

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ПЕТРА ВЕЛИКОГО»

На правах рукописи

Корниенко Александр Владимирович

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ
ОБОРУДОВАНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ
ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ НА ОСНОВЕ КОМПЛЕКСНОГО
ПОКАЗАТЕЛЯ КАЧЕСТВА**

2.5.22. – Управление качеством продукции.
Стандартизация. Организация производства

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
к.э.н., доцент Левенцов В.А.

Санкт-Петербург – 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	4
Глава 1. Теоретические аспекты обеспечения надежности оборудования машиностроительного предприятия.....	15
1.1 Промышленное оборудование как элемент производственной системы машиностроительного предприятия.....	15
1.2 Обеспечение и повышение надежности оборудования в рамках системы технического обслуживания и ремонта	26
1.3 Цифровой двойник оборудования как технология обеспечения и повышения надежности оборудования	37
Выводы.....	46
Глава 2. Обеспечение надежности оборудования в рамках комплексного подхода к оценке качества.....	48
2.1 Основные факторы обеспечения надежности оборудования.....	48
2.2 Комплексный показатель качества обеспечения надежности оборудования	56
2.3 Математическая модель повышения качества обеспечения надежности оборудования на основе комплексного показателя качества	68
Выводы.....	91
Глава 3. Обеспечение надежности оборудования с применением технологии цифровых двойников.....	93
3.1 Процессный подход к обеспечению надежности оборудования с применением технологии цифровых двойников	93
3.2 Модель вероятности безотказной работы оборудования с учетом применения технологии цифровых двойников	104
3.3 Алгоритм совершенствования процесса обеспечения надежности оборудования с применением технологии цифровых двойников.....	112

Выводы.....	125
Глава 4. Практическая реализация разработанных предложений по обеспечению надежности оборудования на предприятии машиностроения.....	127
4.1 Обеспечение надежности оборудования на предприятии машиностроения ООО «Завод «Озон».....	127
4.2 Внедрение процессной модели и алгоритма совершенствования процесса обеспечения надежности оборудования на предприятии машиностроения.....	130
4.3 Оценка эффективности внедрения процессной модели и алгоритма совершенствования процесса обеспечения надежности оборудования на предприятии машиностроения.....	143
Выводы.....	153
Заключение.....	154
Список литературы.....	157
Приложение А.....	191
Приложение Б.....	195

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность избранной темы диссертационного исследования.

Промышленные предприятия сталкиваются с проблемой обеспечения организационных и производственных условий, при которых возможны качественные изменения структуры и механизмов деятельности предприятий в направлении достижения конкурентоспособности и технологической независимости.

Высокий уровень актуальности и значимости протекающей цифровой трансформации промышленности подразумевает повсеместную автоматизацию и совершенствование производственных и технологических процессов, что вызывает масштабные изменения в процессах функционирования организаций и целых отраслей промышленности. Трансформация процессов формируется за счет внедрения передовых цифровых и производственных технологий в бизнес-модели организаций.

Качество производственных процессов напрямую зависит от множества показателей, в том числе уровня технологической оснащенности производства и эксплуатируемого оборудования, которое выступает инструментом реализации производственного процесса. При этом неприемлемый и критический уровень технического состояния оборудования влечет за собой нарушения работы, отклонения и даже выход оборудования из строя, что может вызвать остановку производственного процесса и прервать деятельность как отдельного участка, так и всей производственной системы. Классический подход к обеспечению надежности оборудования и предотвращению критичных отклонений, основанный на сборе и обработке статистических данных, уступает современным методам мониторинга и моделирования объектов и процессов по причине разрозненности данных, высоких требований к организации процессов сбора и обработки данных, дорогостоящих испытаний и влияния человеческого фактора.

Одним из возможных решений такой задачи является применение инструментов модельно-ориентированного системного инжиниринга, промышленного интернета вещей в сочетании с возможностями численного

моделирования объектов и физических процессов, что дает возможность эффективно управлять системой на протяжении всего жизненного цикла и оперативно реагировать на изменения.

Предлагаемый подход сфокусирован на внедрении научно-обоснованных решений на основе технологий цифрового проектирования и моделирования в деятельность отдельных предприятий. Частью упомянутого системного подхода может являться методология, предлагаемая в рамках диссертации, предусматривающая совершенствование процессов, связанных с обеспечением надежности оборудования производства для отечественных предприятий машиностроения, с применением технологии цифровых двойников.

Применение цифровых технологий, в том числе технологии цифровых двойников, повышает уровень качества производственных процессов, а также уменьшает вероятность выхода оборудования из строя и затраты на техническое обслуживание, увеличивает длительность безотказной работы оборудования и срок службы, что обеспечивает и ускоряет достижение технологического лидерства в критически важных отраслях промышленности. Обеспечение и повышение надежности оборудования возможно за счет создания цифрового двойника, проведения цифровых (виртуальных) испытаний работы оборудования и организации системы мониторинга.

Технология цифровых двойников предоставляет возможности для сбора операционных данных из критически важных зон оборудования, моделирования процессов работы оборудования, эффективного планирования технического обслуживания и ремонтных работ, прогнозирования возникновения возможных неисправностей или неточностей работы, что зачастую опережает возможности существующих и используемых на предприятиях инструментов обеспечения надежности.

Область исследований диссертации тесно связана с приоритетными направлениями развития науки, технологий и техники, в частности, с переходом к передовым технологиям проектирования и создания высокотехнологичной продукции, основанном на применении интеллектуальных производственных

решений, роботизированных и высокопроизводительных вычислительных систем, результатов обработки больших объемов данных и других технологий в соответствии с п. 21а Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации [1].

Помимо этого, область исследований соответствует Концепции технологического развития Российской Федерации на период до 2030 года [2]. В частности, в перечне технологических целей развития Российской Федерации указано технологическое обеспечение устойчивого функционирования и развития производственных систем, которое предполагает проведение технологической модернизации производственной системы экономики, в том числе на основе внедрения наилучших доступных технологий для обеспечения ее глобальной конкурентоспособности [2].

Кроме того, актуальность темы исследования подтверждается рядом государственных инициатив и документов стратегического планирования, в рамках которых обозначена государственная поддержка цифровых технологий, включая цифровые двойники, например, в Стратегическом направлении цифровой трансформации обрабатывающих отраслей промышленности [3].

Среди инициатив стратегического развития государства также следует выделить национальный проект по развитию станкостроения, планируемый в рамках реализации и расширения Стратегии развития станкоинструментальной промышленности на период до 2035 года [4–7].

Таким образом, рядом документов стратегического планирования деятельности промышленного сектора на государственном уровне регламентированы направления развития в части формирования импортозамещающего и импортоопережающего уклада, достижения технологического лидерства и импортонезависимости за счет применения цифровых технологий [8]. Разработка принципов и подходов, направленных на повышение надежности оборудования с применением технологии цифровых двойников, обеспечивает высокие показатели результативности процессов предприятия [9], что направлено на достижение высокого уровня

технологического развития при реализации задач государственного значения, а также обеспечение технологического лидерства страны, и является национальной целью развития России.

Обозначенные стратегические направления развития страны и государственная повестка, процессы масштабирования цифровой экономики, внешние геополитические и макроэкономические ограничения [9], недостаточно эффективные подходы к организации процессов обеспечения надежности оборудования подтверждают актуальность настоящего диссертационного исследования.

Степень разработанности темы исследования.

Теоретическую основу исследования составили труды отечественных и зарубежных авторов, работы которых отражают полноту и комплексность научно-технического задела в области организации производства, управления качеством и обеспечения надежности.

Основные труды в области технического сервиса, ТОиР и близких тематик представлены такими специалистами как А.С. Консон, М.О. Якобсон, С.В. Далецкий, А.В. Каракулев, А.Д. Ананьин, Р.Ф. Салихов, В.И. Бобровицкий, А.Б. Липатова, А.В. Новиков и другими. Работы, в которых рассмотрены вопросы квалитметрии, включают, но не ограничиваются, труды Г.Г. Азгальдова, В.М. Маругина, А.И. Субетто, В.И. Кириллова, В.К. Федюкина и других.

Вопросы оценки уровня качества производственных процессов, организации производства и управления качеством рассматривались отечественными учеными, такими как Д.В. Антипов, О.И. Антипова, В.Ю. Анцев, Л.Е. Басовский, В.И. Гиссин, О.П. Глудкин, В.В. Глухов, Д.Ю. Иванов, Ю.С. Клочков, В.Н. Козловский, Е.М. Купряков, В.А. Левенцов, В.В. Окрепилов, Д.И. Панюков, С.А. Соколицын, А.И. Хаймович, И.Н. Хаймович, а также зарубежными авторами, разработки которых широко освещены в научной литературе – Э. Деминг, Д. Джуран, К. Исикава, Н. Кано, Р. Леон, Л. Папич, А. Фейгенбаум, У. Шухарт и другие.

Среди отечественных и зарубежных авторов, ведущих ученых в области

вопросов оценки и обеспечения надежности оборудования, можно выделить Л.Н. Александровскую, И.З. Аронова, И. Базовского, Ю.К. Беляева, В.С. Викторovu, Л.И. Волчкевича, В.С. Воробьева, Б.В. Гнеденко, Б. Диллона, Г.В. Дружинина, Л.В. Ефремова, С.Н. Иванникова, В.Е. Канарчука, А.В. Каштанова, Р.Н. Колегаева, Х.Б. Кордонского, В.И. Корнейчука, П.С. Королева, И.М. Маликова, И.В. Манаенкова, В.С. Малкина, В.А. Острейковского, Л. Папича, С. Покорны, А.М. Половко, А.С. Проникова, Д.Н. Решетова, В.И. Свешникова, Н.А. Северцева, А.С. Степанянца, Е.В. Сугака, В.М. Труханова, И.А. Ушакова, А.В. Чепурина, Г.А. Шаумяна, В.Ю. Шишмарева, Л.Я. Шухгальтера, Р. Барлоу, Ф. Прошана и других. Кроме того, обширные исследования по данной теме проводятся учеными и исследователями, аффилированными в университетах КНР.

Основы математического аппарата для анализа надежности, используемого в FMEA, были разработаны И.А. Ушаковым и его школой, а также некоторыми другими авторами, специализирующимися на математической надежности.

В части концепции цифровых двойников среди зарубежных авторов следует особо выделить основоположника концепции Майкла Гривса, профессора Института цифровых двойников США. В отечественной литературе наибольший вклад внесен профессором СПбПУ А.И. Боровковым.

Целью диссертационного исследования является повышение надежности оборудования за счет применения цифровых двойников и определения критических зон оборудования.

Задачи диссертационного исследования включают:

- Проведение обзора подходов к обеспечению надежности оборудования, систем технического обслуживания и ремонтов, возможностей применения технологии цифровых двойников;
- Разработка комплексного показателя качества обеспечения надежности оборудования;
- Разработка математической модели повышения качества обеспечения надежности оборудования на основе комплексного показателя качества;

- Разработка процессной модели обеспечения надежности оборудования за счет применения технологии цифровых двойников;
- Разработка модели определения вероятности безотказной работы и отказа оборудования с учетом применения технологии цифровых двойников;
- Разработка алгоритма совершенствования процесса обеспечения надежности оборудования с применением технологии цифровых двойников;
- Оценка эффективности применения процессной модели с учетом технико-экономических показателей на предприятии машиностроения, специализирующемся на производстве горноспасательного и противопожарного оборудования.

Реализация поставленных задач позволит оценить возможность применения технологии цифровых двойников как одного из глобальных трендов цифровой трансформации промышленности для повышения надежности оборудования. Тем самым возможно решение научной проблемы, связанной с нехваткой современных методов и подходов к обеспечению надежности оборудования.

В рамках исследования предлагается разработка научного подхода, позволяющего объединить ключевые принципы и ресурсы обеспечения надежности оборудования с возможностями передовых цифровых и производственных технологий. Исследования, направленные на научно-методологическое обоснование применения технологии цифровых двойников для совершенствования методов обеспечения надежности оборудования, проводятся впервые, однако в литературе присутствуют примеры внедрения технологии цифровых двойников в процессы производства.

Объектом диссертационного исследования выступает процесс обеспечения надежности оборудования машиностроительного предприятия.

Предметом диссертационного исследования являются инструменты и методы обеспечения надежности оборудования с применением передовых цифровых и производственных технологий.

Научная новизна диссертационного исследования определяется

следующим:

- Разработана математическая модель повышения качества обеспечения надежности оборудования на основе предложенного комплексного показателя качества, учитывающего эксплуатационные характеристики производственного оборудования, квалификацию персонала, применение технологий мониторинга и ресурсов (п. 18 паспорта специальности);
- Разработана процессная модель обеспечения надежности оборудования, отличающаяся внедрением цифрового двойника оборудования, позволяющего определить критические зоны оборудования и реализовать обоснованное проактивное техническое обслуживание на основе эксплуатационных данных и результатов моделирования (п. 21 паспорта специальности);
- Сформирована модель определения вероятности безотказной работы оборудования и отказа оборудования на основе традиционной модели вероятности безотказной работы и отказа, отличающаяся применением технологии цифровых двойников (п. 21 паспорта специальности).

Теоретическая значимость диссертационного исследования заключается в совершенствовании научно-методологической основы и научно-технического задела для развития принципов и механизмов теории надежности, позволяющих внедрить практические рекомендации, усовершенствованные подходы и методологии эффективного обеспечения и повышения надежности оборудования, организации технического обслуживания на производстве, а также для перехода на современный этап обеспечения производительности и эффективности оборудования за счет применения цифровых инструментов.

Практическая значимость работы направлена на разработку научно-обоснованных прикладных решений и инструментария по обеспечению и повышению надежности оборудования за счет внедрения технологии цифровых двойников, а также применение разработанных подходов на отечественных машиностроительных предприятиях, деятельность которых предполагает использование высокотехнологичного оборудования и требует минимизации

затрачиваемых ресурсов.

Кроме того, результаты диссертационного исследования направлены на совершенствование работы службы технического обслуживания и ремонтов (службы главного механика), увеличение срока службы промышленной инфраструктуры машиностроительных предприятий в условиях ресурсных, санкционных, технико-экономических и технологических ограничений.

Полученные в результате исследования подходы к организации процессов обоснованного и своевременного технического обслуживания и ремонтов, обеспечения надежности оборудования планируются к внедрению и апробации на одном из предприятий машиностроения Московской области. Комплексность поставленных задач определяется возможностью дальнейшего применения разработанного подхода на предприятиях различных отраслей промышленности.

Достижение вышеуказанных задач и разработка предлагаемого научного подхода возможны за счет применения следующих методов, которые составили **методологическую основу исследования:**

- Аналитические методы для выявления объекта, предмета, научной проблемы, формирования терминологической базы;
- Методы системного анализа и сравнения для выявления структуры, взаимосвязей, сопоставления и классификации;
- Квалиметрические методы для оценки качества объекта исследования;
- Методы математического анализа и оптимизации для математического описания объекта исследования;
- Методы теории алгоритмов для формирования научно-прикладного решения;
- Методы экспертных оценок и опроса для сбора информации об объекте исследования;
- Статистические методы для обработки и анализа данных;
- Методы систематизации и визуализации результатов исследования;
- Другие общенаучные и специализированные методы.

Теоретические и научно-методологические положения исследования

включают проанализированные источники и материалы:

1) Нормативно-технический ландшафт тематики исследования, в том числе серию стандартов «Надежность в технике», серию стандартов «Численное моделирование», серию стандартов «Системы менеджмента качества» и другие нормативно-технические документы;

2) Зарубежные и отечественные научные, прикладные и аналитические исследования и публикации, посвященные тематике исследования, в частности:

- Теоретическим вопросам организации производства, системы технического обслуживания и ремонта;

- Концептуальным положениям, проблемам, принципам и методам обеспечения и повышения надежности сложных технических систем и оборудования;

- Концептуальным и математическим вопросам теории управления качеством, квалиметрии, теории вероятности;

- Системному инжинирингу и вопросам внедрения инструментов численного моделирования, цифровых двойников, платформенных решений, инструментов мониторинга и др.;

- Практикоориентированным подходам, бенч-маркам и бизнес-моделям на основе технологий цифровой трансформации, имплементированным в деятельность промышленных предприятий.

Положения, выносимые на защиту, включают:

- Комплексный показатель качества обеспечения надежности оборудования [10–12];

- Математическую модель повышения качества обеспечения надежности оборудования на основе комплексного показателя качества [10–12];

- Процессную модель обеспечения надежности оборудования с применением технологии цифровых двойников [12];

- Модель вероятности безотказной работы и отказа оборудования с применением технологии цифровых двойников [13];

- Алгоритм совершенствования процесса обеспечения надежности оборудования с применением технологии цифровых двойников [9; 14].

Направления исследований в области применения технологии цифровых двойников Корниенко А.В. поддержаны в рамках гранта Стипендиального фонда Владимира Потанина на 2020–2021 гг., по результатам которого реализован проект по формированию универсальной матрицы требований, целевых показателей и ресурсных ограничений для разработки цифрового двойника производственного процесса; в рамках гранта для студентов вузов, расположенных на территории Санкт-Петербурга, в 2023 г., по результатам которого выполнен проект по обеспечению качества производимой продукции на предприятиях машиностроения с применением технологии цифровых двойников.

Основные положения работы соответствуют **паспорту специальности** научных работников 2.5.22. – Управление качеством продукции. Стандартизация. Организация производства и охватывают направления исследования, предусмотренные паспортом:

Пункт 18. Разработка научных, методологических и системотехнических принципов повышения эффективности функционирования и качества организации производственных систем;

Пункт 21. Развитие теоретических основ и практических приложений организационно-технологической надежности производственных процессов. Оценка уровня надежности, адаптивности и устойчивости производства.

Степень достоверности и апробация результатов.

Высокая степень достоверности и обоснованности научных результатов работы обусловлена глубоким анализом авторитетных источников, актуальностью, аргументированностью и непротиворечивостью научным положениям теории надежности и организации производства, использованием надежного методического и методологического инструментария. Все результаты и выводы исследования опубликованы в ведущих рецензируемых печатных изданиях, а также апробированы в ходе научных конференций и форумов, в том числе с международным участием.

Основные результаты работы были представлены и обсуждались на следующих конференциях: Международная научно-практическая конференция «Цифровые двойники: создание, применение, эффективность» в 2022 году (г. Москва), Вторая Национальная научно-практическая конференция с международным участием «Передовые производственные технологии: компьютерные (суперкомпьютерные) технологии и организация наукоемких производств» в 2022 году (г. Санкт-Петербург), International Scientific Conference Global Challenges of Digital Transformation of Markets (GDТМ 2022) в 2022 году (г. Санкт-Петербург), Четвертый международный форум «Передовые цифровые и производственные технологии» в 2022 году (г. Санкт-Петербург), Пятый международный форум «Передовые цифровые и производственные технологии» в 2023 году (г. Санкт-Петербург), III Всероссийская учебно-научная конференция «I&Q project: управление инновациями в условиях цифровой трансформации» в 2024 году (г. Санкт-Петербург), XV Международная научно-практическая конференция «Национальные концепции качества: роль качества в стратегиях социально-экономического развития в новом мире» в 2024 году (г. Санкт-Петербург), Национальная (всероссийская) научно-практическая конференция «Цифровые технологии и управление качеством в технических системах» в 2024 году (г. Москва), X Всероссийская научно-практическая Интернет-конференция «Актуальные проблемы менеджмента качества, стандартизации и метрологии» в 2025 году (г. Белгород), Международная научно-техническая конференция имени Н.Д. Кузнецова «Перспективы развития двигателестроения» в 2025 году (г. Самара) и на других мероприятиях.

ГЛАВА 1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ОБОРУДОВАНИЯ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

1.1 Промышленное оборудование как элемент производственной системы машиностроительного предприятия

Отрасль машиностроения – одна из наиболее наукоемких и технологически сложных отраслей, поскольку производство машин и механизмов требует высокоразвитой технологической, в том числе интеллектуальной [15], инфраструктуры, привлечения высококвалифицированных специалистов, применения передовых производственных технологий и внедрения инноваций. Становится логичным, что производство следует рассматривать как сложноорганизованную функционирующую техническую систему, все элементы которой во взаимосвязи определяют эффективность производственного процесса и полученный результат. При этом результат производственного процесса – продукция машиностроения, которая со временем становится более технологичной, многокомпонентной, мультидисциплинарной, что подтверждается некоторыми отраслевыми исследованиями, например, NASA [16; 17].

Под системой будем понимать множество компонентов или элементов, которые совместно обеспечивают функционирование, которое сами по себе компоненты обеспечить не могут [18]. Определение системы дано специалистами Международного совета по системному инжинирингу (INCOSE), который сформирован в 1990 году в США. Стоит особо отметить свойство совокупности в системе, которое не является суммой или средневзвешенным свойств отдельных компонентов совокупности и которое является интегративным свойством. Как отмечают авторы Косяков А., Свит У., Сеймур С. и Бимер С., элементы системы нельзя разработать независимо, а затем просто соединить, надеясь получить при этом работоспособную систему [19]. Инженер при разработке подобной системы должен координировать проектирование отдельных элементов и следить за тем, чтобы взаимодействия и сопряжения между элементами системы обеспечивали совместимость и взаимную поддержку устройств в составе системы [19; 20]. Из совокупности вышесказанного следует, что система обладает следующими

характеристиками [21]:

1) Ограниченность системы. Для формулирования интегративного свойства нужно доказать, что это свойство не является суммой свойств отдельных компонентов совокупности.

2) Открытость системы. Система должна иметь связи с внешней средой, иначе она недоступна для находящегося во внешней среде субъекта, который формулирует интегративное свойство.

3) Множественность составляющих системы следует из определения интегративного свойства как свойства совокупности объектов.

4) Взаимосвязанность компонентов системы очевидна, так как они связаны хотя бы через интегративное свойство. Связь системы с внешней средой осуществляется через определенные компоненты системы.

Успешность применения данного подхода отмечается множеством примеров, в том числе реализацией проектов NASA [22]. Возможная классификация сложности изделий (технических систем) с долгим жизненным циклом представлена в ГОСТ Р ИСО 10303–239–2008 [23].

Для разработки и сопровождения сложных инновационных объектов, каждое из которых рассматривается как система, применяют системный подход, или системный инжиниринг (в 1960-е годы в русскоязычных изданиях часто применялся термин «системотехника»). Под системным инжинирингом (systems engineering), согласно национальному стандарту ГОСТ Р 57193–2016 «Системная и программная инженерия. Процессы жизненного цикла систем», определяется междисциплинарный подход, управляющий полным техническим и организаторским усилием, требуемым для преобразования ряда потребностей заинтересованных сторон, ожиданий и ограничений в решение и для поддержки этого решения в течение его жизни [24]. INCOSE, в свою очередь, рассматривают системный инжиниринг как междисциплинарный и интеграционный подход, позволяющий успешно реализовывать, использовать и выводить из эксплуатации инженерные системы, используя системные принципы и концепции, а также научные, технологические и управленческие методы [25; 26]. Системному

инжинирингу посвящено множество исследований и работ, что подтверждает эффективность его применения к сложным техническим объектам [25; 27–29].

В прогнозе, опубликованном в 2007 году, в качестве ключевого тренда в системном инжиниринге на 2020 год INCOSE отмечал переход от документоцентричного подхода (the document-centric approach) к модельно-ориентированному системному инжинирингу (Model-Based Systems Engineering, MBSE), который сфокусирован на применении моделирования для удовлетворения требований к системе [25; 30].

Сфокусируемся на производстве как технически сложной системе, включающей множество элементов, взаимосвязанных между собой и формирующих интегрированный механизм. Как отмечает Р.А. Фатхудинов, в качестве элементов и подсистем производственной системы могут выступать как отдельные производственные цехи или участки (макроуровень), так и конкретные единицы оборудования (микроуровень) [31], без которых протекание технологического цикла невозможно. Данный вопрос рассматривается в рамках организации производства, которая определена как комплекс задач и действий, обеспечивающих соблюдение принципов организации производственного процесса и рациональное сочетание средств, инструментов и предметов производства [32]. При этом производство может быть охарактеризовано единичным, серийным и массовым типом производства; метод организации производства делится на поточный, партионный и единичный [33]; специализация может быть технологической, предметной, поддетальной [31; 34]. Также в организации производства важно учитывать пространственную структуру цеха, последовательность выстраивания процессов и проч., что определяет особенности технологического процесса, функционирования оборудования и эффективность результата.

Организация производства требует учета и оптимизации всех производственных ресурсов и имеющихся ограничений производства [35], в том числе: временных ресурсов на выполнение производственного заказа; финансовых ресурсов на обеспечение деятельности производства, сохранение его

интенсивности и ритмичности; технологических ресурсов, которые определяют уровень и качество производимой продукции [36], степень технологичности производства и совершенство используемых в процессе производства инструментов, методов и технологий; требований, обеспечивающих безопасность, экологичность, конфиденциальность производства и проч. [37–39]

Для нахождения оптимального подхода к организации производственного процесса авторами разработана математическая модель балансировки системы требований к производству [40; 41], которая в данной работе подробно не рассматривается. При фокусировке на оптимальности функционирования отдельных станков оценивается, как правило, показатель общей эффективности оборудования (OEE, Overall Equipment Effectiveness) в разрезе параметров простоев, производительности и качества [42]. Подробнее данный показатель рассмотрен в главе 2.

Как отмечает М.С. Абрашкин, сложности и неблагоприятные факторы развития отечественных наукоемких предприятий машиностроения объясняются низкими темпами обновления производственных мощностей, а также отклонением от мировых тенденций новых технологических укладов [43]. При этом наиболее «полное» использование производственных ресурсов предприятия напрямую влияет на конкурентоспособность производства [32; 44].

В связи с этим основные принципы организации производства, помимо выделенных в классической литературе (например, прямоточность, непрерывность и др. [31]), могут быть расширены и содержать автоматичность, гибкость [44; 45], инновационность или технологичность, которые в общем виде означают готовность процессов производства к тенденциям Индустрии 4.0. Подробнее данный аспект совершенствования процессов производства рассмотрен в параграфе 1.3.

Проведенное автором исследование [32] содержит результаты анализа факторов конкурентоспособности промышленных предприятий, к ключевым из них относится технологическая оснащенность производства, в первую очередь оснащенность современным, производительным и надежным оборудованием, что

объясняет значимость вклада оборудования в общую эффективность организации производства.

В качестве одного из направлений развития организации производства также можно выделить принципы бережливого производства (Lean Production), в соответствии с которыми организация производства предполагает, помимо прочего, оптимальное использование оборудования, предотвращение дефектов и прочую деятельность [46]. Пример эффективной организации бережливого производства – всемирно известная Производственная система Toyota (TPS, Toyota Production System), которая в определенный этап развития компании была разработана Тайити Оно и его командой для преодоления трудностей в качестве некой концепции, философии, позволяющей определить, в каких точках возможно улучшение и внедрение кайдзен [47]. Например, TPS реализует один из принципов, называемый Джидока (Jidoka) – это принцип остановки производственного процесса при отклонении от нормы.

Одним из показателей или параметров, описывающих производственный процесс в системе бережливого производства, выступает понятие Мури (Muri), которое означает перегрузку, чрезмерную нагрузку. Для оборудования это значит, что при использовании оборудования в текущий момент времени пытаются произвести больше, чем оно может выдать при нормальной эксплуатации.

Для выявления, визуализации статуса работы или отклонения, последующего предотвращения каких-либо отклонений производственного процесса в системе TPS применяют инструмент Андон, а также инструмент Покаёкэ (Poka-yoke) – это низкочувствительное устройство для остановки производственного процесса при возникновении отклонения, чтобы предотвратить поломку оборудования или возникновение дефекта.

Приведенные выше примеры – лишь малая часть инструментов, направленных на устранение и предотвращение остановки производственного процесса или возникновение отклонения. В случае если поломка уже произошла и необходимо восстановить оборудование, или же необходимы процедуры, направленные на поддержание оборудования в работоспособном состоянии,

выполняется техническое обслуживание и ремонт оборудования. Целью системы технического обслуживания и ремонта (ТОиР) является проведение налаженного процесса, состоящего из управленческих и технологических мероприятий, для реализации обслуживания и ремонта производственных активов организации, а также управления ими.

Общепринятые подходы к организации технического обслуживания и ремонта могут быть классифицированы, как представлено на рисунке 1.1, в разрезе общих характеристик вида (класса) ТОиР, требуемых ресурсов, а также типа оборудования, для которого применим данный подход. Отдельно можно выделить вид технического обслуживания, сфокусированного на обеспечении надежности (подробнее в параграфе 1.2). Преимущества той или иной стратегии технического обслуживания представлены на рисунке 1.2.

Основные труды в области технического сервиса, ТОиР и близких тематик представлены такими специалистами как А.С. Консон [48], М.О. Якобсон [49], С.В. Далецкий [50], А.В. Каракулев [51], А.Д. Ананьин [52], Р.Ф. Салихов [53], В.И. Бобровицкий [54], А.Б. Липатова [55], А.В. Новиков [56] и другими [57].

Техническое обслуживание и ремонты				
Вид ТОиР	Реактивное (аварийное)	Плано-предупредительное	Обслуживание по состоянию	Проактивное обслуживание
Описание	Ремонт после выхода оборудования из строя или замена при полной выработке ресурса, отсутствие плановых профилактических мероприятий	Восстановление работоспособности путем технического ухода, замены и ремонта изношенных деталей в соответствии с планом	Сбор данных о состоянии оборудования и определение необходимости проведения обслуживания по фактическому состоянию	Выявление, устранение причин и предотвращение отказов, превентивные меры обслуживания
Требуемые ресурсы	Инструменты ручного труда Персонал с базовой квалификацией Отсутствие технологий	Ручные и механизированные инструменты Квалифицированный персонал Графики и регламенты	Ручные и механизированные инструменты, инструменты диагностики Высококвалифицированный персонал Системы мониторинга состояния, анализ данных	Ручные и механизированные инструменты, инструменты диагностики Высококвалифицированный персонал Системы мониторинга состояния, анализ данных Цифровые инструменты
Тип оборудования	Недорогостоящее, легко заменяемое оборудование, низкая критичность	Критически важное, сложное оборудование, высокая нагрузка, стандартные режимы обслуживания	Сложное оборудование, работающее при высоких нагрузках или в сложной среде, имеющее возможность сбора и анализа данных	Критически важное, сложное, дорогостоящее оборудование, дорогостоящий ремонт, высокая нагрузка, влияние внешних факторов

Рисунок 1.1 – Классификация видов технического обслуживания и ремонтов

Источник: составлено автором

Существуют два основных вида ремонта: текущий, предназначенный для поддержания работоспособности исправного оборудования, и капитальный, необходимый для восстановления неисправного оборудования.

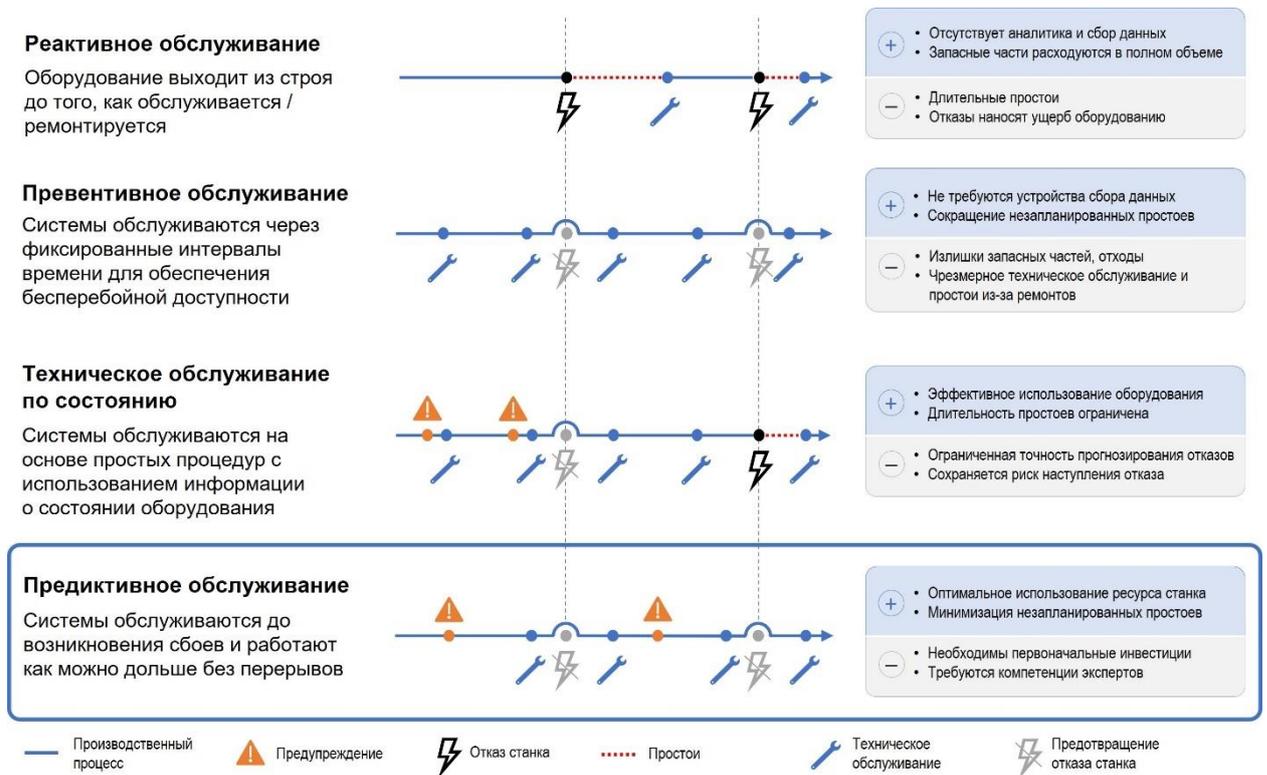


Рисунок 1.2 – Стратегии технического обслуживания в контексте промышленности

Источник: составлено автором по материалам Deloitte [58; 59]

Важно отметить, что для эффективной реализации ТОиР критичность любой поломки (отказа), также как и критичность дефекта, должна быть дифференцирована в соответствии со значимостью. Например, Исикава Кароу выделил следующую классификацию критичности дефектов [60]:

- критический дефект — показатель качества, который связан с жизнью и безопасностью;
- значительный дефект — показатель качества, который серьезно влияет на функциональные свойства изделия;
- малозначительный дефект — показатель качества, который не влияет на основные функциональные свойства изделия и может не учитываться потребителями.

Данная классификация может быть применима и к оборудованию. При этом в соответствии с ГОСТ 18322–2016 «Система технического обслуживания и ремонта техники. Термины и определения» выделяется исправное,

работоспособное, неисправное, неработоспособное и предельное состояние оборудования [61]. Аналогично в других рассмотренных стандартах приводится обзор состояния оборудования без привязки к критичности отказа, в то время как данная классификация должна напрямую определять перечень мер, необходимых для устранения отказа и его последствий. В данной области исследований интересным является анализ перехода предельных состояний оборудования от компонентов системы к системе в целом, представленный в работе Е.В. Федосеева [62].

Таким образом, важным принципом обеспечения качества и надежности функционирования системы является придание показателям качества относительной значимости. Подходы к количественной оценке того или иного показателя, в том числе с учетом приоритетности, являются объектом квалиметрии – науки, которую А.Н. Чекмарев определяет как направленную на изучение проблематики и методологии количественного и качественного оценивания объектов различной природы [63]. Согласно определению Г.Г. Азгальдова, основоположника рассматриваемой научной дисциплины, квалиметрия – систематизированная технология количественного измерения качества [64].

В зависимости от числа исследуемых свойств выделяют единичный, комплексный, интегральный и обобщенный показатели качества, в зависимости от формы представления – абсолютный, относительный, удельный и базовый показатель [63], в зависимости от роли показателя качества при оценке выделяют классификационный и оценочный показатель качества. Конечно, применительно к оборудованию в процессе оценки качества целесообразно использование оценочных показателей. Среди них по однородности свойств наиболее применимыми к задачам исследования являются функциональные показатели, которые определяют функциональную пригодность рассматриваемого объекта (в нашем случае – оборудования) удовлетворять заданные потребности, то есть находиться в работоспособном состоянии с минимальной вероятностью отказа, что подробнее рассмотрено в параграфе 1.2. Работы, в которых рассмотрены вопросы квалиметрии, включают, но не ограничиваются, труды Г.Г. Азгальдова [65; 66],

В.М. Маругина [66; 67], А.И. Субетто [68; 69], В.И. Кириллова [70], В.К. Федюкина [71] и других.

Кроме того, вопросы оценки уровня качества производственных процессов, организации производства и управления качеством рассматривались отечественными учеными, такими как Д.В. Антипов [72–78], О.И. Антипова [79–83], В.Ю. Анцев [84–86], Л.Е. Басовский [87; 88], В.И. Гиссин [89], О.П. Глудкин [90], В.В. Глухов [46; 91], Д.Ю. Иванов [92; 93], Ю.С. Клочков [94; 95], В.Н. Козловский [81; 96; 97], Е.М. Купряков [98], В.А. Левенцов [46; 99; 100], В.В. Окрепилов [101; 102], Д.И. Панюков [81; 103; 104], С.А. Соколицын [105], А.И. Хаймович [106–108], И.Н. Хаймович [79; 106; 109], а также зарубежными авторами, разработки которых широко освещены в научной литературе – Э. Деминг [110], Д. Джуран [111], К. Исикава [60], Н. Кано [112], Р. Леон [113], Л. Папич [21; 95; 114–117], А. Фейгенбаум [118], У. Шухарт [119] и другие.

Основным нормативно-техническим и научно-методологическим документом в области управления качеством является ГОСТ Р ИСО 9000–2015 [120]. Согласно документу, в качестве объекта управления качеством может выступать как продукция (например, система оборудования), так и процесс (например, производственный) или система. Автором в рамках исследования проведен анализ подходов к концепции управления качеством и сформирована система показателей, определяющих уровень качества производственного процесса [10; 11].

Неправильное применение оборудования, ненормальные условия эксплуатации, недостаточные периодические проверки, недостаточный уровень качества применяемого сырья, материалов и технологий могут привести к возникновению дефектов или отказу. Параметры и качество процесса могут колебаться и выходить за пределы допустимых значений, в связи с чем необходимо регулярно осуществлять контроль отслеживаемых критически важных параметров. Накопление дефектов и усталости материалов или узлов может объясняться термином «технологическая наследственность» [121]. Меры по предотвращению возникновения отклонений, как правило, включают устранение

первопричины [122].

Потенциальное возникновение дефектов или отказов для систем, особенно систем длительной эксплуатации, должно сопровождаться соблюдением руководств по эксплуатации и инструкций по проведению периодических проверок. При этом устранение первопричин можно отнести к реактивным методам (по аналогии с реактивным техническим обслуживанием), которые предполагают работу с уже произошедшими отказами или возникшими отклонениями. В то же время более эффективным считается проактивный подход [123], в соответствии с которым реализуется стратегия, направленная на предотвращение поломок и сбоев оборудования путем проведения регулярного обслуживания, мониторинга состояния и прогнозирования потенциальных проблем до того, как они приведут к дорогостоящим простоям и авариям, что потенциально может критически сказаться на выполнении производственного плана. Аналогичная цель сформулирована в рамках концепции всеобщего обслуживания оборудования (TPM, Total Productive Maintenance), которая предполагает вовлечение всего персонала предприятия в процесс обслуживания станков [124].

Дополнительными значимыми факторами с точки зрения организационно-технического и технологического обеспечения процесса производства являются:

- Повышение значимости тенденций, связанных с роботизацией, увеличением автономности производственных линий и заводов в целом, снижением количества персонала и взаимозависимым повышением количества оборудования и роботизированных систем [13; 125];
- Высокая стоимость простоев на производстве – согласно статистике, средняя стоимость простоя из-за поломки оборудования на отечественном предприятии составляет около 5 млн руб. в день, при этом около 50% всей длительности простоев составляет доля внеплановых простоев из-за аварий и ремонтов [126; 127], а сумма затрат на техническое обслуживание оборудования может кратно, до 8 раз, превышать стоимость самого оборудования [128], в частности, затраты на техническое обслуживание сложных технических машин

составляют около 50% всех затрат по всему жизненному циклу [129], равно как и затраты на обеспечение надежности в течение жизненного цикла растут и могут превысить стоимость станка [130];

- Переход на более высокий уровень технологической оснащенности в целях поддержания конкурентоспособности и устойчивости, нивелирование сложностей, связанных с импортозамещением оборудования [131], потребность в решении взаимосвязанного комплекса задач планирования и организации надежного и эффективного производства, обеспечения научно-технического прогресса [132];
- Работоспособность оборудования определяет эффективность и производительность других элементов, факторов и процессов производства, включая работу персонала с оборудованием в процессе производства, требуемые навыки и компетенции персонала, ресурсы и технологии, применяемые в процессе производства изделий и работы оборудования, необходимость формирования эффективной организационной, производственной и экономической системы предприятия и др.

Важно учитывать и существующие геополитические факторы и риски, ориентацию государственной повестки на достижение технологического лидерства в соответствии со значимыми стратегическими документами [2; 133; 134], высокий уровень зависимости от иностранных поставщиков систем и комплектующих, ограниченность доступа к зарубежным решениям, финансовые и временные ограничения.

Обозначенное выше необходимо учитывать при организации производства, оценке качества производственных процессов, отслеживании эффективности элементов производственной системы, в первую очередь – оборудования. Достижение высокого качества процесса производства напрямую зависит от эффективного управления оборудованием, которое требует постоянного анализа и регулирования его точности (соответствия результатов установленным требованиям) и стабильности (способности сохранять точность показателей качества на протяжении всего технологического процесса) [114].

Таким образом, в качестве ключевого ресурса производственного процесса машиностроительного предприятия, направленного на повышение его конкурентоспособности, выступает промышленное оборудование, и процессы обеспечения бесперебойности и надежности его работы – одно из главных задач и условий для достижения технологического лидерства. В общем виде взаимосвязь отдельных рассматриваемых в исследовании элементов представлена на рисунке 1.3.

В связи с этим объектом исследования выступает промышленное оборудование в механосборочном цехе машиностроительного (дискретного) предприятия с фокусировкой на оценке и обеспечении надежности станков.



Рисунок 1.3 – Взаимосвязь между рассматриваемыми в исследовании элементами

Источник: составлено автором

1.2 Обеспечение и повышение надежности оборудования в рамках системы технического обслуживания и ремонта

Сфокусируемся на вопросах обеспечения и повышения надежности оборудования. Данный процесс, как было кратко изложено выше, является

особенно важным по причине того, что систему промышленного оборудования необходимо содержать в работоспособном состоянии для обеспечения конкурентоспособности предприятия. Степень износа оборудования напрямую определяет состояние всего оборудования как системы в целом, так и отдельных ее элементов. Это связано с тем, что оборудование в первую очередь является системой узлов, и каждый элемент системы имеет характеристику износа. При этом надежность нескольких станков может определять надежность производственной системы по аналогии с понятием балансовой надежности [135].

Отсутствие контроля или недостаточный уровень отслеживания состояния промышленного оборудования приводит к возникновению «тонких» эффектов, которые не всегда возможно спрогнозировать заранее, что требует тщательного анализа и определения методологического инструментария, направленного на оценку, обеспечение, повышение, прогнозирование уровня надежности, формирование системы технического обслуживания и ремонтов, мониторинга за состоянием промышленного парка, достаточных для поддержания работоспособности и отказобезопасности.

В ходе анализа научной литературы рассмотрены труды отечественных и зарубежных авторов, ведущих ученых в области вопросов оценки и обеспечения надежности оборудования [8], к числу которых можно отнести Л.Н. Александровскую [122; 136], И.З. Аронова [95; 117; 137], И. Базовского [138], Ю.К. Беляева [139–141], В.С. Викторову [142], В.С. Воробьева [143], Б.В. Гнеденко [140; 141], Б. Диллона [144], Г.В. Дружинина [145], Л.В. Ефремова [146; 147], С.Н. Иванникова [148], В.Е. Канарчука [149], А.В. Каштанова [150], Р.Н. Колегаева [151], Х.Б. Кордонского [152], В.И. Корнейчука [153], П.С. Королева [154], И.М. Маликова [155], И.В. Манаенкова [148], В.С. Малкина [156], В.А. Острейковского [157], Л. Папича [21; 95; 114–117; 158; 159], С. Покорны [160], А.М. Половко [155; 161], А.С. Проникова [162; 163], Д.Н. Решетова [164], В.И. Свешникова [165], Н.А. Северцева [166–168], А.С. Степанянца [142], Е.В. Сугака [169; 170; 170; 171], В.М. Труханова [172], И.А. Ушакова [141; 173; 174], А.В. Чепурина [175],

В.Ю. Шишмарева [176; 177], Л.Я. Шухгальтера [178], Р. Барлоу [179], Ф. Прошана [179] и других [180–187].

Кроме того, обширные исследования по данной теме проводятся учеными и исследователями, аффилированными в университетах КНР [188–194].

Важным элементом нормативно-технического ландшафта рассматриваемой области является серия стандартов «Надежность в технике», содержащая основные положения математического, методологического и концептуального подхода к оценке уровня надежности технических систем. Данная серия стандартов, а также связанные документы, например из серии стандартов «Контроль состояния и диагностика машин», включают:

- ГОСТ 13377–75 «Надежность в технике. Термины и определения» [195];
- ГОСТ Р 27.102–2021 «Надежность в технике. Надежность объекта. Термины и определения» [196] (принят взамен ГОСТ 27.002–2015 «Надежность в технике. Термины и определения» [197]);
- ГОСТ Р 27.004–2009 «Надежность в технике. Модели отказов» [198];
- ГОСТ 27.301–95 «Надежность в технике. Расчет надежности. Основные положения» [199];
- ГОСТ Р 27.302–2009 «Надежность в технике. Анализ дерева неисправностей» [200];
- ГОСТ 27.310–95 «Надежность в технике. Анализ видов, последствий и критичности отказов. Основные положения» [201];
- ГОСТ Р 27.403–2009 «Надежность в технике. Планы испытаний для контроля вероятности безотказной работы» [202];
- ГОСТ Р ИСО 13372–2013 «Контроль состояния и диагностика машин. Термины и определения» [203];
- ГОСТ Р ИСО 13379–1–2015 «Контроль состояния и диагностика машин. Методы интерпретации данных и диагностирования. Часть 1. Общее руководство» [204];

- ГОСТ Р ИСО 17359–2015 «Контроль состояния и диагностика машин. Общее руководство» [205];
- ГОСТ Р 51901.16–2017 «Менеджмент риска. Повышение надежности. Статистические критерии и методы оценки» [206];
- ГОСТ Р МЭК 60300–3–3–2021 «Надежность в технике. Менеджмент надежности. Стоимость жизненного цикла» [207] и др.

Согласно проведенному автором обзору более чем 60 документов [8], понятия и определения надежности, закрепленные в серии стандартов «Надежность в технике», являются одними из наиболее часто используемых в отечественной научной литературе, что свидетельствует об устоявшейся терминологической базе в области надежности и зрелости изложенных в стандарте положений. Ряд источников приводит определение термина из ГОСТ с незначительными изменениями или сокращениями, что существенно не влияет на определяемый объект [8].

К важным аспектам, выявленным в ходе анализа терминологии, следует отнести фактор продолжительности и непрерывности надежности, изменчивости и динамичности, потребность соблюдения режимов работы, потребность выполнения назначенных функций, соответствие стандартам, эталонам и др. Оценка надежности также предполагает проведение количественной оценки запасов и неопределенностей (Quantification of Margins and Uncertainty, QMU [208]), оценку уровня соответствия допускам и учет производственных ограничений, а также оценку приспособленности оборудования к диагностике (контролепригодности).

Некоторые авторы особо отмечают значимость деления надежности на количественные и неколичественные свойства и их сочетание, а также двугранность этого понятия [209]. Основательный обзор теории надежности с хронологическими рамками и анализом вклада отдельных авторов в концепцию приведен в материалах «Основы теории надежности» авторов С.П. Тимошенкова, Б.М. Симонова, В.Н. Горошко [8; 210].

Надежность в соответствии с ГОСТ Р 27.102–2021 определяется как

свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, хранения и транспортирования [197; 211]. Важно повторить – в установленных пределах, поскольку для каждого измеряемого показателя надежности имеется допустимое и предельное установленное значение параметра, соответствующее фактору исправности и неисправности механизма [8; 212]. В соответствии с ГОСТ Р 27.102–2021 надежность является комплексным показателем, который в зависимости от назначения объекта и условий его применения может включать в себя безотказность, ремонтпригодность, восстанавливаемость, долговечность, сохраняемость, готовность или определенные сочетания этих свойств (как правило, их относят к единичным показателям надежности) [197; 211]. Наиболее часто используемым комплексным показателем надежности является коэффициент готовности [213].

Более упрощенное определение надежности приведено в ГОСТ Р ИСО 9000–2015, где надежность определяется как требование, способность функционировать как и когда необходимо [120]. При этом важно отметить, что в данной работе не рассматривается надежность, закладываемая на этапе проектирования машины.

Отказ, в свою очередь, является событием, которое заключается в нарушении работоспособного состояния объекта [21]. Отказ может носить производственный характер, когда отказ вызван несовершенством и нарушением требований к производственным процессам, включая ремонт и обслуживание; либо эксплуатационный характер, когда отказ вызван нарушением условий эксплуатации, возникновением микротрещин, устареванием [196]. Данная классификация схожа с типами надежности в зависимости от характера возникновения отказа, в рамках которой постепенный отказ предполагает накопление износа и усталости, деградацию материалов, механизмов и узлов, в то время как внезапные отказы являются сложно прогнозируемыми и предполагают скачкообразное изменение состояния станка вследствие нарушения работы какого-

либо элемента или подсистемы [214]. Частным случаем внезапных отказов могут быть так называемые «черные лебеди» – события, непредсказуемые по своему характеру, кардинально меняющие ход последующих событий [114; 215]. Другая классификация причин отказов приведена в работе [216]. Количественные характеристики безотказности, отражающие способность изделия сохранять работоспособность, основываются на различных законах распределения времени до отказа – по экспоненциальному закону, нормальному закону, закону Рэлея, Вейбулла, гамма. Подробнее основные параметры безотказности и количественно измеримые свойства надежности представлены в главе 2.

Наиболее эффективным методом в области определения причин и последствий отклонений работы станков является анализ видов, последствий и критичности отказов (FMECA, Failure Modes, Effects and Criticality Analysis) [158; 217–219]. Технология FMECA оценивает возможные отказы системы или процесса и их последствия, определяет, какие действия можно было бы предпринять, чтобы исключить или минимизировать возникновение отказов [116]. Этот метод применяется начиная с начальных этапов планирования проектирования продукта до конца его жизненного цикла. FMECA начинают с определения вида отказа на самом низком уровне (например, компонента), затем переходят к верхним уровням, чтобы определить эффекты на самом высоком уровне (например, для конечного потребителя).

Процедура FMECA позволяет определить слабые места конструкции, обосновать предлагаемые процедуры диагностики, технического обслуживания и правила ремонта, а также возможные последствия повреждений, вызванных отказом деталей. В последнее время для повышения эффективности процессов проектирования, производства и технического обслуживания все больше отраслей промышленности используют процедуру FMECA, а также некоторые ее разновидности, например, применительно к процессам (PFMEA), конструкции (DFMEA) и другим компонентам системы [130; 220; 221].

Ряд авторов отмечает, что FMECA состоит из двух отдельных анализов: анализа видов и последствий отказа (FMEA, Failure Mode and Effects Analysis) и

анализа критичности (CA, Criticality Analysis) [21; 25; 222–225]. Тогда FMEA можно определить как систематический процесс выявления потенциальных отказов системы до того, как отказ произойдет, с намерением устранить или минимизировать риск, связанный с возникновением отказа [224]. FMEA анализирует различные виды отказов и их влияние на систему, в то время как CA классифицирует или расставляет приоритеты по уровню их важности на основе частоты отказов и серьезности последствий отказа [225].

В разрезе уровня тяжести последствий наступления отказа выделяют 4 категории – катастрофический отказ; существенный отказ, приводящий к экономическим потерям; промежуточный (маргинальный) отказ, приводящий к экономическим потерям; несущественный (незначительный) отказ, который не относится к вышеперечисленным категориям [122; 226; 227]. Кроме того, интересным является исследование авторов А.А. Хорешка и В.А. Хажиева, в котором приведено математическое описание уровня надежности производственного цикла в зависимости от значения риска сбоя производственного цикла и тяжести последствий [228].

Как отмечает И. З. Аронов, зависимость между системами может быть вызвана функциональными причинами, имеющими детерминистическую природу, или возникновением случайных событий, имеющих стохастический характер и являющихся следствием человеческих ошибок при проектировании, производстве и эксплуатации объекта, или следствием неблагоприятных воздействий окружающей среды [122; 229]. Большую группу зависимостей также составляют ошибки, совершенные при производстве, сборке и монтаже, к которым можно отнести дефекты производства и монтажа, которые невозможно выявить имеющимися средствами в период испытаний.

Основы математического аппарата для анализа надежности, используемого в FMEA, были разработаны И.А. Ушаковым и его школой, а также некоторыми другими авторами, специализирующимися на математической надежности. Среди авторов в области FMEA можно выделить, в частности, И.З. Аронова [117; 229], Л. Папича [21; 95; 114–117; 158; 159; 215; 230], М.А. Анляйтнера [223] и

других [104; 231].

Суммируя вышесказанное, следует отметить, что задача процедуры FMECA состоит в том, чтобы сделать возможным своевременное обнаружение потенциальных отказов; предотвращение или снижение степени критичности; предотвращение затрат из-за возможного выхода системы из строя. FMECA позволяет снизить потери из-за низкого качества, предотвращая отказы, дефекты и несоответствия еще на этапе проектирования [117]. FMECA является частью современной тенденции перехода от статистических методов оценки надежности к практическим инженерным подходам, направленным на ее обеспечение.

Однако данный метод на этапе эксплуатации позволяет судить о надежности системы на основании уже накопленной информации об отказах, другими словами, FMECA следует применять совместно с превентивными инструментами, позволяющими прогнозировать наступление отказа.

Кроме FMEA и FMECA, на предприятиях используются методы анализа первопричин (RCA, Root Cause Analysis), анализа дерева неисправностей (FTA, Fault Tree Analysis), анализа дерева событий (ETA, Event Tree Analysis), анализа структурной схемы надежности, инструменты статистического анализа и контроля процессов (SPC, Statistical Process Control) и другие связанные методы [170], например, использование принципа Вильфреда Парето [232], «5 Почему?», диаграммы Исикавы [230] и прочего. Для поддержания уровня надежности применяется надежностьная схема (также называют блок-схемой надежности, структурной схемой надежности, RBD, Reliability Block Diagram) [233; 234] или реализуется система технического обслуживания, ориентированная на обеспечение надежности (RCM, Reliability Centered Maintenance) [235–238]. Данный подход позволяет минимизировать простои оборудования, вызванные техническим обслуживанием некритичных единиц оборудования, и поддерживать уровень надежности стратегически важных групп оборудования. Этот подход учитывает не только аспекты безопасности и эксплуатационные характеристики отдельных станков, но и экономические последствия потенциальных отказов, а также механизмы, провоцирующие эти отказы.

Меры повышения или, по крайней мере, обеспечения надежности оборудования могут включать внесение конструктивных изменений, технологические мероприятия, направленные на совершенствование технологии и организационных процессов, а также эксплуатационные мероприятия, включающие проведение технического обслуживания и соблюдение регламентов работы и режимов станка [214]. Проведенный анализ свидетельствует, что подходы к обеспечению надежности могут носить реактивный или проактивный характер [123].

Среди выявленных автором сложностей в части обеспечения надежности оборудования можно отметить:

- Нарботка оборудования, его ресурс и срок службы могут быть определены по результатам эксплуатации и впоследствии наступления отказа или предельного состояния [196], что также влияет на остаточную стоимость станка;
- В случае если отказ не наступил, возможно лишь прогнозировать значение наработки с определенным уровнем достоверности, поскольку статистические методы малоприменимы для оценки уровня надежности эксплуатируемого оборудования, для которого отсутствует накопленная статистика или если оборудование введено впервые;
- Источники сведений об уровне надежности включают, как правило, экспериментальные расчеты по результатам проектирования и эксплуатационных испытаний, статистические данные об отказах, характере и причинах их возникновения, наработках до предельного состояния и других показателях эксплуатационной надёжности, а также статистические данные об аналогах [8; 159], что не всегда является достоверным и достаточным источником данных;
- Отказ представляет собой стохастический процесс, происходящий в произвольный момент времени, вероятность отказа определяется теорией вероятностей, математической статистикой и математическим анализом [239];
- Текущий уровень надежности зависит от множества факторов, часть из которых невозможно проконтролировать, другая часть задана с некоторой степенью неопределенности, при этом полная эксплуатационная надежность

невозможна [240] (в качестве примера в материалах [241] приведена возможная взаимосвязь между благоприятными (или неблагоприятными) факторами и уровнем надежности системы, где факторы могут иметь положительное и отрицательное влияние, и в общем виде включают конструктивно-схемные, производственно-технологические факторы, математическое обеспечение, качество обслуживания и условия работы станка);

- Отказ может означать недостаточный уровень надежности оборудования, заложенный на этапе проектирования системы [8];
- Оснащенность производства и достаточность уровня надежности оборудования напрямую влияет на проблему обеспечения качества процесса [21; 95];
- Практика деятельности промышленных предприятий свидетельствует о недостаточно эффективном мониторинге или об его отсутствии, что может быть вызвано отсутствием службы главного механика, отсутствием или разрозненностью статистических данных, длительностью их сбора, дороговизной проведения испытаний, наличием ошибок или недостоверности [13];
- Реализация реактивного технического обслуживания или обслуживания по состоянию, а также некорректный учет факторов износа оборудования или замены деталей в последующих процессах анализа надежности снижает эффективность проводимых мероприятий по содержанию оборудования.

В связи с этим наблюдается недостаточная эффективность и достоверность используемых на практике методов оценки уровня надежности работы оборудования. Проблематика изучаемого вопроса осложняется тем, что среди современных исследований в области обеспечения надежности, методов ее оценки и повышения медленно появляются новые научно-методологические подходы, в малой степени освещаются вопросы внедрения информационных технологий, передовых производственных технологий и технологий цифрового проектирования и моделирования в процессы эксплуатации оборудования [242; 243]. Часть исследований посвящена проведению цифровых испытаний объектов на надежность преимущественно на этапах проектирования [244], при этом анализ

надежности эксплуатируемого оборудования, как было отмечено ранее, преимущественно опирается на статистический аппарат.

Представим базовый подход к обеспечению надежности, сформированный по результатам анализа с применением процессной модели (см. рисунок 1.4). Как отражено на модели, базовый подход не содержит превентивных и проактивных мер, направленных на мониторинг и корректировку текущего уровня надежности, что является критически важным в динамичном процессе производства.

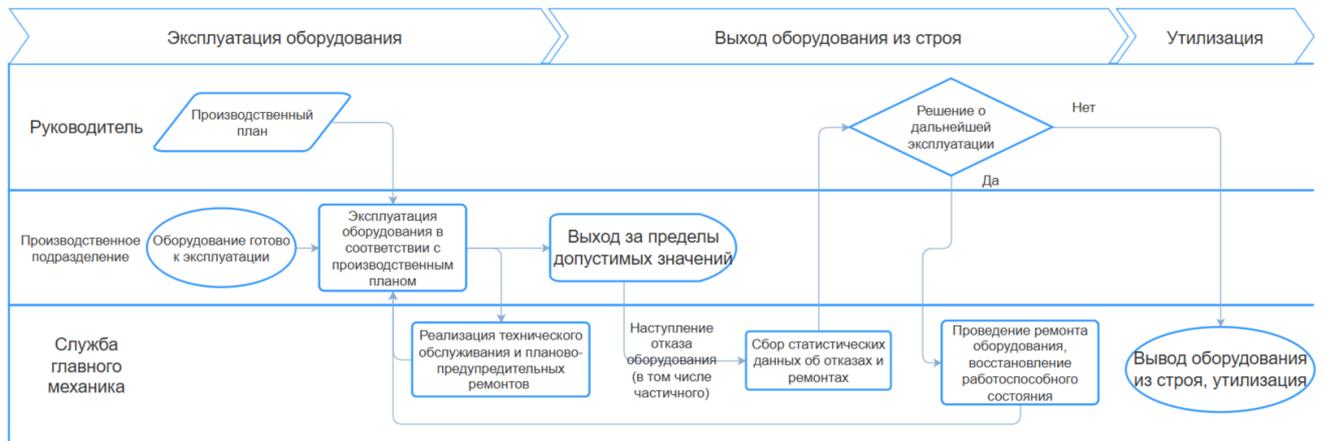


Рисунок 1.4 – Базовый подход к обеспечению надежности оборудования

Источник: разработано автором

В связи с этим актуальными становятся научно-обоснованные методологические, организационно-управленческие и практико-ориентированные подходы к эффективному осуществлению деятельности в области надежности [8]. Следует сформировать комплексный подход к процессам обеспечения надежности, в рамках которого возможно выявить причины отказа, обеспечить требуемый уровень надежности, сформировать программу мероприятий, направленных на раннее выявление несоответствий и повышение надежности. Данный подход позволит увеличить надежность не только оборудования, но и производственного процесса, тем самым обеспечивая высокую вероятность выполнения производственного плана в заданные сроки с требуемым уровнем качества. При этом одним из эффективных компонентов предлагаемого комплексного подхода должны выступать компьютерные методы и цифровые технологии [117], действующие в двух ключевых направлениях. Первое направление предполагает

внедрение инструментов для отслеживания текущего уровня надежности, сбора информации, обеспечения точности и своевременности реализуемых мероприятий, другими словами, внедрение инструментов для мониторинга и предотвращения неожиданных отклонений. Как правило, для достижения данной задачи достаточно внедрения информационных систем управления техническим обслуживанием и ремонтом [245–247], компьютеризированных систем управления техническим обслуживанием (CMMS, Computerized Maintenance Management System) [248], систем диспетчерского контроля и сбора данных (SCADA, Supervisory Control And Data Acquisition) и проч.

Вторым направлением выступает совершенствование процесса обеспечения надежности – повышение его уровня за счет внедрения технологий цифрового проектирования и моделирования, цифровых двойников и технологий промышленного интернета («интеллектуальных» датчиков, непрерывно контролируемых параметров процессов в контрольных точках и выделяющих признаки возникновения и развития дефектов или аномалий [240; 249]), что позволит прогнозировать состояние оборудования с учетом определенных условий, создавать адекватную цифровую модель станка, отслеживать протекающие физико-механические процессы в режиме реального времени и тем самым повышать отказоустойчивость системы.

Таким образом, с целью формирования конкурентоспособности предприятия и обеспечения качества при производстве изделий необходимо уделить особое внимание рационально выстроенному системному подходу при организации производственных процессов, технологической оснащенности производства, а особенно – применяемым программным и информационно-техническим инструментам и технологиям [32].

1.3 Цифровой двойник оборудования как технология обеспечения и повышения надежности оборудования

Исследования в области повышения эффективности производственных систем подтверждают высокий интерес к развитию научно-методологической базы теории организации производства с применением современных инженерно-

технологических инструментов, включая передовые цифровые и производственные технологии, что формирует значительный потенциал для развития решений в обозначенной области и подтверждает актуальность диссертационного исследования.

Основные производственные единицы промышленного предприятия, такие как станки, активы, ресурсы, инструменты и др., могут быть объединены в систему в рамках развертывания подхода к управлению ресурсами. Для данного процесса, как правило, внедряют ERP-, PDM-, SPDM-системы [8; 39]. Управление оборудованием наиболее результативно при применении цифрового двойника оборудования, поскольку обеспечивается контроль и управление технической системой на протяжении всего жизненного цикла [8; 10; 39].

Научно-методологические основы технологии разработки цифровых двойников относятся к 1960-м годам [250], когда начало формироваться направление вычислительных методов и численного моделирования. К основным технологиям цифрового проектирования и моделирования, составляющим вычислительную и программную основу цифровых двойников, относятся технологии компьютерного проектирования (CAD, Computer-Aided Design), компьютерного инжиниринга (CAE, Computer-Aided Engineering), технологической подготовки производства (CAM, Computer-Aided Manufacturing), управления данными (PDM), управления жизненным циклом (PLM, Product Lifecycle Management).

Сама концепция цифровых двойников в явном виде формировалась начиная с 2002 года Майклом Гривсом [251–258], ныне – профессор Института цифровых двойников США, ранее – научный сотрудник Технологического института Флориды (США). Термин «цифровой двойник» был упомянут впервые в 2011 году в труде Майкла Гривса [252], при этом Гривс отметил, что автор термина – эксперт NASA Джон Викарс [252].

В основе концепции Майкла Гривса лежат: 1) физический объект, который находится в физическом пространстве, 2) виртуальный объект, который находится в цифровом пространстве и является аналогом физического объекта, 3)

двунаправленные потоки информации и данных, объединяющие оба пространства [252–256]. NASA, затем другие оборонные ведомства и концерны США и Европы начали активно использовать на практике концепцию цифровых двойников начиная с 2010-х годов.

В эти же годы в зарубежной научной литературе начали появляться публикации на тему цифровых двойников, среди отечественных авторов – начиная с 2017 года [259]. Идеологом концепции цифровых двойников в России выступает профессор СПбПУ А.И. Боровков [259]. Основные положения концепции СПбПУ, а также хронологический обзор развития технологии цифровых двойников, кейсы применения цифровых двойников промышленности, нормативно-правовые и нормативно-технические аспекты представлены в монографии [259]. Также можно выделить труд А.Н. Прохорова, М.Н. Лысачева, посвященный вопросам в области развития цифровых двойников и смежных технологий в мире и России [260].

Нормативно-правовое пространство в области цифровых двойников начало развиваться в 2010-е годы, при этом изначально стандарты были сфокусированы на представлении производственных элементов в цифровом пространстве, автоматизации управления производственными процессами, далее – на «цифровых фабриках». Преимущества развертывания цифровых фабрик неоднократно отмечали эксперты в данной области [261]. Международные стандарты в данной области включают, но не ограничиваются:

- IEC/TR 62794–2012 Industrial-process measurement, control and automation – Reference model for representation of production facilities (digital factory); в настоящее время имеет статус неактивного [262];
- IEC TS 62832–1:2016 ED1 Industrial-process measurement, control and automation – Digital factory framework – Part 1: General principles; принят взамен IEC/TR 62794 [263];
- IEC 62832–1:2020 Industrial-process measurement, control and automation – Digital factory framework – Part 1: General principles [264];
- IEC 62832–2:2020 Industrial-process measurement, control and automation – Digital factory framework – Part 2: Model elements [265];

- IEC 62832–3:2020 Industrial-process measurement, control and automation – Digital factory framework – Part 3: Application of Digital Factory for life cycle management of production systems [266].

На основании приведенных стандартов в Российской Федерации с 2020 года разрабатывается серия предварительных национальных стандартов «Умное производство», в числе принятых стандартов, например, ПНСТ 429–2020, ПНСТ 992–2024, ПНСТ 993–2024, ПНСТ 994–2024. Стандарт ПНСТ 429–2020 «Умное производство. Двойники цифровые производства. Часть 1. Общие положения» устанавливает следующее определение термину «цифровой двойник» – это программно-аппаратный комплекс, реализующий комплексную динамическую модель для исследования и управления деятельностью социотехнической системы [267]. Разработчики стандарта отмечают, что цифровой двойник производства основан на цифровой модели, которая постоянно обновляется и изменяется по мере изменения физического аналога с целью синхронного представления состояния, условий работы, конфигурации продукта и состояния ресурсов [39].

Также в 2021 году впервые в мире введен термин «цифровой двойник изделия» в рамках национального стандарта Российской Федерации ГОСТ Р 57700.37–2021 «Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения» [268]. Стандарт разработан специалистами СПбПУ совместно с ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ». Подход специалистов СПбПУ, в том числе отраженный в национальном стандарте, основывается на многолетнем опыте реализации проектов по созданию цифровых двойников высококонкурентных изделий для разных отраслей промышленности, при этом технология цифровых двойников применима также для производственной системы. Цифровой двойник в соответствии с ГОСТ Р 57700.37–2021 – это система, состоящая из цифровой модели изделия и двусторонних информационными связей с изделием [268]. Другие определения цифрового двойника приведены в работах [269–272].

Научно-исследовательские работы в данной области преимущественно

сфокусированы на обзоре терминологии, в связи с чем популярны обзорные статьи, например, [273; 274]. Также отдельные исследования, в том числе по тематике развития промышленных киберфизических систем, проводятся специалистами китайских университетов и исследовательских центров, которые занимают одну из ведущих позиций в данном направлении и публикации которых набирают большое количество цитирований [275–277].

Согласно оценке авторов [278], использование цифровых двойников целесообразно для сложных, в том числе наукоемких, технических объектов длительного срока полезного использования, нуждающихся в тщательном обслуживании, для которых предусмотрено многообразие эксплуатационных режимов.

Среди положительных эффектов применения цифровых двойников можно выделить, в частности [32]:

- Оптимальность и бесперебойность работы оборудования, отслеживаемость аномалий, снижение количества брака и отклонений [32];
- Проведение моделирования оборудования, обеспечивающего снижение натурных и эксплуатационных испытаний до минимально необходимого уровня [32];
- Снижение количества отказов, простоев, количества и стоимости внеплановых ремонтов;
- Повышение скорости принятия и обоснованности стратегических и тактических решений, разработка оптимальных регламентов обслуживания и ремонтов и др.

Цифровые (виртуальные) испытания позволяют многократно провести анализ исследуемой конструкции, расчеты поведения при определенных внешних условиях, нагрузке, отследить изменения состояния и последствия протекания сложных процессов, спрогнозировать выход из строя или нарушение нормальных условий работы. Испытания в цифровом пространстве требуют значительно меньше трудовых и финансовых ресурсов, однако увеличиваются затраты на вычислительные, платформенные и программные ресурсы, в том числе для

создания и применения цифровых (виртуальных) стендов и полигонов, позволяющих провести испытания во всех возможных условиях на разных стадиях жизненного цикла. При этом цифровые испытания способствуют обнаружению проблем и отклонений на более ранних этапах, что позволяет решать их с минимальными трудовыми и финансовыми затратами. Аналогично возможен виртуальный ввод оборудования в эксплуатацию для оценки параметров его работы [279]. Важно отметить, что концепция цифровых двойников требует высокого уровня квалификации специалистов, что в данной работе подробно не рассматривается.

Важность отслеживания системы на всех стадиях жизненного цикла объясняется накоплением неточностей, то есть отклонений от истинного (заданного, желаемого, регламентированного) значения, которое формируется в потенциальный недостаток на любом этапе и может сопровождаться снижением качества и возможным возникновением отказов. Процесс эксплуатации системы должен проходить в соответствии с условиями, указанными в сопроводительной документации, и отклонение от них может вызвать значительное сокращение срока службы.

Кроме того, применение технологий цифрового проектирования и моделирования для проведения цифровых испытаний позволяет выявить потенциальные узкие или критические места, отслеживание которых критически важно для повышения эффективности контрактов жизненного цикла. Таким образом, цифровые двойники повышают надежность производственной системы и создают возможность для быстрой переналадки оборудования, снижения потенциальных затрат, связанных с авариями и простоями [39]. При этом точность моделей цифрового двойника может составлять до 97% согласно оценке Altair [280], что демонстрирует высокую адекватность разрабатываемых решений.

Принципиально важно отметить, что реализация технологии цифрового двойника невозможна без программно-аппаратного обеспечения, позволяющего моделировать систему с учетом технологической оснащенности производства. Платформенные решения, в том числе упомянутые выше SPDM-платформы,

обеспечивают сбор и обработку данных, контроль происходящих изменений, управление процессами моделирования с учетом жизненного цикла. За счет этого цифровой двойник выступает инструментом для формирования единой актуальной информационной экосистемы между всеми элементами предприятия, моделирования поведения оборудования, проектирования и налаживания производственной системы и др. [39]

Примером такой программной платформы выступает разработка Инжинирингового центра «Центр компьютерного инжиниринга» СПбПУ [281] – цифровая платформа по разработке и применению цифровых двойников CML-Bench[®]. Отслеживание изменений на платформе обеспечивает прозрачный процесс мониторинга, обоснования и принятия решений, что формирует так называемые «непрерывные ворота качества».

Дальнейшее развитие рассматриваемых технологий, в числе которых цифровые двойники, программные решения, вычислительный инструментарий, привело к формированию экосистемы цифрового инжиниринга (см. рисунок 1.5). ANSYS, мировой лидер в области программного обеспечения инженерного проектирования и моделирования, отмечает, что наиболее эффективный способ создания добавленной стоимости для промышленных предприятий – это использование взаимосвязанных технологий: модельно-ориентированного системного инжиниринга (MBSE), платформы управления расчетными данными, связанности данных и моделей, а также цифрового инжиниринга [282]. В широком смысле в качестве сопряженных инструментов MBSE, применяемых на протяжении жизненного цикла, эксперты ANSYS отмечают промышленный интернет вещей (IIoT, Industrial Internet of Things), PDM- и SPDM-платформы, а также формирование «цифровых фабрик».

Аналогичный подход к организации мониторинга на промышленном предприятии представляет Digital Twin Consortium (DTC), международный консорциум организаций, занимающихся продвижением, развитием и внедрением технологии цифровых двойников в различных отраслях промышленности [283; 284]. Согласно их концепции, цифровой двойник построен на основе

интегрированных и синхронизированных систем ИТ/ОТ, использует данные в реальном времени и исторические данные для отображения прошлого и настоящего, а также для моделирования прогнозируемого будущего [285].



Рисунок 1.5 – Эволюция и перспективы развития программных систем управления предприятием

Источник: составлено автором по материалам ANSYS

Собранные данные централизованно размещаются в хранилище данных и проходят специализированную обработку в целях выявления закономерностей. ИТ/ОТ-платформа системы цифрового двойника – это набор информационных и операционных технологий, инфраструктуры и сервисов, с помощью которых реализована технология цифрового двойника; этот набор включает программную платформу, вычислительную и сетевую инфраструктуру, хранилище, а также инструменты, обеспечивающие интеграцию решений между собой и визуализацию для работы оператора цифрового двойника [286].

С целью оперативного прогнозирования и мониторинга производственных процессов многие компании применяют готовые решения на базе промышленного интернета вещей (IIoT), в том числе актуаторы и датчики, RFID-метки, маршрутизаторы, IoT-шлюзы и другие устройства [287–289] в соответствии с проработанными сценариями использования, обеспечивающие генерацию и сбор данных, отправку и принятие сигналов, а также удаленный мониторинг

объектов [290]. Это позволяет избежать «узких мест» в технологическом цикле и оперативно получать информацию о процессах, не прибегая к сложным, трудоемким и нерациональным методам сбора данных. Инструментарий подключенных устройств позволяет операторам формировать динамичную рабочую среду, связывать станки и оператора через интерактивные дашборды и компьютерные сети [291]. В прикладных исследованиях данный вопрос рассматривается в рамках внедрения и применения автоматизированных систем управления технологическими процессами [292].

Согласно исследованию Deloitte, известного консалтингового агентства, предиктивное обслуживание, реализованное с применением технологии цифровых двойников, позволяет повысить производительность предприятия на 25%, сократить количество отказов и неисправностей на 70% и снизить затраты на техническое обслуживание на 25% [293]. Данный подход позволил General Electric повысить надежность эксплуатируемых турбин до 99,49% [293] и перейти на следующий уровень контроля над промышленным объектом с помощью цифровых технологий.

Стоит упомянуть и о некоторых технологических барьерах развития технологии цифровых двойников, связанных, в частности, с обработкой данных, формированием и налаживанием связей между измерительными устройствами и исполнительными механизмами, надежностью измерительных устройств, синхронизацией между физическим и цифровым пространством, интеграцией между программными решениями, кибербезопасностью и др. Также существуют организационно-экономические барьеры, например, высокие требования к персоналу, значительная стоимость и сложность проекта по созданию и поддержанию цифрового двойника и др. Тем не менее, данный тип решений применяется в наиболее прогрессивных высокотехнологичных отраслях промышленности, преимущественно обрабатывающей промышленности, включая автомобилестроение, авиастроение, оборонно-промышленный комплекс, энергетическое машиностроение и некоторые другие отрасли промышленности.

Таким образом, раскрыты основные этапы развития концепции цифровых

двойников, сформулированы основные преимущества внедрения технологии цифровых двойников в систему управления надежностью оборудования, рассмотрены необходимые для этого инфраструктурные, платформенные, программно-аппаратные решения. На основании проведенного теоретического обзора тематики исследования рекомендуется применять технологии компьютерного моделирования, проводить цифровые испытания эксплуатации оборудования и внедрять технологию цифрового двойника оборудования, интегрированную с промышленным интернетом вещей, что позволит предсказывать вероятность наступления отказа оборудования, тем самым повысит уровень надежности оборудования и обеспечит бесперебойность и качество производственного процесса. Применение методов компьютерного моделирования будет способствовать отслеживанию всех изменений, вносимых в конструкцию оборудования, происходящих вследствие эксплуатации оборудования, связанных с проведением ремонтных и обслуживающих работ [9].

Выводы

Проведенный анализ теоретических, прикладных и аналитических исследований позволяет сделать вывод о целесообразности системного подхода применительно к производственной структуре, ключевым элементом которой выступает оборудование. Сбалансированный производственный процесс напрямую зависит от рациональной организации технического обслуживания и ремонтов оборудования, обеспечения его надежности и эффективности с учетом имеющихся ограничений – экономических, геополитических, технологических и т.д. Высокая стоимость простоев из-за отказов оборудования и критические последствия остановки производственного процесса требуют применения современных методов обеспечения надежности оборудования.

Как показывает практика, наибольший эффект в процессе реорганизации производственной системы оказывают прогрессивные передовые цифровые и производственные технологии, включая технологию цифровых двойников, внедрение которых обеспечивает ряд преимуществ. В дополнении с принципами бережливого производства, инструментами FMECA и другими методами анализа и

обеспечения уровня надежности возможно перейти к проактивной системе технического обслуживания, которая позволит не реагировать на наступление критического состояния, а предотвращать его возникновение и предусматривать возможные последствия.

Получение максимального эффекта от внедрения обозначенных технологий предполагает, во-первых, выявление критичности состояния оборудования и критичности возникшего или потенциально возможного отклонения, во-вторых, применение квалиметрических методов оценки эффективности процессов работы оборудования на основе систематизированного перечня оцениваемых показателей. В-третьих, проактивное техническое обслуживание и обеспечение надежности оборудования предполагает организацию мониторинга и прогнозирования наступления возможного отказа, а также численное моделирование исследуемых процессов, в связи с чем необходима программно-аппаратная реализация технологии с применением программных систем, технологической платформы и интегрированных устройств промышленного интернета.

Таким образом, выявленные в процессе анализа сложности и недостатки базового подхода в части обеспечения надежности оборудования могут быть нивелированы за счет применения технологии цифровых двойников в сочетании с модельно-ориентированным системным инжинирингом, промышленным интернетом вещей, программными решениями для управления техническим обслуживанием и сбора данных.

ГЛАВА 2. ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ОБОРУДОВАНИЯ В РАМКАХ КОМПЛЕКСНОГО ПОДХОДА К ОЦЕНКЕ КАЧЕСТВА

2.1 Основные факторы обеспечения надежности оборудования

Проведенный анализ литературы показал, что надежность, как правило, оценивается статистически, при этом свойства, составляющие надежность, зачастую не подкреплены компетенциями персонала и имеющимися ресурсами, а также недостаточно раскрываются в привязке к техническому обслуживанию оцениваемого оборудования. При этом техническое обслуживание – ключевой процесс поддержания и обеспечения надежности оборудования.

В рамках исследования выделена классификация показателей, содержащей три группы факторов – показателей качества, обеспечивающих надежность оборудования:

1) показатели оборудования, содержащие факторы, непосредственно описывающие процессы и результаты эксплуатации оборудования, его техническое состояние и уровень надежности, характеристики функциональности и работоспособности всей группы оборудования, направленного на осуществление основной деятельности предприятия и находящегося в эксплуатации на постоянной основе [10; 11];

2) показатели, связанные с персоналом, содержащие ряд факторов, раскрывающих уровень компетенций персонала по эксплуатации, обслуживанию и другим процессам взаимодействия человека с оборудованием, то есть процессам, оказывающим влияние человеческого фактора на уровень надежности оборудования и в некоторой степени на результат работы – изготовленную продукцию и ее качество;

3) показатели, связанные с применяемыми технологиями и имеющимися ресурсами, содержащие ряд факторов, оказывающих влияние на процессы и эффективность содержания оборудования с точки зрения материально-технического оснащения, взаимодействия оборудования с окружающей средой, системой производства и имеющейся технологической и инновационной инфраструктурой.

Перечень показателей и группы показателей могут быть дополнены и уточнены в соответствии с типом оборудования, отраслевой принадлежностью, особенностями конкретного производства, адаптированы под требования и задачи процедур по оценке надежности и уровня качества. Приведенные группы показателей целесообразно объединить в систему по причине взаимозависимости всех приведенных показателей, а также в соответствии с системным подходом к построению производственной структуры, в связи с чем предлагаемый комплексный показатель качества сформирован с учетом приведенных трех групп показателей.

Оценка качества обеспечения надежности оборудования направлена на выявление отклонений от потенциального состояния промышленного парка, формирование рекомендаций по улучшению уровня надежности оборудования и оптимизации производственных процессов. В данном исследовании обеспечение надежности оборудования понимается как один из производственных процессов, проводимых в целях обслуживания оборудования, предотвращения несоответствий или выхода оборудования из строя, что позволяет минимизировать временные и финансовые затраты при выполнении производственного плана.

Далее представим концептуальное описание факторов обеспечения надежности оборудования. Математическое описание обозначенных факторов и их свойств, составляющее основу комплексного показателя качества, представлено в параграфе 2.2. Взаимосвязь показателей и математическая модель повышения качества обеспечения надежности оборудования на основе комплексного показателя представлены в параграфе 2.3.

Так, первая группа показателей качества обеспечения надежности в привязке к оборудованию (далее – группа «оборудование») содержит следующие показатели:

- уровень безотказности оборудования;

Это ключевой показатель, описывающий свойство оборудования сохранять работоспособность. Данный показатель может раскрываться через ряд взаимосвязанных свойств и характеристик оборудования, таких как вероятность

безотказной работы, вероятность отказа, наработка на отказ, наработка между отказами, интенсивность отказов [128] и некоторые виды этих свойств, определенные в ГОСТ Р 27.102–2021 [196].

- уровень точности работы оборудования;

Данный показатель отражает свойство оборудования точно, без отклонений, в соответствии с заданными или номинальными параметрами и допусками выполнять основные функциональные задачи. Показатель точности работы характеризуется повторяемостью, воспроизводимостью и соблюдением строгих параметров работы, в том числе позиционирования. Любое отклонение в работе оборудования – потенциальная причина дефекта, предпосылка нарушения параметров работы, возникновения последующего отказа, в связи с чем отслеживание точности работы оборудования необходимо проводить в процессе его эксплуатации и обслуживания.

- общая эффективность работы (ОЕЕ) оборудования;

Данный показатель является стандартизированным показателем, принятым для расчета текущей эффективности эксплуатации оборудования в сравнении с потенциально возможным значением эффективности. Общепринятый подход к оценке ОЕЕ раскрывается через взаимозависимость доступности, производительности и качества работы оборудования [196]. Параметр доступности описывает фактически отработанное время оборудования относительно планового времени его работы с учетом простоев и длительности технического обслуживания. Параметр производительности отражает фактическую выработку оборудования относительно плановой выработки. Параметр качества работы оборудования отражает количество произведенной бездефектной продукции относительно общего количества произведенной продукции. Как правило, ОЕЕ на разных предприятиях задается в диапазоне 60–85% в качестве планового показателя [42; 294–296]. Применение данного подхода позволяет выявить узкие места, возникшие в определенный период времени, и необходимость повышения производительности.

- уровень готовности оборудования;

Готовность оборудования оценивается как способность выполнять требуемые функции при условии, что соблюдены все принципы и выполнены все процессы технического обслуживания. Показателями готовности объекта являются коэффициент готовности, коэффициент неготовности, коэффициент оперативной готовности и коэффициент технического использования в соответствии с ГОСТ Р 27.102–2021 [196]. Данный показатель отражает способность оборудования непрерывно выполнять основные производственные процессы в целях формирования добавленной стоимости конечному продукту и выполнения поставленных задач производства.

- уровень ремонтпригодности оборудования;

Это ключевой показатель, описывающий способность оборудования к восстановлению работоспособности после проведения технического обслуживания и ремонта при текущих технических и экономических аспектах. Данный показатель может быть описан через вероятность восстановления оборудования, интенсивность восстановления, среднее время восстановления и среднюю трудоемкость восстановления в соответствии с ГОСТ Р 27.102–2021 [196].

- уровень долговечности оборудования;

Данный показатель характеризует свойство сохранения работоспособности оборудования до наступления предельного состояния при текущем уровне технического обслуживания и ремонтов. Долговечность в соответствии с ГОСТ Р 27.102–2021 рассчитывается через средний ресурс и средний срок службы [196].

- показатель параметров режимов работы оборудования в соответствии с заданными производителем;

Данный показатель определяет, насколько эксплуатация оборудования протекает в соответствии с теми режимами работы, которые зафиксированы в технической документации оборудования. Отклонение от заданных режимов может привести к преждевременному выходу оборудования из строя и нарушению оптимальности, стабильности и безопасности работы. Данный показатель может быть раскрыт через технические параметры, такие как мощность, скорость,

давление, температура, напряжение, колебания, вибрации и прочие параметры, отражающие выполнение функциональных задач оборудования, в частности в соответствии со стандартами группы «Система показателей качества продукции»¹. Каждый параметр должен быть оценен относительно заданного производителем или номинального значения, при этом показатель рассматривается за определенный период и носит фактический характер. В общем случае может быть определен перечень приоритетных для оценки параметров, вклад каждого выбранного параметра в общую оценку определяется пропорционально количеству параметров.

- длительность планового технического обслуживания относительно общей продолжительности технического обслуживания оборудования;

Данный показатель позволяет выявить, какую долю технического обслуживания составляют плановые процедуры, а какую долю – внеплановое обслуживание и ремонты по причине выхода оборудования из строя или наступления аварийных ситуаций. Показатель является критически важным в части оценки длительности технического обслуживания и причин его проведения. Кроме

¹ Данная группа стандартов включает, но не ограничивается:

ГОСТ 4.44–89 «Система показателей качества продукции. Оборудование сварочное механическое. Номенклатура показателей»;

ГОСТ 4.90–83 «Система показателей качества продукции. Оборудование технологическое для литейного производства. Номенклатура показателей»;

ГОСТ 4.93–86 «Система показателей качества продукции. Станки металлообрабатывающие. Номенклатура показателей»;

ГОСТ 4.118–84 «Система показателей качества продукции. Оборудование насосное. Номенклатура основных показателей»;

ГОСТ 4.140–85 «Система показателей качества продукции. Оборудование электросварочное. Номенклатура показателей»;

ГОСТ 4.153–85 «Система показателей качества продукции. Оборудование электротермическое. Номенклатура показателей»;

ГОСТ 4.423–86 «Система показателей качества продукции. Машины компрессорные центробежные. Номенклатура показателей»;

ГОСТ 4.424–86 «Система показателей качества продукции. Турбины паровые стационарные. Номенклатура показателей»;

ГОСТ 4.425–86 «Система показателей качества продукции. Турбины гидравлические. Номенклатура показателей»;

ГОСТ 4.426–86 «Система показателей качества продукции. Оборудование вспомогательное паровых турбин. Номенклатура показателей»;

ГОСТ 4.427–86 «Система показателей качества продукции. Оборудование гидравлических турбин. Номенклатура показателей».

того, отслеживается соответствие задач предприятия, поставленных в части профилактического обслуживания и прогнозирования потенциальных отказов, относительно полученных результатов и уровня надежности оборудования, то есть показатель позволяет выявить, насколько фактически проводимые процедуры технического обслуживания и ремонта совпадают с оперативными планами и прогнозными оценками предприятия. Показатель рассматривается за определенный период и носит фактический характер.

- длительность простоев оборудования из-за отказов и ремонтов относительно общей продолжительности простоев оборудования.

Данный показатель отражает, какая доля простоев оборудования происходит по причине внеплановых выходов оборудования из строя, а какая доля – по причине недостаточной нагрузки оборудования в соответствии с производственным планом, переналадки оборудования и другими производственными факторами, не связанными с отказами. Показатель является важным в части отслеживания эффективности нагрузки оборудования и эффективности проведения технического обслуживания и ремонтов. Показатель рассматривается за определенный период и носит фактический характер.

Вторая группа показателей качества обеспечения надежности оборудования раскрывается через показатели, связанные с компетенциями персонала, задействованного в эксплуатации и обслуживании оборудования (далее – группа «персонал»). Вторая группа содержит следующие показатели:

- уровень владения навыками для проведения требуемого технического обслуживания и ремонта оборудования;

Данный показатель является критически важным, так как позволяет оценить, насколько качественно и эффективно выполняются работы по техническому обслуживанию и ремонту с учетом квалификации и навыков персонала. Данный показатель отражает как соответствие выполняемых процедур требованиям и нормам, обозначенным в нормативных и технических документах, так и опыт обслуживания персоналом конкретного типа оборудования. Показатель оценивается в целом по всему персоналу в привязке к конкретной единице

оборудования.

- уровень компетенций в выполнении производственных операций с использованием оборудования;

Данный показатель, аналогично предыдущему, раскрывает эффективность выполнения производственных операций с учетом навыков и компетенций персонала, выполняющего данные операции с использованием оборудования. Показатель может отражать как соответствие стандартизированным нормам и процедурам, так и знание технологического процесса, опыт, накопленный при работе с конкретным типом оборудования, что является важным для его безопасной и эффективной эксплуатации. Показатель оценивается в целом по всему персоналу в привязке к конкретной единице оборудования.

- уровень владения навыками для анализа данных и выявления взаимосвязей при мониторинге работы оборудования.

Данный показатель является критически важным при оценке работы персонала с системами сбора и анализа промышленных данных, характеризующих параметры работы оборудования, его нагрузку, длительность и эффективность обслуживания. Компетентность персонала в части интерпретации полученных данных оказывает влияние на эффективность анализа, установления взаимосвязей и взаимозависимостей между аспектами эксплуатации, обслуживания оборудования и появлением отклонений, а также влияние на своевременность, точность и эффективность принятия управленческих решений. Данный показатель отражает не только уровень понимания принципов работы систем мониторинга, используемых датчиков и измерительного оборудования, но и уровень компетенций в выявлении аномалий, диагностики неисправностей, применения принципов бережливого производства и др.

Третья группа показателей качества обеспечения надежности оборудования отражает показатели, связанные с технологиями и ресурсами предприятия (далее – группа «технологии и ресурсы»), и включает:

- уровень мониторинга технического состояния и эксплуатации оборудования;

Данный показатель отражает материально-техническое оснащение предприятия в части системы мониторинга оборудования, оснащенность датчиками, измерительным оборудованием, актуаторами и другими инструментами, позволяющими осуществлять сбор, хранение и использование данных, а также управляющие воздействия. Важность данного показателя объясняется важностью формирования системы данных, описывающих состояние оборудования, условия его эксплуатации и обслуживания, что должно быть обеспечено техническими средствами.

- уровень доступности инструментов для проведения технического обслуживания и ремонтов;

Показатель характеризует обеспеченность необходимыми материалами и инструментами для обслуживания оборудования, наличие запасных частей и деталей систем для замены, достаточность имеющейся оснастки и прочих технических компонентов с учетом их уровня качества. Отсутствие, нехватка, недостаточный уровень качества или импортозависимость обозначенных компонентов может привести к увеличению длительности простоев оборудования и снижению уровня готовности оборудования к выполнению производственных задач.

- уровень входного контроля сырья и материалов для изготовления изделий.

Показатель описывает уровень контроля материалов, сырья и полуфабрикатов, которые поступают на предприятие для последующего использования в производственном или обслуживающем процессе. Важность данного показателя объясняется возможностью появления дефектов при некорректном использовании материалов в производстве, нарушением работы оборудования вследствие несоответствия используемых материалов технической документации на оборудование, а также повышением затрат, вызванных использованием некачественного сырья.

Таким образом, рассмотренные группы показателей во взаимосвязи позволяют описать уровень качества обеспечения надежности оборудования в

разрезе трех ключевых аспектов – непосредственно показателей оборудования, показателей персонала, показателей технологий и ресурсов. Расширенная оценка надежности через показатели, связанные не только с оборудованием, позволяет комплексно подойти к описанию факторов, возникающих в технологическом цикле предприятия и являющихся причиной или значимым фактором возникновения несоответствий в производственном процессе.

2.2 Комплексный показатель качества обеспечения надежности оборудования

Приведенные группы показателей качества обеспечения надежности следует рассматривать комплексно по причине взаимосвязанности показателей, то есть когда изменение одного показателя оказывает также воздействие на другие показатели (например, если повысить компетенции персонала в части анализа данных, возможно улучшение системы мониторинга за счет корректного использования инструментов, а также воздействие на показатели производительности оборудования и эффективности его обслуживания), в связи с чем отслеживание взаимного влияния позволяет избежать непреднамеренного отрицательного воздействия на систему. Кроме того, комплексность рассмотренных показателей объясняется повышением объективности оценки, обоснованности решений и учетом приоритетности в части воздействия на показатели, уровень которых является недостаточным.

Описанные показатели качества обеспечения надежности оцениваются расчетным и экспертным методами. Рассмотрим методы оценки каждого показателя подробнее, начиная с группы показателей «оборудование».

Уровень безотказности оборудования оценивается через ряд показателей:

- Вероятность безотказной работы – значение вероятности того, что в пределах заданной наработки отказ оборудования не возникнет [21; 196]. Данный показатель рассчитывается статистически, что предполагает наличие экспериментальных и эксплуатационных данных. Формула для статистической оценки вероятности безотказной работы:

$$P(t) = \frac{N_o - n(t)}{N_o}$$

где $P(t)$ – вероятность безотказной работы оборудования за период t , $n(t)$ – число отказавшего оборудования за период t , N_o – исходное число единиц работоспособного оборудования в начальный момент времени t [8; 95]. Важно отметить, что применимость данной формулы определяется наличием однотипного оборудования и отсутствием зависимости отказов.

- Вероятность отказа – значение вероятности того, что изначально работоспособное оборудование откажет хотя бы один раз в течение заданной наработки [196]. Данный показатель является обратным показателем вероятности безотказной работы и, соответственно, рассчитывается статистически. Формула для расчета вероятности отказа оборудования:

$$Q(t) = \frac{n(t)}{N_o} = 1 - P(t)$$

где $Q(t)$ – вероятность наступления отказа за период t [8].

- Нарботка на отказ (иногда рассчитывается показатель «наработка до первого отказа» для оборудования, впервые введенного в эксплуатацию) – это показатель общей продолжительности наработки оборудования с момента его первого ввода в работоспособное состояние до отказа, или с момента его восстановления до следующего отказа [21; 196]. Данный показатель рассчитывается статистически, то есть на основе экспериментальных и эксплуатационных данных. Формула для статистической оценки наработки на отказ:

$$T_o = \frac{\sum_{i=1}^m t_i}{m} = \frac{T_M}{m}$$

где T_o – наработка на отказ, m – число отказов оборудования за рассматриваемый период t , t_i – длительность работы оборудования между i -отказами, T_M – суммарная длительность безотказной работы оборудования за период t .

- Нарботка между отказами – показатель общей продолжительности наработки между двумя последовательными отказами восстанавливаемого

оборудования. Показатель рассчитывается статистически.

- Интенсивность отказов – плотность вероятности возникновения отказа невосстанавливаемого оборудования, или же число отказавших изделий в момент времени к среднему числу изделий, исправно работающих в этот период времени [154]. Данный показатель, также как и приведенные выше показатели оценки безотказности, оценивается статистически. Формула для статистической оценки интенсивности отказов:

$$\lambda(t) = \frac{n(\Delta t)}{N\Delta t}$$

где $\lambda(t)$ – оценка интенсивности отказов оборудования, Δt – рассматриваемый интервал времени (достаточно малый).

Помимо статистических методов оценки приведенных показателей безотказности также возможно получение значений математического ожидания данных показателей, однако математическое ожидание вычисляется на основе теоретических моделей и характеристик случайной величины. Другими словами, применительно к конкретному объекту исследования (станку или группе оборудования) предпочтительнее использование статистических методов при наличии накопленной информации.

Следующий показатель качества обеспечения надежности оборудования – уровень точности его работы. Данный показатель предполагает поэтапную экспериментальную оценку, в первую очередь выполняется определение приоритетного технического параметра, относительно которого будет оцениваться точность. Далее определяется метод проведения испытаний, как правило, это прямые измерения с применением метрологических инструментов, после чего проводится измерение и сравнивается полученное значение с номинальным или плановым значением по формуле (2.1):

$$F_i = \left(1 - \frac{|F_{\text{факт}} - F_{\text{план}}|}{F_{\text{откл}}} \right) * 100\% \quad (2.1)$$

где F_i – рассматриваемый параметр, $F_{\text{факт}}$ – фактическое значение рассматриваемого параметра, $F_{\text{план}}$ – плановое (заданное) значение

рассматриваемого параметра в соответствии с документацией, $F_{\text{откл}}$ – значение максимально допустимого отклонения от заданного значения, указанное в документации, при этом $F_{\text{откл}} > 0$. В случае если $F_{\text{откл}} = 0$, то выполняется оценка соответствия: в случае когда $F_{\text{факт}} = F_{\text{план}}$, то $F_i = 100\%$, иначе $F_i = 0\%$. Если же показатель имеет отрицательное значение $F_i < 0\%$, то следует считать наличие брака рассматриваемого элемента оборудования.

Предположим, что проводим оценку точности работы станка с числовым программным управлением на точность позиционирования по осям X, Y, Z. Для оценки измерений следует применить лазерный трекер и определить отклонение от заданных координат. Также данный показатель может оцениваться экспертными методами для определенных типов оборудования.

Следующий показатель – общая эффективность работы (ОЕЕ) оборудования. Стандартизировано данный показатель рассчитывается по формуле:

$$OEE = A * P * Q = \frac{GP * ICT}{PPT}$$

где A – показатель доступности, P – показатель производительности, Q – показатель качества, GP – объем произведенной бездефектной продукции, ICT – идеальное время цикла, то есть теоретическое минимально необходимое время для выпуска единицы продукции, PPT – плановое производственное время. Единицей измерения показателя выступают проценты.

Следующий оцениваемый показатель – уровень готовности оборудования. Рассмотрим комплексные параметры, составляющие показатель готовности:

- Коэффициент готовности – показатель вероятности того, что в данный момент времени оборудование находится в работоспособном состоянии, кроме периодов, в которых применение оборудования не предусматривается [196]. Коэффициент готовности рассчитывается статистически по формуле:

$$K_g = \frac{T}{T + T_g}$$

где K_g – коэффициент готовности оборудования, T – средняя наработка оборудования между отказами, T_g – среднее время восстановления.

- Коэффициент неготовности – показатель вероятности того, что в данный момент времени оборудование находится в неработоспособном состоянии, кроме периодов, в которых применение оборудования не предусматривается [196]. Данный показатель является обратным показателем коэффициента готовности, следовательно, оценивается статистически:

$$K_{нг} = 1 - K_g = \frac{T_g}{T + T_g}$$

где $K_{нг}$ – коэффициент неготовности оборудования.

- Коэффициент оперативной готовности – показатель вероятности того, что оборудование окажется в работоспособном состоянии в данный момент времени и начиная с этого момента будет работать безотказно в течение заданного периода времени [196]. Рассматриваемый параметр требует знания длительности периода безотказной работы, который необходим, в связи с чем данный показатель редко используется на практике.

- Коэффициент технического использования – это показатель отношения математического ожидания суммарного времени пребывания объекта в работоспособном состоянии к математическому ожиданию суммарного времени пребывания объекта в работоспособном состоянии и длительности простоев по причине технического обслуживания и ремонтов за время эксплуатации [196]. Рассматриваемый параметр рассчитывается статистически и может быть описан по формуле:

$$K_{ТИ} = \frac{T}{T + T_g + T_{пл}}$$

где $K_{ТИ}$ – коэффициент технического использования, $T_{пл}$ – длительность простоев, связанных с плановым техническим обслуживанием и ремонтами.

Следующий оцениваемый показатель качества обеспечения надежности оборудования – уровень ремонтпригодности, описываемый через следующие параметры:

- Вероятность восстановления оборудования определяется как вероятность того, что время восстановления работоспособного состояния

оборудования не превысит заданного значения [196] и оценивается как $P(t_B) \leq P(t_H)$, где t_B – время восстановления объекта, t_H – время восстановления объекта, заданное в нормативной или технической документации.

- Интенсивность восстановления – это плотность вероятности восстановления работоспособного состояния оборудования для рассматриваемого момента времени [196].

- Среднее время восстановления оценивается как математическое ожидание времени восстановления [196]. Рассчитать среднее время восстановления можно по формуле:

$$T_{\text{с}} = \frac{\sum_{i=1}^m T_i}{m}$$

где m – число отказов оборудования, T_i – длительность восстановления оборудования после i -отказа.

- Средняя трудоемкость восстановления – математическое ожидание трудоемкости восстановления оборудования после отказа [196]. Средняя трудоемкость рассчитывается по формуле на основе статистических оценок:

$$T_{\text{тр}_\text{с}} = \frac{\sum_{i=1}^m T_{\text{тр}_\text{с}_i}}{m}$$

где $T_{\text{тр}_\text{с}}$ – общая трудоемкость восстановления оборудования, $T_{\text{тр}_\text{с}_i}$ – трудоемкость восстановления оборудования после i -отказа.

Следующий оцениваемый показатель – уровень долговечности оборудования, который характеризуется следующими параметрами:

- Средний ресурс описывается как математическое ожидание ресурса, то есть показателя наработки оборудования от начала его эксплуатации (или возобновления после ремонта) до перехода в предельное состояние [196]. Средний ресурс рассчитывается статистическими методами и оценивается по следующей формуле:

$$T_p = \frac{\sum_{i=1}^N T_{p_i}}{N}$$

где T_p – значение ресурса, N – число единиц оборудования, T_{p_i} – значение ресурса

i-оборудования.

- Средний срок службы определяется как математическое ожидание срока службы, то есть календарной продолжительности эксплуатации оборудования от начала его эксплуатации (или возобновления после ремонта) до перехода в предельное состояние [196]. Средний срок службы рассчитывается статистическими методами и оценивается по следующей формуле:

$$T_{сл} = \frac{\sum_{i=1}^N T_{сл_i}}{N}$$

где $T_{сл}$ – значение срока службы, N – число единиц оборудования, $T_{сл_i}$ – значение срока службы *i*-оборудования.

Следующий оцениваемый показатель качества обеспечения надежности оборудования – это показатель параметров режимов работы оборудования в соответствии с заданными производителем, который оценивается по фактическим измерениям и сравнивается с заданными значениями для каждого отдельного параметра по аналогии с формулой расчета точности работы оборудования (2.1). Свертка всех значений приоритетных параметров может быть представлена в виде (2.2):

$$F_{общ} = \frac{\sum_{i=1}^N F_i}{N} \quad (2.2)$$

где $F_{общ}$ – общее значение показателя параметров режимов работы оборудования в соответствии с заданными производителем, N – число оцениваемых показателей.

Следующий показатель – длительность планового технического обслуживания относительно общей продолжительности технического обслуживания оборудования, который оценивается по фактическим измерениям (2.3):

$$T_{сравнение_ТОиР} = \frac{T_{пл}}{T_{общ}} * 100\% = \frac{T_{пл}}{T_{пл} + T_{авар}} * 100\% \quad (2.3)$$

где $T_{сравнение_ТОиР}$ – оцениваемый показатель оборудования, то есть доля длительности планового технического обслуживания относительно общей продолжительности технического обслуживания оборудования, $T_{пл}$ – длительность

планового технического обслуживания оборудования за рассматриваемый период, $T_{\text{общ}}$ – общая длительность технического обслуживания оборудования за рассматриваемый период, $T_{\text{авар}}$ – длительность внепланового технического обслуживания оборудования, проводимого вследствие наступления аварийной ситуации или наступления отказа.

Последний рассматриваемый показатель качества обеспечения надежности в группе «оборудование» – длительность простоев оборудования из-за отказов и ремонтов относительно общей продолжительности простоев оборудования, который оценивается по формуле (2.4):

$$T_{\text{сравнение_простои}} = \frac{T_{\text{отк}}}{T_{\text{простои}}} * 100\% = \frac{T_{\text{отк}}}{T_{\text{отк}} + T_{\text{проч}}} * 100\% \quad (2.4)$$

где $T_{\text{сравнение_простои}}$ – оцениваемый показатель оборудования, то есть доля длительности простоев оборудования из-за отказов и ремонтов относительно общей продолжительности простоев оборудования, $T_{\text{отк}}$ – длительность простоев оборудования из-за отказов и аварий, $T_{\text{простои}}$ – общая длительность простоев оборудования, $T_{\text{проч}}$ – длительность простоев оборудования по причине незагруженности, переналадки и других факторов.

Приведенные выше показатели группы «оборудование» следует систематизировать и определить среди них наиболее приоритетные параметры для каждого показателя (в тех случаях, где оценивается больше одного параметра) (см. таблицу 2.1). Стоит отметить, что новые формулы расчета введены только для показателей точности работы, показателя параметров режимов работы оборудования, доли длительности планового технического обслуживания и доли длительности простоев оборудования из-за отказов. В остальных случаях рекомендовано применение общепринятых формул для расчета показателей.

Таблица 2.1 – Сводная таблица оцениваемых показателей группы «оборудование»

Показатель группы «оборудование»	Формула для расчета
Уровень безотказности оборудования	<p>Наработка на отказ</p> $T_o = \frac{\sum_{i=1}^m t_i}{m} = \frac{T_M}{m}$
Уровень точности оборудования	$F_i = \left(1 - \frac{ F_{факт} - F_{план} }{F_{откл}} \right) * 100\% \quad (2.1)$
Общая эффективность работы (ОЕЕ) оборудования	$OEE = A * P * Q = \frac{GP * ICT}{PPT}$
Уровень готовности оборудования	<p>Коэффициент готовности</p> $K_z = \frac{T}{T + T_g}$
Уровень ремонтпригодности оборудования	<p>Среднее время восстановления</p> $T_g = \frac{\sum_{i=1}^m T_i}{m}$
Уровень долговечности оборудования	<p>Средний ресурс</p> $T_p = \frac{\sum_{i=1}^N T_{p-i}}{N}$ <p>Средний срок службы</p> $T_{сл} = \frac{\sum_{i=1}^N T_{сл-i}}{N}$
Параметры режимов работы оборудования в соответствии с заданными производителем	$F_{общ} = \frac{\sum_{i=1}^N F_i}{N} \quad (2.2)$

Показатель группы «оборудование»	Формула для расчета
Длительность планового технического обслуживания относительно общей продолжительности технического обслуживания оборудования	$T_{\text{сравнение_ТОиР}} = \frac{T_{\text{пл}}}{T_{\text{общ}}} * 100\% = \frac{T_{\text{пл}}}{T_{\text{пл}} + T_{\text{авар}}} * 100\% \quad (2.3)$
Длительность простоев оборудования из-за отказов и ремонтов относительно общей продолжительности простоев оборудования	$T_{\text{сравнение_простои}} = \frac{T_{\text{отк}}}{T_{\text{простои}}} * 100\% = \frac{T_{\text{отк}}}{T_{\text{отк}} + T_{\text{проч}}} * 100\% \quad (2.4)$

Источник: составлено автором

В таблице 2.1 приведено по одному рассчитываемому показателю для каждого показателя группы «оборудование» за исключением уровня долговечности оборудования, поскольку выбор расчета среднего срока службы оборудования или расчета среднего ресурса оборудования будет зависеть от следующих факторов:

- интенсивность использования (при высокой интенсивности и цикличности работы целесообразно оценивать ресурс, при низкой интенсивности и низких темпах – срок службы);
- причины вывода из эксплуатации (в случае если вывод оборудования из эксплуатации происходит по причине износа и усталости материалов и компонентов, то необходимо оценивать ресурс, в случае если оборудование подвержено физическому и моральному устареванию, частым простоям, важно оценивать срок службы);
- простота замены (в случае если запчасти оборудования можно быстро, недорого и легко заменить, то следует оценивать ресурс, в случае если замена

оборудования или деталей является дорогостоящим, длительным или трудоемким процессом, в том числе по причине логистики, следует оценивать срок службы и заранее продумывать варианты замены).

При этом предприятие может принять решение о необходимости расчета обоих параметров.

Вторая и третья группы показателей – группа «персонал» и группа «технологии и ресурсы» – оцениваются экспертными методами в соответствии с приведенной в таблице 2.2 градацией экспертных оценок по балльной системе от 0 до 10 (в скобках – значения по балльной системе от 0 до 1).

Комплексный показатель качества обеспечения надежности оборудования, раскрытый через приведенные группы показателей, формирует систему взаимосвязанных элементов (см. рисунок 2.1).

Приведенные на схеме обозначения показателей приняты для математической модели повышения качества обеспечения надежности, которая будет раскрыта далее.

Таблица 2.2 – Шкала экспертной оценки показателей группы «персонал» и группы «технологии и ресурсы», влияющих на уровень качества обеспечения надежности оборудования

Показатель	0–1 (0–0,1)	2–3 (0,2–0,3)	4–5 (0,4–0,5)	6–7 (0,6–0,7)	8–9 (0,8–0,9)	10 (1)
Показатели, связанные с компетенциями персонала						
Уровень владения навыками для проведения требуемого технического обслуживания и ремонта оборудования	На предприятии отсутствует персонал с необходимым и навыками	Персонал владеет навыками на неудовлетворительном уровне, практически не владеет навыками	Персонал владеет навыками на удовлетворительном уровне, ниже среднего уровня	Персонал владеет навыками на среднем уровне	Персонал владеет навыками на высоком уровне, достаточном для высокой эффективности процесса	Персонал владеет навыками на высочайшем уровне, максимальная эффективность процесса
Уровень компетенций в выполнении производственных операций с использованием оборудования						
Уровень владения навыками для анализа данных и выявления взаимосвязей при мониторинге работы оборудования						

Показатель	0–1 (0–0,1)	2–3 (0,2–0,3)	4–5 (0,4–0,5)	6–7 (0,6–0,7)	8–9 (0,8–0,9)	10 (1)
Показатели, связанные с технологиями и ресурсами						
Уровень мониторинга технического состояния и эксплуатации оборудования	На предприятии не проводится мониторинг	Мониторинг проводится на неудовлетворительном уровне, практически не эффективно	Мониторинг проводится на удовлетворительном уровне, ниже среднего уровня	Мониторинг проводится на среднем уровне	Мониторинг проводится на высоком уровне, достаточном для высокой эффективности и процесса	Мониторинг проводится на высочайшем уровне, максимальная эффективность процесса
Уровень доступности инструментов для проведения технического обслуживания и ремонтов	На предприятии отсутствуют инструменты	Доступность, количество и качество инструментов на неудовлетворительном уровне	Доступность, количество и качество инструментов на удовлетворительном уровне, ниже среднего уровня достаточности	Доступность, количество и качество инструментов на среднем уровне	Доступность, количество и качество инструментов на высоком уровне, достаточном для высокой эффективности и процесса	Доступность, количество и качество инструментов на высочайшем уровне, максимальная эффективность процесса
Уровень входного контроля сырья и материалов для изготовления изделий	На предприятии не проводится входной контроль сырья	Входной контроль проводится на неудовлетворительном уровне, практически не эффективно	Входной контроль проводится на удовлетворительном уровне, ниже среднего уровня	Входной контроль проводится на среднем уровне	Входной контроль проводится на высоком уровне, достаточном для высокой эффективности и процесса	Входной контроль проводится на высочайшем уровне, максимальная эффективность процесса

Источник: разработано автором



Рисунок 2.1 – Комплексный показатель качества обеспечения надежности оборудования

Источник: разработано автором [10; 11]

Представленный комплексный подход подтверждает необходимость реализации общепринятой среди производителей регулярной практики

отслеживания уровня качества процессов, обеспечивает целесообразность вложения инвестиций в поддержание высокого уровня надежности и технологичности производственного парка, а также демонстрирует важность учета показателей, связанных с влиянием персонала, технологий и ресурсов.

2.3 Математическая модель повышения качества обеспечения надежности оборудования на основе комплексного показателя качества

Опишем математическую модель повышения качества обеспечения надежности оборудования на основе предложенного комплексного показателя качества, представленного ранее [12]. Обозначим отдельные оцениваемые показатели из групп показателей e «оборудование», p «персонал» и t «технологии и ресурсы».

При анализе показателей надежности всей совокупности оборудования предположим, что оборудование может быть представлено единичными образцами (автономными станками) и группой станков, объединенных в производственную или конвейерную линию. Идентификатор принадлежности к автономным станкам обозначим i , к группе станков – j .

Вначале рассмотрим группу показателей e «оборудование» применительно к автономным станкам. Автономный станок способен выполнять свои функции самостоятельно, без необходимости непосредственной интеграции в производственную линию (конвейер) или сложную систему управления. При этом он использует общие ресурсы, такие как электроэнергия и сеть промышленного интернета.

Для удобства и единообразия введем обозначения для каждого отдельного показателя, оцениваемого в рамках математической модели в соответствии с комплексным показателем качества. Верхний индекс означает конкретный показатель качества обеспечения надежности (например, индекс f означает принадлежность показателю уровня безотказности, индекс a означает принадлежность показателю уровня точности и т.д.), нижний индекс обозначает принадлежность к конкретному станку i . Примем следующие обозначения для автономных станков:

r_i^f – показатель уровня безотказности i -станка в рамках группы показателей e «оборудование»;

r_i^a – показатель уровня точности работы i -станка в рамках группы показателей e «оборудование»;

r_i^o – показатель общей эффективности работы (ОЕЕ) i -станка в рамках группы показателей e «оборудование»;

r_i^r – показатель уровня готовности i -станка в рамках группы показателей e «оборудование»;

r_i^m – показатель уровня ремонтпригодности i -станка в рамках группы показателей e «оборудование»;

r_i^u – показатель уровня долговечности i -станка в рамках группы показателей e «оборудование»;

r_i^b – показатель параметров режимов работы i -станка в соответствии с заданными производителем в рамках группы показателей e «оборудование»;

r_i^h – показатель длительности планового технического обслуживания i -станка относительно общей продолжительности технического обслуживания i -станка в рамках группы показателей e «оборудование»;

r_i^d – показатель длительности простоев i -станка из-за отказов и ремонтов относительно общей продолжительности простоев i -станка в рамках группы показателей e «оборудование»;

r_i^e – комплексный показатель качества обеспечения надежности i -станка в рамках группы показателей e «оборудование».

Принадлежность к конкретному станку варьируется от 1 до I , то есть $i = [1; I]$, где I – общее количество оцениваемых автономных станков.

В целях учета приоритетности и важности показателей для конкретных единиц оборудования введем весовой коэффициент для группы показателей e «оборудование» (принадлежность к данной группе показателей обозначена верхним индексом) и весовые коэффициенты для отдельных показателей группы e «оборудование»:

k_i^e – весовой коэффициент группы показателей e «оборудование» для i -станка;

k_i^{ef} – весовой коэффициент показателя уровня безотказности i -станка в рамках группы показателей e «оборудование»;

k_i^{ea} – весовой коэффициент показателя уровня точности работы i -станка в рамках группы показателей e «оборудование»;

k_i^{eo} – весовой коэффициент показателя общей эффективности работы (ОЕЕ) i -станка в рамках группы показателей e «оборудование»;

k_i^{er} – весовой коэффициент показателя уровня готовности i -станка в рамках группы показателей e «оборудование»;

k_i^{em} – весовой коэффициент показателя уровня ремонтпригодности i -станка в рамках группы показателей e «оборудование»;

k_i^{eu} – весовой коэффициент показателя уровня долговечности i -станка в рамках группы показателей e «оборудование»;

k_i^{eb} – весовой коэффициент показателя параметров режимов работы i -станка в соответствии с заданными производителем в рамках группы показателей e «оборудование»;

k_i^{eh} – весовой коэффициент показателя длительности планового технического обслуживания i -станка относительно общей продолжительности технического обслуживания i -станка в рамках группы показателей e «оборудование»;

k_i^{ed} – весовой коэффициент показателя длительности простоев i -станка из-за отказов и ремонтов относительно общей продолжительности простоев i -станка в рамках группы показателей e «оборудование».

При этом сумма весовых коэффициентов (величин k) по определению весовых коэффициентов равна единице (2.5):

$$k_i^{ef} + k_i^{ea} + k_i^{eo} + k_i^{er} + k_i^{em} + k_i^{eu} + k_i^{eb} + k_i^{eh} + k_i^{ed} = 1 \quad (2.5)$$

В целях приведения всех показателей группы показателей e «оборудование»

к единому диапазону значений и к единому масштабу измерений необходимо провести нормирование показателей с применением минимально-максимального нормирования. Приведем пример обозначений для нормирования показателя r_i^f (2.6):

r_i^{f-n} – нормированный показатель уровня безотказности i -станка в рамках группы показателей e «оборудование»;

r_i^{f-min} – минимальное значение показателя уровня безотказности i -станка в рамках группы показателей e «оборудование»;

r_i^{f-max} – максимальное значение показателя уровня безотказности i -станка в рамках группы показателей e «оборудование»;

$$r_i^{f-n} = \frac{r_i^f - r_i^{f-min}}{r_i^{f-max} - r_i^{f-min}} \quad (2.6)$$

Важно отметить, что нормирование показателей требуется в том случае, если значение показателя необходимо получить методом расчета. Введем нормированное значение по аналогии с показателем уровня безотказности r_i^{f-n} для остальных показателей (2.7–2.14):

r_i^{a-n} – нормированный показатель уровня точности работы i -станка в рамках группы показателей e «оборудование»;

r_i^{a-min} – минимальное значение показателя уровня точности работы i -станка в рамках группы показателей e «оборудование»;

r_i^{a-max} – максимальное значение показателя уровня точности работы i -станка в рамках группы показателей e «оборудование»;

$$r_i^{a-n} = \frac{r_i^a - r_i^{a-min}}{r_i^{a-max} - r_i^{a-min}} \quad (2.7)$$

r_i^{o-n} – нормированный показатель общей эффективности работы (ОЕЕ) i -станка в рамках группы показателей e «оборудование»;

r_i^{o-min} – минимальное значение показателя общей эффективности работы (ОЕЕ) i -станка в рамках группы показателей e «оборудование»;

$r_i^{o_max}$ – максимальное значение показателя общей эффективности работы (ОЭЕ) i -станка в рамках группы показателей e «оборудование»;

$$r_i^{o_n} = \frac{r_i^o - r_i^{o_min}}{r_i^{o_max} - r_i^{o_min}} \quad (2.8)$$

$r_i^{r_n}$ – нормированный показатель уровня готовности i -станка в рамках группы показателей e «оборудование»;

$r_i^{r_min}$ – минимальное значение показателя уровня готовности i -станка в рамках группы показателей e «оборудование»;

$r_i^{r_max}$ – максимальное значение показателя уровня готовности i -станка в рамках группы показателей e «оборудование»;

$$r_i^{r_n} = \frac{r_i^r - r_i^{r_min}}{r_i^{r_max} - r_i^{r_min}} \quad (2.9)$$

$r_i^{m_n}$ – нормированный показатель уровня ремонтпригодности i -станка в рамках группы показателей e «оборудование»;

$r_i^{m_min}$ – минимальное значение показателя уровня ремонтпригодности i -станка в рамках группы показателей e «оборудование»;

$r_i^{m_max}$ – максимальное значение показателя уровня ремонтпригодности i -станка в рамках группы показателей e «оборудование»;

$$r_i^{m_n} = \frac{r_i^m - r_i^{m_min}}{r_i^{m_max} - r_i^{m_min}} \quad (2.10)$$

$r_i^{u_n}$ – нормированный показатель уровня долговечности i -станка в рамках группы показателей e «оборудование»;

$r_i^{u_min}$ – минимальное значение показателя уровня долговечности i -станка в рамках группы показателей e «оборудование»;

$r_i^{u_max}$ – максимальное значение показателя уровня долговечности i -станка в рамках группы показателей e «оборудование»;

$$r_i^{u_n} = \frac{r_i^u - r_i^{u_min}}{r_i^{u_max} - r_i^{u_min}} \quad (2.11)$$

$r_i^{b_n}$ – нормированный показатель параметров режимов работы i -станка в

соответствии с заданными производителем в рамках группы показателей e «оборудование»;

r_i^{b-min} – минимальное значение показателя параметров режимов работы i -станка в соответствии с заданными производителем в рамках группы показателей e «оборудование»;

r_i^{b-max} – максимальное значение показателя параметров режимов работы i -станка в соответствии с заданными производителем в рамках группы показателей e «оборудование»;

$$r_i^{b-n} = \frac{r_i^b - r_i^{b-min}}{r_i^{b-max} - r_i^{b-min}} \quad (2.12)$$

r_i^{h-n} – нормированный показатель длительности планового технического обслуживания i -станка относительно общей продолжительности технического обслуживания i -станка в рамках группы показателей e «оборудование»;

r_i^{h-min} – минимальное значение показателя длительности планового технического обслуживания i -станка относительно общей продолжительности технического обслуживания i -станка в рамках группы показателей e «оборудование»;

r_i^{h-max} – максимальное значение показателя длительности планового технического обслуживания i -станка относительно общей продолжительности технического обслуживания i -станка в рамках группы показателей e «оборудование»;

$$r_i^{h-n} = \frac{r_i^h - r_i^{h-min}}{r_i^{h-max} - r_i^{h-min}} \quad (2.13)$$

r_i^{d-n} – нормированный показатель длительности простоев i -станка из-за отказов и ремонтов относительно общей продолжительности простоев i -станка в рамках группы показателей e «оборудование»;

r_i^{d-min} – минимальное значение показателя длительности простоев i -станка из-за отказов и ремонтов относительно общей продолжительности простоев i -станка в рамках группы показателей e «оборудование»;

r_i^{d-max} – максимальное значение показателя длительности простоев i -станка из-за отказов и ремонтов относительно общей продолжительности простоев i -станка в рамках группы показателей e «оборудование»;

$$r_i^{d-n} = \frac{r_i^d - r_i^{d-min}}{r_i^{d-max} - r_i^{d-min}} \quad (2.14)$$

Тогда комплексный показатель качества обеспечения надежности i -станка в рамках группы показателей e «оборудование» будет равен (2.15):

$$r_i^e = k_i^{ef} r_i^{f-n} + k_i^{ea} r_i^{a-n} + k_i^{eo} r_i^{o-n} + k_i^{er} r_i^{r-n} + k_i^{em} r_i^{m-n} + k_i^{eu} r_i^{u-n} + k_i^{eb} r_i^{b-n} + k_i^{eh} r_i^{h-n} + k_i^{ed} r_i^{d-n} \quad (2.15)$$

Аналогично можно представить группу показателей p «персонал» для i -станка и привести весовые коэффициенты для группы p «персонал» и показателей данной группы (верхний индекс p означает принадлежность к данной группе). Примем следующие обозначения:

r_i^s – показатель уровня владения навыками для проведения требуемого технического обслуживания и ремонта i -станка в рамках группы показателей p «персонал»;

r_i^w – показатель уровня компетенций в выполнении производственных операций при работе с i -станком в рамках группы показателей p «персонал»;

r_i^v – показатель уровня владения навыками для анализа данных и выявления взаимосвязей при мониторинге работы i -станка в рамках группы показателей p «персонал»;

r_i^p – комплексный показатель качества обеспечения надежности i -станка в рамках группы показателей p «персонал»;

k_i^p – весовой коэффициент группы показателей p «персонал» для i -станка;

k_i^{ps} – весовой коэффициент показателя уровня владения навыками для проведения требуемого технического обслуживания и ремонта i -станка в рамках группы показателей p «персонал»;

k_i^{pw} – весовой коэффициент показателя уровня компетенций в выполнении производственных операций при работе с i -станком в рамках группы показателей p «персонал»;

k_i^{pv} – весовой коэффициент показателя уровня владения навыками для анализа данных и выявления взаимосвязей при мониторинге работы i -станка в рамках группы показателей p «персонал».

По определению сумма весовых коэффициентов равна единице (2.16):

$$k_i^{ps} + k_i^{pw} + k_i^{pv} = 1 \quad (2.16)$$

Нормированные показатели вводить не требуется, так как показатели группы p «персонал» оцениваются экспертным методом.

Тогда комплексный показатель качества обеспечения надежности i -станка в рамках группы показателей p «персонал» равен (2.17):

$$r_i^p = k_i^{ps} r_i^s + k_i^{pw} r_i^w + k_i^{pv} r_i^v \quad (2.17)$$

Аналогично представим группу показателей t «технологии и ресурсы» для i -станка. Примем следующие обозначения:

r_i^x – показатель уровня мониторинга технического состояния и эксплуатации i -станка в рамках группы показателей t «технологии и ресурсы»;

r_i^l – показатель уровня доступности инструментов для проведения технического обслуживания и ремонтов i -станка в рамках группы показателей t «технологии и ресурсы»;

r_i^q – показатель уровня входного контроля сырья и материалов для изготовления изделий с применением i -станка в рамках группы показателей t «технологии и ресурсы»;

r_i^t – комплексный показатель качества обеспечения надежности i -станка в рамках группы показателей t «технологии и ресурсы»;

k_i^t – весовой коэффициент группы показателей t «технологии и ресурсы» для i -станка.

Тогда сумма весовых коэффициентов групп показателей e «оборудование», p «персонал», t «технологии и ресурсы» по определению равна единице (2.18):

$$k_i^e + k_i^p + k_i^t = 1 \quad (2.18)$$

Далее введем весовые коэффициенты для каждого отдельного показателя

группы показателей t «технологии и ресурсы», где верхний индекс t означает принадлежность к данной группе:

k_i^{tx} – весовой коэффициент показателя уровня мониторинга технического состояния и эксплуатации i -станка в рамках группы показателей t «технологии и ресурсы»;

k_i^{tl} – весовой коэффициент показателя уровня доступности инструментов для проведения технического обслуживания и ремонтов i -станка в рамках группы показателей t «технологии и ресурсы»;

k_i^{tq} – весовой коэффициент показателя уровня входного контроля сырья и материалов для изготовления изделий с применением i -станка в рамках группы показателей t «технологии и ресурсы».

Следовательно, по определению сумма весовых коэффициентов отдельных показателей группы t «технологии и ресурсы» также равна единице (2.19):

$$k_i^{tx} + k_i^{tl} + k_i^{tq} = 1 \quad (2.19)$$

Нормированные показатели вводить не требуется, так как показатели группы t «технологии и ресурсы» оцениваются экспертным методом.

Тогда комплексный показатель качества обеспечения надежности i -станка в рамках группы показателей t «технологии и ресурсы» равен:

$$r_i^t = k_i^{tx} r_i^x + k_i^{tl} r_i^l + k_i^{tq} r_i^q \quad (2.20)$$

Комплексный показатель качества обеспечения надежности i -станка в рамках всех групп показателей можно представить через формулы (2.15, 2.17, 2.20), для чего примем:

r_i – комплексный показатель качества обеспечения надежности i -станка в разрезе трех групп показателей – e «оборудование», p «персонал», t «технологии и ресурсы»;

E – общее число показателей в группе показателей e «оборудование»; $E \geq 1$, в текущей математической модели $E = 9$;

P – общее число показателей в группе показателей p «персонал»;

$P \geq 1$, в текущей математической модели $P = 3$;

T – общее число показателей в группе показателей t «технологии и ресурсы»; $T \geq 1$, в текущей математической модели $T = 3$.

Тогда комплексный показатель качества обеспечения надежности i -станка равен (2.21):

$$r_i = \frac{k_i^e r_i^e}{E} + \frac{k_i^p r_i^p}{P} + \frac{k_i^t r_i^t}{T} \quad (2.21)$$

Аналогичным образом представим математическую модель качества обеспечения надежности для группы станков. Группа станков объединена в единую конвейерную или производственную линию, в рамках модели оценивается надежность всей линии без фокусировки на конкретных системах, составляющих линию. Как правило, группа станков расположена на предметно-замкнутом участке серийного производства. Наибольшую потерю эффективности при отказе одного из станков, входящего в группу станков, можно наблюдать для конвейерной линии, поскольку переход к следующей технологической операции в рамках линии невозможен. Для производственной линии остановка несет значительные неудобства и лишние трудозатраты, например, при переходе к другому станку для последующей операции, что объясняется низкой гибкостью производственной линии. В случае с групповыми станками конвейерной линии надежность всей группы станков можно описать как надежность при последовательном соединении, когда вышедший из строя один элемент влияет на отказ всей системы, при производственной линии надежность можно приближенно описать как надежность параллельного соединения, когда имеются резервы перехода к другому станку, однако производительность даже с учетом компенсации отказа снижается, в частности по причине внутрицеховой логистики.

Введем обозначения аналогично автономным станкам. Верхний индекс означает принадлежность конкретному показателю качества, нижний индекс имеет два обозначения – g для указания, что показатель принадлежит группе станков (принято для удобства при сверстке показателей автономных станков и групп станков), j – для указания, что показатель принадлежит конкретной группе станков.

Примем следующие обозначения для группы станков:

r_{gj}^f – показатель уровня безотказности j -группы станков в рамках группы показателей e «оборудование»;

r_{gj}^a – показатель уровня точности работы j -группы станков в рамках группы показателей e «оборудование»;

r_{gj}^o – показатель общей эффективности работы (ОЕЕ) j -группы станков в рамках группы показателей e «оборудование»;

r_{gj}^r – показатель уровня готовности j -группы станков в рамках группы показателей e «оборудование»;

r_{gj}^m – показатель уровня ремонтпригодности j -группы станков в рамках группы показателей e «оборудование»;

r_{gj}^u – показатель уровня долговечности j -группы станков в рамках группы показателей e «оборудование»;

r_{gj}^b – показатель параметров режимов работы j -группы станков в соответствии с заданными производителем в рамках группы показателей e «оборудование»;

r_{gj}^h – показатель длительности планового технического обслуживания j -группы станков относительно общей продолжительности технического обслуживания j -группы станков в рамках группы показателей e «оборудование»;

r_{gj}^d – показатель длительности простоев j -группы станков из-за отказов и ремонтов относительно общей продолжительности простоев j -группы станков в рамках группы показателей e «оборудование»;

r_{gj}^e – комплексный показатель качества обеспечения надежности j -группы станков в рамках группы показателей e «оборудование».

Обозначение группы станков варьируется от 1 до J , следовательно, $j = [1; J]$, где J – общее количество оцениваемых групп станков.

Аналогично введем весовые коэффициенты для группы показателей e «оборудование» и отдельных показателей группы e «оборудование» для групп

станков, верхний индекс e означает принадлежность к данной группе показателей:

k_{gj}^e – весовой коэффициент группы показателей e «оборудование» для j -группы станков;

k_{gj}^{ef} – весовой коэффициент показателя уровня безотказности j -группы станков в рамках группы показателей e «оборудование»;

k_{gj}^{ea} – весовой коэффициент показателя уровня точности работы j -группы станков в рамках группы показателей e «оборудование»;

k_{gj}^{eo} – весовой коэффициент показателя общей эффективности работы (ОЕЕ) j -группы станков в рамках группы показателей e «оборудование»;

k_{gj}^{er} – весовой коэффициент показателя уровня готовности j -группы станков в рамках группы показателей e «оборудование»;

k_{gj}^{em} – весовой коэффициент показателя уровня ремонтпригодности j -группы станков в рамках группы показателей e «оборудование»;

k_{gj}^{eu} – весовой коэффициент показателя уровня долговечности j -группы станков в рамках группы показателей e «оборудование»;

k_{gj}^{eb} – весовой коэффициент показателя параметров режимов работы j -группы станков в соответствии с заданными производителем в рамках группы показателей e «оборудование»;

k_{gj}^{eh} – весовой коэффициент показателя длительности планового технического обслуживания j -группы станков относительно общей продолжительности технического обслуживания j -группы станков в рамках группы показателей e «оборудование»;

k_{gj}^{ed} – весовой коэффициент показателя длительности простоев j -группы станков из-за отказов и ремонтов относительно общей продолжительности простоев j -группы станков в рамках группы показателей e «оборудование».

Тогда, согласно определению весовых коэффициентов, их сумма равна единице (2.22):

$$k_{gj}^{ef} + k_{gj}^{ea} + k_{gj}^{eo} + k_{gj}^{er} + k_{gj}^{em} + k_{gj}^{eu} + k_{gj}^{eb} + k_{gj}^{eh} + k_{gj}^{ed} = 1 \quad (2.22)$$

Аналогично приведем нормированные показатели группы *e* «оборудование» для групп станков (2.23–2.31):

r_{gj}^{f-n} – нормированный показатель уровня безотказности *j*-группы станков в рамках группы показателей *e* «оборудование»;

r_{gj}^{f-min} – минимальное значение показателя уровня безотказности *j*-группы станков в рамках группы показателей *e* «оборудование»;

r_{gj}^{f-max} – максимальное значение показателя уровня безотказности *j*-группы станков в рамках группы показателей *e* «оборудование»;

$$r_{gj}^{f-n} = \frac{r_{gj}^f - r_{gj}^{f-min}}{r_{gj}^{f-max} - r_{gj}^{f-min}} \quad (2.23)$$

r_{gj}^{a-n} – нормированный показатель уровня точности работы *j*-группы станков в рамках группы показателей *e* «оборудование»;

r_{gj}^{a-min} – минимальное значение показателя уровня точности работы *j*-группы станков в рамках группы показателей *e* «оборудование»;

r_{gj}^{a-max} – максимальное значение показателя уровня точности работы *j*-группы станков в рамках группы показателей *e* «оборудование»;

$$r_{gj}^{a-n} = \frac{r_{gj}^a - r_{gj}^{a-min}}{r_{gj}^{a-max} - r_{gj}^{a-min}} \quad (2.24)$$

r_{gj}^{o-n} – нормированный показатель общей эффективности работы (ОЕЕ) *j*-группы станков в рамках группы показателей *e* «оборудование»;

r_{gj}^{o-min} – минимальное значение показателя общей эффективности работы (ОЕЕ) *j*-группы станков в рамках группы показателей *e* «оборудование»;

r_{gj}^{o-max} – максимальное значение показателя общей эффективности работы (ОЕЕ) *j*-группы станков в рамках группы показателей *e* «оборудование»;

$$r_{gj}^{o-n} = \frac{r_{gj}^o - r_{gj}^{o-min}}{r_{gj}^{o-max} - r_{gj}^{o-min}} \quad (2.25)$$

r_{gj}^{r-n} – нормированный показатель уровня готовности j -группы станков в рамках группы показателей e «оборудование»;

r_{gj}^{r-min} – минимальное значение показателя уровня готовности j -группы станков в рамках группы показателей e «оборудование»;

r_{gj}^{r-max} – максимальное значение показателя уровня готовности j -группы станков в рамках группы показателей e «оборудование»;

$$r_{gj}^{r-n} = \frac{r_{gj}^r - r_{gj}^{r-min}}{r_{gj}^{r-max} - r_{gj}^{r-min}} \quad (2.26)$$

r_{gj}^{m-n} – нормированный показатель уровня ремонтпригодности j -группы станков в рамках группы показателей e «оборудование»;

r_{gj}^{m-min} – минимальное значение показателя уровня ремонтпригодности j -группы станков в рамках группы показателей e «оборудование»;

r_{gj}^{m-max} – максимальное значение показателя уровня ремонтпригодности j -группы станков в рамках группы показателей e «оборудование»;

$$r_{gj}^{m-n} = \frac{r_{gj}^m - r_{gj}^{m-min}}{r_{gj}^{m-max} - r_{gj}^{m-min}} \quad (2.27)$$

r_{gj}^{u-n} – нормированный показатель уровня долговечности j -группы станков в рамках группы показателей e «оборудование»;

r_{gj}^{u-min} – минимальное значение показателя уровня долговечности j -группы станков в рамках группы показателей e «оборудование»;

r_{gj}^{u-max} – максимальное значение показателя уровня долговечности j -группы станков в рамках группы показателей e «оборудование»;

$$r_{gj}^{u-n} = \frac{r_{gj}^u - r_{gj}^{u-min}}{r_{gj}^{u-max} - r_{gj}^{u-min}} \quad (2.28)$$

r_{gj}^{b-n} – нормированный показатель параметров режимов работы j -группы станков в соответствии с заданными производителем в рамках группы показателей e «оборудование»;

r_{gj}^{b-min} – минимальное значение показателя параметров режимов работы j -

группы станков в соответствии с заданными производителем в рамках группы показателей e «оборудование»;

$r_{gj}^{b,max}$ – максимальное значение показателя параметров режимов работы j -группы станков в соответствии с заданными производителем в рамках группы показателей e «оборудование»;

$$r_{gj}^{b,n} = \frac{r_{gj}^b - r_{gj}^{b,min}}{r_{gj}^{b,max} - r_{gj}^{b,min}} \quad (2.29)$$

$r_{gj}^{h,n}$ – нормированный показатель длительности планового технического обслуживания j -группы станков относительно общей продолжительности технического обслуживания j -группы станков в рамках группы показателей e «оборудование»;

$r_{gj}^{h,min}$ – минимальное значение показателя длительности планового технического обслуживания j -группы станков относительно общей продолжительности технического обслуживания j -группы станков в рамках группы показателей e «оборудование»;

$r_{gj}^{h,max}$ – максимальное значение показателя длительности планового технического обслуживания j -группы станков относительно общей продолжительности технического обслуживания j -группы станков в рамках группы показателей e «оборудование»;

$$r_{gj}^{h,n} = \frac{r_{gj}^h - r_{gj}^{h,min}}{r_{gj}^{h,max} - r_{gj}^{h,min}} \quad (2.30)$$

$r_{gj}^{d,n}$ – нормированный показатель длительности простоев j -группы станков из-за отказов и ремонтов относительно общей продолжительности простоев j -группы станков в рамках группы показателей e «оборудование»;

$r_{gj}^{d,min}$ – минимальное значение показателя длительности простоев j -группы станков из-за отказов и ремонтов относительно общей продолжительности простоев j -группы станков в рамках группы показателей e «оборудование»;

$r_{gj}^{d,max}$ – максимальное значение показателя длительности простоев j -

группы станков из-за отказов и ремонтов относительно общей продолжительности простоев j -группы станков в рамках группы показателей e «оборудование»;

$$r_{gj}^{d-n} = \frac{r_{gj}^d - r_{gj}^{d-min}}{r_{gj}^{d-max} - r_{gj}^{d-min}} \quad (2.31)$$

Тогда комплексный показатель качества обеспечения надежности j -группы станков в рамках группы показателей e «оборудование» равен (2.32):

$$r_{gj}^e = k_{gj}^{ef} r_{gj}^{f-n} + k_{gj}^{ea} r_{gj}^{a-n} + k_{gj}^{eo} r_{gj}^{o-n} + k_{gj}^{er} r_{gj}^{r-n} + k_{gj}^{em} r_{gj}^{m-n} + k_{gj}^{eu} r_{gj}^{u-n} + k_{gj}^{eb} r_{gj}^{b-n} + k_{gj}^{eh} r_{gj}^{h-n} + k_{gj}^{ed} r_{gj}^{d-n} \quad (2.32)$$

Аналогично представим группу показателей p «персонал» для j -группы станков, верхний индекс p означает принадлежность к данной группе показателей. Примем следующие обозначения:

r_{gj}^s – показатель уровня владения навыками для проведения требуемого технического обслуживания и ремонта j -группы станков в рамках группы показателей p «персонал»;

r_{gj}^w – показатель уровня компетенций в выполнении производственных операций при работе с j -группой станков в рамках группы показателей p «персонал»;

r_{gj}^v – показатель уровня владения навыками для анализа данных и выявления взаимосвязей при мониторинге работы j -группы станков в рамках группы показателей p «персонал»;

r_{gj}^p – комплексный показатель качества обеспечения надежности j -группы станков в рамках группы показателей p «персонал»;

k_{gj}^p – весовой коэффициент группы показателей p «персонал» для j -группы станков;

k_{gj}^{ps} – весовой коэффициент показателя уровня владения навыками для проведения требуемого технического обслуживания и ремонта j -группы станков в рамках группы показателей p «персонал»;

k_{gj}^{pw} – весовой коэффициент показателя уровня компетенций в выполнении производственных операций при работе с j -группой станков в рамках группы

показателей p «персонал»;

k_{gj}^{pv} – весовой коэффициент показателя уровня владения навыками для анализа данных и выявления взаимосвязей при мониторинге работы j -группы станков в рамках группы показателей p «персонал».

Тогда по определению сумма весовых коэффициентов равна единице (2.33):

$$k_{gj}^{ps} + k_{gj}^{pw} + k_{gj}^{pv} = 1 \quad (2.33)$$

Нормированные показатели вводить не требуется, поскольку данные показатели оцениваются экспертным методом. Тогда комплексный показатель качества обеспечения надежности j -группы станков в рамках группы показателей p «персонал» равен (2.34):

$$r_{gj}^p = k_{gj}^{ps} r_{gj}^s + k_{gj}^{pw} r_{gj}^w + k_{gj}^{pv} r_{gj}^v \quad (2.34)$$

Аналогично представим группу показателей t «технологии и ресурсы» для j -группы станков. Примем следующие обозначения:

r_{gj}^x – показатель уровня мониторинга технического состояния и эксплуатации j -группы станков в рамках группы показателей t «технологии и ресурсы»;

r_{gj}^l – показатель уровня доступности инструментов для проведения технического обслуживания и ремонтов j -группы станков в рамках группы показателей t «технологии и ресурсы»;

r_{gj}^q – показатель уровня входного контроля сырья и материалов, используемых для изготовления изделий с применением j -группы станков в рамках группы показателей t «технологии и ресурсы»;

r_{gj}^t – комплексный показатель качества обеспечения надежности j -группы станков в рамках группы показателей t «технологии и ресурсы»;

k_{gj}^t – весовой коэффициент группы показателей t «технологии и ресурсы» для j -группы станков.

Следовательно, сумма весовых коэффициентов групп показателей e «оборудование», p «персонал», t «технологии и ресурсы» по определению равна

единице (2.35):

$$k_{gj}^e + k_{gj}^p + k_{gj}^t = 1 \quad (2.35)$$

Далее введем весовые коэффициенты для каждого отдельного показателя, верхний индекс t означает принадлежность к данной группе:

k_{gj}^{tx} – весовой коэффициент показателя уровня мониторинга технического состояния и эксплуатации j -группы станков в рамках группы показателей t «технологии и ресурсы»;

k_{gj}^{tl} – весовой коэффициент показателя уровня доступности инструментов для проведения технического обслуживания и ремонтов j -группы станков в рамках группы показателей t «технологии и ресурсы»;

k_{gj}^{tq} – весовой коэффициент показателя уровня входного контроля сырья и материалов для изготовления изделий с применением j -группы станков в рамках группы показателей t «технологии и ресурсы».

По определению сумма весовых коэффициентов равна единице (2.36):

$$k_{gj}^{tx} + k_{gj}^{tl} + k_{gj}^{tq} = 1 \quad (2.36)$$

Нормированные показатели вводить не требуется, поскольку оценка осуществляется экспертным методом. Тогда комплексный показатель качества обеспечения надежности j -группы станков в рамках группы показателей t «технологии и ресурсы» равен (2.37):

$$r_{gj}^t = k_{gj}^{tx} r_{gj}^x + k_{gj}^{tl} r_{gj}^l + k_{gj}^{tq} r_{gj}^q \quad (2.37)$$

Комплексный показатель качества обеспечения надежности j -группы станков в рамках всех групп показателей (2.38) можно представить через формулы (2.32, 2.34, 2.37):

$$r_{gj} = \frac{k_{gj}^e r_{gj}^e}{E} + \frac{k_{gj}^p r_{gj}^p}{P} + \frac{k_{gj}^t r_{gj}^t}{T} \quad (2.38)$$

где r_{gj} – комплексный показатель качества обеспечения надежности j -группы станков с учетом групп показателей e «оборудование», p «персонал», t «технологии и ресурсы».

Таким образом, можно представить агрегированный показатель качества обеспечения надежности системы оборудования, содержащей как автономные i -станки, так и j -группы станков. Примем следующие обозначения весовых коэффициентов:

k_i – весовой коэффициент i -станка;

k_{gj} – весовой коэффициент j -группы станков.

По определению сумма весовых коэффициентов равна единице (2.39):

$$\sum_{i=1}^I k_i + \sum_{j=1}^J k_{gj} = 1 \quad (2.39)$$

Тогда агрегированный показатель качества обеспечения надежности системы оборудования на основе формул (2.21 и 2.38) равен (2.40):

$$R = \frac{\sum_{i=1}^I k_i r_i}{I} + \frac{\sum_{j=1}^J k_{gj} r_{gj}}{J} \quad (2.40)$$

где R – агрегированный показатель качества обеспечения надежности системы оборудования.

Для наглядности взаимосвязи между приведенными показателями составим таблицу 2.3 с обозначениями элементов. Предположим, что на предприятии имеется 2 автономных станка ($I = 2$) и 3 группы станков, объединенных в линию ($J = 3$). При этом для упрощения будем оценивать только показатели безотказности (r_i^{f-n} и r_{gj}^{f-n}), точности (r_i^{a-n} и r_{gj}^{a-n}) и готовности (r_i^{r-n} и r_{gj}^{r-n}) в рамках группы показателей e «оборудование» ($E = 3$), показатели уровня владения навыками технического обслуживания (r_i^s и r_{gj}^s) и компетенций в выполнении производственных операций (r_i^w и r_{gj}^w) в рамках группы показателей p «персонал» ($P = 2$), показатель уровня мониторинга (r_i^x и r_{gj}^x) в рамках группы показателей t «технологии и ресурсы» ($T = 1$). Также приведены коэффициенты важности групп показателей, самих показателей, станка и группы станков. В скобках в таблице 2.3 приведены номера формул расчета или принятые обозначения.

Таблица 2.3 – Система взаимосвязи отдельных элементов математической модели оценки качества обеспечения надежности оборудования

Наименование показателя	Автономный станок 1 ($i = 1$)		Автономный станок 2 ($i = 2$)		Группа станков 1 ($j = 1$)		Группа станков 2 ($j = 2$)		Группа станков 3 ($j = 3$)	
	Значение показателя	Коэффициент важности	Значение показателя	Коэффициент важности	Значение показателя	Коэффициент важности	Значение показателя	Коэффициент важности	Значение показателя	Коэффициент важности
Уровень безотказности оборудования (r_i^{f-n} и r_{gj}^{f-n})	r_1^{f-n}	k_1^{ef}	r_2^{f-n}	k_2^{ef}	r_{g1}^{f-n}	k_{g1}^{ef}	r_{g2}^{f-n}	k_{g2}^{ef}	r_{g3}^{f-n}	k_{g3}^{ef}
Уровень точности работы оборудования (r_i^{a-n} и r_{gj}^{a-n})	r_1^{a-n}	k_1^{ea}	r_2^{a-n}	k_2^{ea}	r_{g1}^{a-n}	k_{g1}^{ea}	r_{g2}^{a-n}	k_{g2}^{ea}	r_{g3}^{a-n}	k_{g3}^{ea}
Уровень готовности оборудования (r_i^{r-n} и r_{gj}^{r-n})	r_1^{r-n}	k_1^{er}	r_2^{r-n}	k_2^{er}	r_{g1}^{r-n}	k_{g1}^{er}	r_{g2}^{r-n}	k_{g2}^{er}	r_{g3}^{r-n}	k_{g3}^{er}
Комплексный показатель качества обеспечения надежности в рамках группы показателей e «оборудование» (2.15, 2.32)	r_1^e		r_2^e		r_{g1}^e		r_{g2}^e		r_{g3}^e	
Весовой коэффициент группы показателей e «оборудование» для станка (k_i^e) и группы станков (k_{gj}^e)	k_1^e		k_2^e		k_{g1}^e		k_{g2}^e		k_{g3}^e	
Уровень владения навыками для проведения требуемого технического обслуживания и ремонта (r_i^s и r_{gj}^s)	r_1^s	k_1^{ps}	r_2^s	k_2^{ps}	r_{g1}^s	k_{g1}^{ps}	r_{g2}^s	k_{g2}^{ps}	r_{g3}^s	k_{g3}^{ps}
Уровень компетенций в выполнении производственных операций (r_i^w и r_{gj}^w)	r_1^w	k_1^{pw}	r_2^w	k_2^{pw}	r_{g1}^w	k_{g1}^{pw}	r_{g2}^w	k_{g2}^{pw}	r_{g3}^w	k_{g3}^{pw}

Наименование показателя	Автономный станок 1 ($i = 1$)		Автономный станок 2 ($i = 2$)		Группа станков 1 ($j = 1$)		Группа станков 2 ($j = 2$)		Группа станков 3 ($j = 3$)	
	Значение показателя	Коэффициент важности	Значение показателя	Коэффициент важности	Значение показателя	Коэффициент важности	Значение показателя	Коэффициент важности	Значение показателя	Коэффициент важности
Комплексный показатель качества обеспечения надежности в рамках группы показателей p «персонал» (2.17, 2.34)	r_1^p		r_2^p		r_{g1}^p		r_{g2}^p		r_{g3}^p	
Весовой коэффициент группы показателей p «персонал» для станка (k_i^p) и группы станков (k_{gj}^p)	k_1^p		k_2^p		k_{g1}^p		k_{g2}^p		k_{g3}^p	
Уровень мониторинга технического состояния и эксплуатации (r_i^x и r_{gj}^x)	r_1^x	k_1^{tx}	r_2^x	k_2^{tx}	r_{g1}^x	k_{g1}^{tx}	r_{g2}^x	k_{g2}^{tx}	r_{g3}^x	k_{g3}^{tx}
Комплексный показатель качества обеспечения надежности в рамках группы показателей t «технологии и ресурсы» (2.20, 2.37)	r_1^t		r_2^t		r_{g1}^t		r_{g2}^t		r_{g3}^t	
Весовой коэффициент группы показателей t «технологии и ресурсы» для станка (k_i^t) и группы станков (k_{gj}^t)	k_1^t		k_2^t		k_{g1}^t		k_{g2}^t		k_{g3}^t	
Комплексный показатель качества обеспечения надежности с учетом групп показателей e «оборудование», p «персонал», t «технологии и ресурсы» (2.21, 2.38)	r_1		r_2		r_{g1}		r_{g2}		r_{g3}	

Наименование показателя	Автономный станок 1 ($i = 1$)		Автономный станок 2 ($i = 2$)		Группа станков 1 ($j = 1$)		Группа станков 2 ($j = 2$)		Группа станков 3 ($j = 3$)	
	Значение показателя	Коэффициент важности	Значение показателя	Коэффициент важности	Значение показателя	Коэффициент важности	Значение показателя	Коэффициент важности	Значение показателя	Коэффициент важности
Весовой коэффициент станка (k_i) и группы станков (k_{gj})	k_1		k_2		k_{g1}		k_{g2}		k_{g3}	
Агрегированный показатель качества обеспечения надежности системы оборудования (2.40)	R									

Источник: разработано автором

Кроме того, определим целевую функцию математической модели качества обеспечения надежности автономных станков и групп станков, то есть сформулируем, к какому значению показателя следует стремиться. Так, определена возможность повышения качества обеспечения надежности оборудования на основе комплексного показателя качества (2.21, 2.38) за счет воздействия на те или иные показатели, что в конечном итоге будет способствовать повышению качества (2.41–2.42):

$$r_i = \frac{k_i^e r_i^e}{E} + \frac{k_i^p r_i^p}{P} + \frac{k_i^t r_i^t}{T} \rightarrow \max \quad (2.41)$$

$$r_{gj} = \frac{k_{gj}^e r_{gj}^e}{E} + \frac{k_{gj}^p r_{gj}^p}{P} + \frac{k_{gj}^t r_{gj}^t}{T} \rightarrow \max \quad (2.42)$$

Предположим, что в разработанной математической модели повышения качества обеспечения надежности приняты равные весовые коэффициенты для групп показателей: весовой коэффициент группы показателей «оборудование» составляет 0,33; весовой коэффициент группы показателей «персонал» составляет 0,33; весовой коэффициент группы показателей «технологии и ресурсы» составляет 0,34.

Аналогично предположим, что в рамках каждой группы приняты равные значения для каждого показателя: в группе «оборудование» значение показателя составляет 0,111; в рамках группы «персонал» – 0,333; в рамках группы

«технологии и ресурсы» – 0,333. При данных значениях с учетом максимально возможного значения каждого отдельного показателя максимальное значение комплексного показателя качества при равных весовых коэффициентах составляет 0,26. Представим примерную шкалу ранжирования значения комплексного показателя качества, приведенного в работе. Расчет максимального значения комплексного показателя качества приведен в Приложении Б.

Таким образом, разработана математическая модель повышения качества обеспечения надежности оборудования, представленная на основе предложенного комплексного показателя качества, содержащего три группы показателей – «оборудование», «персонал», «технологии и ресурсы».

Таблица 2.4 – Шкала ранжирования комплексного показателя качества обеспечения надежности при равных весовых коэффициентах

Уровень качества обеспечения надежности	Диапазон значений	Описание уровня качества
Критический уровень	$0 \leq R < 0,05$	Требуется улучшение, уровень качества неудовлетворителен
Низкий уровень	$0,05 \leq R < 0,1$	Наблюдаются значительные несоответствия, уровень качества неудовлетворителен
Пониженный (удовлетворительный) уровень	$0,1 \leq R < 0,16$	Наблюдаются несоответствия, уровень качества на удовлетворительном уровне
Приемлемый уровень	$0,16 \leq R < 0,22$	Качество на приемлемом уровне, возможны улучшения

Высокий уровень	$0,22 \leq R < 0,26$	Качество на высоком уровне, необходимо поддерживать данный уровень
-----------------	----------------------	--

Источник: составлено автором

В математической модели предусмотрена возможность оценки показателей как для отдельных станков, так и для групп оборудования (станков, объединенных в единую линию). Применение математической модели на предприятии позволит выявить ключевые показатели, обеспечивающие надежность, оценить значение показателей для всего производственного парка, определить слабые места производственного процесса в части надежности, получить комплексную оценку уровня надежности оборудования на предприятии и сформировать стратегию для дальнейшего повышения уровня надежности в целях обеспечения бесперебойного производственного процесса и минимизации потенциальных отказов.

Выводы

В исследовании рассмотрены ключевые показатели, позволяющие сформировать классификацию показателей (комплексный показатель качества) и провести эффективную оценку качества обеспечения надежности оборудования, в разрезе трех групп. Первая группа содержит показатели оборудования, описывающие процессы и результаты его эксплуатации. Во второй группе приведены показатели, связанные с персоналом и раскрывающие уровень компетенций при выполнении производственного процесса и проведении технического обслуживания. Данная группа показателей имеет важное значение наряду с другими группами показателей, поскольку человеческий фактор может напрямую повлиять на возникновение отказа оборудования. Третья группа показателей определяет уровень используемых технологий и ресурсов, материально-технического оснащения и условий функционирования оборудования.

Обозначенные группы показателей раскрыты через качественное и количественное описание каждого показателя, что позволяет выявить необходимость и определить методику применения данных показателей для

каждого отдельного предприятия в соответствии со спецификой деятельности и задачами оценки качества обеспечения надежности. В работе представлена шкала оценивания показателей группы «персонал» и «технологии и ресурсы», поскольку данные показатели оцениваются экспертным методом.

Разработанная в исследовании математическая модель оценки качества обеспечения надежности оборудования основана на приведенном комплексном показателе качества на базе трех групп показателей, при этом представленная математическая модель сформирована как для автономных станков, так и для группы оборудования, составляющего единую линию. Математическая модель учитывает вес отдельных оцениваемых показателей, вес группы показателей, вес станков и групп станков, а также нормализованное значение показателей группы «оборудование», что балансирует приведенную оценку и позволяет стремиться к повышению качества процесса за счет влияния на отдельные элементы модели.

Таким образом, в исследовании подробно представлено описание комплексного показателя качества обеспечения надежности оборудования на основе трех выделенных групп показателей, приведена математическая модель оценки качества обеспечения надежности с учетом возможности максимизации значения.

ГЛАВА 3. ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ОБОРУДОВАНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ

3.1 Процессный подход к обеспечению надежности оборудования с применением технологии цифровых двойников

Рассмотрим процесс обеспечения надежности оборудования в разрезе задействованных ресурсов, возникающих внешних и внутренних воздействий, компонентов на входе и выходе процесса. При базовом подходе, процесс которого представлен в главе 1, в качестве ресурсов фигурируют имеющиеся на предприятии материально-техническое оснащение, компетенции персонала, действующая система технического обслуживания и ремонтов (ТОиР), имеющиеся данные об эксплуатации оборудования, в том числе определяющие программу реализации системы ТОиР, техническая документация на оборудование и соответствие требованиям документации, база поставщиков предприятия, которые в широком смысле определяют качество, количество и доступность запасных деталей, узлов, компонентов, расходных материалов для эксплуатации и обслуживания оборудования.

В соответствии с этим формируются и определяющие воздействия, которые влияют на уровень надежности оборудования, в их числе: нагрузка оборудования в соответствии с производственным планом, условия эксплуатации оборудования и оценка его состояния, особенности и результаты реализации ТОиР, процессы мониторинга технического состояния и накопления статистических данных об эксплуатации, техническом обслуживании, отказах и их причинах, процессы управления качеством в части входного и приемочного контроля, контроля процессов изготовления, а также внешние воздействующие факторы, которые не были учтены в других видах воздействий.

В качестве компонента на входе выделим комплексный показатель качества обеспечения надежности оборудования исходного уровня – $R_{исх}$, на выходе формируется обновленный комплексный показатель качества обеспечения надежности оборудования – $R_{баз}$, который может быть как больше, так и меньше значения исходного показателя. Взаимосвязь ресурсов и воздействий на процесс

обеспечения надежности при базовом подходе представлена на рисунке 3.1.



Рисунок 3.1 – Ресурсы и воздействия на процесс обеспечения надежности оборудования при базовом подходе

Источник: разработано автором

Представим процесс обеспечения надежности оборудования в разрезе ресурсов и воздействий при усовершенствованном подходе. Как определено в главе 1, обеспечение надежности оборудования может быть усовершенствовано и трансформировано в более эффективный процесс при формировании взаимодействия между тремя процессами производственного цикла – эксплуатации оборудования, его обслуживания и мониторинга технического состояния. Интеграция и синергия между обозначенными процессами возможна при реализации триады процессов – внедрении цифровых двойников, совершенствовании системы мониторинга и реализации ТОиР. Формирование новых связей между выделенными процессами и их эффективная интеграция обеспечат реализацию комплексного подхода к обеспечению надежности и повышению уровня надежности всей системы оборудования.

Так, в рамках предлагаемого усовершенствованного процессного подхода

рассматривается включение новых ресурсов в систему предприятия:

- технология цифровых двойников, которая позволит визуализировать техническое состояние оборудования в режиме реального времени с цветовой индикацией отслеживаемых параметров и тепловыми картами, что обеспечит контроль процессов ТОиР, формирование рекомендаций по совершенствованию системы ТОиР, прогнозирование и моделирование состояния оборудования, учет текущих или заданных условий эксплуатации, генерацию, накопление и анализ данных о состоянии оборудования, предиктивный анализ;
- программно-технологическая (цифровая) SPDM-платформа [281; 297], направленная на реализацию программной составляющей технологии, обеспечение взаимодействия между используемыми программными решениями, в целях результативности проводимого ТОиР, сбора и обработки данных, поступающих из промышленных источников, таких как интернет вещей, а также результативности процессов моделирования работы оборудования;
- система управления данными, которая обеспечивает взаимодействие с программными решениями и цифровой моделью оборудования на SPDM-платформе, необходимая для сбора, обработки данных, управления ими [297], формирования управляющих воздействий от цифрового двойника к оборудованию, формирования информационных моделей на основе данных и результатов предиктивного анализа, в том числе с применением методов машинного обучения, для внесения корректировок в текущий производственный план, систему технического обслуживания и ремонтов и пр.

Также трансформируются ресурсы, обозначенные в базовом подходе, в частности, внедрение новых ресурсов способствует изменению и расширению материально-технического оснащения, поскольку формирование системы мониторинга и системы управления данными требует размещения измерительных устройств – датчиков, актуаторов, программируемых логических контроллеров (ПЛК), сенсоров и других средств измерения, хранения и передачи данных. Внедрение цифровых двойников также требует новых компетенций от персонала, поскольку для его развертывания и использования требуются инженеры и

программисты, которые обеспечат создание, актуализацию моделей, обработку результатов и принятие решений на их основе. Также можно отметить, что база накапливаемых данных об эксплуатации оборудования расширяется, поскольку технология цифровых двойников и система управления данными дополняет имеющуюся базу данных информационными, математическими и компьютерными моделями по результатам сканирования, моделирования оборудования, на основе накапливаемых эксплуатационных данных, генерируемых устройствами сбора и обработки данных, и прочими данными из различных источников.

Вследствие этого трансформация ресурсов и воздействий на процессы обеспечения надежности расширяет и дополняет компоненты процессной модели, которые включают, в частности:

- систему мониторинга за состоянием оборудования с использованием измерительных устройств, которая реализуется за счет взаимодействия между программными и аппаратными системами цифрового двойника на программно-технологической платформе, и системами генерации данных; как правило, обеспечение взаимодействия между программной и аппаратной частью системы мониторинга происходит за счет внедрения технологий промышленного интернета;
- накопление эксплуатационных и расчетных данных об отказах и их причинах, что характеризуется формированием базы данных, полученных за счет проведения цифрового проектирования и моделирования, функционирования системы мониторинга, и способствующих дальнейшему использованию результатов анализа данных для формирования системы ТОиР в целях влияния на надежность оборудования;
- внедрение устройств сбора и передачи данных, ПЛК, датчиков и других измерительных средств, внедрение которых необходимо для реализации системы мониторинга;
- реализацию управляющих воздействий по результатам моделирования и предиктивного анализа, при этом управляющие воздействия могут быть инициированы как оператором цифрового двойника по результатам анализа, так и

непосредственно цифровым двойником (при условии наличия соответствующих алгоритмов в управляющей системе цифрового двойника и актуаторов).

В результате внедрения описанных ресурсов и возникновения обозначенных воздействий меняются и компоненты на выходе процесса. Одним из результатов процесса является обоснованная, регулярная и эффективная система технического обслуживания и ремонтов оборудования, скорректированная по результатам выявления критических зон оборудования, оценки текущего технического состояния, моделирования, прогнозирования и предиктивного анализа состояния оборудования в процессе эксплуатации и технического обслуживания. Второй компонент на выходе – обновленный комплексный показатель качества обеспечения надежности оборудования R_{DT} , отличающийся от исходного значения комплексного показателя на входе $R_{исх}$, а также отличающийся от аналогичного показателя $R_{баз}$ при базовом подходе: $R_{DT} > R_{исх}$, $R_{DT} > R_{баз}$.

Обновленная схема ресурсов и воздействий при усовершенствованном подходе к обеспечению надежности оборудования представлена на рисунке 3.2, зеленым цветом обозначены новые предлагаемые связи и элементы.

В результате исследования разработана процессная модель обеспечения надежности оборудования на основе комплексного показателя качества обеспечения надежности, отличающаяся применением технологии цифровых двойников, формированием системы сбора и анализа эксплуатационных данных, реализацией обоснованного технического обслуживания и ремонта (см. рисунок 3.3). Процессная модель сформирована с применением кросс-функциональной нотации «Процедура» (Cross-Functional Flowchart) [298–301], выбранной по причине удобства распределения процессов по укрупненным этапам, а также возможности отражения подразделения, ответственного за реализацию процессов обеспечения надежности.

Процессную модель обеспечения надежности оборудования целесообразно описывать начиная с события, когда оборудование готово к эксплуатации (введено в эксплуатацию впервые или восстановлено после капитального ремонта). Эксплуатация оборудования сопровождается выполнением производственного

плана, заданного руководителем или ответственным лицом (начальником цеха, техническим директором или другим сотрудником, например, специалистом по планированию), и оценкой исходного значения комплексного показателя обеспечения надежности $R_{исх}$.



Рисунок 3.2 – Ресурсы и воздействия на процесс обеспечения надежности оборудования при усовершенствованном подходе

Источник: разработано автором

Для создания цифрового двойника высокого уровня адекватности необходимо провести реверс-инжиниринг оборудования со сканированием всей системы оборудования, компонентов и узлов, цифровое проектирование и моделирование подсистем и систем, выявление критических зон оборудования, которые необходимо отслеживать, на основе выявленных критических зон сформировать редуцированную цифровую модель (модель пониженного порядка, ROM-модель) [9]. В создании цифрового двойника могут быть задействованы

инженеры, входящие в службу главного инженера, программисты и системные администраторы, поддерживающие программно-аппаратную часть технологии цифровых двойников, а также внешние организации (подрядчики), которые проведут сканирование оборудования, создание его модели и проч. Проект по созданию цифрового двойника может быть реализован сторонней организацией, которая будет поддерживать цифровой двойник на собственных вычислительных серверах, осуществлять техническую поддержку процессов заказчика с применением облачных технологий и сопровождать жизненный цикл цифрового двойника вплоть до вывода оборудования из строя и его утилизации.

Конечно, передача работ по созданию цифрового двойника консалтинговой организации-подрядчику зависит от целей, технико-экономических условий и возможностей предприятия-заказчика, а также результатов оценки рисков в части конфиденциальности, кибербезопасности и прочих аспектов.

На основании полученной цифровой модели изделия с выявленными критическими зонами необходимо сформировать предварительный план по предотвращению отказов оборудования, проработать систему технического обслуживания и ремонтов с учетом критических зон оборудования, интегрировать план предотвращения отказов в систему обслуживания с целью эффективной реализации ТОиР. Данный процесс выполняется службой главного механика.

Реализация обозначенных выше процессов способствует переходу к параллельному выполнению трех ключевых процессов производственного цикла применительно к оборудованию, в их числе – эксплуатация оборудования в соответствии с производственным планом, реализация технического обслуживания и ремонтов в соответствии с необходимостью и программой ТОиР, сбор эксплуатационных данных и мониторинг технического состояния оборудования. При этом техническое обслуживание (ТО) трансформируется из реактивного ТО, проводимого по фактическому выходу оборудования из строя, к проактивной системе ТО, когда происходит прогнозирование возможного наступления отказа и предотвращение как самого отказа, так и возможных последствий.

Сбор эксплуатационных данных предполагает получение актуальной

информации об уровне надежности оборудования в соответствии с комплексным показателем качества – на данном этапе получение расчетного значения R_{DT} возможно в полуавтоматическом режиме (при наличии соответствующих алгоритмов в системе цифрового двойника). Напомним, что $R_{DT} > R_{исх}$. Мониторинг технического состояния и сбор данных позволяют провести моделирование работы оборудования и предиктивный анализ, на основании результатов которого принимается решение о дальнейшей эксплуатации оборудования и внесении корректировок в систему ТОиР. После принятия решения о невозможности продолжения эксплуатации оборудования его выводят из строя и утилизируют.

Процессная модель обеспечения надежности оборудования приведена на рисунке 3.3. Зеленым цветом обозначены новые элементы процессной модели в рамках усовершенствованного подхода. Пошаговый процесс реализации приведенного подхода с применением технологии цифровых двойников раскрыт на алгоритме в параграфе 3.3. Приведенная процессная модель позволяет заранее предусматривать возникновение потенциальных отказов оборудования и воздействовать на систему ТОиР за счет применения технологии цифровых двойников и технологий промышленного интернета.

В общем виде программно-реализуемая система цифрового двойника оборудования может содержать четыре ключевых компонента:

- DT_{static} – компонент, позволяющий описать структуру и строение оборудования, неотъемлемые свойства оборудования, характеристики деталей и материалов, физико-механические свойства и параметры, особенности процессов изготовления продукции; данный компонент также направлен на хранение документации об оборудовании, взаимодействии с другими производственными элементами, спецификации материалов, в том числе расходных материалов, информации об изготовителе и прочих данных, которые остаются неизменны на протяжении всех этапов жизненного цикла оборудования; данный компонент представлен в рамках визуализации моделей и структуры оборудования, а также базы данных;



Рисунок 3.3 – Процессная модель обеспечения надежности оборудования с учетом комплексного показателя качества при применении технологии цифровых двойников

Источник: разработано автором [12]

- $DT_{dynamic}$ – компонент, обеспечивающий мониторинг технического состояния оборудования в режиме реального времени с учетом процессов эксплуатации и таких параметров, как нагрузка оборудования, производственный план, остановы, условия эксплуатации, внешние воздействующие факторы, используемые материалы и прочие факторы, оказывающие непосредственное влияние на эффективность использования оборудования [8]; данный компонент реализуется в формате визуализации текущего состояния с цветовыми индикаторами, подсвечивающими критические зоны оборудования и критические процессы, а также выдачи сигналов предупреждения и оповещений о нарушении работы или возникновении отклонения;

- $DT_{maintenance}$ – компонент, обеспечивающий отслеживание проводимого ТОиР оборудования, учитывающий как фактически проведенные мероприятия ТОиР, так и планы, связанные с реализацией проактивной системы ТОиР; данный компонент также обеспечивает внесение корректировок, поддержание актуальной информации о статусе ТОиР в программной системе управления производством; данный компонент реализуется в формате базы данных, интегрированной с другими компонентами для обновления цифрового двойника и поддержания его актуальности;

- $DT_{predict}$ – компонент, объединяющий программные инструменты для проведения цифрового проектирования и моделирования, предиктивного анализа, отслеживания и контроля эксплуатации оборудования, корректировки режимов работы, формирования рекомендаций и управляющих воздействий на основе результатов моделирования, анализа и формирования реакции на возникающие отклонения, включая превышение заданных диапазонов отслеживаемых параметров в критических зонах, нарушение нормальных режимов работы, в том числе выдачи предупреждения или рекомендации о проведении ТО или других воздействий на состояние оборудования; данный компонент реализован в формате интерфейса, объединяющего инструменты моделирования, систему поддержки принятия решений и интеллектуальные системы управления.

Под упомянутыми критическими зонами будем понимать зоны, в которых

нарушение нормальных режимов работы вызывает «тонкие» эффекты, которые могут привести к опасным ситуациям и выходу оборудования из строя [13]. Обозначенные компоненты интегрированы между собой, как представлено на рисунке 3.4: DT_{static} является основой, базисом для других компонентов, $DT_{dynamic}$ и $DT_{predict}$ связаны передачей потоков данных между собой, а также передачей потоков данных к компоненту $DT_{maintenance}$, при этом все четыре компонента оказывают влияние на формирование значения комплексного показателя качества обеспечения надежности и служат источником данных.

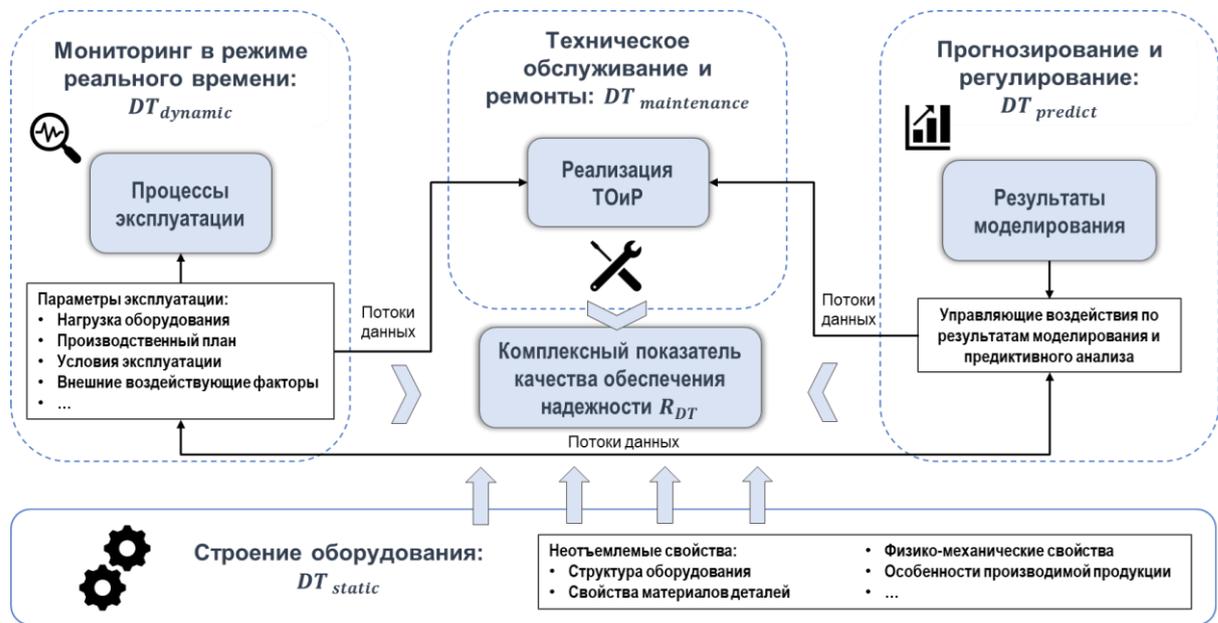


Рисунок 3.4 – Взаимодействие компонентов, составляющих основу программной реализации цифрового двойника оборудования

Источник: разработано автором [59]

Аналогичный подход к контролю за состоянием оборудования с применением цифровых двойников описан в материалах прикладных исследований консорциума Digital Twin Consortium [284], который создан для формирования сообщества в области цифровых двойников, развития форматов сотрудничества и внедрения инновационных технологий на мировом уровне.

Таким образом, реализация процессной модели обеспечения надежности оборудования при наличии всего перечня ресурсов и сформированной системы компонентов, составляющих основу программной реализации цифрового двойника, направлена на повышение эффективности, обоснованности и

регулярности системы технического обслуживания и ремонтов оборудования. Данный подход позволяет выявить критические зоны, формирует оптимальные условия содержания и эксплуатации оборудования, тем самым повышая его надежность и срок службы.

3.2 Модель вероятности безотказной работы оборудования с учетом применения технологии цифровых двойников

Сфокусируемся на основных показателях, которые в соответствии с ГОСТ Р 27.102–2021 определяют надежность оборудования, среди них выделим безотказность и долговечность оборудования, поскольку именно эти свойства определяют длительность эксплуатации без нарушения работы оборудования, то есть длительность стабильной работы, и сформулируем основную цель применения технологии цифровых двойников и реализации предложенного процессного подхода в привязке к показателям надежности: повысить период безотказности и долговечности оборудования за счет мониторинга, технического обслуживания и моделирования.

Как отмечено в главе 1, для расчета показателей надежности принято применять методы статистического анализа и формировать базу данных, содержащую информацию о режимах работы оборудования, произошедших отказах, внесении изменений в конструкцию, в том числе по результатам технического обслуживания и ремонтов, а также данные о любых изменениях состояния. Согласно ГОСТ Р 27.102–2021 под отказом (Failure) понимают событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния объекта [196]. Отсутствие или недостаточность данных определяет вероятностный характер наступления отказа оборудования, другими словами, отказ является детерминированным явлением, то есть зависящем от других объектов или процессов системы, при этом возникновение отказа носит случайный характер. В связи с этим явление отказа рассматривают через теорию вероятностей и математическую статистику.

Классический (традиционный) подход к расчету параметров отказов включает оценку вероятности наступления отказа оборудования и вероятности

безотказной работы. Оба показателя вероятности являются обратными друг другу, в связи с чем возможно событие, когда вероятность отказа и вероятность безотказной работы оборудования будут равны значению 0,5 в момент времени t_0 , то есть вероятность наступления отказа, равно как вероятность безотказной работы, равна 50%. Схематичное отображение базовой модели вероятности безотказной работы $P_0(t)$ и вероятности наступления отказа $Q_0(t)$ представлено на рисунке 3.5.

В главе 1 также представлены ограничения традиционного подхода к оценке надежности оборудования, которые связаны с неполнотой и разрозненностью данных, неэффективностью работы службы главного механика, отсутствием возможности проведения испытаний оборудования, отсутствием данных об отказах оборудования, введенного в эксплуатацию впервые, и др.

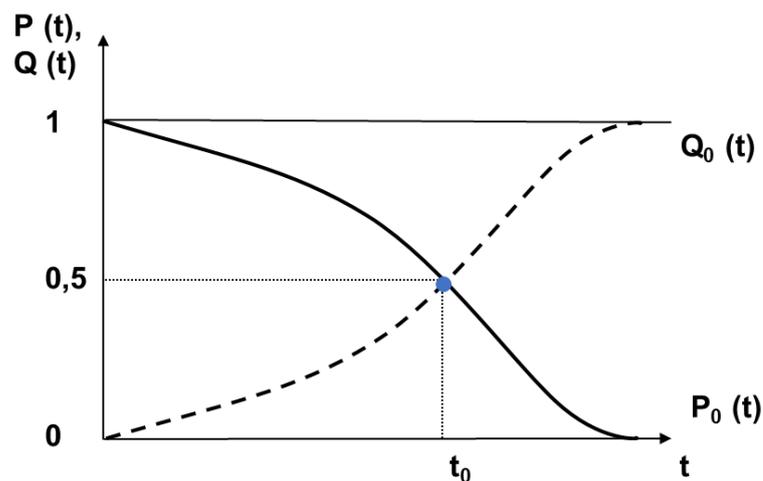


Рисунок 3.5 – Традиционный подход к определению вероятности безотказной работы $P_0(t)$ и отказа оборудования $Q_0(t)$ по наработке t

Источник: составлено автором [8; 13] по материалам [95]

Обеспечение полноты контроля за счет реализации процессной модели и внедрения технологии цифровых двойников повысит осведомленность о текущем уровне надежности оборудования в части вероятности наступления отказа, в связи с чем возникает трансформация модели вероятности безотказной работы и вероятности наступления отказа оборудования, как отражено на рисунке 3.6. Серым цветом на графике обозначена базовая модель, красными стрелками обозначены изменения, наступающие при условии реализации процессной модели

и внедрения цифрового двойника ($\Delta P(t)$ и $\Delta Q(t)$ соответственно).

Согласно представленному графику при усовершенствованном подходе к определению вероятности безотказной работы и вероятности наступления отказа, между периодами t_0 и t_1 возникает резерв надежности оборудования, то есть потенциальный запас уровня надежности оборудования, получение которого возможно при внедрении цифрового двойника [8].

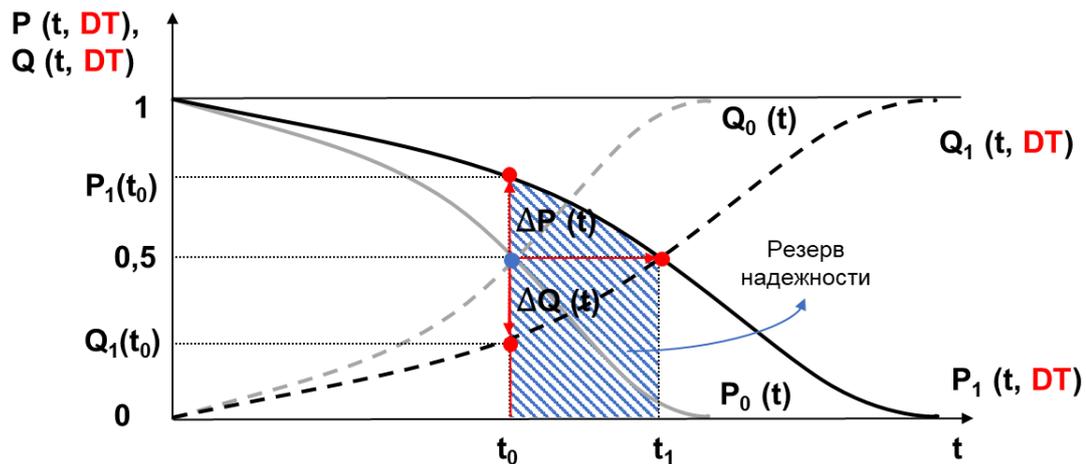


Рисунок 3.6 – Модель усовершенствованного подхода к определению вероятности безотказной работы $P_1(t, DT)$ и отказа оборудования $Q_1(t, DT)$ по наработке t с применением технологии цифровых двойников (DT)

Источник: разработано автором [13]

Возникновение резерва надежности связано со следующими факторами:

- выполняется условие $DT = 1$, то есть технология цифровых двойников внедрена в деятельность, в связи с чем возможно получение эффекта от применения технологии;
- $Q(t) + P(t) = 1$, $Q_0(t_0) = P_0(t_0) = 0,5$, $Q_1(t_1) = P_1(t_1) = 0,5$;
- повышение надежности оборудования можно интерпретировать как снижение вероятности отказов оборудования за период времени, равный t : $Q_1(t, DT) \rightarrow \min$, $n(t, DT) \rightarrow \min$;
- количество отказов оборудования за период t при внедрении технологии цифровых двойников меньше, чем без внедрения технологии: $n(t, DT) < n(t)$ [8];
- изменение вероятности безотказной работы оборудования опишем

$\Delta P(t)$, при этом $\Delta P(t) \geq 0$, поскольку технология цифровых двойников не может уменьшить вероятность безотказной работы [8];

- изменение вероятности наступления отказа оборудования аналогично опишем значением $\Delta Q(t)$, при этом $\Delta Q(t) \geq 0$, так как технология цифровых двойников не может увеличить вероятность наступления отказа [8];

- $P(t) \rightarrow P(t, DT)$, вероятность безотказной работы увеличивается (не уменьшается) для периода времени t_1 , следовательно, $P(t, DT) \geq P(t)$, что можно описать следующим образом: $P_1(t, DT) = P_0(t) + \Delta P(t)$, следовательно, $P_1(t_0) \geq 0,5$, вероятность безотказной работы оборудования оценивается выше 50% [8];

- $Q(t) \rightarrow Q(t, DT)$, пропорционально уменьшается вероятность наступления отказа оборудования $Q(t, DT)$ для периода времени t_1 , то есть $Q(t, DT) \leq Q(t)$, то есть $Q_1(t, DT) = Q_0(t) - \Delta Q(t)$, следовательно, $Q_1(t_0) \leq 0,5$, вероятность наступления отказа оборудования оценивается ниже 50%;

- $Q(t, DT) + P(t, DT) = 1$, тогда $\Delta P(t) = \Delta Q(t)$, следовательно, применение технологии цифровых двойников DT увеличивает вероятность безотказной работы на величину $\Delta P(t)$ и пропорционально уменьшает вероятность наступления отказа оборудования на величину $\Delta Q(t)$.

Модель вероятности безотказной работы с учетом применения цифровых двойников описывает динамику изменения вероятности за счет получения достоверной информации о состоянии оборудования и прогнозных характеристиках его поведения. Данные подтверждаются практикой эксплуатации оборудования машиностроительного предприятия, для которого был разработан цифровой двойник. Цифровой двойник оборудования позволил выявить критические зоны и создать систему управления и мониторинга за состоянием оборудования. Основные проблемы, которые повышали затраты предприятия и формировали дополнительные сложности для выполнения производственного заказа, включали частый выход оборудования из строя, преждевременный износ узлов и компонентов, входящих в систему оборудования, а также неэффективность

системы технического обслуживания оборудования.

Статистика, накопленная за 2020–2021 годы эксплуатации станков на предприятии, демонстрирует динамику ухудшения качества технического обслуживания, падение его надежности и ухудшение технического состояния, что являлось критически важным для результативности производственного процесса и своевременного выполнения заказов. Число отказов оборудования за рассматриваемый период составило 43 отказа. Фрагмент накопленной статистики по отказам за периоды до реализации проекта по созданию цифрового двойника (2020–2021 гг.) и после реализации проекта (2022–2023 гг.) представлен в таблице 3.1. Проект по разработке цифрового двойника проводился во II полугодии 2021 года.

Таблица 3.1 – Фрагмент статистики по отказам однотипного механообрабатывающего оборудования

Период	Номер станка										Итого за период
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
I полугодие 2020 года	2	1	3	1	0	2	1	1	1	1	13
II полугодие 2020 года	1	3	0	1	1	0	0	0	3	0	9
I полугодие 2021 года	3	1	2	0	2	1	2	0	0	1	12
II полугодие 2021 года	1	0	1	1	0	1	0	2	1	2	9
ИТОГО за период 2020–2021 гг.	7	5	6	3	3	4	3	3	5	4	43
I полугодие 2022 года	0	0	1	0	0	1	0	2	0	1	5
II полугодие 2022 года	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	3
I полугодие 2023 года	1	0	0	1	0	2	0	0	0	0	4
II полугодие 2023 года	1	0	0	1	2	0	1	1	1	0	7
ИТОГО за период 2022–2023 гг.	3	1	1	2	2	3	1	3	1	2	19

Источник: составлено автором по материалам Инжинирингового центра

СПбПУ

Результат анализа предоставленных данных свидетельствует о регулярных

отказах оборудования до реализации проекта: в среднем 11 отказов за полугодие для комплекса 10 станков, в среднем 4 отказа за два года для одного станка данного типа. Учитывая нагрузку оборудования, данное число отказов является неприемлемым для производственного процесса.

Создание цифрового двойника оборудования, выявление критических зон и узлов оборудования, правильно выстроенная система управления и контроля за техническим состоянием станков позволили снизить число отказов и привели к увеличению периода аварийных ремонтов. Как свидетельствуют результаты обследования эффективности реализации проекта по созданию цифрового двойника оборудования, ближайший отказ оборудования, возникший после реализации проекта, произошел спустя 5 месяцев. Число отказов за период 2 лет сократилось более чем в 2 раза с 43 отказов до 19, уменьшилось время простоев из-за отказов, увеличилась наработка на отказ. В среднем число отказов после реализации проекта составило 5 отказов за полугодие для комплекса 10 станков, в среднем 2 отказа за два года для одного станка данного типа.

Таким образом подтверждено, что подход к обеспечению надежности с внедрением цифрового двойника способствует продлению периода между отказами оборудования и уменьшению интенсивности отказов, следовательно, увеличивается длительность межремонтного периода без ущерба для работоспособности оборудования, поскольку наступление события, из-за которого оборудование выйдет из строя и потребуются ремонт или техническое обслуживание, переносится на более поздний период [13]. Оптимизация режимов работы оборудования напрямую определяет увеличение срока службы оборудования за счет своевременного проведения ТОиР и, следовательно, предотвращения износа и повреждений, а также прогнозирования остаточного ресурса.

Оценка качества обеспечения надежности оборудования в части уровня безотказности оборудования позволяет спрогнозировать наступление критического события. Идентификацию риска наступления отказа эксплуатируемого оборудования можно провести за счет классификации

технического состояния оборудования в соответствии с уровнем надежности оборудования [8]. При формировании классификации проанализированы типы состояния оборудования, приведенные в следующих стандартах:

- ГОСТ Р 27.102–2021 «Надежность в технике. Надежность объекта. Термины и определения», в котором выделено техническое состояние оборудования – исправное, неисправное, работоспособное, неработоспособное, рабочее, нерабочее, предельное, опасное состояние [196];
- ГОСТ 27.002–2015 «Надежность в технике. Термины и определения» (предшествующая версия приведенного выше стандарта), в терминах которого приведены те же виды состояния и дополнительно выделено предотказное состояние [197];
- ГОСТ 18322–2016 «Система технического обслуживания и ремонта техники. Термины и определения», в котором выделено исправное, работоспособное, неисправное, неработоспособное и предельное состояние оборудования [61].

В приведенных стандартах классификация состояния оборудования оценивается с точки зрения работоспособности и исправности, что не носит привязки к уровню надежности и вероятности наступления отказа оборудования. В связи с этим предлагается классификация технического состояния оборудования, которая наглядно представлена на рисунке 3.7 и в соответствии с которой классы состояния оборудования могут быть описаны следующим образом с фокусировкой на вероятности наступления отказа:

- Оборудование с высоким уровнем надежности, как правило, недавно введенное в эксплуатацию или редко нагружаемое; вероятность возникновения отказа оборудования оценивается на минимальном уровне в диапазоне $0 \leq Q < 0,2$ [8];
- Оборудование с приемлемым уровнем надежности, которое, как правило, некоторое время находилось в эксплуатации или восстановлено после капитального ремонта; к данному классу оборудования зачастую можно отнести

значительную часть техники на предприятии; вероятность возникновения отказа оценивается в диапазоне $0,2 \leq Q < 0,4$ [8];

- Оборудование с пониженным уровнем надежности, которое должно находиться под регулярным контролем, поскольку вероятность наступления отказа данного класса оборудования варьируется в диапазоне $0,4 \leq Q < 0,6$;

- Оборудование в предотказном состоянии, отказ которого может произойти с высокой долей вероятности, при этом целесообразно провести техническое обслуживание и ремонт оборудования или замену, поскольку в целях поддержания высокого уровня готовности производственного участка следует минимизировать число единиц оборудования данной группы; вероятность наступления отказа оборудования оценивается на высоком уровне, в диапазоне $0,6 \leq Q < 0,8$ [8];

- Оборудование с критическим уровнем надежности, техническое обслуживание которого практически не повлияет на уровень его безотказности, при этом эксплуатация данного оборудования может быть аварийно опасна; вероятность наступления отказа оборудования оценивается в диапазоне $0,8 \leq Q < 1$.

Приведенная классификация может быть адаптирована под требования и отраслевые особенности конкретного предприятия, в том числе в соответствии со спецификой оцениваемого оборудования [8; 9]. Важно отметить, что данная классификация может быть применима только в том случае, когда состояние оборудования отслеживается в ходе мониторинга с применением цифрового двойника, в обратном случае при отсутствии технологии регулярная оценка уровня надежности оборудования является трудоемким процессом. Другими словами, вводится новый класс – отслеживаемое оборудование, состояние которого фиксируется с применением технологии цифровых двойников и в соответствии с уровнем надежности. При этом следует определить потенциально возможный или желаемый уровень надежности и выполнять операции, направленные на достижение обозначенного уровня.

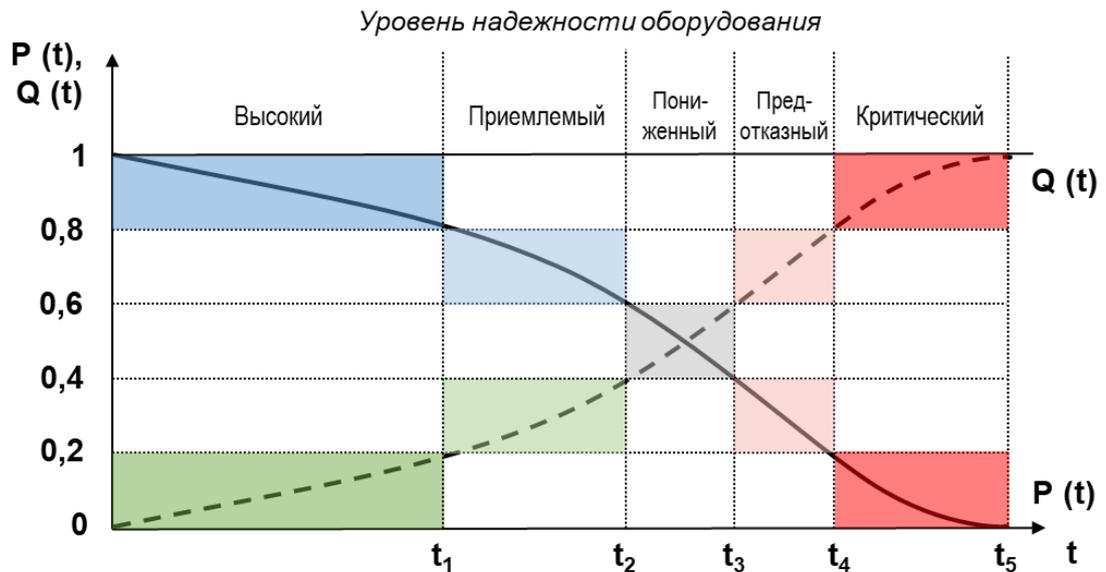


Рисунок 3.7 – Классификация технического состояния оборудования в соответствии с уровнем надежности на основе модели вероятности безотказной работы $P(t)$ и отказа оборудования $Q(t)$

Источник: разработано автором [8]

Таким образом, технология цифровых двойников оказывает положительное влияние на безотказность, долговечность и, следовательно, на надежность оборудования. Применение классификации состояния оборудования при внедрении цифрового двойника позволит структурировать рекомендации по эксплуатации и обслуживанию оборудования, что так же обеспечит продление его ресурса.

3.3 Алгоритм совершенствования процесса обеспечения надежности оборудования с применением технологии цифровых двойников

Реализация процессной модели обеспечения надежности оборудования предполагает внедрение технологии цифровых двойников в целях достижения высокой эффективности работы оборудования, увеличения его безотказности и долговечности. В ходе исследования разработан алгоритм совершенствования процесса обеспечения надежности оборудования с учетом комплексного показателя качества обеспечения надежности, отличающийся применением технологии цифровых двойников, на котором представлены основные этапы внедрения технологии и варианты последующего применения цифрового двойника

(рисунок 3.8). Эффективная реализация технологии цифровых двойников возможна за счет внедрения платформенного решения, в функциональные возможности которого будет входить хранение и анализ данных, формирование рекомендаций о повышении эффективности работы, инструменты моделирования и предиктивного анализа, отслеживание текущего состояния оборудования и прочее в соответствии с компонентами, составляющими основу программной реализации цифрового двойника, выделенными в параграфе 3.1.

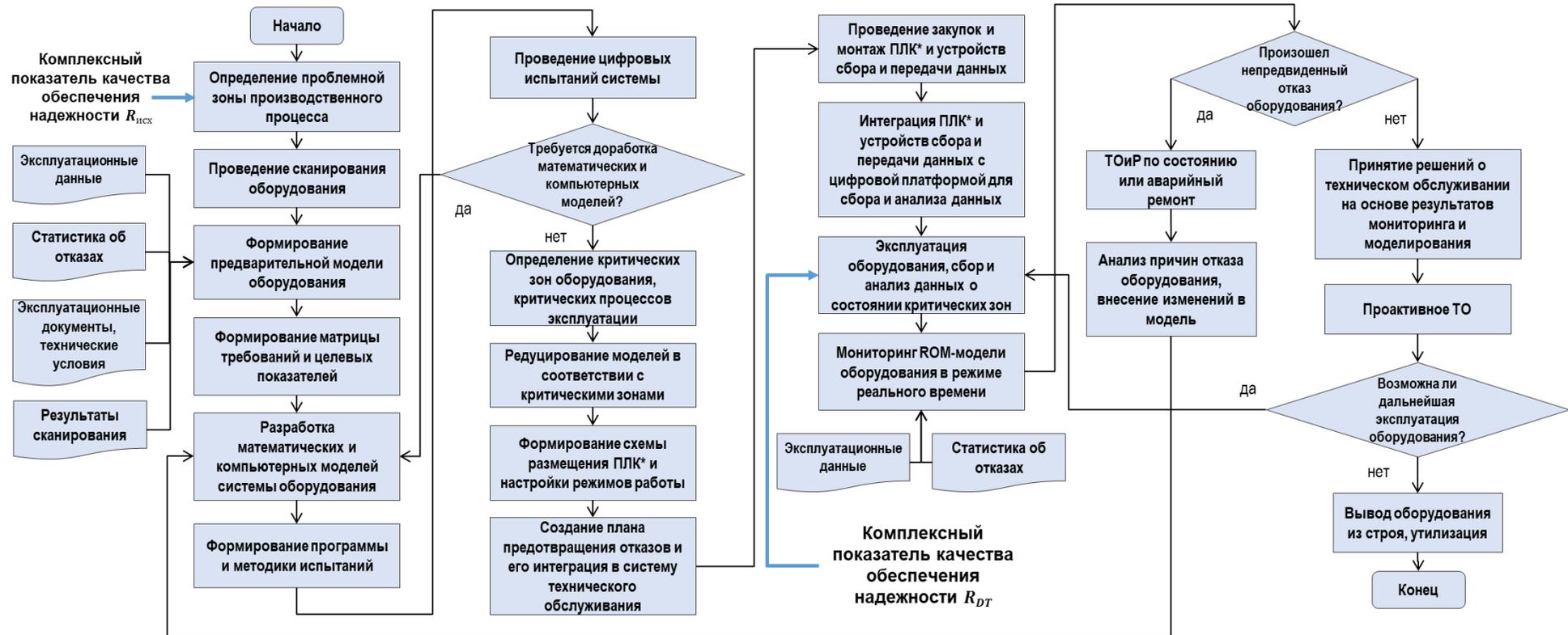
Укрупненно алгоритм раскрывает основные этапы процессной модели:

- Создание цифрового двойника оборудования;

Данный этап реализуется за счет последовательного прохождения шагов – вначале необходимо выявить проблемную зону производственного процесса, то есть определить оборудование, которое нуждается в оцифровке, создании цифрового двойника и совершенствовании системы обслуживания [14; 123]. Определение проблемной зоны производственного процесса также предполагает выявление последовательностей, возникающих в процессе эксплуатации конкретной единицы оборудования, которые раскрывают зависимость компонентов оборудования, оказывающих влияние на работоспособность и надежность системы по причине неисправности или изменения состояния [14; 123].

Для выделенного оборудования проводится оценка комплексного показателя качества обеспечения надежности $R_{исх}$ с целью последующего анализа результативности реализованного алгоритма. Также важно определить целесообразность проведения последующих работ по созданию цифрового двойника и совершенствованию системы обслуживания, в противном случае реализация алгоритма нецелесообразна.

Для создания геометрической модели оборудования необходимо провести его сканирование с целью оценки состояния оборудования, обнаружения имеющихся дефектов, трещин, коррозии и других повреждений или потенциальных проблем внутри оборудования без его разрушения или повреждения.



*ПЛК – программируемые логические контроллеры

Рисунок 3.8 – Алгоритм совершенствования процесса обеспечения надежности оборудования с учетом комплексного показателя качества и применением цифрового двойника

Источник: разработано автором [9]

Данный метод тесно связан с проведением неразрушающего контроля, в рамках которого могут быть применены следующие виды контроля: ультразвуковой контроль [302], радиографический контроль [303; 304], магнитопорошковый контроль [305], капиллярный контроль [306], а также визуальный осмотр.

Кроме того, в ходе сканирования возможно проведение тепловизионного сканирования, лазерного сканирования и других процессов с применением лазерных сканеров, томографов, измерительных машин и других технических средств. На основе результатов сканирования, накопленных ранее эксплуатационных данных, статистики об отказах оборудования, эксплуатационных документов [307], технических условий на оборудование [308], классификации причин отказов формируется предварительная модель оборудования. Далее необходимо «очистить» модель от шума, избыточных данных, нежелательных элементов и провести соответствующую постобработку для уточнения модели, которая будет служить основой для реализации реинжиниринга (обратного инжиниринга) оборудования.

На основе полученной модели оборудования необходимо сформировать матрицу требований и целевых показателей (например, на основе подхода Передовой инженерной школы СПбПУ «Цифровой инжиниринг» [259]) к оборудованию, чтобы отразить фактические характеристики оборудования, а также требуемые показатели и параметры эксплуатационных процессов оборудования по результатам моделирования, обслуживания и эксплуатации. Данные требования необходимо учесть в процессе моделирования и проведения испытаний оборудования, а также формирования рекомендаций.

Сформированная матрица требований и целевых показателей служит основой для разработки математических и компьютерных моделей всех компонентов и подсистем оборудования, которые лягут в основу цифровой модели оборудования [268]. Следующий шаг – формирование методики испытаний, в соответствии с которой необходимо провести цифровые испытания всех подсистем и единой системы оборудования на разных режимах эксплуатации, в том числе

провести анализ причин выхода оборудования из строя [309]. Данный процесс позволит повысить адекватность цифрового двойника и получить результаты моделирования, на основании которых в дальнейшем следует корректировать процессы обслуживания и эксплуатации оборудования, а также прогнозировать возможный выход из строя. При необходимости возможно проведение физических испытаний оборудования.

- Создание ROM-модели оборудования;

Проведенные цифровые испытания оборудования позволяют выявить критические зоны оборудования и критические процессы его эксплуатации для последующего проведения ROM-моделирования на основе цифрового двойника. Так, создание модели пониженного порядка, то есть упрощенной ROM-модели (Reduced Order Model), способствует повышению результативности прогнозирования параметров работы оборудования, особенностей поведения или моделирования различных сценариев работы с учетом режимов эксплуатации [9]. Как правило, данный тип модели упрощает процессы расчетов и требует меньшего объема вычислительных мощностей и, следовательно, ресурсов, в сравнении с полномасштабным численным моделированием [9; 123].

- Создание плана предотвращения отказов;

Выявленные критические зоны и критические процессы оборудования служат информацией для формирования схемы рационального размещения измерительных устройств на оборудовании – датчиков, актуаторов, программируемых логических контроллеров, устройств сбора и передачи данных и других технических средств. В ходе создания цифрового двойника, в случае если размещение физических датчиков не целесообразно или невозможно, следует обеспечить генерацию данных от виртуальных датчиков, которые возможно установить в любой критически важной зоне оборудования [259; 310; 311]. Кроме того, цифровые испытания подсистем оборудования также генерируют информацию, необходимую для уточнения и настройки режимов работы оборудования.

По результатам данного процесса может быть сформирована матрица,

содержащая на основе оценки технического состояния оборудования предварительные рекомендации по необходимой корректировке режимов работы и проведению технического обслуживания. Матрица может быть привязана к классификации технического состояния оборудования, представленной ранее на рисунке 3.7, в соответствии с уровнем надежности оборудования [8; 13]. Пример матрицы с обобщенными рекомендациями по эксплуатации и обслуживанию оборудования приведен в таблице 3.2. Матрица также может быть связана с разрабатываемой программой обеспечения надежности оборудования в соответствии с ГОСТ Р 27.001–2009 [312].

Разработка подобной матрицы и применение цифрового двойника облегчают процедуры мониторинга, диагностики и формирования подходящих рекомендаций для проведения необходимого технического обслуживания.

Таблица 3.2 – Пример матрицы рекомендаций по уточнению режимов работы и технического обслуживания оборудования в соответствии с классификацией технического состояния и уровнем надежности

Класс технического состояния оборудования в соответствии с уровнем надежности	Вероятность наступления отказа	Рекомендации по эксплуатации	Рекомендации по ТОиР
Оборудование, обладающее высоким уровнем надежности	$0 \leq Q < 0,2$	Продолжение эксплуатации оборудования с учетом режимов работы, заданных производителем, предотвращение	Строгое соблюдение системы ТОиР, профилактическое (проактивное) обслуживание, регулярная инспекция

Класс технического состояния оборудования в соответствии с уровнем надежности	Вероятность наступления отказа	Рекомендации по эксплуатации	Рекомендации по ТОиР
		перегрузки оборудования, механических повреждений	
Оборудование, обладающее приемлемым уровнем надежности	$0,2 \leq Q$ $< 0,4$	Эксплуатация оборудования в соответствии с заданными режимами работы, предотвращение перегрузки оборудования, механических повреждений, отклонений параметров, пиковых нагрузок	Строгое соблюдение системы ТОиР, профилактическое (проактивное) обслуживание или обслуживание по состоянию, регулярная инспекция, усиленный мониторинг и диагностика отклонений, превентивная замена комплекующих и устранение отклонений
Оборудование, обладающее	$0,4 \leq Q$ $< 0,6$	Регулирование режимов	Строгое следование регламентам системы

Класс технического состояния оборудования в соответствии с уровнем надежности	Вероятность наступления отказа	Рекомендации по эксплуатации	Рекомендации по ТОиР
<p>пониженным уровнем надежности</p>		<p>эксплуатации, контроль соответствия режимам, заданным производителем, предотвращение превышения допустимых нагрузок оборудования, механических повреждений, мониторинг и устранение отклонений параметров, исключение и сглаживание пиковых нагрузок, подготовка к ТОиР</p>	<p>ТОиР, обслуживание, ориентированное на фактическое состояние оборудования, регулярная инспекция, расширенный мониторинг и контроль соответствия, отслеживание отклонений параметров (выхода из области допустимых значений), своевременная замена критически важных комплектующих, компонентов и деталей,</p>

Класс технического состояния оборудования в соответствии с уровнем надежности	Вероятность наступления отказа	Рекомендации по эксплуатации	Рекомендации по ТОиР
			планирование возможного ремонта или восстановительных работ
Оборудование, находящееся в предотказном состоянии	$0,6 \leq Q < 0,8$	Предотвращение перегрузки оборудования, минимизация использования, подготовка к ремонту или замене	Тщательная диагностика степени повреждений, выполнение ремонта или замены поврежденных комплекующих, планирование замены оборудования
Оборудование, обладающее критическим уровнем надежности	$0,8 \leq Q < 1$	Ограничение или исключение использования	Восстановление или замена, внесение корректировок в систему ТОиР и оптимизация процедур и регламентов обслуживания по

Класс технического состояния оборудования в соответствии с уровнем надежности	Вероятность наступления отказа	Рекомендации по эксплуатации	Рекомендации по ТОиР
			результатам накопленной информации в ходе эксплуатации оборудования, статистики отказов на предыдущих этапах жизненного цикла станка

Источник: разработано автором

После формирования матрицы и плана предотвращения отказов необходимо осуществить закупку всего перечня измерительных устройств и провести их монтаж в соответствии с выявленными критическими зонами и схемой рационального размещения датчиков. Далее следует интегрировать всю систему измерительных устройств, расположенных на оборудовании, с системами платформы, на которой будет осуществляться сбор и анализ данных, а также мониторинг технического состояния. Другими словами, данный этап предполагает программно-аппаратное развертывание системы промышленного интернета на предприятии и ее взаимоувязку с цифровым двойником.

- Эксплуатация оборудования, мониторинг технического состояния;

Эксплуатация оборудования, подключенного к промышленному интернету, должна протекать в соответствии с заданными режимами и рекомендациями системы, при этом параллельно осуществляется сбор и анализ данных, мониторинг

и моделирование работы, а также реализация технического обслуживания.

На данном этапе также целесообразно провести оценку комплексного показателя качества обеспечения надежности оборудования R_{DT} для сопоставления с исходным значением и отслеживания эффективности результатов. Оценка комплексного показателя качества может проходить в течение эксплуатации оборудования с заданной периодичностью, например, 1 раз в месяц, для оперативного реагирования на изменение параметров показателя, или регулярно в полуавтоматическом режиме.

Важно отметить существующие различия в методах оценки комплексного показателя качества. Так, расчетную оценку показателя надежности возможно получить путем проведения математических расчетов и моделирования на основе имеющихся данных о надежности и заданных условий. Данный метод может быть реализован в системе цифрового двойника в полуавтоматическом режиме за счет проработки алгоритма расчета комплексного показателя, взаимосвязки с моделями цифрового двойника и результатами цифровых испытаний. Кроме того, могут быть использованы данные из стандартов, справочников и другой нормативно-технической и исследовательской информации. Как правило, при базовом подходе данный метод применяется на этапе проектирования и разработки системы.

Эксплуатационная оценка показателя надежности оборудования получена на основе обработки и анализа данных, полученных по результатам эксплуатации станков в режимах работы, близких к реальным условиям, или непосредственно в реальных условиях. Оценка предполагает применение статистических инструментов для выявления существующих в процессах эксплуатации закономерностей.

Экспериментальная оценка комплексного показателя качества, в свою очередь, проводится в условиях специализированных испытаний и проверок оборудования, как правило, в полевых или же лабораторных условиях, и учитывает особенности и регламенты, обозначенные в программе и методике испытаний.

Последний вид оценки комплексного показателя надежности – экстраполированная оценка, которая предполагает прогнозирование ожидаемого

значения показателя на основе имеющихся данных о надежности, а также результатов моделирования. Применение данного вида оценки позволяет прогнозировать остаточный ресурс оборудования, планировать программу ТОиР и оценивать экономическую эффективность дальнейшей эксплуатации оборудования.

- Моделирование работы оборудования и предиктивный анализ в едином пространстве на цифровой платформе;

Моделирование работы оборудования осуществляется на основе накопленных эксплуатационных данных, в том числе статистики об отказах, а также применения технологий цифрового проектирования и моделирования. При этом целесообразно проводить моделирование на базе упрощенных моделей оборудования с учетом критических зон, поскольку для этого требуется меньше вычислительных ресурсов. Моделирование проходит параллельно с эксплуатацией и мониторингом работы оборудования.

На данном этапе возможно выявление потенциально опасных ситуаций, отработка сценариев непредвиденного отказа оборудования и его возможных последствий, уточнение состояния оборудования в зависимости от сценариев – продолжения работы в данных режимах или смены нагрузки. Результаты моделирования служат основой для принятия управленческих решений, в частности, о корректировке режимов или изменении программы технического обслуживания. Принятие решений может проходить как инженером (оператором), так и интеллектуальной управляющей системой, обеспечивающей двусторонние информационные связи между цифровым двойником и оборудованием.

- Реализация технического обслуживания, вывод из строя.

Реагирование на изменения параметров в отслеживаемых критических зонах и критических физико-механических процессах предполагает оперативное проведение технического обслуживания. В зависимости от класса технического состояния оборудования в соответствии с уровнем надежности оборудования (таблица 3.2), а также в зависимости от того, произошел непредвиденный отказ оборудования или нет, реализуется соответствующий подход к техническому

обслуживанию и ремонту оборудования в соответствии с типами обслуживания, приведенными в ГОСТ 18322–2016 «Система технического обслуживания и ремонта техники. Термины и определения» [61].

В случае если наступил непредвиденный отказ, необходимо провести техническое обслуживание по состоянию или аварийный ремонт, а также установить причины наступления отказа, например, с применением метода FMECA или диаграммой Исикавы, для внесения изменений в цифровой двойник, систему рекомендаций и программу технического обслуживания и ремонтов. При этом вероятность наступления непредвиденного отказа при условии внедрения цифрового двойника и формирования системы мониторинга крайне мала.

В случае отсутствия отказа оборудования следует руководствоваться выстроенной системой рекомендаций и принимать решение о необходимости проведения проактивного обслуживания и ремонтов в соответствии с результатами мониторинга, результатами моделирования, а также целесообразностью затрат на проведение обслуживания. При этом следует учитывать как обслуживание или замену компонентов оборудования, так и регулярный контроль расходных и эксплуатационных материалов, включая смазочные материалы и технические жидкости, фильтры, уплотнения и другие материально-технические ресурсы, в том числе контроль запасов.

В общем случае предлагаемый подход может быть описан через систему эксплуатации, мониторинга и технического обслуживания оборудования (СЭМТО), которая формируется на основе программы управления эксплуатацией (рекомендациями системы), программы обеспечения надежности (по ГОСТ 27.102–2021), программы мониторинга состояния оборудования, что подробнее представлено в работах автора [14; 123]. Кроме того, сформированный цифровой двойник может применяться для обучения персонала работе с оборудованием, его обслуживанию и ремонту (в том числе для отработки сценариев), а также выдачи рекомендаций о необходимых компетенциях персонала для результативной эксплуатации оборудования и проведения ТО.

Следующий шаг предполагает оценку, возможна ли последующая

эксплуатация оборудования с учетом проведения технического обслуживания и ремонта, а также оценки ресурса оборудования и его пригодности к эксплуатации или восстановлению. В случае, если эксплуатация возможна, осуществляется возврат к процессам эксплуатации и повторение цикла – эксплуатация, мониторинг, моделирование, техническое обслуживание. В случае, если дальнейшая эксплуатация нецелесообразна или принято решение о замене оборудования, необходимо корректно организовать вывод оборудования из строя и его утилизацию.

Предлагаемый алгоритм обеспечения высокого уровня надежности оборудования лежит в основе процессной модели обеспечения надежности и отличается внедрением технологии цифровых двойников в процессы предприятия, оптимизацией контроля технического состояния оборудования, повышением его производительности и надежности. Цифровой двойник обеспечивает мониторинг технического состояния оборудования и прогнозирование его работы, что направлено на повышение оперативности реагирования в случае наступления непредвиденного отказа оборудования [123].

Положительным эффектом реализации обозначенных процессов выступает повышение устойчивости производственной системы, снижение потенциальных затрат по причине отказа и простоя оборудования, что является критически важным для предприятий машиностроения в условиях обеспечения технологического лидерства [134].

Выводы

В исследовании проанализированы ключевые ресурсы и воздействия процесса обеспечения надежности оборудования для базового и усовершенствованного подходов, на входе и выходе обозначенных процессов формируется комплексный показатель качества обеспечения надежности. При усовершенствованном подходе, который предполагает применение технологии цифровых двойников, значение показателя превышает исходное значение, а также значение показателя при базовом подходе, что является задачей внедрения технологии цифровых двойников. Так, повышение значения показателя

обеспечивается внедрением цифрового двойника, формированием системы управления данными и мониторинга, а также совершенствованием процессов технического обслуживания.

Реализация подхода с применением технологии цифровых двойников раскрыта в процессной модели, сформированной с применением кросс-функциональной нотации «Процедура». Реализация процессной модели должна сопровождаться развертыванием программно-реализуемой системы цифрового двойника оборудования. Эффективность предлагаемого подхода может быть оценена с применением математической модели повышения качества обеспечения надежности на основе комплексного показателя качества.

Кроме того, эффективность подхода подтверждается трансформацией модели вероятности безотказной работы и вероятности наступления отказа оборудования – при внедрении технологии цифровых двойников возникает резерв надежности, объясняемый как снижение вероятности наступления отказа оборудования в оцениваемый период времени и продление межремонтного периода. Тем самым обеспечивается увеличение срока службы оборудования, предотвращение преждевременного износа станка и минимизация вероятности возникновения преждевременного отклонения. На основе модели вероятности наступления отказа оборудования приведена классификация состояния оборудования, позволяющая выявить необходимые мероприятия по обслуживанию оборудования и обеспечению его надежности.

Представленные в исследовании математическая модель оценки качества обеспечения надежности на основе комплексного показателя качества и процессная модель обеспечения надежности легли в основу разработанного алгоритма совершенствования процесса обеспечения надежности оборудования с применением технологии цифровых двойников. Приведенные результаты исследования – процессная модель, модель вероятности безотказной работы, алгоритм совершенствования процесса обеспечения надежности – могут быть применимы на предприятиях машиностроения, что обеспечит контроль технического состояния оборудования, его надежность, а также снижение затрат.

ГЛАВА 4. ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ РАЗРАБОТАННЫХ ПРЕДЛОЖЕНИЙ ПО ОБЕСПЕЧЕНИЮ НАДЕЖНОСТИ ОБОРУДОВАНИЯ НА ПРЕДПРИЯТИИ МАШИНОСТРОЕНИЯ

4.1 Обеспечение надежности оборудования на предприятии машиностроения ООО «Завод «Озон»

Практическая реализация предлагаемого процессного подхода к обеспечению надежности оборудования и алгоритма совершенствования процесса рассмотрена на примере предприятия ООО «Завод «Озон» горноспасательного и противопожарного оборудования» (ООО «Завод «Озон» ГС и ПО», далее – Завод «Озон»), открытого в 2004 году на базе ГУП Гайского опытно-экспериментального завода горноспасательного оборудования «ОЗОН» в городе Гай Оренбургской области [313; 314]. В 2011 году был открыт новый завод в г. Орехово-Зуево (Московская обл.), ставший головным предприятием. В 2023 году предприятием «Озон» начата работа по восстановлению завода горноспасательной техники в г. Луганск.

Так, Завод горноспасательной техники «Горизонт» в г. Луганск был создан в 1948 году и более 60 лет производил воздушно дыхательную аппаратуру, в 2014 году приостановил свою производственную деятельность по причине возникшего в регионе конфликта [314]. Стратегическое решение по восстановлению завода, принятое в 2023 году, направлено на создание производства полного цикла, необходимого на территории региона, запуск производства ранее выпускаемой продукции на предприятии, разработку новых видов продукции, востребованной в значимых отраслях, таких как горнодобывающая, атомная, химическая промышленность и другие [314; 315].

Таким образом, в целях повышения эффективности проекта по восстановлению производственных мощностей филиала в г. Луганск и развертыванию производственной площадки предлагается внедрение подхода по обеспечению надежности оборудования, что будет способствовать реорганизации процессов и достижению высоких показателей качества производства.

Текущая деятельность завода заключается в проектировании и

производстве современного горноспасательного, противопожарного и медицинского оборудования по следующему перечню продукции:

- специальные устройства для проверки панорамных масок и давления в кислородных баллонах;
- изолирующие регенеративные респираторы;
- самоспасатели шахтные изолирующие;
- аппараты высокочастотной индуктивной шахтной связи;
- аппараты связи командного пункта;
- аппараты подземной проводной связи;
- приборы для проверки герметичности всех типов самоспасателей;
- носилки подъёмно-переносные, переносные и повышенной грузоподъёмностью до 250 кг;
- аппараты проводной громкоговорящей связи;
- аппараты высокочастотной индуктивной шахтной связи с гарнитурой и ларингофоном;
- портативные аппараты искусственной вентиляции легких [313] и др.

В ходе исследования сформирована организационная структура предприятия, которая представлена на рисунке 4.1. Организационная структура предприятия является смешанной – в ней сочетаются функции, задачи и особенности линейно-функциональной (административные и вспомогательные подразделения) и дивизиональной структур (участки основного производства). Суммарное количество персонала – 80 человек.

Предприятие специализируется на мелкосерийном, преимущественно позаказном производстве, в связи с чем на предприятии имеются складские запасы готовой продукции в минимальном объеме. Этим объясняется критичность отслеживания уровня надежности производственных мощностей, предприятие должно иметь высокую степень готовности к выполнению производственного заказа.

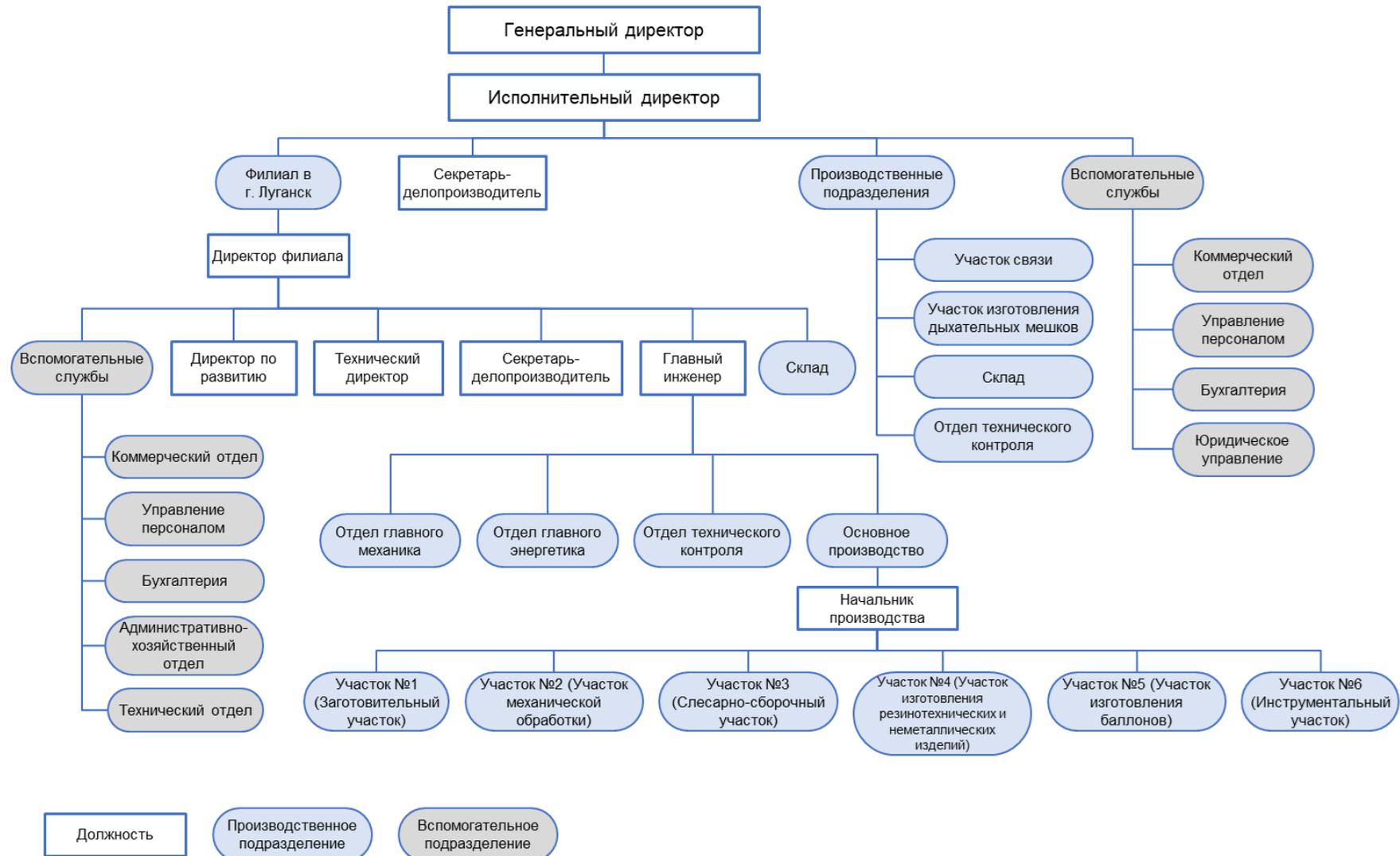


Рисунок 4.1 – Организационная структура предприятия ООО «Завод «Озон»

Источник: составлено автором по материалам ООО «Завод «Озон»

Специализация является смешанной по причине особенностей изготавливаемой продукции – часть участков специализируется на технологических видах деятельности, часть участков имеет предметную специализацию. Подробнее описание производственных участков представлено в параграфе 4.2.

Основными заказчиками предприятия являются ФГУП «Военизированная горноспасательная часть» (находится в ведении МЧС России), специализированные организации, ведущие деятельность по регулированию и предотвращению чрезвычайных ситуаций, медицинские организации, оборонные предприятия и компании, работающие в горнодобывающей промышленности. Таким образом, подтверждается актуальность внедрения подхода к обеспечению надежности оборудования на предприятии «Озон».

Значимость деятельности предприятия и критичность отслеживания уровня надежности производственной инфраструктуры объясняется, во-первых, потребностью соответствия высоким требованиям, закрепленным нормативными документами (среди них ГОСТ Р 58584–2019, ГОСТ Р 70061–2022, ГОСТ 31441.1–2011, ГОСТ 31610.0–2019 и др.), а также требованиям к системе менеджмента качества предприятия; во-вторых, участием предприятия в поддержке обороноспособности страны в части обеспечения военнослужащих надежной [316] и качественной экипировкой, специальными средствами защиты и вспомогательным оборудованием, что требует высокой готовности производственных участков к выполнению государственного оборонного заказа.

4.2 Внедрение процессной модели и алгоритма совершенствования процесса обеспечения надежности оборудования на предприятии машиностроения

Рассмотрим исходное состояние оборудования предприятия «Озон» и определим приоритетные направления по совершенствованию процесса обеспечения надежности оборудования.

Так, сформированная организационная структура (см. рисунок 4.1) отражает разделение производственных площадок по территориальному принципу на головное предприятие, расположенное в Орехово-Зуево, которое организует

работу всего предприятия и сбыт продукции, проводит наладку связи для электромеханических компонентов и изготовление дыхательных мешков, а также обеспечивает функционирование склада готовой продукции для дистрибуции; и предприятие, расположенное в ЛНР – Филиал в г. Луганск. В Луганск перенесена значительная часть основного производства, которое реализуется на 6 производственных участках:

- Участок №1 – Заготовительный участок, 19 единиц оборудования;

Данный производственный участок специализируется на обеспечении основного производства заготовками в необходимом объеме в установленные сроки при соблюдении требований к качеству. Так, участок осуществляет складирование используемого сырья и материалов, сортировку, контроль качества поступающих материалов, а также подготовку материалов к дальнейшей обработке при необходимости. Данный процесс является важным элементом производственного цикла, поскольку, согласно усредненной статистике компании, около 90% брака продукции на предприятии возникает по причине некачественного сырья. В связи с этим предприятие осуществляет реорганизацию цепочек поставок, в частности, переходит на сырье более высокого качества, что сопровождается некоторым увеличением затрат на поставку материалов.

Также заготовительный участок выполняет операции по изготовлению заготовок нужных размеров и формы, осуществляет контроль качества заготовок и соответствия установленным требованиям.

- Участок №2 – Участок механической обработки, 17 единиц оборудования;

Производственный участок механообработки специализируется на изготовлении деталей требуемой формы и размеров путем удаления материала заготовки за счет применения методов механической обработки с помощью специализированного оборудования. К основным операциям механической обработки, выполняемым на данном участке, можно отнести точение, фрезерование и шлифование. При этом важно отметить, что шлифовка на данном предприятии осуществляется с микронной точностью, что необходимо для

изготовления изделий с высокой точностью и качеством поверхностей и требует применения специализированных шлифовальных станков.

Данный участок является ключевым звеном производственного цикла на предприятии, поскольку на нем происходит преобразование заготовок в детали, готовые к дальнейшей сборке или передаче на другие участки, при этом практически все изделия проходят через данный участок. Приблизительная оценка доли выполняемых операций на участке механообработки от общего объема выполняемых производственных операций составляет 50–70%. В связи с этим дальнейшее исследование сфокусировано на анализе эффективности работы данного участка, оценке уровня надежности критически важных единиц оборудования на данном участке и внедрении предлагаемого процессного подхода в деятельность участка.

- Участок №3 – Слесарно-сборочный участок, 12 единиц оборудования;

На данном участке происходит сборка и настройка изготавливаемых респираторов, шахтных самоспасателей, аппаратов искусственной вентиляции лёгких, контрольных приборов, воздушных аппаратов, шлангов и других изделий. Основная задача данного участка заключается в сборке готовых изделий или узлов (сборочных единиц) в соответствии со сборочными чертежами и схемами, а также регулировка и настройка их работы. Кроме того, на данном участке выполняются слесарные работы, в частности опиливание, сверление, формирование резьбы, что позволяет обеспечить точность посадки деталей. В некоторых случаях возможно проведение испытаний работы изготавливаемых аппаратов.

- Участок №4 – Участок изготовления резинотехнических и неметаллических изделий, 16 единиц оборудования;

Основная задача данного участка – изготовление изделий из резины и других неметаллических материалов, в том числе полимеров и композиционных материалов. В частности, предприятие производит металлокомпозитные баллоны, внешняя оболочка которых состоит из композиционного материала на основе стеклонити, органожгута, углежгута или других армирующих материалов и эпоксидного связующего [317].

производственных площадках, составляет примерно 100 единиц оборудования.

В качестве критической единицы оборудования выбран станок Siemens KE 36x750 [318] (2023 год выпуска) по ряду причин. Во-первых, технические характеристики оборудования позволяют считать его современным высокоточным производительным станком, особенно важным для производственного процесса:

- станок оснащен современной системой ЧПУ (числовое программное управление), которая предоставляет возможность моделирования траекторий, оптимальную организацию процессов диагностики и автоматизации;
- станок обладает высокой точностью обработки до нескольких микрон за счет современной конструкции, прецизионных компонентов и развитой системы компенсации погрешностей;
- станок обладает жесткой конструкцией, что позволяет обрабатывать детали с большей глубиной резания и на более высоких скоростях, обеспечивает высокую скорость обработки благодаря мощному приводу шпинделя и быстрым перемещениям суппорта, оснащен мощным шпинделем, что позволяет обрабатывать более твердые материалы, имеет широкий диапазон частот вращения шпинделя, что позволяет подобрать оптимальные режимы резания для различных материалов.

Во-вторых, критичность данного станка объясняется тем, что станок применяется для обработки изделий в большом объеме, в связи с чем нарушение его работы оказывает значительное негативное влияние на устойчивость производственного процесса. В частности, в 2023 году произошел отказ станка, в связи с чем было затрачено около 5 рабочих дней на его восстановление, что повлекло за собой финансовые затраты и потери для предприятия. Взаимозаменяемость оборудования в полной мере отсутствует – аналогичные токарные станки с ЧПУ, имеющиеся на предприятии, более ранних годов выпуска и обладают менее предпочтительными техническими характеристиками. В-третьих, согласно оценке руководства предприятия, данный станок следует отнести к критически важным, поскольку станок введен в эксплуатацию не так давно в сравнении с другими единицами оборудования, в ближайшее время не будет

подвержен моральному и физическому износу в сравнении с другим оборудованием, а также не планируется к модернизации или капитальному ремонту.

Далее сфокусируемся на текущем подходе предприятия к обеспечению надежности оборудования. На предприятиях машиностроения обслуживание оборудования осуществляется службой главного механика, на предприятии «Завод «Озон» служба главного механика насчитывает 6 человек включая главного механика, инженера-механика, 2 техников и 2 специалистов по ремонту. Основные задачи службы главного механика заключаются в следующем:

- организация безопасной и непрерывной эксплуатации оборудования и инженерных систем, ТОиР, ведение план-графиков;
- контроль технического состояния оборудования, мониторинг, выявление и устранение несоответствий;
- устранение аварий и поломок оборудования, минимизация простоев;
- учет и анализ отказов оборудования, технико-экономических показателей работы оборудования;
- разработка рекомендаций по эксплуатации, обслуживанию и профилактике работы оборудования;
- контроль наличия и доступности необходимых для эксплуатации и ТОиР запасных частей и материалов;
- поддержание работоспособности производственной, энергетической инфраструктуры, обслуживание инженерных сетей;
- монтаж и ввод в эксплуатацию нового оборудования, вывод из эксплуатации устаревшего или неработоспособного оборудования.

Проведенный анализ работы предприятия, а также экспертная оценка руководителей предприятия «Завод «Озон» позволяют сформулировать ключевые, критически значимые вызовы, с которыми сталкивается служба главного механика и которые напрямую влияют на уровень надежности оборудования:

- отсутствие автоматизированной системы управления ТОиР (EAM), обеспечивающей отслеживание реализации план-графиков ремонтов и

технического обслуживания оборудования, соответствие рекомендациям производителей;

- отсутствие системы, обеспечивающей оперативное отслеживание и мониторинг технического состояния оборудования, в том числе отсутствие измерительных устройств;
- разрозненность имеющихся данных со статистикой параметров эксплуатации оборудования, статистикой отказов и пр., отсутствие надежных источников промышленных данных;
- недостаточный уровень компетенций персонала, в связи с чем отмечается недостаточно высокая эффективность эксплуатации оборудования;
- реализация ТОиР по состоянию, отсутствие технических возможностей проведения проактивного обслуживания оборудования;
- периодическое возникновение отказов оборудования, в том числе критически важных для производственного процесса, что не было спрогнозировано заранее.

Для совершенствования процессов обеспечения надежности и повышения значения комплексного показателя качества предложен ряд мероприятий для реализации на рассматриваемом предприятии.

Во-первых, рекомендована реализация процессного подхода в соответствии с процессной моделью, представленной в параграфе 3.1, и алгоритмом, представленном в параграфе 3.3.

Во-вторых, предприятию требуется развернуть информационную систему, направленную на управление процессами технического обслуживания и ремонтов. Данный компонент может входить в состав программных инструментов, интегрированных в программно-аппаратную составляющую цифрового двойника и развернутых на цифровой платформе.

Третьим ключевым мероприятием предлагаемых мер по совершенствованию процессов обеспечения надежности на предприятии является разработка цифрового двойника оборудования и последующее формирование системы для сбора и обработки данных, мониторинга за состоянием, создания

модели пониженного порядка и проведения ROM-моделирования.

Четвертый блок мероприятий направлен на приобретение и монтаж измерительных устройств, датчиков, актуаторов, программируемых логических контроллеров, сенсоров, устройств сбора и передачи данных и других технических средств, необходимых для развертывания системы промышленного интернета вещей.

Дополнительными мероприятиями являются проведение обучающих мероприятий и образовательных программ для технического персонала предприятия, создание матрицы, содержащей основные рекомендации по результативному обслуживанию оборудования и соблюдению корректных режимов эксплуатации, а также регулярная оценка комплексного показателя качества обеспечения надежности с периодичностью 1 раз в месяц силами службы главного механика.

Так, в соответствии с процессной моделью выявлена критическая зона производственного процесса механообрабатывающего участка и определено, что станок КЕ 36x750 является критически важным для стабильности производственного процесса на данном участке. Далее проведена оценка комплексного показателя качества обеспечения надежности оборудования для определения текущего состояния рассматриваемого оборудования до внедрения мер, направленных на совершенствование процесса обеспечения надежности и, следовательно, до реализации предлагаемого процессного подхода.

Оценка показателей проходила в соответствии со сводной таблицей показателей 2.1 в рамках группы *e* «оборудование» и таблицей 2.2 со шкалой оценивания показателей группы *p* «персонал» и *t* «технологии и ресурсы». Результаты оценки приведены в параграфе 4.3. Некоторые пояснения к значениям, полученным в ходе оценки комплексного показателя, приведены в Приложении Б, при этом диапазон измерений приведен на основе нормированных значений показателей. Важно отметить, что оценка проводилась с привлечением экспертной комиссии, в том числе руководства предприятия ООО «Завод «Озон».

По результатам оценки определено, что исходное значение комплексного

показателя качества обеспечения надежности оборудования составило $R_{исх} = 0,1178$, уровень безотказности составил $r^f = 0,414$, в связи с чем отнесем оборудование к классу оборудования с пониженным уровнем надежности в соответствии с классификацией, представленной в параграфе 3.2.

Чтобы эффективно реализовать предложенную процессную модель и алгоритм совершенствования процесса обеспечения надежности, решено создать и внедрить цифровой двойник оборудования с помощью сторонних экспертов. В процессе создания цифрового двойника проведено сканирование оборудования и сформирована предварительная модель станка, развернутая на мощностях компании-исполнителя. Информация о статусе реализации проекта и иллюстративные материалы не могут быть представлены в открытом доступе по причине заключенного соглашения о неразглашении коммерческой информации. Планируемый срок завершения работ по созданию цифрового двойника оборудования, проведения всех согласованных с заказчиком цифровых (виртуальных) испытаний оборудования, наладки режимов эксплуатации и мероприятий по обслуживанию оборудования, формирование единого информационного пространства для предоставления заказчику доступа к цифровой модели оборудования (в том числе модели пониженного порядка), а также матрицы рекомендаций намечен на период после завершения текущего научного исследования.

Согласно предварительно предоставленной информации о размещении датчиков и измерительных устройств, а также подключении к промышленной системе интернета вещей, сформирован перечень измерительных устройств к закупке. Перечень сформирован на основе предварительной оценки компанией-исполнителем проекта создания цифрового двойника с привлечением экспертов со стороны компании-заказчика. Устройства будут интегрированы с цифровым двойником, также будет настроен диапазон отклонений и система выдачи оповещений о выявленных отклонениях. Итоговый перечень устройств будет согласован по завершении процессов по разработке цифрового двойника. Ранее оборудование не было интегрировано с устройствами сбора данных.

Перечень датчиков и обозначение характеристики работы оборудования, на измерение которой направлен датчик, приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Предварительный перечень измерительных устройств, датчиков, актуаторов, программируемых логических контроллеров, сенсоров, устройств сбора и передачи данных и других технических средств к закупке на предприятии ООО «Завод «Озон»

№п/п	Наименование устройства	Описание измеряемого параметра
1.	Датчик тока шпинделя	Измерение тока, потребляемого двигателем шпинделя
2.	Датчик вибрации шпинделя (акселерометр)	Измерение вибрации шпинделя
3.	Датчик температуры шпинделя (пирометр)	Измерение температуры шпинделя
4.	Линейный энкодер	Датчик измерения положения суппорта по осям X и Z
5.	Датчик давления в гидравлическом приводе	Измерение давления в гидросистеме
6.	Датчик расхода СОЖ	Контроль уровня и расхода смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ)
7.	Динамометр	Измерение силы резания в двух направлениях (Px, Pz)
8.	Датчик вибрации станины (акселерометр)	Обнаружение общих вибраций станка
9.	Датчик износа резца	Проведение акустической эмиссии для контроля микротрещин
10.	Система технического зрения	Контроль качества поверхности и обнаружения дефектов

№п/п	Наименование устройства	Описание измеряемого параметра
11.	Дефектоскоп	Выявление скрытых дефектов, микротрещин и проч.
12.	IoT-шлюз	Интеграция с платформой цифрового двойника

Источник: составлено автором по материалам ООО «Завод «Озон», результатам опроса руководителей предприятия, материалам компании-исполнителя проекта создания цифрового двойника

Предварительная схема расположения измерительных устройств в соответствии с обозначенным перечнем отражена на рисунке 4.3 в соответствии с нумерацией типа датчиков.

Далее необходимо интегрировать потоки данных, поступающие от измерительных устройств, с системой сбора и анализа данных. Для этого требуется IoT-шлюз, который передает эти данные на платформу, где их возможно визуализировать, проанализировать и на их основе принять управленческие решения [129; 283; 284]. В целях обеспечения корректной интерпретации информации строится корреляция [319] между измеряемыми параметрами (такими как длительность работы, температура, сила тока, вибрации, положение координат, давление, расход, сила, структура материала с учетом микротрещин и т.п.) и описанием состояния оборудования.

В общем виде корреляция такого рода может быть описана следующей зависимостью:

$$r_{\text{текущ}} = r(t, T, A, g, X, P, C, F, S) \quad (4.1)$$

где $r_{\text{текущ}}$ – функция, обозначающая состояние оборудования в зависимости от входных (поточковых) данных, $r(t, T, A, g, X, P, C, F, S)$ – функция, обозначающая корреляцию между параметрами $t, T, A, g, X, P, C, F, S$.

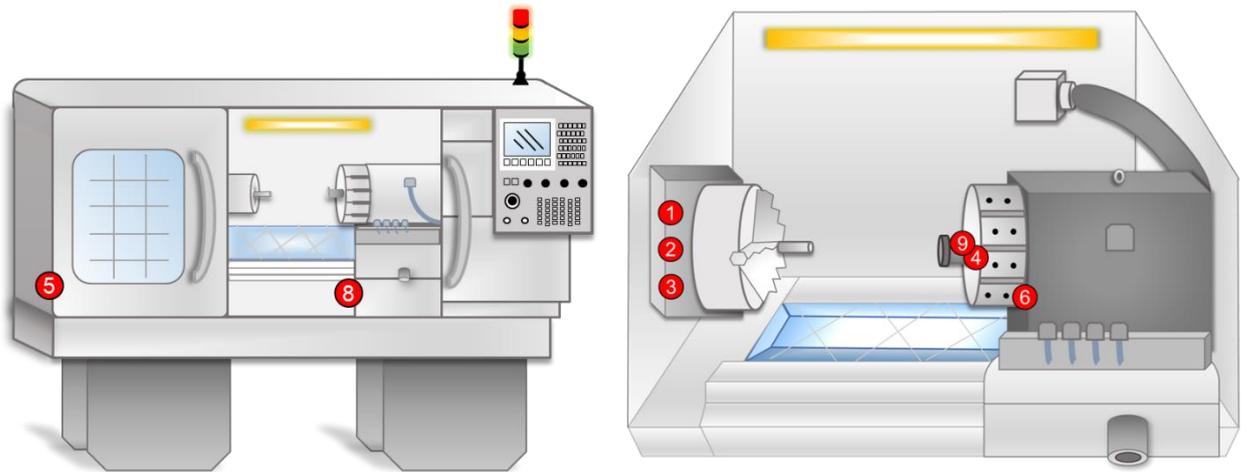


Рисунок 4.3 – Схема расположения датчиков на станке

Источник: составлено автором по материалам ООО «Завод «Озон»

Корреляция измеряемых параметров и характеристик состояния оборудования является важным, поскольку изменение некоторых параметров может нести изменения других параметров за счет имеющейся взаимосвязи между свойствами по всей технологической цепочке работы станка. Наблюдаемое изменение свойств может свидетельствовать о наличии отклонения от требуемого состояния. Поток данных, получаемый в результате измерения и оценки обозначенных параметров, определяет, какие свойства могут и должны контролироваться, какие свойства можно прогнозировать, диагностировать отклонения, корректировать их значения управляющими воздействиями.

Состояние оборудования в соответствии с выявленными параметрами может быть привязано к классификации, приведенной в параграфе 3.2. Тем самым формируется модель описания состояния оборудования с учетом целевых (изменяемых) параметров, визуализация которой происходит на цифровой платформе за счет совместного взаимодействия потока данных и цифрового двойника в режиме реального времени. Укрупненно процесс передачи данных между интегрированными измерительными устройствами промышленного интернета вещей и платформой сбора и анализа данных (цифровой платформой управления цифровым двойником) представлена на рисунке 4.4.

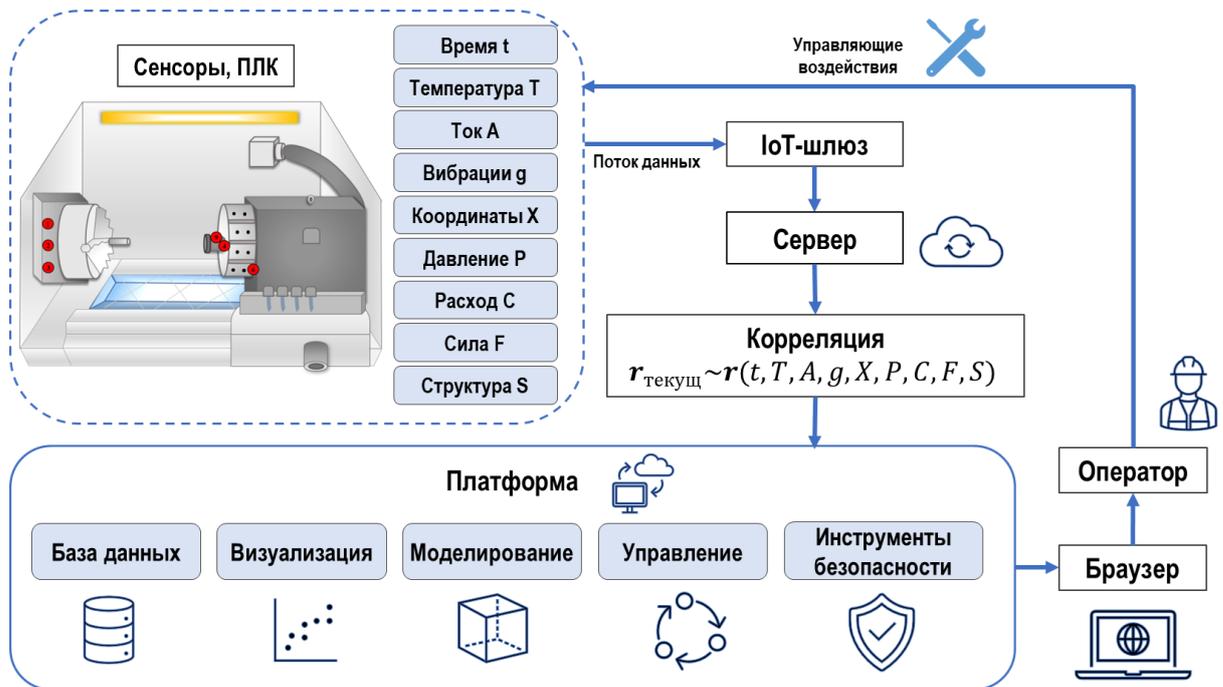


Рисунок 4.4 – Процесс передачи данных от устройств промышленного интернета на платформу сбора и анализа данных в рамках технологии цифрового двойника

Источник: разработано автором

Также предприятием согласована закупка лицензии информационной системы 1С:ТОиР [320; 321] в количестве 6 рабочих мест, которую запланировано интегрировать с системой цифрового двойника для обеспечения доступа к ресурсам управления надежностью в едином пространстве. Кроме того, в течение ближайших двух лет запланировано проведение не менее 8 обучающих мероприятий, направленных на погружение в методы первичной диагностики и выявления неисправностей, FMECA, анализ дерева неисправностей (FTA), анализ первопричин отказов (RCA), совершенствование процессов планирования и организации технического обслуживания и ремонта оборудования.

Будет проведен ряд мероприятий, согласованных с компанией-исполнителем работ по созданию цифрового двойника, для обучения процессам мониторинга состояния оборудования и предиктивного анализа возможного нарушения режимов работы.

Также расширен функционал службы главного механика, в частности введены задачи по регулярной оценке значения комплексного показателя качества обеспечения надежности, а также скорректирован кадровый состав предприятия и

планируется формирование нового инженерного подразделения, ответственного за информационное сопровождение процессов применения цифрового двойника оборудования.

Среди планов предприятия на ближайшие 8 лет, помимо стратегических задач по увеличению выпуска надежной и качественной продукции, также формирование семейства цифровых двойников экземпляров для токарных станков на основе разрабатываемого в настоящий момент цифрового двойника, и формирование семейства цифровых двойников оборудования для всех критических зон производственного процесса.

4.3 Оценка эффективности внедрения процессной модели и алгоритма совершенствования процесса обеспечения надежности оборудования на предприятии машиностроения

Представим в таблице 4.2 результаты оценки исходного комплексного показателя качества обеспечения надежности станка KE 36x750, который определен как критическое оборудование на предприятии ООО «Завод «Озон». Оценка исходных значений показателей проводилась по состоянию на 1 апреля 2025 года. Так, оборудование суммарно наработало 3100 часов за время начиная с момента ввода в эксплуатацию (10 января 2023 года), за этот период произошел один критический отказ оборудования, вызванный человеческим фактором. Причины наступления отказа оборудования оценивались с применением причинно-следственной диаграммы Исикавы.

Экспертная оценка показателей группы «персонал» и группы «технологии и ресурсы» проводилась на основе таблицы 2.2 с учетом оценки трех представителей предприятия ООО «Завод «Озон», которые составили экспертную комиссию. В таблицах 4.2 и 4.3 приведены усредненные значения экспертной оценки.

Исходное значение комплексного показателя качества обеспечения надежности оборудования составило $R_{исх} = 0,1178$.

Таблица 4.2 – Оценка исходного значения показателей комплексного показателя качества (КПК) обеспечения надежности оборудования на предприятии ООО «Завод «Озон»

Показатели группы «оборудование»	Исходные значения показателей		
	Значение показателя в исходной форме	Значение показателя	Весовой коэффициент
Уровень безотказности оборудования	2100	0,414	0,15
Уровень точности оборудования	100	1	0,15
Общая эффективность работы оборудования	53	0,53	0,15
Уровень готовности оборудования	0,98	0,73	0,07
Уровень ремонтпригодности оборудования	40	0,357	0,1
Уровень долговечности оборудования	3100	0,938	0,08
Параметры режимов работы оборудования в соответствии с заданными производителем	80	0,8	0,1
Длительность планового технического обслуживания относительно общей продолжительности технического обслуживания	0,83	0,83	0,1

Длительность простоев оборудования из-за отказов и ремонтов относительно общей продолжительности простоев оборудования	0,03	0,94	0,1
Значение показателей группы показателей «оборудование»	0,71044		
Весовой коэффициент группы показателей «оборудование»	0,5		
Итоговое значение КПК группы показателей «оборудование»	0,03947		
Показатели группы «персонал»	Исходные значения показателей		
	Значение показателя	Весовой коэффициент	
Уровень владения навыками для проведения требуемого технического обслуживания и ремонта оборудования	0,6	0,4	
Уровень компетенций в выполнении производственных операций с использованием оборудования	0,7	0,4	
Уровень владения навыками для анализа данных и выявления взаимосвязей при мониторинге работы оборудования	0,2	0,2	
Значение показателей группы показателей «персонал»	0,56		

Весовой коэффициент группы показателей «персонал»	0,25	
Итоговое значение КПК группы показателей «персонал»	0,04667	
Показатели группы «технологии и ресурсы»	Исходные значения показателей	
	Значение показателя	Весовой коэффициент
Уровень мониторинга технического состояния и эксплуатации оборудования	0,2	0,4
Уровень доступности инструментов для проведения технического обслуживания и ремонтов	0,4	0,3
Уровень входного контроля сырья и материалов для изготовления изделий	0,6	0,3
Значение показателей группы показателей «технологии и ресурсы»	0,28	
Весовой коэффициент группы показателей «технологии и ресурсы»	0,25	
Итоговое значение КПК группы показателей «технологии и ресурсы»	0,03167	
Итоговое значение КПК обеспечения надежности станка	0,1178	

Источник: составлено автором по материалам ООО «Завод «Озон» и результатам опроса руководителей предприятия и экспертной комиссии

Аналогично в таблице 4.3 представлена оценка планового значения показателей комплексного показателя обеспечения надежности станка КЕ 36х750. Данное значение, по оценке экспертов, будет достигнуто к сроку реализации предлагаемых мер, включая реализацию процессного подхода и алгоритма по внедрению цифрового двойника оборудования.

Таблица 4.3 – Оценка планового значения показателей комплексного показателя качества (КПК) обеспечения надежности оборудования на предприятии ООО «Завод «Озон»

Показатели группы «оборудование»	Плановые значения показателей		
	Значение показателя в исходной форме	Значение показателя	Весовой коэффициент
Уровень безотказности оборудования	5000	1	0,15
Уровень точности оборудования	100	1	0,15
Общая эффективность работы оборудования	75	0,75	0,15
Уровень готовности оборудования	0,997	1	0,07
Уровень ремонтпригодности оборудования	15,2	0,8	0,1
Уровень долговечности оборудования	5100	0,898	0,08
Параметры режимов работы оборудования в соответствии с заданными производителем	100	1	0,1

Длительность планового технического обслуживания относительно общей продолжительности технического обслуживания	1	1	0,1
Длительность простоев оборудования из-за отказов и ремонтов относительно общей продолжительности простоев оборудования	0,02	0,96	0,1
Значение показателей группы показателей «оборудование»	–	0,93	1
Весовой коэффициент группы показателей «оборудование»	0,5		
Итоговое значение КПК группы показателей «оборудование»	0,0517		
Показатели группы «персонал»	Плановые значения показателей		
	Значение показателя	Весовой коэффициент	
Уровень владения навыками для проведения требуемого технического обслуживания и ремонта оборудования	0,9	0,4	
Уровень компетенций в выполнении производственных операций с использованием оборудования	0,9	0,4	

Уровень владения навыками для анализа данных и выявления взаимосвязей при мониторинге работы оборудования	0,8	0,2
Значение показателей группы показателей «персонал»	0,88	1
Весовой коэффициент группы показателей «персонал»	0,25	
Итоговое значение КПК группы показателей «персонал»	0,073	
Показатели группы «технологии и ресурсы»	Плановые значения показателей	
	Значение показателя	Весовой коэффициент
Уровень мониторинга технического состояния и эксплуатации оборудования	0,8	0,4
Уровень доступности инструментов для проведения технического обслуживания и ремонтов	0,7	0,3
Уровень входного контроля сырья и материалов для изготовления изделий	0,8	0,3
Значение показателей группы показателей «технологии и ресурсы»	0,77	1
Весовой коэффициент группы показателей «технологии и ресурсы»	0,25	

Итоговое значение КПК группы показателей «технологии и ресурсы»	0,064
Итоговое значение КПК обеспечения надежности станка	0,1892

Источник: составлено автором по материалам ООО «Завод «Озон» и результатам опроса руководителей предприятия и экспертной комиссии

Визуально представим сравнение количественной оценки показателей качества процесса обеспечения надежности на предприятии ООО «Завод «Озон» в рамках групп показателей, а также сравнение итоговых значений комплексного показателя качества (см. Рисунок 4.5).

Также адаптируем представленную в таблице 2.4 шкалу ранжирования комплексного показателя качества обеспечения надежности с учетом весовых коэффициентов, представленных по материалам ООО «Завод «Озон» (см. таблицу 4.4).

Таким образом, ожидается изменение уровня качества процесса обеспечения надежности станка от исходного значения $R_{исх} = 0,1178$ (пониженный уровень качества обеспечения надежности) к плановому значению $R_{DT} = 0,1892$ (высокий уровень качества обеспечения надежности), изменение составит 60,6%.

Уровень вероятности безотказной работы оборудования повысился с исходного значения $r_{исх}^f = 0,414$ (2100 часов) до планового значения $r_{DT}^f = 1$ (5000 часов), что соответствует запланированному периоду безотказной работы, заявленному в паспорте.

Также ожидается увеличение уровня ремонтпригодности оборудования от $r_{исх}^m = 0,357$ (40,0 часов) до $r_{DT}^m = 0,800$ (15,2 часа) и увеличение других показателей качества процесса обеспечения надежности.

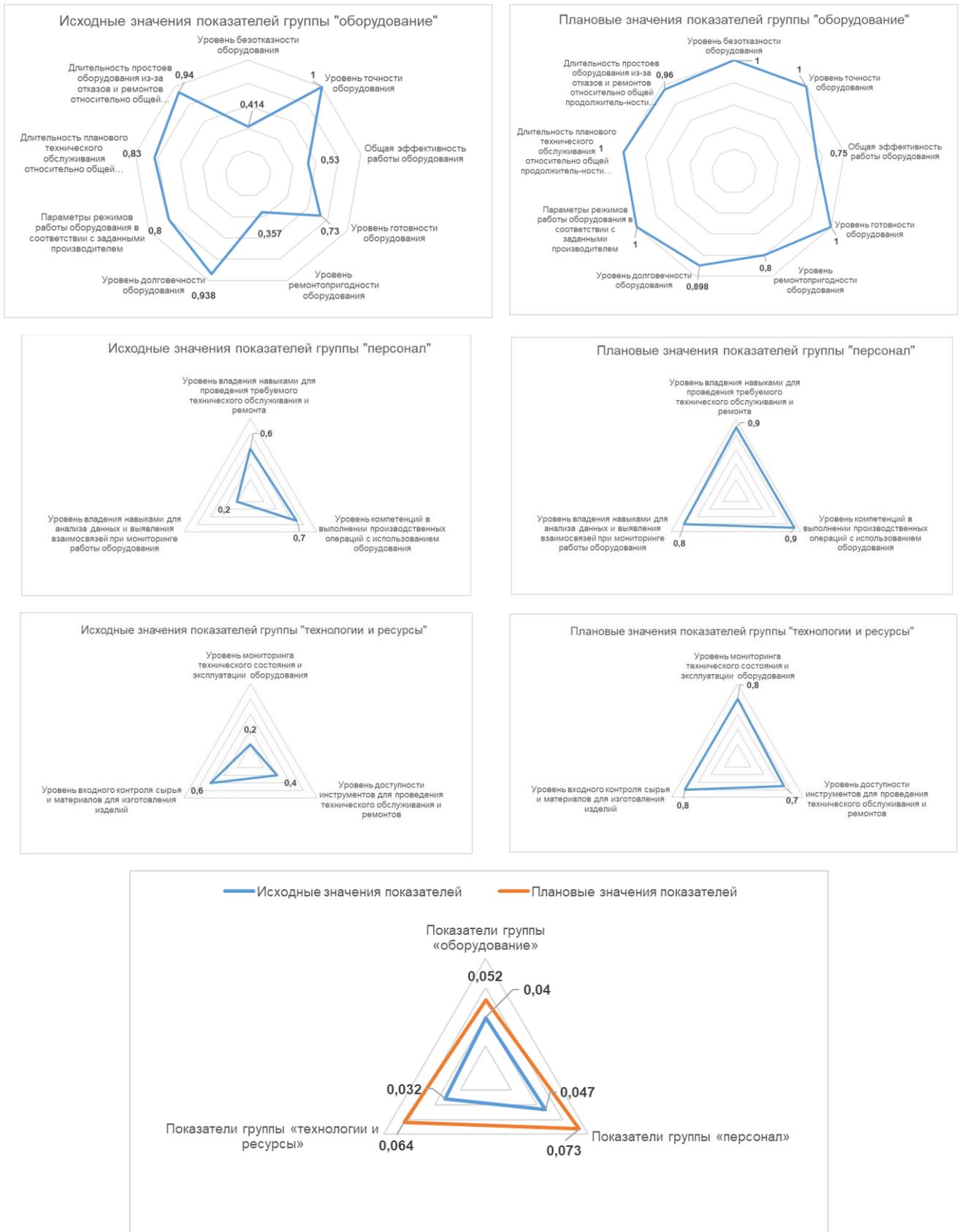


Рисунок 4.5 – Сравнение исходного и планового значений показателя качества процесса обеспечения надежности

Источник: составлено автором по материалам ООО «Завод «Озон»

Таблица 4.4 – Шкала ранжирования комплексного показателя качества обеспечения надежности при весовых коэффициентах ООО «Завод «Озон»

Уровень качества обеспечения надежности	Диапазон значений	Описание уровня качества
Критический уровень	$0 \leq R < 0,044$	Требуется улучшение, уровень качества неудовлетворителен
Низкий уровень	$0,044 \leq R < 0,088$	Наблюдаются значительные несоответствия, уровень качества неудовлетворителен
Пониженный (удовлетворительный) уровень	$0,088 \leq R < 0,133$	Наблюдаются несоответствия, уровень качества на удовлетворительном уровне
Приемлемый уровень	$0,133 \leq R < 0,177$	Качество на приемлемом уровне, возможны улучшения
Высокий уровень	$0,177 \leq R < 0,222$	Качество на высоком уровне

Источник: составлено автором

В результате применения процессного подхода улучшились показатели надежности оборудования, увеличился уровень мониторинга и обслуживания станка, снизился риск выхода оборудования из строя. Тем самым подтверждается ожидаемая эффективность внедрения предложенных в работе процессной модели и алгоритма, направленных на внедрение цифрового двойника оборудования.

Выводы

В исследовании представлены результаты применения предлагаемого подхода на предприятии машиностроения на примере завода производства горноспасательного и противопожарного оборудования. Предприятие рассмотрено в разрезе нескольких аспектов – организационной и пространственно-цеховой структуры, реализуемой продукции, выполняемых производственных процессов и функциональных задач подразделений, основных заказчиков, имеющихся нормативно-технических ограничений и т.п. В качестве исследуемого критически важного станка на предприятии рассмотрен токарный станок с системой числового программного управления, расположенный на механообрабатывающем участке.

Предлагаемые мероприятия включали реализацию процессного подхода и алгоритма, внедрение автоматизированной системы управления техническим обслуживанием, создание цифрового двойника и системы мониторинга и др. Кроме того, при поддержке специалистов анализируемого предприятия проведена подготовка перечня измерительных устройств для формирования системы промышленного интернета вещей, проработан вопрос размещения датчиков в критически важных зонах оборудования, сформирована программно-реализуемая система цифрового двойника, интегрированная с устройствами промышленного интернета вещей.

В ходе исследования проведена оценка эффективности применения разработанных мероприятий для обеспечения надежности оборудования на рассматриваемом предприятии на основе комплексного показателя качества. Ожидаемые результаты от реализации обозначенных мероприятий подтверждают эффективность реализуемого подхода к обеспечению надежности оборудования с применением цифровых двойников и формированием системы мониторинга, что обосновывает практическую значимость полученных в диссертационном исследовании результатов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе диссертационного исследования получены **следующие результаты:**

- Поставленная в исследовании цель, направленная на повышение надежности оборудования за счет применения цифровых двойников и определения критических зон оборудования, достигнута.
- Разработан комплексный показатель качества обеспечения надежности оборудования в разрезе трех групп показателей – показатели, связанные с оборудованием, описывающие процессы и результаты его эксплуатации, состояние и уровень надежности; показатели, связанные с персоналом, раскрывающие уровень компетенций при эксплуатации и обслуживании оборудования; показатели, связанные с применяемыми технологиями и имеющимися ресурсами, в том числе с учетом передовых цифровых и производственных технологий, оказывающих влияние на процессы и эффективность содержания оборудования.
- Разработана математическая модель повышения качества обеспечения надежности оборудования на основе предложенного комплексного показателя качества, учитывающего эксплуатационные характеристики производственного оборудования, квалификацию персонала, применение технологий мониторинга и ресурсов. Математическая модель сформирована для автономных станков и для группы оборудования, составляющего производственную линию, позволяет учесть вес каждого оцениваемого показателя, вес каждой группы, вес каждого станка и группы станков, нормализованное значение показателей группы «оборудование», что балансирует приведенную оценку и позволяет эффективно и системно оценить текущий уровень надежности оцениваемого объекта.
- Разработана процессная модель обеспечения надежности оборудования, отличающаяся внедрением цифрового двойника оборудования, позволяющего определить критические зоны оборудования и реализовать обоснованное проактивное техническое обслуживание на основе эксплуатационных данных и результатов моделирования. Процессная модель предполагает также развертывание программно-реализуемой системы цифрового двойника оборудования и оценку эффективности на основе математической

модели оценки качества обеспечения надежности, что обеспечивает комплексный подход к определению и повышению уровня надежности оцениваемого объекта.

- Сформирована модель определения вероятности безотказной работы оборудования и наступления отказа оборудования на основе традиционной модели вероятности безотказной работы, отличающаяся применением технологии цифровых двойников. При внедрении технологии цифровых двойников возникает резерв надежности, поскольку снижается вероятность наступления отказа оборудования, увеличивается межремонтный период и срок службы оборудования. Данный подход в сочетании с процессной моделью предотвращает преждевременный износ станка и наступление отклонения, что повышает эксплуатационную надежность не только оцениваемого станка, но и всей производственной системы.

- Проведена оценка результативности реализации предложенных мероприятий на примере предприятия, специализирующегося в области горноспасательного и противопожарного оборудования. Реализация предложенных мер позволяет увеличить уровень качества процесса обеспечения надежности станка от $R_{исх} = 0,1178$ до планового значения $R_{DT} = 0,1892$, изменение составит 60,6%. Уровень вероятности безотказной работы оборудования повысился с исходного значения $r_{исх}^f = 0,414$ (2100 часов) до планового значения $r_{DT}^f = 1$ (5000 часов), что соответствует запланированному периоду безотказной работы, заявленному в паспорте. Также ожидается увеличение уровня ремонтпригодности оборудования от $r_{исх}^m = 0,357$ (40,0 часов) до $r_{DT}^m = 0,800$ (15,2 часа) и увеличение других показателей качества процесса обеспечения надежности.

Внедрение разработанных методологий в деятельность предприятий промышленности будет способствовать обеспечению высокого уровня цифровой трансформации целых отраслей, что является существенным как для предприятий общего машиностроения, так и для экономики Российской Федерации [8]. Тем самым формируется научно-технический задел для достижения целей

национального развития, в том числе технологического лидерства, импортозамещающего уклада, реализации программы станкостроения и обеспечения конкурентоспособности промышленности страны.

Рекомендации для применения результатов диссертационного исследования могут включать детализацию показателей, составляющих основу комплексного показателя качества, и формализацию методов оценки для конкретных областей применения; оценку технико-экономической результативности применения предлагаемых результатов; дополнение процессной модели и алгоритма совершенствования процесса обеспечения надежности инструментами и методами, используемыми на конкретных предприятиях.

Перспективы дальнейшей разработки темы исследования включают разработку методик, адаптированных под специфику различных типов оборудования; проведение исследований, дополненных и интегрированных с другими методами обеспечения и повышения надежности (RCM, FMECA и др.); разработку механизмов обратной связи, системы поддержки принятия решений и формирование сценариев возможной эксплуатации оборудования; масштабирование результатов исследования на другие отрасли промышленности, в том числе отрасли непрерывного производства, и т.д. Определенные направления развития темы диссертационного исследования будут представлены в следующих работах и публикациях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Указ Президента Российской Федерации от 28 февраля 2024 № 145 «О Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации». – URL: <http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202402280003> (дата обращения: 24.06.2024).
2. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 20 мая 2023 г. № 1315-р «Об утверждении Концепции технологического развития на период до 2030 года». – URL: <http://government.ru/docs/48570/> (дата обращения: 24.06.2024).
3. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 07.11.2023 г. № 3113-р «Стратегическое направление в области цифровой трансформации обрабатывающих отраслей промышленности, относящейся к сфере деятельности Министерства промышленности и торговли Российской Федерации». – URL: <http://government.ru/docs/all/150406/> (дата обращения: 25.12.2023).
4. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 5 ноября 2020 г. № 2869-р «Стратегия развития станкоинструментальной промышленности на период до 2035 года». – URL: <http://static.government.ru/media/files/NyeLKqLhrJrydnGRBm39nHl0hJNOzHzQ.pdf> (дата обращения: 09.07.2024).
5. Правительство планирует расширить программу развития станкоинструментальной промышленности и робототехники до национального проекта – Аналитический центр при Правительстве Российской Федерации. – URL: <https://ac.gov.ru/news/page/pravitelstvo-planiruet-rassirit-programmu-razvitiya-stankoinstrumentalnoj-promyslennosti-i-robototehniki-do-nacionalnogo-proekta-27821> (дата обращения: 09.07.2024).
6. На нацпроект по робототехнике и станкостроению дают 300 млрд рублей. – URL: <https://www.vedomosti.ru/technology/articles/2024/06/11/1043378-natsproekt-robototehnike-300> (дата обращения: 09.07.2024).
7. Российская газета. Россия активизирует создание собственных станков и оборудования. Торгово-промышленная палата Российской Федерации. – URL:

<https://news.tpprf.ru/ru/media/5827932/> (дата обращения: 09.07.2024).

8. Корниенко, А.В. Обзор подходов к определению «надежность оборудования». Классификация технологического оборудования в зависимости от уровня надежности / А.В. Корниенко, Е.Р. Мартынец, В.А. Левенцов // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. – 2025. – № 1 (369). – С. 98-112. – URL: https://oreluniver.ru/public/file/archive/fipptt_ZHurnal_1_2025.pdf

9. Корниенко, А.В. Алгоритм мониторинга надежности технологического оборудования с применением технологии цифровых двойников / А.В. Корниенко, В.А. Левенцов // *Национальные концепции качества: роль качества в стратегиях социально-экономического развития в новом мире: Сборник материалов XV Международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 18–22 октября 2024 года*. – 2024. – С. 148-151. – URL: <https://unecon.ru/wp-content/uploads/2025/01/sbornik-nkk-2024.pdf>

10. Корниенко, А.В. Математическая модель качества производственного процесса / А.В. Корниенко, Е.Р. Мартынец, В.А. Левенцов // *Управление качеством продукции на основе передовых производственных технологий: Сборник тезисов докладов V Международного форума*. – 2023. – С. 14-21.

11. Корниенко, А.В. Система качества производственного процесса и надежность технологического оборудования / А.В. Корниенко, Е.Р. Мартынец, В.А. Левенцов // *Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 4: Промышленные технологии*. – 2024. – № 3. – С. 38-43.

12. Корниенко, А.В. Обеспечение надежности оборудования с точки зрения процессного подхода и влияния на качество производственного процесса / А.В. Корниенко // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. – 2025. – № 3 (371). – С. 174-181.

13. Корниенко, А.В. Надежность технологического оборудования как фактор эффективности производственного процесса / А.В. Корниенко, Е.Р. Мартынец, В.А. Левенцов // *Петербургский экономический журнал*. – 2025. –

№ 1. – С. 42-53.

14. Корниенко, А.В. Принципы обеспечения и повышения надежности технологического оборудования / А.В. Корниенко // Актуальные проблемы менеджмента качества, стандартизации и метрологии: Сборник докладов X Всероссийской научно-практической Интернет-конференции, Белгород, 11 февраля 2025 года. – 2025. – С. 171-174.

15. The state and dynamics of the intellectual infrastructure of technological development of industrial enterprises: methodological tools for assessing sustainability / V. Leventsov [et al.] // E3S Web of Conferences 419, 01017. – 2023. – P. 1-13.

16. Компьютерный инжиниринг: учеб. пособие / А.И. Боровков [и др.]. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – 93 с.

17. SEH 3.0 NASA Program/Project Life Cycle – NASA. – URL: <https://www.nasa.gov/reference/3-0-nasa-program-project-life-cycle/> (дата обращения: 15.04.2025).

18. Systems Engineering Definition. – URL: https://www.incose.org/about-systems-engineering/system-and-se-definition/systems-engineering-definition#ENGINEERED_SYSTEM (дата обращения: 28.02.2024).

19. Системная инженерия. Принципы и практика / А. Косяков [и др.]. – М.: ДМК Пресс, 2014. – 624 с.

20. Романов, А.А. Прикладной системный инжиниринг / А.А. Романов. – М.: Физматлит, 2015. – 555 с.

21. Папич, Л. Системный анализ, управление и обработка информации. Методическое руководство / Л. Папич. – 2022. – 464 с.

22. NASA Technical Reports Server (NTRS) 19930015284: Development of code evaluation criteria for assessing predictive capability and performance. – 1993.

23. ГОСТ Р ИСО 10303–239–2008 Системы автоматизации производства и их интеграция. Представление данных об изделии и обмен этими данными. Часть 239. Прикладные протоколы. Поддержка жизненного цикла изделий. – URL: <https://protect.gost.ru/default.aspx/v.aspx?control=7&id=173810> (дата обращения: 01.03.2023).

24. ГОСТ Р 57193–2016 Системная и программная инженерия. Процессы жизненного цикла систем. – URL: <https://protect.gost.ru/document.aspx?control=7&id=205413> (дата обращения: 27.02.2023).

25. Guide to the Systems Engineering Body of Knowledge (SEBoK) Version 2.11, 2024. – URL: https://sebokwiki.org/w/images/sebokwiki-farm!w/5/5c/Guide_to_the_Systems_Engineering_Body_of_Knowledge_v2.11.pdf (дата обращения: 03.03.2025).

26. Николенко, В.Ю. Инновации от идеи до рынка / В.Ю. Николенко. – ООО «Издательские решения», 2024. – 550 с.

27. DTIC ADA223168: Systems Engineering Management Guide, 1990. – URL: https://archive.org/details/DTIC_ADA223168/page/B-6/mode/2up (дата обращения: 04.04.2025).

28. Systems Engineering Handbook – NASA. – URL: <https://www.nasa.gov/reference/systems-engineering-handbook/> (дата обращения: 03.03.2025).

29. Systems engineering handbook : a guide for system life cycle processes and activities / prepared by International Council on Systems Engineering (INCOSE) – 4th edition. – USA: John Wiley & Sons, Inc., 2015. – 304 с.

30. INCOSE, SE Vision 2020, TP-2004-004-02, September 2007. – URL: <https://www.omgwiki.org/MBSE/doku.php> (дата обращения: 28.02.2023).

31. Фатхутдинов, Р.А. Организация производства: учебник / Р.А. Фатхутдинов. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва: ИНФРА-М, 2007. – 544 с.

32. Корниенко, А.В. Факторы повышения эффективности процессов организации производства / А.В. Корниенко, В.А. Левенцов // Управление качеством продукции на основе передовых производственных технологий: сборник тезисов докладов IV Международного форума «Передовые цифровые и производственные технологии». – 2023. – С. 52-57.

33. Кузин, Б.И. Организация и оперативно-календарное планирование машиностроительного производства в АСУП / Б.И. Кузин, В.А. Дуболазов. –

Ленинград: Изд-во Ленинградского ун-та, 1978. – 241 с.

34. Лебедев, Л.В. Технология машиностроения: учеб. для студ. вузов / Л.В. Лебедев, В.У. Мнацаканян, А.А. Погонин. – М.: Академия, 2006. – 528 с.

35. Корниенко, А.В. Цифровой двойник как инструмент проектирования производства / А.В. Корниенко, В.А. Левенцов // Устойчивое развитие цифровой экономики, промышленности и инновационных систем: сборник трудов научно-практической конференции с зарубежным участием. – 2020. – С. 624-628.

36. Мартынец, Е.Р. Цифровые двойники изделий как инструмент обеспечения качества на стадии разработки / Е.Р. Мартынец, А.В. Корниенко, В.А. Левенцов // Управление инновациями в условиях цифровой трансформации: сборник научных трудов III Всероссийской студенческой учебно-научной конференции, Санкт-Петербург, 12–13 апреля 2024 года. – 2024. – С. 286-290.

37. Корниенко, А.В. Совершенствование наукоемкого производства с использованием системы комплексных технологических решений / А.В. Корниенко, Е.Р. Мартынец, В.А. Левенцов // Передовые производственные технологии: компьютерные (суперкомпьютерные) технологии и организация наукоемких производств: Сборник тезисов докладов Национальной научно-практической конференции с международным участием. – 2022. – С. 22-29.

38. Мартынец, Е.Р. Универсальная матрица требований, целевых показателей и ресурсных ограничений при проектировании наукоемкого производства / Е.Р. Мартынец, А.В. Корниенко, В.А. Левенцов // Передовые производственные технологии: компьютерные (суперкомпьютерные) технологии и организация наукоемких производств: Сборник тезисов докладов Национальной научно-практической конференции с международным участием. – 2022. – С. 111-119.

39. Мартынец, Е.Р. Система комплексных технологических решений с применением цифровых двойников производства / Е.Р. Мартынец, А.В. Корниенко, В.А. Левенцов // Горизонты экономики. – 2022. – № 6 (72). – С. 68-74.

40. Корниенко, А.В. Математическая модель уравнивания матрицы

целевых показателей и ресурсных ограничений при использовании технологии «цифровых двойников» на наукоемких производствах / А.В. Корниенко, В.А. Левенцов // Передовые производственные технологии: компьютерные (суперкомпьютерные) технологии и организация наукоемких производств: Сборник тезисов докладов Национальной научно-практической конференции с международным участием. – 2021. – С. 63-69.

41. Мартынец, Е.Р. Математическая модель уравнивания матрицы целевых показателей и ресурсных ограничений при использовании технологии «цифровых двойников» на наукоемких производствах / Е.Р. Мартынец, А.В. Корниенко, В.А. Левенцов // Устойчивое развитие. Мировые вызовы: материалы конференции Санкт-Петербургского международного экономического форума на базе Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, 3 июня 2021 г. – 2021. – С. 60-61.

42. Алгоритм расчета ОЕЕ как самого универсального и современного показателя эффективности оборудования в мире. – URL: <https://up-pro.ru/library/repair/tpm/algorithm-rascheta-oee/> (дата обращения: 20.02.2025).

43. Абрашкин, М.С. Организация и развитие предприятий наукоёмкого машиностроения / М.С. Абрашкин. – М.: Издательство «Научный консультант», 2019. – 208 с.

44. Гавренкова, В.И. Организация производства на предприятиях отрасли (промышленности) / В.И. Гавренкова, А.И. Козловская. – Владивосток: Изд-во ВГУЭС, 2009. – 100 с.

45. Гирфанова, Е.Ю. Организация производства / Е.Ю. Гирфанова, В.И. Кислова. – Нижнекамск: Нижнекамский химико-технологический институт ФГБОУ ВПО «КНИТУ», 2014. – 86 с.

46. Глухов, В.В. Бережливое производство / В.В. Глухов, С.Н. Кузьмина, В.А. Левенцов. – Санкт-Петербург: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022. – 244 с.

47. Оно, Т. Производственные системы Тойоты. Уходя от массового производства / Т. Оно. – Москва: Институт комплексных стратегических исследований, 2006. – 208 с.

48. Консон, А.С. Экономика ремонта машин / А.С. Консон. – М.: Машиностроение, 1970. – 216 с.

49. Якобсон, М.О. Единая система планово-предупредительного ремонта и рациональной эксплуатации технологического оборудования машиностроительных предприятий / М.О. Якобсон. – М.: Машиностроение, 1967. – 592 с.

50. Далецкий, С.В. Проектирование системы технического обслуживания и ремонта воздушных судов гражданской авиации / С.В. Далецкий. – М.: Изд-во МАИ, 2001. – 360 с.

51. Каракулев, А.В. Организация технического обслуживания и ремонта машин в условиях Севера / А.В. Каракулев, Г.Н. Кириллов. – Ленинград: Стройиздат. Ленинградское отделение, 1978. – 168 с.

52. Диагностика и техническое обслуживание машин: учебник / А.Д. Ананьин [и др.]. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Академия, 2015. – 415 с.

53. Салихов, Р.Ф. Повышение эффективности производственной и технической эксплуатации парка дорожно-строительных машин / Р.Ф. Салихов. – Омск: СибАДИ, 2003. – 250 с.

54. Бобровицкий, В.И. Механическое оборудование: техническое обслуживание и ремонт / В.И. Бобровицкий, В.А. Сидоров. – Донецк: Юго-Восток, 2011. – 238 с.

55. Техническое обслуживание и ремонт узлов и механизмов оборудования, агрегатов и машин: учебник / А.Б. Липатова [и др.]. – Москва: Академия, 2019. – 332 с.

56. Новиков, А.В. Диагностика и техническое обслуживание машин: учебник / А.В. Новиков. – Минск: ИВЦ Минфина, 2013. – 340 с.

57. Кизим А.В. Модели и методы интеллектуальной поддержки принятия решений при управлении процессом технического обслуживания, ремонта и модернизации промышленного оборудования: дис. ... док. техн. наук: 05.13.01 / Кизим Алексей Владимирович. – Волгоград, 2021. – 289 с.

58. Deloitte Predictive Maintenance. – URL:

https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/de/Documents/deloitte-analytics/Deloitte_Predictive-Maintenance_PositionPaper.pdf (дата обращения: 20.05.2025).

59. Корниенко, А.В. Обеспечение и повышение надежности оборудования с применением цифровых двойников / Корниенко А.В. // Перспективы развития двигателестроения: материалы международной научно-технической конференции имени Н.Д. Кузнецова, 18–20 июня 2025 г. – 2025. – С. 340-342.

60. Исикава, К. Японские методы управления качеством / К. Исикава. – М.: Экономика, 1988. – 199 с.

61. ГОСТ 18322-2016 Система технического обслуживания и ремонта техники. Термины и определения. – URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293746/4293746610.pdf> (дата обращения: 31.10.2024).

62. Федосеев Е.В. Технико-экономические аспекты эксплуатационной надёжности, технического обслуживания и ремонта оборудования предприятий по производству минеральных удобрений: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.13 / Федосеев Евгений Владимирович. – Москва, 2017. – 213 с.

63. Чекмарев, А.Н. Квалиметрия и управление качеством. Часть I. Квалиметрия: Учебное пособие / А.Н. Чекмарев. – Самара: Самарский государственный аэрокосмический университет, 2010. – 172 с.

64. Азгальдов, Г.Г. Квалиметрия, 1968. – URL: <http://www.labrate.ru/discus/messages/7147/qualimetry-2011-46450.pdf> (дата обращения: 04.04.2025).

65. Азгальдов Гарри Гайкович, основатель научной дисциплины Квалиметрия. – URL: <https://web.archive.org/web/20110726143024/http://www.labrate.ru/azgaldov/> (дата обращения: 05.04.2025).

66. Квалиметрическая экспертиза: Руководство по организации экспертизы и проведению квалиметрических расчетов / ред. В.М. Маругин, Г.Г. Азгальдов. – СПб.: Русский регистр, 2002. – 517 с.

67. Маругин, В.М. Как оценить исходное качество и текущее состояние любого объекта по данным квалиметрии? / В.М. Маругин. – 2-е изд., испр. – СПб, 2012. – 46 с.
68. Субетто, А.И. Квалиметрия / А.И. Субетто. – СПб: Изд-во «Астерион», 2002. – 288 с.
69. Субетто, А.И. Квалиметрия в приборостроении и машиностроении: Монография / А.И. Субетто, Ю.М. Андрианов. – Л.: ЛО «Машиностроение», 1990. – 223 с.
70. Кириллов, В.И. Квалиметрия и системный анализ: учеб. пособие / В.И. Кириллов. – М.: ИНФРА-М, 2011. – 440 с.
71. Федюкин, В.К. Основы квалиметрии. Управление качеством продукции: Учебное пособие / В.К. Федюкин. – М.: Филинь, 2004. – 296 с.
72. Антипов, Д.В. Комплексный показатель оценки устойчивости систем менеджмента качества / Д.В. Антипов, О.Г. Губанова // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2022. – Т. 24. – № 4(108). – С. 5-15.
73. Антипов, Д.В. Процессный подход в определении модели учета и анализа затрат на качество / Д.В. Антипов, О.Г. Губанова // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. – 2023. – Т. 26. – № 3. – С. 41-52.
74. Антипов, Д.В. Оценка устойчивости систем менеджмента качества / Д.В. Антипов, О.Г. Губанова // Избранные научные труды двадцать первой Международной научно-практической конференции «Управление качеством». – 2022. – С. 24-29.
75. Антипов, Д.В. Комплексная оценка развития системы менеджмента качества организации машиностроительного производства / Д.В. Антипов, О.Г. Губанова // Избранные научные труды двадцатой Международной научно-практической конференции «Управление качеством». – 2021. – С. 41-45.
76. Совершенствование требований Системы менеджмента качества к производственным процессам / Д.В. Антипов [и др.] // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2022. – Т. 24. – № 4(108). – С. 137-147.

77. Антипов, Д.В. Подходы к повышению производительности и качества производственных процессов предприятий машиностроения / Д.В. Антипов, А.В. Иващенко // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2017. – Т. 19. – № 4-2. – С. 300-309.

78. Антипов, Д.В. Цифровизация процесса разработки технологической документации с использованием методологии FMEA / Д.В. Антипов, Е.К. Савич, О.Г. Губанова // Математическое и программное обеспечение систем в промышленной и социальной сферах. – 2022. – Т. 10. – № 1. – С. 2-5.

79. Управление качеством конструкторско-технологической подготовки производства с использованием базовой концептуальной модели данных / О.И. Антипова [и др.] // Вестник Самарского муниципального института управления. – 2020. – № 1. – С. 7-19.

80. Антипов, Д.В. Экспресс-программа повышения производительности труда в производстве / Д.В. Антипов, О.И. Антипова, Е.В. Еськина // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2021. – № 11. – С. 542-551.

81. Показатели и критерии оценки результативности и эффективности систем управления предприятием / Д.И. Панюков [и др.] // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2024. – № 5. – С. 30-34.

82. Антипова О.И. Методология и инструментарий создания распределенных систем менеджмента качества предприятий автомобильной промышленности: дис. ... док. техн. наук: 2.5.22 / Антипова Ольга Игоревна. – Самара, 2024. – 263 с.

83. Антипова, О.И. Подходы к цифровизации систем менеджмента качества / О.И. Антипова, Д.А. Горохова // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2023. – № 12. – С. 106-110.

84. Анцев, В.Ю. Оценка качества производственного процесса с использованием системы единичных и комплексных показателей / В.Ю. Анцев, Н.А. Витчук // Страна живет, пока работают заводы: Сборник научных трудов Международной научно-технической конференции. – 2015. – С. 39-42.

85. Анцев, В.Ю. Применение методов квалиметрии в оценке качества производственных процессов / В.Ю. Анцев, Н.А. Витчук, Н.Н. Трушин // Проблемы машиноведения: Материалы III Международной научно-технической конференции. – 2019. – Т. 2. – С. 162-167.

86. Оценка взаимосвязи показателей качества производственного процесса и показателей эффективности деятельности предприятия / Н.А. Витчук [и др.] // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2023. – № 12. – С. 124-127.

87. Басовский, Л.Е. Управление качеством: Учебник / Л.Е. Басовский, В.Б. Протасьев. – М.: ИНФРА-М, 2004. – 212 с.

88. Басовская, Е.Н. Стратегия оптимального планирования производства в условиях преобладания косвенных налогов / Е.Н. Басовская, Л.Е. Басовский, М.Д. Акатьева // Научные исследования и разработки. Экономика. – 2019. – Т. 7. – № 2. – С. 20-24.

89. Гиссин, В.И. Управление качеством / В.И. Гиссин. – М.: ИКЦ «МарТ», 2003. – 400 с.

90. Всеобщее управление качеством: учебник для вузов / О.П. Глудкин [и др.]. – Москва: Горячая линия – Телеком, 2001. – 600 с.

91. Глухов, В.В. Аудит систем менеджмента качества: учебник / В.В. Глухов, Д.П. Гасюк. – Санкт-Петербург: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2019. – 360 с.

92. Засканов, В.Г. Внутрифирменные модели организации производства на предприятиях машиностроения: теория и практика / В.Г. Засканов, Д.Ю. Иванов. – Самара: СамНЦ РАН, 2016. – 218 с.

93. Иванов, Д.Ю. Использование принципов бережливого производства к управлению инновациями / Д.Ю. Иванов, А.Г. Савин // Вестник Самарского университета. Экономика и управление. – 2023. – Т. 14. – № 2. – С. 25-34.

94. Буткевич, Р.В. Особенности применения экспертного метода оценивания продукции на различных этапах жизненного цикла продукции / Р.В. Буткевич, Ю.С. Клочков // Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Строительство и строительные технологии: Сборник статей 79-ой

всероссийской научно-технической конференции. – 2022. – С. 1162-1169.

95. Systems Reliability: Statistical Analysis And Applications / L. Papic [и др.]. – Prijevor – Casak: DQM Research Center, 2022. – 174 с.

96. Козловский В.Н. Обеспечение качества и надежности системы электрооборудования автомобилей: дис. ... док. техн. наук: 05.09.03 / Козловский Владимир Николаевич. – Тольятти, 2010. – 428 с.

97. Мосин, В.Г. Обоснование методологии детекции аномалий в качестве нового цифрового инструмента управления качеством / В.Г. Мосин, В.Н. Козловский // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – Т. 26. – № 3 (119). – С. 16-22.

98. Купряков, Е.М. Стандартизация и качество промышленной продукции: учебник для вузов / Е.М. Купряков. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1991. – 303 с.

99. Левенцов, В.А. Цифровое проектирование изделия и процессов производства как фактор повышения эффективности / В.А. Левенцов, А.Н. Левенцов // Современные наукоемкие технологии. – 2021. – № 5. – С. 63-67.

100. Соловейчик, К.А. Модель планирования технического обслуживания оборудования / К.А. Соловейчик, В.А. Левенцов, Е.М. Сафронова // Организатор производства. – 2019. – Т. 27. – № 3. – С. 69-78.

101. Окрепилов, В.В. О роли экономики качества в выполнении задач, предусмотренных национальными целями развития России до 2030 года, на примере Санкт-Петербурга / В.В. Окрепилов // Ноономика и ноообщество. Альманах трудов ИНИР им. С.Ю. Витте. – 2024. – Т. 3. – № 2. – С. 25-39.

102. Окрепилов, В.В. Менеджмент качества: учебник для студентов / В.В. Окрепилов. – Санкт-Петербург: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. – 650 с.

103. Панюков, Д.И. Эффективное управление качеством проектирования новых производственных процессов на основе ISO/TS 16949 / Д.И. Панюков // International Scientific and Practical Conference World science. – 2015. – Т. 1. – № 3(3). – С. 42-49.

104. Панюков Д.И. Совершенствование методологии анализа и управления

техническими рисками в производственных системах: дис. ... док. техн. наук: 05.02.23 / Панюков Дмитрий Иванович. – Самара, 2021. – 728 с.

105. Соколицын, С.А. Организация и оперативное управление машиностроительным производством / С.А. Соколицын, Б.И. Кузин. – Ленинград: Машиностроение, 1988. – 525 с.

106. Хаймович, А.И. Информационные системы в технологической подготовке производства на предприятиях авиационной отрасли: учебно-методическое пособие / А.И. Хаймович, И.Н. Хаймович. – Самара: Изд-во Самарского научного центра РАН, 2016. – 138 с.

107. Искворин, Д.С. Методика анализа организационно-технических рисков обеспечения готовности оборудования для процесса селективного лазерного сплавления на основе сетей Байеса / Д.С. Искворин, А.И. Хаймович // Известия Самарского научного центра РАН. – 2024. – Т. 26. – № 3. – С. 63-73.

108. Алексеев, В.П. Разработка модифицированных целевых краткосрочных контрольных карт и определение индексов воспроизводимости для анализа управляемости процессом производства изделий малыми сериями / В.П. Алексеев, А.И. Хаймович, В.Г. Смелов // СТИН. – 2024. – № 10. – С. 25-28.

109. Хаймович, И.Н. Организационно-экономическое моделирование системы автоматизации проектирования на предприятии заготовок и штампов компрессорных лопаток авиационных двигателей / И.Н. Хаймович, А.С. Кутумов, В.М. Рамзаев // Вестник Самарского муниципального института управления. – 2021. – № 3. – С. 45-52.

110. Deming W.E. The essential Deming : leadership principles from the father of quality / W.E. Deming. – New York: McGraw-Hill, 2013. – 326 p.

111. Juran J.M. Juran's quality handbook : the complete guide to performance excellence / J.M. Juran, J.A. De Feo. – New York: McGraw Hill, 2010. – 1113 p.

112. Kano N. Life cycle and creation of attractive quality / N. Kano // The 4th QMOD Conference, Linkoeping, Sweden. – 2001. – С. 18-36.

113. Леон, Р. Управление качеством. Робастное проектирование. Методы

Тагути / Р. Леон. – М., 2002. – 384 с.

114. Папич, Л. Инновационные технологии в управлении качеством / Л. Папич. – 2023. – 496 с.

115. Papic, L. Quality Assurance on the Basis of Failure Modes, Effects and Criticality Analysis: Review / L. Papic, M. Khan // Communications in Dependability and Quality Management, An International Journal. – 1998. – Т. 1. – № 1.

116. Papic, L. Quality Management and Improvement, Lecture Notes in Concurrent Engineering, Failure Modes, Effects and Criticality Analysis, Fault Tree Analysis, Fault Tree Simulation Model and Event Tree Analysis / L. Papic. – Spain: Valencia Polytechnic University, 2011. – 121 с.

117. Обзор современных подходов к обеспечению качества и безопасности сложных систем на основе анализа видов, последствий и критичности отказов / И.З. Аронов [и др.] // Методы анализа качества и надежности. – 1996. – № 11. – С. 3-15.

118. Фейгенбаум, А. Контроль качества продукции / А. Фейгенбаум. – М.: Экономика, 1986. – 471 с.

119. Shughart W.F. The organization of industry / W.F. Shughart. – Homewood, 1990. – 492 с.

120. ГОСТ Р ИСО 9000:2015 Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь. – URL: https://2i.tusur.ru/wp-content/uploads/2018/12/ISO_9000-2015.pdf (дата обращения: 10.03.2023).

121. Ящерицын, П.И. Технологическая наследственность в машиностроении / П.И. Ящерицын, Э.В. Рыжов, В.И. Аверченков. – Минск: Наука и техника, 1977. – 255 с.

122. Безопасность и надёжность технических систем / Л.Н. Александровская [и др.]. – М.: Логос, 2008. – 376 с.

123. Корниенко, А.В. Этапы повышения надежности технологического оборудования / А.В. Корниенко, В.А. Левенцов, Е.Р. Мартынец // Национальная (всероссийская) научно-практическая конференция «Цифровые технологии и управление качеством в технических системах», Москва, 02–24 декабря 2024 года.

– 2024 (в печати).

124. Система TPM: необходимая теория в практическом применении. – URL: https://wkazarin.ru/tpm-system-book/tpm_1_1/ (дата обращения: 19.03.2025).

125. Industrial automation: the cost of doing nothing. – URL: <https://www.cyngn.com/hubfs/The%20Cost%20of%20Doing%20Nothing%20Infographic.pdf> (дата обращения: 02.04.2025).

126. Расчет стоимости простоя – Atlassian. – URL: <https://www.atlassian.com/ru/incident-management/kpis/cost-of-downtime> (дата обращения: 01.07.2024).

127. Как сократить риски бизнеса от простоя оборудования. – URL: <https://www.e-xecutive.ru/management/practices/1995700-skolko-stoit-prostoi-oborudovaniya-i-kak-sokratit-eti-poteri> (дата обращения: 03.04.2025).

128. Царев, А.М. Надежность и диагностика технологического оборудования : учеб. пособие / А.М. Царев. – Тольятти: Изд-во ТГУ, 2013. – 128 с.

129. Manufacturing Predictive maintenance. – URL: <https://www.huaweicloud.com/intl/en-us/solution/pdm/> (дата обращения: 05.04.2025).

130. What Is DFMEA? Design Failure Mode and Effect Analysis | Ansys. – URL: <https://www.ansys.com/blog/what-is-dfmea> (дата обращения: 08.03.2023).

131. Тенденции импортозамещения в промышленности в 2022–2023 гг. – М.: НИУ ВШЭ, 2023. – 9 с.

132. Бауэр, В.П. Методологические аспекты проектирования технологического переоснащения высокотехнологичных отраслей промышленности России: монография / В.П. Бауэр, Д.В. Трошин. – Тверь: Твер. гос. ун-т, 2017. – 256 с.

133. Федеральный закон от 28.12.2024 г. № 523-ФЗ «О технологической политике в Российской Федерации и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации». – URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/51500> (дата обращения: 17.01.2025).

134. Указ Президента Российской Федерации от 7 мая 2024 № 309 «О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года и

на перспективу до 2036 года». – URL: <http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202405070015> (дата обращения: 24.06.2024).

135. Абузярова, Н.К. Усовершенствование существующих показателей балансовой надежности на примере энергосистемы Мурманской области / Н.К. Абузярова, Д.А. Игнатъев // URAL PROJECT OF ENERGY CONFERENCE 2022 : сборник статей участников Всероссийской конференции с международным участием. – 2023. – С. 72-78.

136. Александровская, Л.Н. Современные методы обеспечения безотказности сложных технических систем : учебник / Л.Н. Александровская, А.П. Афанасьев, А.А. Лисов. – Москва: Логос, 2003. – 206 с.

137. Аронов, И.З. Оценка надежности по результатам сокращенных испытаний / И.З. Аронов, Е.И. Бурдасов. – Москва: Изд-во стандартов, 1987. – 180 с.

138. Базовский, И. Надежность : Теория и практика / И. Базовский; ред. Б.Р. Левин; пер. Ю.Г. Епишин, А.М. Лившиц. – Москва: Мир, 1965. – 373 с.

139. Беляев, Ю.К. Надежность технических систем: Справочник / Ю.К. Беляев, В.А. Богатырев, В.В. Болотин. – М.: Радио и связь, 1985. – 608 с.

140. Гнеденко, Б.В. Математические методы в теории надежности. Основные характеристики надежности и их статистический анализ / Б.В. Гнеденко, Ю.К. Беляев, А.Д. Соловьев. – М., 1965. – 524 с.

141. Вопросы математической теории надежности / Е.Ю. Барзилович [и др.]; ред. Б.В. Гнеденко. – Москва: Радио и связь, 1983. – 376 с.

142. Викторова, В.С. Модели и методы расчета надежности технических систем / В.С. Викторова, А.С. Степанянц. – 2-е изд., испр. – М.: ЛЕНАНД, 2016. – 256 с.

143. Воробьев, В.Г. Надежность и техническая диагностика авиационного оборудования / В.Г. Воробьев, В.Д. Константинов. – М.: МГТУ ГА, 2010. – 448 с.

144. Диллон, Б. Инженерные методы обеспечения надежности систем / Б. Диллон, Ч. Сингх; пер. Е.Г. Коваленко. – Москва: Мир, 1984. – 318 с.

145. Дружинин, Г.В. Надежность автоматизированных систем / Г.В. Дружинин. – 3-е изд., перераб и доп. – Москва: Энергия, 1977. – 536 с.
146. Ефремов, Л.В. Практика вероятностного анализа надежности техники с применением компьютерных технологий / Л.В. Ефремов. – СПб.: Наука, 2008. – 216 с.
147. Ефремов, Л.В. Техническая эксплуатация и надежность промышленного оборудования в рамках ДПО/CDIO-подхода: учебное пособие / Л.В. Ефремов, М.А. Скотникова. – Санкт-Петербург: Изд-во Политехнического университета, 2016. – 124 с.
148. Иванников, С.Н. Параметрическая надежность технологического оборудования / С.Н. Иванников, И.В. Манаенков // Евразийский Союз Ученых. – 2016. – № 4 (25). – С. 57-58.
149. Канарчук, В.Е. Основы надежности машин / В.Е. Канарчук. – Киев: Наук. думка, 1982. – 248 с.
150. Каштанов, В.А. Теория надежности сложных систем / В.А. Каштанов, А.И. Медведев. – М.: Физматлит, 2010. – 608 с.
151. Колегаев, Р.Н. Определение оптимальной долговечности технических систем / Р.Н. Колегаев. – Москва: Советское радио, 1967. – 114 с.
152. Кордонский, Х.Б. Оценивание показателей надёжности при действии нескольких причин / Х.Б. Кордонский, В.Л. Растрингин, З.А. Щулькин // Изв. АН СССР. Техническая кибернетика. – 1986. – № 6.
153. Корнейчук, В.И. Надежность и контроль ЭЦВМ / В.И. Корнейчук. – Киев, 1972. – 133 с.
154. Королев, П.С. Основы надежности вычислительных систем / П.С. Королев, С.Н. Полесский, В.Э. Цветков. – Москва: КНОРУС, 2023. – 182 с.
155. Основы теории и расчета надежности / И.М. Маликов [и др.]. – Ленинград: Судпромгиз, 1960. – 140 с.
156. Малкин, В.С. Надёжность технических систем и техногенный риск / В.С. Малкин. – Ростов-на-Дону: Феникс, 2010. – 434 с.
157. Острейковский, В.А. Теория надёжности / В.А. Острейковский. –

Москва: Высшая школа, 2008. – 463 с.

158. Папич, Л. Интегрирование проектирования и обслуживания техники с использованием нового подхода в инженерных основах жизненного цикла / Л. Папич // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2004. – № 3. – С. 6-10.

159. Папич, Л. Исследование и прогноз надёжности и долговечности ленточных конвейеров на открытых разработках / Л. Папич. – 1986. – 296 с.

160. Pokorni, S. Data-driven reliability and availability of electronic equipment / S. Pokorni // VOJNOTEHNIČKI GLASNIK / MILITARY TECHNICAL COURIER. – 2023. – Т. 71. – № 3. – С. 769-782.

161. Половко, А.М. Основы теории надёжности / А.М. Половко, А.И. Гуров. – 2-е изд., перераб. и доп. – СПб.: БХВ-Петербург, 2006. – 704 с.

162. Проников, А.С. Параметрическая надёжность машин / А.С. Проников. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 560 с.

163. Проников, А.С. Надёжность машин / А.С. Проников. – Москва: Машиностроение, 1978. – 592 с.

164. Решетов, Д.Н. Надёжность машин / Д.Н. Решетов, А.С. Иванов, В.З. Фадеев. – Москва: Высшая школа, 1988. – 240 с.

165. Свешников, В.И. Надёжность электроэнергетических систем при аварийном понижении частоты и напряжения / В.И. Свешников, Ф.А. Кушнарёв. – Москва: Энергоатомиздат, 1996. – 157 с.

166. Северцев, Н.А. Теория надёжности сложных систем в отработке и эксплуатации: учебник для вузов / Н.А. Северцев. – 2-е изд., перераб и доп. – Москва: Юрайт, 2025. – 473 с.

167. Северцев, Н.А. Надёжность сложных систем в эксплуатации и отработке / Н.А. Северцев. – М.: Высшая школа, 1989. – 432 с.

168. Северцев, Н.А. Теория надёжности сложных систем в отработке и эксплуатации / Н.А. Северцев. – 2-е изд., пер. и доп. – Издательство Юрайт, 2018. – 436 с.

169. Сугак, Е.В. Прикладная теория надёжности. Часть 1 : Основы теории / Е.В. Сугак. – СПб.: Издательство «Лань», 2023. – 276 с.

170. Сугак, Е.В. Прикладная теория надежности. Часть 2: Надежность технических систем / Е.В. Сугак. – 2-е изд., стер. – СПб.: Издательство «Лань», 2023. – 240 с.
171. Невзоров, В.Н. Надежность машин и оборудований. Ч.1. Основы теории / В.Н. Невзоров, Е.В. Сугак. – Красноярск: СГТУ, 1998. – 400 с.
172. Труханов, В.М. Методы обеспечения надёжности изделий машиностроения / В.М. Труханов. – М.: Машиностроение, 1995. – 302 с.
173. Ушаков, И.А. Курс теории надежности систем / И.А. Ушаков. – М.: Дрофа, 2007. – 238 с.
174. Ушаков, И.А. Надежность: прошлое, настоящее, будущее / И.А. Ушаков // Reliability: Theory & Applications. – 2006. – № 1. – С. 17-27.
175. Основы теории надежности / А.В. Чепурин [и др.]. – М., 2023. – 232 с.
176. Шишмарев, В.Ю. Надежность технических систем / В.Ю. Шишмарев. – М.: Издательский центр «Академия», 2010. – 304 с.
177. Шишмарев, В.Ю. Надежность технических систем / В.Ю. Шишмарев. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Издательство Юрайт, 2024. – 289 с.
178. Шухгальтер, Л.Я. Экономика долговечности и надежности машин / Л.Я. Шухгальтер. – Москва: Экономиздат, 1963. – 148 с.
179. Барлоу, Р.Э. Статистическая теория надежности и испытания на безотказность / Р.Э. Барлоу, Ф. Прошан; пер. И.А. Ушаков. – Москва: Наука, 1984. – 327 с.
180. Автаева, А. Надежность систем: тестирование и защита информации: 1 часть / А. Автаева, Л. Давлеткереева, А. Муканова. – Алматы: ССК, 2018. – 324 с.
181. Birolini, A. Reliability Engineering: Theory and Practice / A. Birolini. – Springer Berlin Heidelberg, 2010. – 610 с.
182. Dhillon, B.S. Reliability, quality, and safety for engineers / B.S. Dhillon. – 2005. – 217 с.
183. Reliability of Electric Utility Distribution Systems: EPRI White Paper. – 2000.
184. Gnedenko e-Forum. – URL: https://gnedenko.net/News/news_books.htm

(дата обращения: 16.02.2025).

185. Ярыгин, А. Надежность как критерий выбора оборудования для систем пожарной сигнализации / А. Ярыгин // Алгоритм безопасности. – 2010. – № 1. – С. 28-31.

186. Шпер, В. Реферативный аналитический обзор наиболее значимых публикаций в отечественной и зарубежной периодике по вопросам оценки надежности продукции, в том числе об опыте предприятий / В. Шпер // Надежность: вопросы теории и практики. – 2006. – № 3. – С. 122-148.

187. Становление, развитие и концепции теории надежности. – URL: https://ria-stk.ru/news/keythemes.php?ELEMENT_ID=175912 (дата обращения: 14.03.2025).

188. Zio, E. An Introduction to the Basics of Reliability and Risk Analysis / E. Zio. – New Yesey: World Scientific, 2007. – 234 с.

189. Zhao, Y.-Q. Dependability modeling research of air-defense missile weapon systems / Y.-Q. Zhao, Q. Mai, Q.-Y. Xu // Systems Engineering and Electronics. – 2016. – № 38. – С. 2777-2784.

190. Min, M. Dependability modeling and analysis in a Shipborne Microwave Unified Instrumentation System / M. Min, H. Jianguo, L. Dan // IEEE 2011 10th International Conference on Electronic Measurement and Instruments, ICEMI. – 2011.

191. The Research on the Evaluation of Equipment's Dependability / X. Han [и др.] // Applied Mechanics and Materials. – 2014. – С. 1906-1910.

192. Jiang, W.W. Research of Product Dependability Strengthen Design Method / W.W. Jiang, Z.B. Xie // Advanced Materials Research. – 2011. – № 225-226. – С. 1137-1140.

193. Wen, H. Warship Mission Reliability Modeling and Simulation from the Perspective of Equipment Support Resource / H. Wen, P. Di, T. Chen // Journal of Marine Science and Engineering. – 2023. – № 11. – С. 504.

194. Evaluating the reliability of emergency control equipment based on the Weibull distribution / J. Zhang [и др.]. – 2022. – С. 18.

195. ГОСТ 13377–75 Надежность в технике. Термины и определения. –

URL: <https://files.stroyinf.ru/Data/594/59465.pdf> (дата обращения: 26.08.2024).

196. ГОСТ Р 27.102–2021 Надежность в технике. Надежность объекта. Термины и определения. – URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/75917/> (дата обращения: 10.07.2024).

197. ГОСТ 27.002–2015 Надежность в технике. Термины и определения. – URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/62713/> (дата обращения: 10.07.2024).

198. ГОСТ Р 27.004–2009 Надежность в технике. Модели отказов. – URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/49104/> (дата обращения: 17.03.2025).

199. ГОСТ 27.301–95 Надежность в технике. Расчет надежности. Основные положения. – URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/9361/> (дата обращения: 17.03.2025).

200. ГОСТ Р 27.302–2009 Надежность в технике. Анализ дерева неисправностей. – URL: <https://files.stroyinf.ru/Data/500/50007.pdf> (дата обращения: 17.03.2025).

201. ГОСТ 27.310–95 Надежность в технике. Анализ видов, последствий и критичности отказов. Основные положения. – URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/9354/> (дата обращения: 17.03.2025).

202. ГОСТ Р 27.403–2009 Надежность в технике. Планы испытаний для контроля вероятности безотказной работы. – URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/49133/> (дата обращения: 17.03.2025).

203. ГОСТ Р ИСО 13372–2013 Контроль состояния и диагностика машин. Термины и определения. – URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/55933/> (дата обращения: 17.03.2025).

204. ГОСТ Р ИСО 13379–1–2015 Контроль состояния и диагностика машин. Методы интерпретации данных и диагностирования. Часть 1. Общее руководство. – URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293758/4293758913.pdf> (дата обращения: 17.03.2025).

205. ГОСТ Р ИСО 17359–2015 Контроль состояния и диагностика машин. Общее руководство. – URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293758/4293758912.pdf>.

206. ГОСТ Р 51901.16–2017 Менеджмент риска. Повышение надежности.

Статистические критерии и методы оценки. – URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293743/4293743604.pdf> (дата обращения: 17.03.2025).

207. ГОСТ Р МЭК 60300–3–3–2021 Надежность в технике. Менеджмент надежности. Стоимость жизненного цикла. – URL: <https://gostassistant.ru/doc/f38f6492-95d0-4984-8a63-7b32f7514bf8> (дата обращения: 17.03.2025).

208. Evaluation of Quantification of Margins and Uncertainties Methodology for Assessing and Certifying the Reliability of the Nuclear Stockpile. – Washington, DC: The National Academies Press, 2009. – 92 с.

209. Handbook of reliability, availability, maintainability and safety in engineering design. – 2009.

210. Тимошенко, С.П. Основы теории надежности / С.П. Тимошенко, Б.М. Симонов, В.Н. Горошко. – М.: Издательство Юрайт, 2015. – 445 с.

211. ГОСТ 27.002-89 Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения. – URL: <https://files.stroyinf.ru/Data/112/11290.pdf> (дата обращения: 26.08.2024).

212. Мясников, Ю.Н. Прогрессивные испытания кораблей флота / Ю.Н. Мясников // Труды Крыловского государственного научного центра. – 2019. – № 3 (389). – С. 157-164.

213. Кузин, Б. Методы и модели управления фирмой / Б. Кузин, В. Юрьев, Г. Шахдинаров. – СПб.: Питер, 2001. – 432 с.

214. Штефан, Ю.В. Основы теории надежности: учебно-методическое пособие / Ю.В. Штефан, В.К. Федоров. – М.: МАДИ, 2023. – 168 с.

215. Aronov, J. Reliability and Safety Management of Engineering Systems through the Prism of “Black Swan” Theory / J. Aronov, L. Papic // System Reliability Management. – 2018. – С. 103-111.

216. Манаков А.Л. Теория, методы и практика совершенствования организации повышения качества и надежности технического сервиса путевых машин на основе операционного менеджмента и процессного подхода: дис. ... канд.

техн. наук: 05.02.22 / Манаков Алексей Леонидович. – Новосибирск, 2013. – 283 с.

217. Guide to Failure Mode and Effect Analysis - FMEA - Juran Institute, An Attain Partners Company. – URL: <https://www.juran.com/blog/guide-to-failure-mode-and-effect-analysis-fmea/> (дата обращения: 02.03.2025).

218. Годлевский, В.Е. Применение метода анализа видов, причин и последствий потенциальных несоответствий (FMEA) на различных этапах жизненного цикла автомобильной продукции / В.Е. Годлевский, А.Я. Дмитриев, Г.Н. Изюменко. – Самара: ГП «Перспектива», 2002. – 160 с.

219. Гарельский, В.А. Применение FMEA-анализа в управлении качеством продукции: методические указания / В.А. Гарельский, А.Л. Воробьев. – Оренбург: ОГУ, 2018. – 85 с.

220. Разница между PFMEA и DFMEA. – URL: <https://ru.strephonsays.com/pfmea-and-dfmea-9434> (дата обращения: 08.03.2023).

221. PFMEA Process Failure Mode and Effects Analysis. – URL: <https://www.slideserve.com/emily/pfmea-process-failure-mode-and-effects-analysis> (дата обращения: 08.03.2023).

222. IEC Standard 812 Procedure for Failure Mode and Effects Analysis (FMEA). – URL: <https://pdfslide.net/documents/reference-documents-iec-standard-812-procedure-for-failure-mode-and-effects-analysis.html?page=1> (дата обращения: 10.03.2023).

223. Anleitner, M.A. The Power of Deduction, Failure Modes and Effects Analysis for Design / M.A. Anleitner. – Milwaukee: ASQ Quality Press, 2011. – 208 с.

224. Guidance on Failure Modes & Effects Analyses (FMEAs): The International Marine Contractors Association (IMCA). – URL: <http://omtc.ua/images/courses/dp/IMCAM166.pdf> (дата обращения: 10.03.2023).

225. TM 5-698-4 Failure modes, effects, and criticality analysis (FMECA) for command, control, communications, computer, intelligence, surveillance, and reconnaissance (C4ISR) facilities. – URL: https://wbdg.org/FFC/ARMYSOE/COETM/tm_5_698_4.pdf (дата обращения: 01.03.2023).

226. BS 5750: Part 5, Reliability of Systems, Equipment and Components, Part

5, Guide to Failure Modes, Effects and Criticality Analysis (FMEA and FMECA). – 1991.

227. ГОСТ Р 27.303–2021 (МЭК 60812:2018) Надежность в технике. Анализ видов и последствий отказов. – URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/75897/> (дата обращения: 14.03.2023).

228. Хорешок, А.А. Оценка влияния системы эксплуатации оборудования технологического комплекса на надежность производственного цикла горнодобывающего предприятия / А.А. Хорешок, В.А. Хажиев // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. – 2022. – № 16. – С. 117-126.

229. Аронов И.З. Анализ зависимых отказов – важный способ обеспечения безопасности сложных систем / «Методы менеджмента качества», Октябрь 2004. – URL: <https://ria-stk.ru/mmq/adetail.php?ID=7725> (дата обращения: 14.04.2025).

230. Решение проблемы аварийности горных машин с использованием Отчета «Тойота» АЗ / Л. Папич [и др.] // Надежность. – 2019. – № 4. – С. 32-44.

231. McDermott, R. The basics of FMEA / R. McDermott, R. Mikulak, M. Beauregard. – 2nd Edition. – CRC Press, 2008. – 90 с.

232. Маяков, Д.М. Качественный анализ надёжности силового оборудования тепловозов серии 2ТЭ25А / Д.М. Маяков // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. – 2019. – № 4 (44). – С. 76-82.

233. Мрыкин, С.В. Метод структурных схем и оценка безотказности системы: Электронные методические указания к лабораторной работе / С.В. Мрыкин, М.И. Вильчек. – Самарский государственный аэрокосмический университет, 2010. – 27 с.

234. ГОСТ Р МЭК 61078–2021 Надежность в технике. Структурная схема надежности (Переиздание). – URL: https://hseblog.ru/kb/document/3116/files/14787/ГОСТ%20Р%20МЭК%2061078-2021%20Надежность%20в%20технике.%20Структурная%20схема%20надежности%20%28Переиздание%29_Текст.pdf (дата обращения: 03.02.2025).

235. Nowlan, F.S. Reliability-centered Maintenance / F.S. Nowlan, H.F. Hear. – San Francisco: Dolby Access Press, 1978. – 466 с.

236. Reliability Centered Maintenance Guide for Facilities and Collateral Equipment. – NASA, 2000. – 348 с.

237. Moubray, J. Reliability-centered Maintenance. Second Edition / J. Moubray. – NY: Industrial Press Inc., 1997. – 426 с.

238. SAE International Recommended Practice, Evaluation Criteria for Reliability-Centered Maintenance (RCM) Processes, SAE Standard JA1011_200908. – URL: https://saemobilus.sae.org/standards/ja1011_200908-evaluation-criteria-reliability-centered-maintenance-rcm-processes (дата обращения: 04.04.2025).

239. Иванов, М.Н. Детали машин: учеб. для студентов вузов / М.Н. Иванов; ред. В.А. Финогенов. – 6-е изд., перераб. – М.: Высшая школа, 2000. – 383 с.

240. Северцев, Н.А. Безопасность и надежность в современном мире / Н.А. Северцев // Фундаментально-прикладные проблемы безопасности, живучести, надежности, устойчивости и эффективности систем: Материалы III международной научно-практической конференции, посвящённой 110-летию со дня рождения академика Н.А. Пилюгина. – 2019. – С. 12-17.

241. Надежность технических систем объектов наземных комплексов: учеб. пособие / В.В. Буренин [и др.]. – М.: МАДИ, 2017. – 88 с.

242. Пименов С.А. Методы и алгоритмы оценки показателей надежности конструкций с учетом внешних воздействий различной физической природы вероятностного характера: дис. ... док. техн. наук: 05.13.01 / Пименов Станислав Александрович. – Нижний Новгород, 2020. – 377 с.

243. What is Failure Analysis?. – URL: <https://www.ansys.com/simulation-topics/what-is-failure-analysis> (дата обращения: 23.04.2025).

244. Русин, А.Ю. Сокращение времени испытаний электрооборудования на надежность / А.Ю. Русин // Вестник Тверского государственного технического университета, Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». – 2020. – № № 3 (7). – С. 60-68.

245. Храмовских, В.А. Адаптивный интеллектуальный анализ данных как инструмент для прогнозирования ресурса узлов горных машин и оборудования / В.А. Храмовских, А.Н. Шевченко, К.А. Непомнящих // Науки о Земле и

недропользование. – 2023. – № 46 (2). – С. 212-225.

246. Иорш, В.И. Международные стандарты в области управления физическими активами / В.И. Иорш, И.Э. Крюков, И.Н. Антоненко // Молочная промышленность. – 2012. – № 10. – С. 15-18.

247. Сокращение простоев оборудование на предприятии в Москве - Система контроля простоев оборудования Диспетчер. – URL: <https://intechnology.ru/produkty/dispatcher-toir/toir/> (дата обращения: 17.04.2025).

248. Ярцев, В.Н. Оптимизация процессов технического обслуживания оборудования: методы и современные подходы / В.Н. Ярцев // Вестник Воронежского института высоких технологий. – 2024. – № 18 (3). – С. 1-7.

249. Anomaly Detection – Siemens Global. – URL: <https://www.siemens.com/global/en/products/software/simatic-apps/anomaly-detection.html> (дата обращения: 01.04.2025).

250. Digital Twin Technology – MIT Technology Roadmapping. – URL: https://roadmaps.mit.edu/index.php/Digital_Twin_Technology (дата обращения: 17.03.2025).

251. Grieves, M. Completing the Cycle: Using PLM Information in the Sales and Service Functions : Presentation / ResearchGate. – 2002. – URL: https://www.researchgate.net/publication/356192963_SME_Management_Forum_Completing_the_Cycle_Using_PLM_Information_in_the_Sales_and_Service_Functions (дата обращения: 29.12.2022).

252. Grieves M. Virtually Perfect: Driving Innovative and Lean Products through Product Lifecycle Management. – Cocoa Beach (USA): Space Coast Press, 2011. – 370 с.

253. Grieves M., Vickers J. Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems // Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems / ред. F.-J. Kahlen, S. Flumerfelt, A. Alves. – Cham (Switzerland): Springer International Publishing, 2017. – С. 85-113.

254. Grieves, M. Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication : Digital Twin White Paper / ResearchGate. – 2014. – URL: https://www.researchgate.net/publication/275211047_Digital_Twin_Manufacturing_Ex

cellence_through_Virtual_Factory_Replication (дата обращения: 07.12.2022).

255. Grieves M. Virtually Intelligent Product Systems: Digital and Physical Twins // Complex Systems Engineering: Theory and Practice / ред. S. Flumerfelt [и др.]. – American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2019. – С. 175-200.

256. Grieves, M. Intelligent digital twins and the development and management of complex systems : Opinion Article / Digital Twin. – 2022. – URL: <https://doi.org/10.12688/digitaltwin.17574.1> (дата обращения: 07.12.2022).

257. Grieves, M. Digital Twins: Past, Present, and Future / M. Grieves // The Digital Twin. – Springer, 2023. – С. 97-121.

258. Grieves, M. Digital Twin Certified: Employing Virtual Testing of Digital Twins in Manufacturing to Ensure Quality Products / M. Grieves // MDPI Machines. – 2023. – № 11(8):808. – С. 1-13.

259. Цифровые двойники в высокотехнологичной промышленности : монография / А.И. Боровков [и др.]; ред. А.И. Боровков. – СПб: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022. – 492 с.

260. Прохоров А., Лысачев М. Цифровой двойник. Анализ, тренды, мировой опыт. Издание первое, исправленное и дополненное / науч. ред. А.И. Боровков. – М.: ООО «АльянсПринт», 2020. – 401 с.

261. Digital Factory Transformation Survey 2022 – PwC. – URL: <https://www.pwc.de/en/strategy-organisation-processes-systems/operations/digital-factory-transformation-survey-2022.html> (дата обращения: 19.02.2025).

262. IEC/TR 62794(2012) Управление, контроль и автоматизация промышленных процессов. Стандартная модель для представления производственного оборудования (цифровое производство). – URL: <https://www.gostinfo.ru/catalog/Details/?id=5299582> (дата обращения: 05.06.2023).

263. IEC/TS 62832–1(2016) Измерение, управление и автоматизация промышленного процесса. Структура цифровых фабрик (умного производства). Часть 1. Основные принципы. – URL: <https://www.gostinfo.ru/catalog/Details/?id=6263444> (дата обращения: 05.06.2023).

264. IEC 62832–1:2020 Industrial-process measurement, control and automation

- Digital factory framework - Part 1: General principles – IEC Webstore. – URL: <https://webstore.iec.ch/publication/65858> (дата обращения: 05.06.2023).

265. IEC 62832–2:2020 Industrial-process measurement, control and automation - Digital factory framework - Part 2: Model elements – IEC Webstore. – URL: <https://webstore.iec.ch/publication/60214> (дата обращения: 05.06.2023).

266. IEC 62832–3:2020 Industrial-process measurement, control and automation - Digital factory framework - Part 3: Application of Digital Factory for life cycle management of production systems – IEC Webstore. – URL: <https://webstore.iec.ch/publication/60277> (дата обращения: 05.06.2023).

267. ПНСТ 429–2020 Умное производство. Двойники цифровые производства. Часть 1. Общие положения. – URL: <https://protect.gost.ru/v.aspx?control=7&id=238539> (дата обращения: 28.02.2023).

268. ГОСТ Р 57700.37–2021 Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения. – URL: <https://protect.gost.ru/document.aspx?control=7&id=241313> (дата обращения: 01.03.2023).

269. Grieves, M. Virtually Intelligent Product Systems: Digital and Physical Twins / M. Grieves // Complex Systems Engineering: Theory and Practice. – 2019. – С. 175-200.

270. Grieves, M. Intelligent digital twins and the development and management of complex systems / M. Grieves // Digital Twin. – 2022. – № 2:8. – С. 18.

271. Grieves, M. Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication: White Paper / M. Grieves. – 2014.

272. Боровков, А.И. Цифровые двойники: определение, подходы и методы разработки / А.И. Боровков, Ю.А. Рябов // Цифровая трансформация экономики и промышленности: сборник трудов научно-практической конференции с зарубежным участием. – 2019. – С. 234-245.

273. Kukushkin, K. Digital Twins: A Systematic Literature Review Based on Data Analysis and Topic Modeling / K. Kukushkin, Y. Ryabov, A. Borovkov // Data. – 2022. – № 7 (12).

274. Султан, Н. Литературный обзор: применение автоматизированных цифровых производственных систем на основе цифровых двойников / Н. Султан, В.Е. Петров // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки. – 2024. – № 7-2. – С. 168-172.

275. Digital Twins and Cyber-Physical Systems toward Smart Manufacturing and Industry 4.0: Correlation and Comparison / F. Tao [et al.] // Engineering. – 2019. – Vol. 5. – № 4. – P. 653-661.

276. Digital twin-driven intelligent maintenance decision-making system and key-enabling technologies for nuclear power equipment / Q. Xu [и др.] // Digital Twin. – 2022. – № 2:14. – С. 1-12.

277. Digital Twin and Manufacturing Simulation Integrated Platform embedded in cyber-physical system / B. Leng [и др.] // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – С. 1-8.

278. Мартынец, Е.Р. Разработка наукоемкой продукции с применением технологии цифровых двойников / Е.Р. Мартынец, В.А. Левенцов // Устойчивое развитие цифровой экономики, промышленности и инновационных систем. – 2020. – С. 631-634.

279. Digital Engineering - Rockwell Automation US. – URL: <https://www.rockwellautomation.com/en-us/capabilities/digital-engineering-software.html> (дата обращения: 18.04.2025).

280. Modeling Next-Gen Wind Turbines - Altair Solutions Monitor and Optimize Vertical Wind Turbines. – URL: <https://altair.com/resource/modeling-next-gen-wind-turbines-altair-solutions-monitor-and-optimize-vertical-wind-turbines?lang=en> (дата обращения: 18.04.2025).

281. CML-Bench[®] – цифровая платформа по разработке и применению цифровых двойников. – URL: <https://cml-bench.ru/> (дата обращения: 01.12.2024).

282. A Perspective on the Adoption of Digital Engineering within an Enterprise. – URL: <https://www.ansys.com/zh-cn/resource-center/white-paper/a-perspective-on-the-adoption-of-digital-engineering-within-an-enterprise> (дата обращения: 18.04.2025).

283. Digital Twin Consortium Showcases Digital Twin-Enabled Microfactory for

Smart Manufacturing. – URL: <https://www.digitaltwinconsortium.org/press-room/04-10-25/> (дата обращения: 20.04.2025).

284. Digital Twin-Enabled Microfactory for Smart Manufacturing. – URL: <https://www.digitaltwinconsortium.org/initiatives/technology-showcase/micro-factory/> (дата обращения: 21.03.2025).

285. Definition of a Digital Twin. – URL: <https://www.digitaltwinconsortium.org/initiatives/the-definition-of-a-digital-twin/> (дата обращения: 20.04.2025).

286. The DTC Glossary. – URL: <https://www.digitaltwinconsortium.org/glossary/glossary/#itot-platform> (дата обращения: 20.04.2025).

287. Digital Twins: Technology, Use Cases, and Implementation Tips. – URL: <https://www.altexsoft.com/blog/digital-twins/> (дата обращения: 20.04.2025).

288. Цифровые двойники: от концепций до промышленной эксплуатации – Издательство «Открытые системы». – URL: <https://www.osp.ru/os/2022/04/13056597?ysclid=lczay9bxwy797123871> (дата обращения: 20.04.2025).

289. Несенюк, Т.А. Применение RFID-контроля для определения диэлектрического состояния изоляторов воздушной линии топографическим способом / Т.А. Несенюк, П.С. Гончарь // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 1 (65). – С. 89-98.

290. Удаленный мониторинг объектов – современные технологии и их преимущества. – URL: <https://hanston.ru/press-centr/udalennyj-monitoring-obektovs-ovremennyye-tehnologii-i-ih-preimuschestva> (дата обращения: 20.04.2025).

291. Цифровая трансформация космического приборостроения / ред. А.А. Романов, А.А. Романов, Ю.М. Урличич. – Королёв: АО «ЦНИИмаш», 2020. – 397 с.

292. Теория автоматического управления / В.Н. Брюханов [и др.]. – 3-е изд. – Москва: Высшая школа, 2000. – 270 с.

293. Digital twins in manufacturing: benefits, technologies and use cases. – URL:

<https://www.n-ix.com/digital-twins-in-manufacturing/> (дата обращения: 18.04.2025).

294. Глузд, А.А. Принципы повышения эффективности использования оборудования на основе концепции ОЕЕ / А.А. Глузд // Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления: материалы XV научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Гомель, 23–24 апреля 2015 г. – 2015. – С. 313-315.

295. Шопин, А.Г. ОЕЕ и управление простоями: от теории к реализации в SIMATIC IT / А.Г. Шопин, И.В. Занин // Автоматизация в промышленности. – 2006. – № 9. – С. 24-29.

296. OEE Calculation: Definitions, Formulas, and Examples | OEE. – URL: <https://www.oee.com/calculating-oee/> (дата обращения: 20.02.2025).

297. Цифровая платформа по разработке и применению цифровых двойников «Digital Twins» CML-Bench®. Часть 1 / А.И. Боровков [и др.] // САПР и графика. – 2023. – № 8. – С. 42-51.

298. Нотации моделирования бизнес-процессов. – URL: https://www.businessstudio.ru/articles/article/modelirovanie_biznes_protsesov/ (дата обращения: 01.03.2025).

299. Нотации «Basic Flowchart» и «Cross-functional Flowchart». – URL: https://www.businessstudio.ru/help/docs/current/doku.php/ru/csdesign/bpmodeling/process_procedure (дата обращения: 01.02.2025).

300. Нотация «Cross-functional Flowchart». – URL: https://www.businessstudio.ru/help/docs/current/doku.php/ru/manual/creating_model/notation_procedure (дата обращения: 01.02.2025).

301. How to Create a Cross-Functional Flowchart – Miro. – URL: <https://miro.com/flowchart/how-to-create-a-cross-functional-flowchart/> (дата обращения: 01.02.2025).

302. ГОСТ Р 55724–2013 Контроль неразрушающий. Соединения сварные. Методы ультразвуковые. – URL: https://ntcexpert.ru/documents/docs/GOST_R_55724.pdf (дата обращения: 24.03.2025).

303. ГОСТ Р 50.05.07–2018 Система оценки соответствия в области использования атомной энергии. Оценка соответствия в форме контроля. Унифицированные методики. Радиографический контроль. – URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293739/4293739609.pdf> (дата обращения: 24.03.2025).

304. ГОСТ ISO 17636–2–2017 Неразрушающий контроль сварных соединений. Радиографический контроль. Часть 2. Способы рентгено- и гаммаграфического контроля с применением цифровых детекторов. – URL: <https://files.stroyinf.ru/Data/664/66402.pdf> (дата обращения: 24.03.2025).

305. ГОСТ Р 56512–2015 Контроль неразрушающий. Магнитопорошковый метод. Типовые технологические процессы. – URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293762/4293762306.pdf> (дата обращения: 24.03.2025).

306. ГОСТ 18442–80. Контроль неразрушающий. Капиллярные методы. Общие требования. – URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/14158/> (дата обращения: 24.03.2025).

307. ГОСТ Р 2.601–2019 Единая система конструкторской документации. Эксплуатационные документы. – URL: <https://files.stroyinf.ru/Data/708/70828.pdf> (дата обращения: 24.03.2025).

308. ГОСТ 2.114–2016 Единая система конструкторской документации. Технические условия. – URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293752/4293752371.pdf> (дата обращения: 24.03.2025).

309. Мартынец, Е.Р. Эффективность применения технологии разработки цифровых двойников в промышленности / Е.Р. Мартынец, В.А. Левенцов // Качество образования и устойчивое развитие - основа международного сотрудничества : Материалы конференции Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого в рамках программы Петербургского Международного экономического форума. – 2024. – С. 281-287.

310. 8 notable developments in software-defined manufacturing. – URL:

https://iot-analytics.com/developments-software-defined-manufacturing/?utm_source=IoT+Analytics+Master+People+List&utm_campaign=1bbfbee6bf-Software-def_Manu_FEB25_BLOG&utm_medium=email&utm_term=0_-5512165bdc-610136959&mc_cid=1bbfbee6bf&mc_eid=98a1cc2440 (дата обращения: 03.03.2025).

311. Virtual PLCs: Can they become the industry norm by 2030?. – URL: https://iot-analytics.com/virtual-plcs/?utm_source=IoT+Analytics+Master+People+List&utm_campaign=1bbfbee6bf-Software-def_Manu_FEB25_BLOG&utm_medium=email&utm_term=0_-5512165bdc-610136959&mc_cid=1bbfbee6bf&mc_eid=98a1cc2440 (дата обращения: 03.03.2025).

312. ГОСТ Р 27.001–2009 Надежность в технике. Система управления надежностью. Основные положения. – URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293820/4293820223.pdf> (дата обращения: 31.10.2024).

313. Официальный сайт Завод «Озон» ГС и ПО». – URL: <https://заводозон.рф/> (дата обращения: 07.03.2025).

314. О компании – Завод «Озон» ГС и ПО». – URL: <https://заводозон.рф/about/> (дата обращения: 07.03.2025).

315. Часто задаваемые вопросы – Завод «Озон» ГС и ПО». – URL: <https://заводозон.рф/faq/> (дата обращения: 07.03.2025).

316. Заводу «Озон» ГС и ПО» выдан сертификат соответствия системы добровольной сертификации «Сделано в России» по направлению «Надежность». – URL: <https://заводозон.рф/news/detail.php?id=49> (дата обращения: 24.03.2025).

317. Баллоны металлокомпозитные типа БМК - Завод «Озон» ГС и ПО». – URL: <https://заводозон.рф/products/ballony/ballony-metallokompozitnye-tipa-bmk/> (дата обращения: 24.03.2025).

318. Токарный станок с ЧПУ KE36/750 Siemens (механика). – URL: <https://kmt-stanki.ru/catalog/tokarnye-stanki/tokarnye-stanki-s-gorizontальной-staninoy/tokarnyyu-stanok-s-chpu-kmt-ke/> (дата обращения: 03.04.2025).

319. Data Guided Materials Processing - Digital Material Twin and Digital

Material Shadow / J. Wang [и др.] // Authorea. – 2022. – С. 1-12.

320. 1С:ТОИР – автоматизация технологических процессов управления ТОиР на платформе 1С от разработчика. – URL: <https://1ctoir.ru/> (дата обращения: 08.04.2025).

321. 1С:ТОИР Управление ремонтами и обслуживанием оборудования – О решении – Возможности. – URL: <https://solutions.1c.ru/catalog/eam/features> (дата обращения: 08.04.2025).

ПРИЛОЖЕНИЕ А

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор
 ООО «Завод «Озон» ГС и ПО»,
 канд. мед. наук



М.А. Кобельницкий
 М.А. Кобельницкий

06 2025 г.

АКТ

о внедрении научно-практических результатов кандидатской диссертационной работы Корниенко А.В. на тему «Совершенствование процесса обеспечения надежности оборудования с применением технологии цифровых двойников на основе комплексного показателя качества» в практику ООО «Завод «Озон» ГС и ПО»

Комиссия общества с ограниченной ответственностью «Завод «Озон» горноспасательного и противопожарного оборудования» (ООО «Завод «Озон» ГС и ПО») составила настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы Корниенко Александра Владимировича на тему «Совершенствование процесса обеспечения надежности оборудования с применением технологии цифровых двойников на основе комплексного показателя качества», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, были внедрены в работу ООО «Завод «Озон» ГС и ПО».

Автором предложены следующие научно-технические решения, которые легли в основу реализуемой в ООО «Завод «Озон» ГС и ПО» стратегии повышения конкурентоспособности:

- комплексный показатель качества обеспечения надежности оборудования и математическая модель повышения качества обеспечения надежности, использование которых обеспечивает системность и многогранность оценки результатов процесса обеспечения надежности, эффективность выявления критических областей и элементов процесса обеспечения надежности, фокусировку на нивелировании отклонений от желаемого результата;

- модель вероятности безотказной работы оборудования и классификация технического состояния на основе уровня надежности, которые обеспечивают корректность и своевременность выявления несоответствий в состоянии оборудования, а также формируют основу для механизма реализации технического обслуживания в соответствии с рекомендациями системы цифрового двойника;

- процессная модель обеспечения надежности оборудования и алгоритм совершенствования процесса обеспечения надежности с применением технологии цифровых двойников, внедрение которых позволяет обеспечить бесперебойность производственного процесса на механообрабатывающем участке и готовность предприятия к выполнению производственного заказа.

Использование результатов диссертационной работы Корниенко А.В. на предприятии ООО «Завод «Озон» ГС и ПО» обеспечивает совершенствование процесса обеспечения надежности оборудования с использованием цифрового моделирования, позволяют корректно оценить результаты процесса и значительно упростить процедуры выбора подходящей стратегии обслуживания оборудования, достигнуть улучшения показателей обеспечения надежности оборудования не менее чем на 60%. Данные результаты позволяют добиться повышения качества мониторинга на предприятии, уровня цифровой зрелости предприятия, оптимизации и эффективности работы оборудования.

Председатель комиссии:

Исполнительный директор
ООО «Завод «Озон» ГС и ПО»



В.А. Моисеев

Члены комиссии:

Главный инженер
филиала ООО «Завод «Озон»
ГС и ПО» в г. Луганск



А.В. Шевченко

Главный механик
филиала ООО «Завод «Озон»
ГС и ПО» в г. Луганск



Р.В. Конаплев





МИНОБРНАУКИ РОССИИ
федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого»
(ФГАОУ ВО «СПбПУ»)

ИНН 7804040077, ОГРН 1027802505279,
ОКПО 02068574
ул. Политехническая, д. 29 литера Б,
вн. тер. г. муниципальный округ Академическое,
г. Санкт-Петербург, 195251
тел.: +7 (812)552-60-80, office@spbstu.ru

Справка о внедрении результатов кандидатской диссертационной работы Корниенко Александра Владимировича в учебный процесс Передовой инженерной школы «Цифровой инжиниринг» СПбПУ

Результаты диссертационной работы Корниенко А.В. на тему «Совершенствование процесса обеспечения надежности оборудования с применением технологии цифровых двойников на основе комплексного показателя качества», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, использованы в учебной деятельности Передовой инженерной школы «Цифровой инжиниринг» СПбПУ и включены в состав учебно-методического комплекса по дисциплине «Управление наукоемкими производствами» для аспирантов, обучающихся по специальности 2.5.22 «Управление качеством продукции. Стандартизация. Организация производства» в виде:

- Комплексного показателя качества обеспечения надежности оборудования;
- Процессной модели обеспечения надежности оборудования с применением технологии цифровых двойников;
- Алгоритма совершенствования процесса обеспечения надежности оборудования с применением технологии цифровых двойников;
- Элементов и методов планирования стратегий технического обслуживания и обеспечения надежности оборудования при обучении процессам организации производства и управления качеством с учетом применения передовых цифровых и производственных технологий.

Использование указанных результатов диссертационного исследования позволило организовать процесс формирования профильных и цифровых компетенций, новых знаний и навыков в области организации производства и

управления качеством у аспирантов, обучающихся по специальности 2.5.22 «Управление качеством продукции. Стандартизация. Организация производства» в Передовой инженерной школе «Цифровой инжиниринг» СПбПУ.

Главный конструктор по
ключевому научно-
технологическому направлению
«Системный цифровой
инжиниринг»,
и. о. директора Передовой
инженерной школы
«Цифровой инжиниринг»,
к.т.н., доцент

«08» июня 2025 г.

(подпись)



Ст. зам. А.И. Боровков
Подпись
УДОСТОВЕРЯЮ
Ведущий специалист
по кадрам
0906
20-25 г.



ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Таблица Б.1 – Пояснения к значениям, полученным в ходе оценки исходного и планового значений показателей группы «оборудование» комплексного показателя качества обеспечения надежности оборудования на предприятии ООО «Завод «Озон»

Показатели группы «оборудование»	Единица измерения	Диапазон измерений показателя и соответствие значениям параметров для оцениваемого станка											Пояснения к расчету показателя
		0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	
Уровень безотказности оборудования	час	50	545	1040	1535	2030	2525	3020	3515	4010	4505	5000	В оценке участвует 1 станок, поскольку не имеется другого однотипного оборудования со схожими техническими параметрами, в связи с этим оценивается наработка на отказ. Нарботка до первого отказа составила 2100 часов. Плановое значение наработки до

Показатели группы «оборудование»	Единица измерения	Диапазон измерений показателя и соответствие значениям параметров для оцениваемого станка											Пояснения к расчету показателя	
		0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1		
														отказа – 5000 часов.
Уровень точности оборудования	процент	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	<p>В оценке осуществлялась проверка геометрической точности станка – позиционная точность (Positioning Accuracy) по осям X и Z. Заданное производителем значение по оси X – 360 мм, значение по оси Z – 580 мм, допустимое отклонение – 0,005 мм (5 микрон). Отклонений не выявлено. Вклад обоих параметров равный,</p>	

Показатели группы «оборудование»	Единица измерения	Диапазон измерений показателя и соответствие значениям параметров для оцениваемого станка											Пояснения к расчету показателя	
		0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1		
														следовательно, фактическое значение составляет 100%.
Общая эффективность работы оборудования	процент	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	Суммарно в 2023–2024 гг. 247 и 248 рабочих дней соответственно, 1976 и 1984 рабочих часов соответственно, в 2025 году с 1 января по 1 апреля количество рабочих дней составило 58 дней, 464 рабочих часа соответственно. Следовательно, плановая доступность оборудования оценивается в размере 4424	

Показатели группы «оборудование»	Единица измерения	Диапазон измерений показателя и соответствие значениям параметров для оцениваемого станка											Пояснения к расчету показателя	
		0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1		
														<p>часа, фактически отработанное время станка – 2100 часов до первого отказа и 1000 часов после отказа до момента оценки параметра (1 апреля 2025 года), при этом доступность оценивается как эффективность использования производственных мощностей (с учетом простоев по причине отсутствия нагрузки производственных мощностей). Фактическое значение показателя доступности</p>

Показатели группы «оборудование»	Единица измерения	Диапазон измерений показателя и соответствие значениям параметров для оцениваемого станка											Пояснения к расчету показателя	
		0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1		
														оборудования – 0,701. Значение производительности составило 0,85, значение уровня качества продукции – 0,9.
Уровень готовности оборудования	у.е.	0,934	0,9403	0,9466	0,9529	0,9592	0,9655	0,9718	0,9781	0,9844	0,9907	0,997	За основу взято плановое значение 5000 часов наработки до первого отказа, 15,2 часа – среднее время на восстановление работоспособного состояния при оптимистичном сценарии, следовательно, значение показателя при оптимистичном сценарии: $5000/(5000+15,2) = 0,997$. При	

Показатели группы «оборудование»	Единица измерения	Диапазон измерений показателя и соответствие значениям параметров для оцениваемого станка											Пояснения к расчету показателя	
		0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1		
														<p>пессимистичном сценарии среднее время восстановления – 2 месяца, то есть 44 рабочих дня (352 часа соответственно), значение показателя при pessimistичном сценарии: $5000/(5000+352) = 0,934$.</p> <p>Фактическое значение уровня готовности: $2100/(2100+40)=0,98 (0,73)$, поскольку 2100 часов – наработка оборудования, 40 часов – время восстановления после отказа.</p>

Показатели группы «оборудование»	Единица измерения	Диапазон измерений показателя и соответствие значениям параметров для оцениваемого станка											Пояснения к расчету показателя
		0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	
Уровень ремонтпригодности оборудования	час	60	54,4	48,8	43,2	37,6	32	26,4	20,8	15,2	9,6	4	В ходе эксплуатации станка произошел 1 отказ оборудования, потребовалось 5 рабочих дней на восстановление работоспособности (40 часов соответственно). Значение показателя при оптимистичном сценарии – 4 часа на восстановление при 1 отказе, при пессимистичном сценарии – в среднем затраты 60 часов на устранение отказа.

Показатели группы «оборудование»	Единица измерения	Диапазон измерений показателя и соответствие значениям параметров для оцениваемого станка											Пояснения к расчету показателя
		0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	
Уровень долговечности оборудования	час	50000	45000	40000	35000	30000	25000	20000	15000	10000	5000	0	Средний ресурс станка задан производителем – 50000 часов наработки. Прогнозный показатель целесообразно задавать в привязке к плановой календарной продолжительности службы станка. На дату реализации предлагаемых мер (примем 3 квартал 2026 года) начиная с 1 апреля 2025 года оборудование будет доступно 2600 часов, из

Показатели группы «оборудование»	Единица измерения	Диапазон измерений показателя и соответствие значениям параметров для оцениваемого станка											Пояснения к расчету показателя	
		0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1		
														них около 600 часов простоев, в связи с чем предположим, что прогнозное значение наработки составит 2000 часов. Количество однотипных станков составляет 1. Суммарный ресурс оборудования на исходную дату составляет 3100 часов наработки, плановый ресурс: $3100+2000=5100$ часов.
Параметры режимов работы оборудования в соответствии с	процент	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	В качестве важных для оценки параметров	

Показатели группы «оборудование»	Единица измерения	Диапазон измерений показателя и соответствие значениям параметров для оцениваемого станка											Пояснения к расчету показателя	
		0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1		
заданными производителем														выделим скорость вращения шпинделя (об/мин) и температуру шпинделя (°C). Два параметра взяты к оценке для обеспечения простоты расчета. Фактическое значение составило 0,8, поскольку выявлены отклонения параметров эксплуатации (режимов работы) в отличие от заданных производителем – зафиксирован перегрев деталей

Показатели группы «оборудование»	Единица измерения	Диапазон измерений показателя и соответствие значениям параметров для оцениваемого станка											Пояснения к расчету показателя	
		0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1		
														в критическом узле оборудования.
Длительность планового технического обслуживания относительно общей продолжительности технического обслуживания	доля	0,5	0,55	0,6	0,65	0,7	0,75	0,8	0,85	0,9	0,95	1	В соответствии с план-графиком службы главного механика на обслуживание станка выделено 200 часов в год. Для значения показателя при пессимистичном сценарии примем 200 часов в год на аварийное обслуживание и ремонты, следовательно, суммарная длительность обслуживания и ремонтов составила 400 часов в год, значение	

Показатели группы «оборудование»	Единица измерения	Диапазон измерений показателя и соответствие значениям параметров для оцениваемого станка											Пояснения к расчету показателя	
		0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1		
														показателя при пессимистичном сценарии составило: $200/(200+200)=0,5$. Фактическое значение оценивалось из расчета 200 часов планового обслуживания и 40 часов, затраченных на аварийный ремонт по причине отказа.
Длительность простоев оборудования из-за отказов и ремонтов относительно общей продолжительности простоев оборудования	доля	0,5	0,45	0,4	0,35	0,3	0,25	0,2	0,15	0,1	0,05	0	Согласно сведениям и имеющейся статистике о доступности оборудования, суммарная длительность простоев оборудования составила 1324	

Показатели группы «оборудование»	Единица измерения	Диапазон измерений показателя и соответствие значениям параметров для оцениваемого станка											Пояснения к расчету показателя	
		0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1		
														<p>часа (3100 часов отработано, 4424 часа оборудование было доступно), при этом произошел 1 отказ оборудования, длительность восстановления оборудования составила 40 часов, соответственно, фактическое значение показателя составило: $40/1324=0,03$. При оптимистичном сценарии простоев по причине отказов не возникало, при</p>

Показатели группы «оборудование»	Единица измерения	Диапазон измерений показателя и соответствие значениям параметров для оцениваемого станка											Пояснения к расчету показателя	
		0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1		
														пессимистичном сценарии 50% длительност и простоев пришлось на простои по причине отказа оборудования. Плановое значение оценивается в объеме 40 часов (отсутствие новых отказов), включенных в 1924 часа простоя (1324 часов фактического простоя и 600 часов ожидаемых простоев), плановое значение составило 0,02.

Источник: составлено автором по материалам ООО «Завод «Озон» и результатам опроса руководителей предприятия

Таблица Б.2 – Оценка исходного и планового значений показателей группы «оборудование» комплексного показателя качества (КПК) обеспечения надежности оборудования на предприятии ООО «Завод «Озон»

Показатели группы «оборудование»	Максимальные значения при равных весовых коэффициентах		Максимальные значения при оцениваемых весовых коэффициентах		Исходные значения показателей			Плановые значения показателей		
	Значение показателя	Весовой коэфф-т	Значение показателя	Весовой коэфф-т	Значение показателя в исходной форме	Значение показателя	Весовой коэфф-т	Значение показателя в исходной форме	Значение показателя	Весовой коэфф-т
Уровень безотказности оборудования	1	0,111	1	0,15	2100	0,414	0,15	5000	1	0,15
Уровень точности оборудования	1	0,111	1	0,15	100	1	0,15	100	1	0,15
Общая эффективность работы оборудования	1	0,111	1	0,15	0,53	0,53	0,15	0,75	0,75	0,15
Уровень готовности оборудования	1	0,111	1	0,07	0,98	0,73	0,07	0,997	1	0,07
Уровень ремонтпригодности оборудования	1	0,111	1	0,1	40	0,357	0,1	15,2	0,8	0,1

Показатели группы «оборудование»	Максимальные значения при равных весовых коэффициентах		Максимальные значения при оцениваемых весовых коэффициентах		Исходные значения показателей			Плановые значения показателей		
	Значение показателя	Весовой коэфф-т	Значение показателя	Весовой коэфф-т	Значение показателя в исходной форме	Значение показателя	Весовой коэфф-т	Значение показателя в исходной форме	Значение показателя	Весовой коэфф-т
Уровень долговечности оборудования	1	0,111	1	0,08	3100	0,938	0,08	5100	0,898	0,08
Параметры режимов работы оборудования в соответствии с заданными производителем	1	0,111	1	0,1	80	0,8	0,1	100	1	0,1
Длительность планового технического обслуживания относительно общей продолжительности технического обслуживания	1	0,111	1	0,1	0,83	0,83	0,1	1	1	0,1

Показатели группы «оборудование»	Максимальные значения при равных весовых коэффициентах		Максимальные значения при оцениваемых весовых коэффициентах		Исходные значения показателей			Плановые значения показателей		
	Значение показателя	Весовой коэфф-т	Значение показателя	Весовой коэфф-т	Значение показателя в исходной форме	Значение показателя	Весовой коэфф-т	Значение показателя в исходной форме	Значение показателя	Весовой коэфф-т
Длительность простоев оборудования из-за отказов и ремонтов относительно общей продолжительности простоев оборудования	1	0,111	1	0,1	0,03	0,94	0,1	0,02	0,96	0,1
Значение показателей группы показателей «оборудование»	1		1		0,71044			0,93		
Весовой коэффициент группы показателей «оборудование»	0,33		0,5		0,5			0,5		

Показатели группы «оборудование»	Максимальные значения при равных весовых коэффициентах		Максимальные значения при оцениваемых весовых коэффициентах		Исходные значения показателей			Плановые значения показателей		
	Значение показателя	Весовой коэфф-т	Значение показателя	Весовой коэфф-т	Значение показателя в исходной форме	Значение показателя	Весовой коэфф-т	Значение показателя в исходной форме	Значение показателя	Весовой коэфф-т
Итоговое значение КПК группы показателей «оборудование»	0,03667		0,05556		0,03947			0,0517		

Источник: составлено автором по материалам ООО «Завод «Озон» и результатам опроса руководителей

Таблица Б.3 – Оценка исходного и планового значений показателей группы «персонал» и группы «технологии и ресурсы» комплексного показателя качества (КПК) обеспечения надежности оборудования на предприятии ООО «Завод «Озон»

Показатели группы «персонал»	Максимальные значения при равных весовых коэффициентах		Максимальные значения при оцениваемых весовых коэффициентах		Исходные значения показателей		Плановые значения показателей	
	Значение показателя	Весовой коэфф-т	Значение показателя	Весовой коэфф-т	Значение показателя	Весовой коэфф-т	Значение показателя	Весовой коэфф-т
Уровень владения навыками для проведения требуемого технического обслуживания и ремонта оборудования	1	0,333	1	0,4	0,6	0,4	0,9	0,4

Уровень компетенций в выполнении производственных операций с использованием оборудования	1	0,333	1	0,4	0,7	0,4	0,9	0,4
Уровень владения навыками для анализа данных и выявления взаимосвязей при мониторинге работы оборудования	1	0,333	1	0,2	0,2	0,2	0,8	0,2
Значение показателей группы показателей «персонал»	1		1		0,56		0,88	
Весовой коэффициент группы показателей «персонал»	0,33		0,25		0,25		0,25	
Итоговое значение КПК группы показателей «персонал»	0,11		0,08333		0,04667		0,073	
Показатели группы «технологии и ресурсы»	Максимальные значения при равных весовых коэффициентах		Максимальные значения при весовых коэффициентах исходного состояния		Исходные значения показателей		Плановые значения показателей	
	Значение показателя	Весовой коэфф-т	Значение показателя	Весовой коэфф-т	Значение показателя	Весовой коэфф-т	Значение показателя	Весовой коэфф-т
Уровень мониторинга технического состояния и эксплуатации оборудования	1	0,333	1	0,4	0,2	0,4	0,8	0,4
Уровень доступности инструментов для проведения технического обслуживания и ремонтов	1	0,333	1	0,3	0,4	0,3	0,7	0,3

Уровень входного контроля сырья и материалов для изготовления изделий	1	0,333	1	0,3	0,6	0,3	0,8	0,3
Значение показателей группы показателей «технологии и ресурсы»	1		1		0,38		0,77	
Весовой коэффициент группы показателей «технологии и ресурсы»	0,34		0,25		0,25		0,25	
Итоговое значение КПК группы показателей «технологии и ресурсы»	0,11333		0,08333		0,03167		0,064	

Источник: составлено автором по материалам ООО «Завод «Озон» и результатам опроса руководителей предприятия

Таблица Б.4 – Оценка исходного и планового значений комплексного показателя качества (КПК) обеспечения надежности оборудования на предприятии ООО «Завод «Озон»

Значение КПК	Максимальное значение при равных весовых коэффициентах	Максимальное значение при оцениваемых весовых коэффициентах	Исходное значение	Плановое значение
Итоговое значение КПК обеспечения надежности станка	0,26	0,222	0,1178	0,1892

Источник: составлено автором по материалам ООО «Завод «Озон» и результатам опроса руководителей предприятия