектор» // Наука и техника Казахстана. – 2023. – № 1. – С. 99-106. – DOI 10.48081/RMQS2439.

103. Шайдуллин, Р. А. повышение надежности оборудования и оптимизация затрат на ТОиР с помощью решения Honeywell Forge APM / Р. А. Шайдуллин, М. Е. Савинова // Автоматизация в промышленности. – 2021. – № 10. – С. 9-20. – DOI 10.25728/avtprom.2021.10.02.

104. Шинкевич, А. И. Методика оценки ключевых показателей эффективности системы менеджмента качества организаций / А. И. Шинкевич, Д. Р. Алимова, Ф. Ф. Галимулина // Информационно-экономические аспекты стандартизации и технического регулирования. – 2025. – № 3(84). – С. 25-31.

105. Шинкевич, М. В. Жизненный цикл изделия и система контроля качества / М. В. Шинкевич, Г. Р. Мусина // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. – 2025. – Т. 28, № 3. – С. 53–63.

106. Шляхин, Д. А. Динамическая осесимметричная задача теории упругости для жестко закрепленной круглой многослойной пластины / Д. А. Шляхин // Промышленное и гражданское строительство. – 2015. – № 6. – С. 5-9.

107. Щеткин А.А., Бевз А.С., Анцыферов С.С., Минаева А.О., Аневский С.И., Останина О.И. Система мониторинга и прогнозирования поведения оборудования на базе IIoT // Автоматизация в промышленности. – 2024. – № 3. – С. 51-55. – DOI 10.25728/avtprom.2024.03.10.

108. Энциклопедия технологий 2.0: Производство металлов / [гл. ред. Д. О. Скобелев]; ФГАУ «НИИ «ЦЭПП». – Москва; Санкт-Петербург: Реноме, 2022. – 378 с.

109. Al Rahbi, Y. Reliability analysis of a rodding anode plant in aluminum industry with multiple units failure and single repairman / Y. Al Rahbi, S. M. Rizwan, B. M. Alkali, A. Cowell, G. Taneja // International Journal of System Assurance Engineering and Management. – 2019. – Vol. 10, No. 1. – P. 97-109. – DOI 10.1007/s13198-019-00771-3.

110. Al Rahbi, Y. Reliability analysis of rodding anode plant in an aluminum industry with multiple repairmen / Y. Al Rahbi, S. M. Rizwan, B. M. Alkali, A. Cowell, G. Taneja // Advances and Applications in Statistics. – 2018. – Vol. 53, No. 5. – P. 569-597.

111. Alfionita, S. Preventive Maintenance Analysis Based on Mean Time Between Failure (MTBF) and Mean Time to Repair (MTTR) / S. Alfionita, F. I. Alifin // Angkasa: Jurnal Ilmiah Bidang Teknologi. – 2023. – Vol. 15, No. 2. – P. 201. – DOI 10.28989/angkasa.v15i2.1833.

112. Analogy of Non-Destructive Tests for the Detection of Defectologies in Aluminium Cylinder Heads / S. S. Valencia, L. C. Galárraga, H. C. Terán, O. Arteaga // Key Engineering Materials. – 2020. – Vol. 841. – P. 355-362. – DOI 10.4028/www.scientific.net/kem.841.355.

113. Annaufal Dzaki Ramadhan. Analisis Reliability Centered Maintenance (RCM) untuk Mereduksi Downtime Mesin Cement Mill di PT XYZ / Annaufal Dzaki Ramadhan, Siti Rahayu, Fibi Eko Putra // Jurnal KaLIBRASI - Karya Lintas Ilmu Bidang Rekayasa Arsitektur, Sipil, Industri. – 2025. – Vol. 8, No. 2. – P. 94-103. – DOI 10.37721/kalibrasi.v8i2.1660.

114. Budiharjo. Penjadwalan perawatan mesin pressure jet incinerator dengan metode RCM berdasar downtime analysis Dan FMEA / Budiharjo // Industry Xplore. – 2024. – Vol. 9, No. 2. – P. 456-464. – DOI 10.36805/teknikindustri.v9i2.7913.

115. Challenging MTBF Expectations in Demanding Applications // World Pumps. – 2023. – Vol. 2023, No. 662. – P. 40-41. – DOI 10.12968/s0262-1762(24)70026-1.

116. Design maintenance of stitching machine maintenance based on the Reliability Centered maintenance (RCM) method / R. I. Buwono, L. A. S. Costa, F. Agusti, I. S. D. Ridzuan // Proceeding of International Conference on Science, Health, And Technology. – 2025. – P. 385-392. – DOI 10.47701/8nd04183.

117. Digital twin key technology on rare earth process / H. Yang, Zh. Kuang, J. Zhu [et al.] // Scientific Reports. – 2022. – Vol. 12, No. 1. – P. 1-15. – DOI 10.1038/s41598-022-19090-y.

118. Erzamaev, M. P. Transport diesels oil system operation efficiency increase / M. P. Erzamaev // Известия Национальной академии наук Республики Казахстан. Серия геологии и технических наук. – 2019. – Vol. 2, No. 434. – P. 79-85. – DOI 10.32014/2019.2518-170X.41.

119. Khoirul Anam, N. E. S. Application of FMEA and RCM in developing a standard Operating Procedure (SOP) for belt conveyor splicing / N. E. S. Khoirul Anam, Rilo Chandra Muhamadin // Journal Universitas Muhammadiyah Gresik Engineering, Social Science, and Health International Conference (UMGESHIC). – 2025. – Vol. 2, No. 2. – DOI 10.30587/umgeshic.v2i2.10777.

120. Kumar U., Parida A., Galar D. Life cycle cost analysis for maintenance planning of potlines in aluminium industry // International Journal of Systems Assurance Engineering and Management. – 2019. – Vol. 10, № 5. – P. 1234–1248. – DOI: 10.1007/s13198-019-00846-1.

121. Larsen T., Olsen H., Johansen F. Predictive Maintenance of Rotating Equipment in Aluminium Casthouses Using SCADA and Vibration Data Fusion // Journal of Intelligent Manufacturing**.** – 2020. – Vol. 31, № 8. – P. 2045–2060. – DOI: 10.1007/s10845-020-01546-5.

122. MaintainX. State of Industrial Maintenance Report 2024 / MaintainX. – San Francisco, 2024. – 21 p.

123. MaintainX. State of Industrial Maintenance Report 2025 / MaintainX. – San Francisco, 2025. – 24 p.

124. Miller R., Chen L., Rodriguez P. A Digital Twin Framework for Rolling Mill Health Prognostics and Optimal Roll Change Scheduling // Procedia

Manufacturing. – 2019. – Vol. 34. – P. 723–730. – DOI: 10.1016/j.promfg.2019.06.220.

125. Nafiuddin, M. R. Penerapan Metode FMEA dan RCM untuk Penjadwalan Preventive Maintenance Mesin CNC Laser Cutting / M. R. Nafiuddin, M. N. A. Mukhtar // Jumantara Jurnal Manajemen dan Teknologi Rekayasa. – 2025. – Vol. 4, No. 2. – P. 81. – DOI 10.28989/jumantara.v4i2.3038.

126. Novelis transforms from preventive to AI predictive maintenance with SymphonyAI / SymphonyAI // Case Studies. – 2025. – 22 January. – URL: https://www.symphonyai.com/resources/case-study/industrial/novelis-ai-predictive-maintenance/ (дата обращения: 06.05.2026).

127. Oh, W. S. Comparative Study on FMEA Application for System Reliability and Maintenance Reliability in RCM Procedure / W. S. Oh, J. S. Koo // Journal of the Korean Society for Railway. – 2021. – Vol. 24, No. 10. – P. 861-875. – DOI 10.7782/jksr.2021.24.10.861.

128. Operational Downtime: How Manufacturers Are Using Predictive Maintenance to Combat Staggering Costs // International Society of Automation. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.automation.com/article/operational-downtime-manufacturers-predictive-maintenance-costs (Дата обращения: 01.05.2026).

129. Optimization of energy consumption in chemical production based on descriptive analytics and neural network modeling / A. I. Shinkevich, T. V. Malysheva, Y. V. Vertakova, V. A. Plotnikov // Mathematics. – 2021. – Vol. 9, No. 4. – P. 1-20. – DOI 10.3390/math9040322.

130. Overview of Monitoring Methods for Metalworking Fluids / A. S. Kim, A. K. Mateshov, N. K. Savchenko, Y. K. Shakirova // Material and Mechanical Engineering Technology. – 2025. – No. 2. – P. 94-101. – DOI 10.52209/2706-977X_2025_2_94.

131. Padamata S.K., Yasinskiy A., Polyakov P. A Review of Secondary Aluminum Production and its Byproducts // Journal of the Minerals Metals & Materials Society. – 2021. – Vol. 73. – No. 9. – Pp. 2603-2614.

132. Pebriyanto, R. Maintenance Analysis on Cap Roller Press Machine with FMEA Method and RCM / R. Pebriyanto // Jurnal Teknologi. – 2025. – Vol. 15, No. 1. – P. 28-32. – DOI 10.35134/jitekin.v15i1.136.

133. Penelitian terhadap Perawatan pada Mesin Press Cap Roller dengan Metode FMEA dan RCM / B. Harma, M. Yetrina, Susriyati, R. Pebriyanto // Jurnal Teknologi. – 2023. – Vol. 13, No. 2. – DOI 10.35134/jitekin.v14i1.116.

134. Perander, L. Light Metals 2021: 50th Anniversary Edition / L. Perander // The Minerals, Metals & Materials Series. – Cham : Springer, 2021. – 1033 p. – DOI 10.1007/978-3-030-65396-5.

135. Reliability Testing of Wind Farm Devices Based on the Mean Time between Failures (MTBF) / S. Duer, M. Woźniak, Ja. Paś [et al.] // Energies. – 2023. – Vol. 16, No. 4. – P. 1659. – DOI 10.3390/en16041659.

136. Roltsch, T. The Robust Classical MTBF Test / T. Roltsch // The ITEA Journal of Test and Evaluation. – 2024. – Vol. 45, No. 2. – DOI 10.61278/itea.45.2.1003.

137. Sánchez, F. Innovation in the Mining Industry: Technological Trends and a Case Study of the Challenges of Disruptive Innovation / F. Sánchez, P. Hartlieb // Mining, Metallurgy & Exploration. – 2020. – Vol. 37, No. 5. – P. 1385-1399. – DOI 10.1007/s42461-020-00262-1.

138. Sensitivity analysis-based optimization: A case study with the MTBF of an aeronautical hydraulic pipeline system / L. Li, Q. Chang, C. Zhou [et al.] // International Journal of Computational Methods. – 2020. – Vol. 17, No. 5. – P. 1940019. – DOI 10.1142/S021987621940019X.

139. Taj, S. M. Reliability analysis of a single machine subsystem of a cable plant with six maintenance categories / S. M. Taj, S. M. Rizwan, B. M. Alkali, D. K. Harrison, G. L. Taneja // International Journal of Applied Engineering Research. – 2017. – Vol. 12, No. 8. – P. 1752-1757.

140. Taj, S. Z. Reliability analysis of a 3-unit subsystem of a cable plant / S. Z. Taj, S. M. Rizwan, B. M. Alkali, D. K. Harrison, G. L. Taneja // Advances and Applications in Statistics. – 2018. – Vol. 52, No. 6. – P. 413-429.

141. Tomsett, A. Light Metals 2020 / A. Tomsett // The Minerals, Metals & Materials Series. – Cham : Springer, 2020. – 1395 p. – ISBN 978-3-030-36407-6.

142. Vokey, G. Manufacturing Execution Systems: An Operations Management Approach / G. Vokey, T. Seubert. – Research Triangle Park : International Society of Automation (ISA), 2020. – 200 p. – ISBN 978-1-64331-064-0.

143. Wan, X. Collaborative Optimization of Cost and Risk for Industrial Equipment Maintenance Projects Based on DRO-CVaR / X. Wan // Mathematical and Computational Applications. – 2026. – Vol. 31. – P. 48. – DOI 10.3390/mca31020048.

144. Yasinskiy A.S., Polyakov P.V., Padamata S.K. Behaviour of aluminium oxide in KF-AlF3-Al2O3 melts and suspensions // Ceramics International. – 2020. – Vol. 46, No. 8. – P. 11539-11548. – DOI 10.1016/j.ceramint.2020.01.180.

145. Zadkov, D.A. Mathematical Modeling of Operational Reliability of Mine Lifting Equipment Based on Censored Data / D.A. Zadkov, N.V. Martyushev, B.V. Malozyomov [et al.] // Mathematics. – 2026. – Vol. 14, no. 4. – P. 716. – DOI 10.3390/math14040716.

146. Zoidii Releases Comprehensive Maintenance Statistics Report Highlighting Global Benchmarks and Trends // Global News [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.globenewswire.com/news-release/2026/01/08/3215717/0/en/Zoidii-Releases-Comprehensive-Maintenance-Statistics-Report-Highlighting-Global-Benchmarks-and-Trends.html (Дата обращения: 01.05.2026).

ПРИЛОЖЕНИЯ

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Доверительные пределы для функции распределения и надежности (метод максимального правдоподобия) на основе распределения Вейбулла с параметрами $\beta = 3{,}047$, $\eta = 3065$ дней

	Время отказа, дней	Ожидаемая функция распределения F(t)	Нижний 95% доверительный предел для F(t)	Верхний 95% доверительный предел для F(t)	Надежность R(t) = 1 – F(t)	Нижний 95% доверительный предел для R(t)	Верхний 95% доверительный предел для R(t)
40	843						
39	899						
38	944						
37	1001						
36	1015	0,034	0,009	0,119	0,966	0,881	0,991
35	1107						
32	1126	0,046	0,015	0,142	0,954	0,858	0,985
34	1156						
33	1213						
31	1325						
26	1360	0,081	0,032	0,195	0,919	0,805	0,968
29	1360	0,081	0,032	0,195	0,919	0,805	0,968
30	1382						
28	1488						
27	1542						
15	1550	0,118	0,054	0,245	0,882	0,755	0,946
25	1655						
24	1705						
22	1711	0,156	0,079	0,293	0,844	0,707	0,921
23	1762						
18	1831	0,188	0,101	0,333	0,812	0,667	0,899
21	1871						
20	1928						
12	1939	0,219	0,123	0,373	0,781	0,627	0,877
19	1978						
9	1987	0,234	0,134	0,392	0,766	0,608	0,866
17	2091						
16	2147						
14	2252						
13	2308						
5	2330	0,352	0,213	0,543	0,648	0,457	0,787
2	2417	0,384	0,234	0,586	0,616	0,414	0,766
11	2421						
10	2470						
8	2580						
7	2634						
6	2691						
4	2820						
3	2871						
1	3029						

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Накопленные вероятности отказов (функции распределения Вейбулла)

Значения процентиля P (% отказов на момент t)

	Время t	-95,0% - НДП	+95,0% - ВДП		Время t	-95,0% - НДП	+95,0% - ВДП
1	677,341	369,704	1240,969	51	2743,517	2215,464	3397,430
2	851,768	514,708	1409,553	52	2769,293	2232,026	3435,885
3	974,627	624,310	1521,518	53	2795,115	2248,421	3474,734
4	1072,939	715,726	1608,433	54	2820,997	2264,665	3513,997
5	1156,430	795,561	1680,990	55	2846,955	2280,770	3553,693
6	1229,849	867,174	1744,205	56	2873,006	2296,750	3593,844
7	1295,914	932,548	1800,864	57	2899,164	2312,619	3634,472
8	1356,339	992,967	1852,686	58	2925,446	2328,389	3675,603
9	1412,286	1049,315	1900,814	59	2951,870	2344,074	3717,261
10	1464,582	1102,234	1946,048	60	2978,453	2359,687	3759,475
11	1513,838	1152,205	1988,974	61	3005,214	2375,240	3802,274
12	1560,522	1199,600	2030,032	62	3032,173	2390,747	3845,691
13	1604,997	1244,713	2069,566	63	3059,349	2406,220	3889,761
14	1647,558	1287,782	2107,846	64	3086,765	2421,673	3934,519
15	1688,440	1329,002	2145,091	65	3114,443	2437,120	3980,008
16	1727,841	1368,535	2181,482	66	3142,407	2452,574	4026,270
17	1765,925	1406,521	2217,166	67	3170,683	2468,049	4073,352
18	1802,831	1443,077	2252,270	68	3199,300	2483,561	4121,306
19	1838,678	1478,307	2286,897	69	3228,285	2499,125	4170,189
20	1873,568	1512,300	2321,139	70	3257,672	2514,757	4220,061
21	1907,592	1545,136	2355,073	71	3287,496	2530,474	4270,990
22	1940,828	1576,888	2388,765	72	3317,793	2546,293	4323,049
23	1973,346	1607,619	2422,274	73	3348,606	2562,235	4376,322
24	2005,206	1637,388	2455,650	74	3379,981	2578,320	4430,897
25	2036,465	1666,251	2488,936	75	3411,966	2594,570	4486,875
26	2067,173	1694,255	2522,172	76	3444,618	2611,009	4544,370
27	2097,373	1721,448	2555,391	77	3477,998	2627,664	4603,507
28	2127,107	1747,873	2588,623	78	3512,176	2644,564	4664,428
29	2156,413	1773,570	2621,896	79	3547,230	2661,743	4727,294
30	2185,324	1798,578	2655,231	80	3583,248	2679,235	4792,288
31	2213,872	1822,932	2688,652	81	3620,331	2697,083	4859,620
32	2242,087	1846,667	2722,177	82	3658,597	2715,333	4929,535
33	2269,996	1869,816	2755,823	83	3698,178	2734,039	5002,313
34	2297,623	1892,408	2789,606	84	3739,233	2753,264	5078,288
35	2324,994	1914,474	2823,541	85	3781,948	2773,080	5157,851
36	2352,130	1936,042	2857,643	86	3826,545	2793,574	5241,475
37	2379,053	1957,138	2891,923	87	3873,292	2814,851	5329,730
38	2405,782	1977,787	2926,394	88	3922,519	2837,036	5423,320
39	2432,336	1998,015	2961,069	89	3974,635	2860,288	5523,122
40	2458,735	2017,844	2995,960	90	4030,161	2884,805	5630,256
41	2484,996	2037,297	3031,077	91	4089,773	2910,845	5746,182
42	2511,135	2056,396	3066,433	92	4154,374	2938,747	5872,852
43	2537,169	2075,160	3102,039	93	4225,211	2968,981	6012,973
44	2563,114	2093,610	3137,908	94	4304,073	3002,218	6170,454
45	2588,986	2111,765	3174,051	95	4393,687	3039,471	6351,263
46	2614,800	2129,642	3210,482	96	4498,510	3082,392	6565,223
47	2640,570	2147,260	3247,213	97	4626,679	3133,970	6830,364
48	2666,313	2164,635	3284,259	98	4795,838	3200,634	7186,097
49	2692,041	2181,784	3321,633	99	5059,576	3301,664	7753,458
50	2717,771	2198,722	3359,352				