

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

На правах рукописи



НУГМАНОВ ДИЛЬШАТ ИЛХАМОВИЧ

**РАЗРАБОТКА НАУЧНО-ОРГАНИЗАЦИОННЫХ МЕТОДОВ
ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЦИФРОВОГО ПРОИЗВОДСТВА**

2.5.22. Управление качеством продукции.
Стандартизация. Организация производства

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, доцент
Нургалиев Рустам Карлович

Казань – 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ	4
ВВЕДЕНИЕ	6
1 НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ОБЗОР И АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ ПРОБЛЕМ ОРГАНИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВА В УСЛОВИЯХ ЦИФРОВОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ	14
1.1 Эволюция концепций организации производства и управления качеством	14
1.2 Перспективы интеллектуализации производственных систем в условиях Индустрии 4.0 и Индустрии 5.0	26
1.3 Выявление ключевых проблем в области организации производства при переходе к модели «цифровой фабрики».....	43
Выводы по главе 1	52
2 РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ «ЦИФРОВОЙ ФАБРИКИ» И ЕЕ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ	54
2.1 Структурирование элементов модели «цифровой фабрики»	54
2.2 Формализация поэтапного внедрения модели «цифровой фабрики»	63
2.3 Описание трансформации требований к кадровому обеспечению цифровой производственной системы	79
Выводы по главе 2	83
3 СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В РАМКАХ РАЗВЕРТЫВАНИЯ «ЦИФРОВОЙ ФАБРИКИ»	86
3.1 Развитие системы показателей эффективности блока планирования производства	86
3.2 Формирование алгоритма предиктивного управления качеством на основе анализа больших данных	101
3.3 Разработка методики оценки эффективности управления материалами	109
Выводы по главе 3	113

4 АПРОБАЦИЯ РАЗРАБОТАННЫХ ИНСТРУМЕНТОВ «ЦИФРОВОЙ ФАБРИКИ»	115
4.1 Систематизация требований к блокам планирования, управления качеством, управления материалами	115
4.2 Сравнительный анализ предложенных инструментов и зарубежных аналогов	123
4.3 Имитационное моделирование оценки эффективности производственных процессов «цифровой фабрики»	129
Выводы по главе 4	137
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	140
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	144
ПРИЛОЖЕНИЯ	161
Приложение А	162
Использование промышленных роботов (данные Росстата)	162
Приложение Б	163
Использование программных средств в решении прикладных задач производства на предприятиях металлургической отрасли, единиц (данные Росстата)	163
Приложение В	164
Структура затрат на внедрение и использование цифровых технологий на предприятиях металлургической отрасли в 2024 г. по типам металлургического производства (составлено и рассчитано по данным Росстата)	164
Приложение Г	166
Параметры настройки стохастической модели	166
Приложение Д	167
Обоснование выбора закона распределения случайных величин	167
Приложение Е	168
Формулы для моделирования случайных величин	168

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

- АРМ – автоматизированное рабочее место;
- АСАК – автоматизированная система аналитического контроля;
- АСОДУ ТП – автоматизированная система оперативно-диспетчерского управления технологическим процессом;
- АСУП – автоматизированная система управления предприятием;
- АСУР – автоматизированная система управления рецептурами;
- АСУТП – автоматизированная система управления технологическим процессом;
- ИИ – искусственный интеллект;
- ИС – информационная система;
- ИТ – информационные технологии;
- ЛИМС – лабораторная информационная менеджмент-система (LIMS, Laboratory Information Management System);
- ПИ – пользовательский интерфейс;
- ПО – программное обеспечение;
- СККП – система контроля качества процесса;
- СМК – система менеджмента качества;
- СУБД – система управления базами данных;
- ТОиР – техническое обслуживание и ремонт;
- APS – Advanced planning and scheduling (усовершенствованное планирование);
- FAT – Factory Acceptance Test (заводские приемочные испытания);
- ESB – Enterprise service bus (корпоративная сервисная шина);
- MES – Manufacturing Execution System (Система управления производственными процессами);
- ML – Machine Learning (машинное обучение);
- PDCA – цикл Шухарта-Деминга «Plan – Do – Check – Act» («планирование – осуществление – проверка – корректирующее действие»);

PLM – Product Lifecycle Management (Управление жизненным циклом изделия);

SAT – Site Acceptance Test (приемочные испытания на месте эксплуатации);

SIT – Site Integration Test (объектовые интеграционные испытания).

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Интеграция управленческих решений в цифровой экономике с организацией производственных систем становится неотъемлемым элементом стратегии развития предприятий, действенным инструментом повышения эффективности, качества продукции и экологичности технологических процессов. Однако фрагментарной цифровой трансформации отдельных производственных процессов становится недостаточно, требуется системный подход, адекватный условиям Четвертой промышленной революции и концепции Качество 4.0.

Потенциал цифровизации весьма высок, охватывает широкий инструментальный спектр, от сбора первичных данных на полевом уровне до автоматизированного проектирования, имитационного моделирования, предиктивной аналитики и интеллектуальной системы поддержки принятия решений. В масштабах производственной системы актуальным инструментом выступает «цифровая фабрика». Ее базовая структура регламентирована стандартами ГОСТ Р 70265.1-2022 Измерение, управление и автоматизация промышленного процесса. Структура цифровой фабрики. Часть 1. Основные положения) и ГОСТ Р 70265.2-2024 Измерение, управление и автоматизация промышленного процесса. Структура цифровой фабрики. Часть 2. Элементы модели. Однако для применения в конкретной отрасли требуется адаптация данных положений.

В России цифровая трансформация совмещена с целями политики импортозамещения. На фоне ухода зарубежных поставщиков программных продуктов (Siemens, SAP и др.) крупные предприятия сфокусировали ресурсы на разработке корпоративных информационных систем с учетом специфики технологических процессов или обоснованном выборе готовых отечественных решений. Данная проблема также затронула анодные производства, в технологические цепочки которых активно внедряются умные устройства,

автоматизированные системы, роботы для повышения качества процессов, электродов, а также обеспечения прослеживаемости готовой продукции.

Вышесказанное определяет важность разработки такой модели «цифровой фабрики», которая учитывает специфику сырья, оборудования, технологических процессов анодного производства. Кроме того, в структуре модели «цифровой фабрики» наиболее принципиальные изменения в трактовке эффективности, на наш взгляд, актуальны для таких подсистем на уровне управления производством, как блок планирования (календарного и оперативного), блок управления качеством и блок управления материалами. Это актуализирует проблему научно-практического развития инструментов организации производства в условиях модели «цифровой фабрики», которая находится в фокусе диссертационного исследования.

Степень разработанности темы исследования. Цифровая трансформация производственных систем, освоение и результативность внедрения цифровых инструментов организации производства являются объектом исследования российских и зарубежных ученых.

Фундаментальные положения организации производства и управления качеством заложены У. Э. Демингом [41, 42], Дж. Джураном [128], Ф. У. Тейлором [136], А. Фейгенбаумом [122], У. Э. Шухартом [58] и др., и получили развитие в трудах Т. А. Салимовой [84], В. А. Лapidуса [59], посвященных изучению и практическому применению положений концепции Качество 4.0, а также О. А. Горленко [39], А. Я. Дмитриева, Т. А. Митрошкиной [43], внимание которых обращено на реализацию QFD-методологии («дом качества») как метода управления качеством продукции. Наилучшие доступные технологии как инструмент управления качеством раскрыт в работах Т. В. Гусевой [40], Д. О. Скобелева [88] и др. Значимый вклад в решение научно-практических проблем в области бережливого производства внесли В. М. Бабушкин [25], А. В. Кизим [51], Т. В. Малышева [62, 63], академик РАН – В. П. Мешалкин [65, 66], Р. Д. Фарисов [98], Д. В. Харитонов [106, 107] и другие ученые.

Изучение и разработка направлений решения проблем интеграции информационных технологий в организации производственных процессов нашли отражение в работах таких ученых, как В. И. Бобков [29], Я. А. Ерисов [34], С. С. Кудрявцева [55, 56], Е. Р. Мошев [67], С. В. Новикова [95, 96], Р. К. Нургалиев [77], А. И. Шинкевич [114, 115] и др. Цифровой трансформации подсистемы управления качеством посвящены труды следующих ученых: Д. И. Благовещенский [28], В. А. Васильев [31], С. А. Васин [32, 33], И. А. Гарькина [36], Е. А. Горбашко [38], А. М. Данилов [36], В. Н. Козловский [52, 53, 54], О. В. Пантюхин [32], Д. И. Панюков [28, 53], Н. В. Переборова [78], Ю. Ю. Черемухина [105] и др. В частности, специфика «цифровой фабрики» как инструмента организации производства раскрыта в научных публикациях Д. В. Антипова [20, 21], А. В. Куприянова [94], И. С. Ткаченко [94], В. П. Часовских [109] и др.

Однако существенный массив теоретических и прикладных исследований не в полной мере решает проблему формирования и диагностики комплексной эффективности «цифровой фабрики» и не затрагивает специфику анодного производства, что обуславливает необходимость разработки соответствующих новых организационно-технических решений.

Цель и задачи исследования. Целью диссертационного исследования является разработка научно-организационных методов проектирования цифрового производства в целях повышения качества изделий и эффективности процессов в условиях цифровой трансформации производственной системы.

Достижение установленной цели предполагает решение следующих задач:

- 1) разработать структурно-параметрическую модель «цифровой фабрики» для эффективной организации анодного производства;
- 2) предложить методику оценки эффективности производственной системы в разрезе модулей «цифровой фабрики» анодного производства;
- 3) сформировать комплексный инструментарий организации производства на основе модели «цифровой фабрики», интегрирующий предложенные разработки в единую систему управления производственными процессами;

4) апробировать предложенные научно-технические решения по повышению эффективности производственных процессов.

Объектом исследования является система организации анодного производства в России в условиях цифровизации экономики.

Предметом исследования выступает организация подсистемы «цифровой фабрики», представляющая собой функциональные блоки единой информационно-аналитической платформы управления производством.

Соответствие исследования паспорту научной специальности. Область диссертационного исследования соответствует научной специальности 2.5.22. Управление качеством продукции. Стандартизация. Организация производства в пунктах: 15. Научно-практическое развитие инженерных инструментов управления, организации производственных систем, а также баз знаний; 23. Разработка и совершенствование методов и средств планирования и управления производственными процессами и их результатами; 25. Разработка моделей описания, методов и алгоритмов решения задач проектирования производственных систем, организации производства и принятия управленческих решений в цифровой экономике.

Научная новизна исследования заключается в разработке научно-технических решений по повышению эффективности процессов анодного производства, основанных на применении инструментов Индустрии 4.0 и позволяющих квантифицировать качество управления данными в контексте «цифровой фабрики».

1. **Предложена** структурно-параметрическая модель «цифровой фабрики» для эффективной организации анодного производства (на примере системы управления качеством), дополненная алгоритмом внедрения и метаграфовой моделью «цифровой фабрики», **отличающаяся** учетом специфических отраслевых параметров, интегрирующая современные цифровые инструменты и иерархическую систему управления потоками данных, **обеспечивающая** сквозное управление базами данных, возможность проектирования новых и модернизации действующих производств (п. 15 паспорта специальности 2.5.22).

2. **Разработан** методический инструментарий диагностики структурных блоков «цифровой фабрики» (планирование, управление качеством, управление материалами), **отличающийся** от традиционной системы оценки эффективности производства включением специфичных для цифровой среды метрик, что **позволяет** создать инструментальную основу для количественной оценки цифровой трансформации производственной системы и управления ее эффективностью на принципиально новом уровне (п. 23 паспорта специальности 2.5.22).

3. **Разработан** комплексный организационно-технический инструментарий управления цифровым производством, интегрирующий предложенный методический аппарат в единую систему управления процессами, дополненный формализацией функции качества QFD для «цифровой фабрики» анодного производства и имитационными моделями (стохастическая и системно-динамическая) диагностики эффективности блока планирования, **отличающийся** возможностью сравнения эффективности организации производства для «традиционной» и «цифровой фабрики» анодов, что **позволяет** автоматизировать процесс диагностики эффективности производственной системы, выявления «узких» мест в технологической цепочке, формирования больших данных для принятия управленческих решений (п. 25 паспорта специальности 2.5.22).

Теоретическая значимость работы заключается в развитии концептуальных подходов к проектированию цифровых производственных систем, в том числе: обоснована необходимость сквозной интеграции данных, построена онтологическая модель «цифровой фабрики», сформулированы ключевые проблемы организации производства при переходе к модели «цифровой фабрики», построена концептуальная структура моделирования цифрового анодного производства, предложена логико-функциональная структура производства обожженных анодов в контексте создания «цифровой фабрики», разработана процессно-компетентностная модель цифровой трансформации производственной системы; проведена модернизация методики диагностики эффективности производственной системы применительно к «цифровой фабрике» в разрезе

функциональных блоков планирования, управления качеством, управления материалами.

Практическая значимость работы подтверждается тем, что определены перспективы практического использования методических разработок, в частности, метаграфовая модель «цифровой фабрики» применима в качестве шаблона для проектирования цифровых производственных систем в других сферах производства, имитационные модели диагностики эффективности планирования производства позволяют сценарный анализ цифровой трансформации производства; создана система рекомендаций по внедрению модели «цифровой фабрики», определены этапы оценки эффективности «цифровой фабрики», алгоритм предиктивного управления качеством на основе анализа больших данных, процесс прослеживаемости анодов в среде «цифровой фабрики», система функциональных требований к подсистемам планирования, управления качеством, управления материалами «цифровой фабрики». Комплексная реализация организационно-технических решений направлена на повышение качества изделий и эффективности процессов в условиях цифровой трансформации производственной системы.

Методология и методы исследования. Решению задач диссертационного исследования способствовало применение системного подхода к реализации модели «цифровой фабрики» как совокупности взаимосвязанных подсистем, метаграфового подхода для описания архитектуры «цифровой фабрики», процессное моделирование, формализация функции качества QFD в виде «дома качества», диаграмма Исикавы для систематизации функциональных требований к подсистемам «цифровой фабрики», имитационное моделирование для проверки усовершенствованной методики, а также методы сравнительного и статистического анализа.

Разработка и проверка программно-методического комплекса реализованы в программных решениях Microsoft Excel, Business Studio и AnyLogic.

Информационной базой исследования послужили материалы опубликованных результатов научных исследований отечественных и зарубежных

ученых (в виде монографий, диссертаций, научных статей, патентов); нормативно-правовые акты, включая национальные и межгосударственные стандарты, регламентирующие структуру «цифровой фабрики», интероперабельность информационных систем, интеграцию систем управления предприятием, отраслевой информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям; статистические данные; данные информационно-аналитических порталов в области автоматизации и цифровой трансформации производственных систем.

Положения, выносимые на защиту.

1. Структурно-параметрическая модель «цифровой фабрики» анодного производства, дополненная алгоритмом внедрения и метаграфовой моделью «цифровой фабрики».
2. Методический инструментарий диагностики структурных блоков «цифровой фабрики», включающий специфичные для цифровой среды метрики.
3. Комплексный организационно-технический инструментарий управления цифровым производством, дополненный функцией качества QFD для «цифровой фабрики» анодного производства и имитационными моделями диагностики эффективности блока планирования.

Степень достоверности и апробация результатов исследования.

Достоверность научных результатов подтверждается аналитическим обзором значительного массива научно-практических материалов в области организации цифрового производства, на которых базируются сформулированные в работе теоретические положения; использованы современные методы обработки данных и информационные технологии; научные результаты согласуются с известными данными по теме диссертационного исследования.

Основные результаты исследования обсуждались на международных и российских научно-практических конференциях, включая: XXXIX Международную научную конференцию «Математические методы в технике и технологиях» (г. Санкт-Петербург, 2026 г.), 4-я Международная научно-техническая конференция «Технологии и техника: пути инновационного развития»

(г. Воронеж, 2026 г.), XIII Международный научно-практический форум «Стандартизация. Экономика данных. Кадровое и технологическое лидерство» (г. Казань, 2026 г.), IV Всероссийскую научно-практическую конференцию «Актуальные тренды цифровой трансформации промышленных предприятий» (г. Казань, 2025 г.).

Основные положения диссертационного исследования прошли апробацию в рамках НИР КНИТУ: «Методика анализа качества процессов по производству продукции с использованием искусственного интеллекта» (НИР № 115-25 от 30.10.2025), «Развитие бизнес-модели предприятия нефтегазохимического комплекса в условиях устойчивого развития» (НИР № 9-25 от 29.07.2025), «Моделирование бизнес-процессов в рамках импортозамещения для предприятий нефтегазохимического технологического комплекса» (НИР №115-24 от 29.07.2024).

Результаты исследования используются в ООО НПП «ГКС» и научно-образовательной деятельности ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет», что подтверждено соответствующими справками.

Личный вклад автора состоит в непосредственном участии на всех этапах исследовательской работы, включая определение проблематики, постановку цели и формулирование задач исследования, определение объекта и предмета исследования, аналитический обзор известных научных положений в области цифровой трансформации производственных систем, разработку теоретических и практических научных результатов и их апробацию.

Публикации. Основные положения диссертации опубликованы в 9 научных работах общим объемом 2,75 п. л. (авторский вклад объемом 2,46 п. л.), из них 3 статьи опубликованы в изданиях, входящих в Перечень ВАК при Минобрнауки России, зарегистрирован 1 электронный ресурс.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы (138 наименований) и 6 приложений. Общий объем диссертации – 168 страниц, включая 53 рисунка, 14 таблиц.

1 НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ОБЗОР И АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ ПРОБЛЕМ ОРГАНИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВА В УСЛОВИЯХ ЦИФРОВОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ

1.1 Эволюция концепций организации производства и управления качеством

Современные производственные системы претерпевают существенную модернизацию, обусловленную потребностью в повышении ресурсоэффективности и экологичности, цифровой трансформацией, переходом к принципам «умного» производства. Данный переход сопровождается развитием соответствующего инструментария.

Как известно, концепция бережливого производства проистекает из опыта компании Тойота, совершившей революцию в организации производства. Сегодня реализации принципов бережливого производства, организации интегрированной системы менеджмента, интеграции системы менеджмента качества и системы менеджмента производства посвящен обширный перечень национальных стандартов [3, 4, 5], устанавливающих инструменты, методы, требования к организации рационального производства. Основными инструментами бережливого производства являются стандартизация работы, организация рабочего пространства (5S), картирование потока создания ценности (VSM), визуализация, быстрая переналадка (SMED), защита от непреднамеренных ошибок (Рока-yoke), канбан, всеобщее обслуживание оборудования [4], в той или иной степени способствующие повышению безопасности производства, качества продукции и услуг, оптимизации стоимости и времени производственных процессов. Ключевыми принципами являются устранение потерь, непрерывный поток создания ценности, вытягивающее производство и др. [2].

Качество стало рассматриваться как неотъемлемая часть производственного процесса, что привело к формированию концепции (философии) Всеобщего управления качеством (TQM), в котором принимает участие каждый сотрудник. Концепция ориентирована на удовлетворение потребителей за счет непрерывного

улучшения качества продукции, услуг, процессов на всех этапах создания ценности, носит сквозной характер, формирует фундамент для системного управления потерями и стоимостью производственного цикла.

Методология «Шесть сигм» (six sigma) – системный подход к управлению качеством, разработанный в компании Motorola, предусматривающий улучшение качества выходов процессов, статистически обоснованный подход к снижению дефектности операций. Подход основан на измеримости результатов, в том числе финансовых, а также на постулате о прямой зависимости между дефектами продукции, производственными затратами и уровнем удовлетворённости потребителей.

Далее следовала интеграция принципов бережливого производства и «Шести сигм», позволяющая системно решить проблему повышения качества и скорости потока создания ценности, а также ресурсоэффективности. Последовательность действий включает определение, измерение, анализ, усовершенствование, контроль (цикл DMAIC). Однако осознание того факта, что невозможно исправить конструктивно несовершенный продукт, привело к развитию методологии «Шесть сигм» до подхода DFSS (Design for Six Sigma), который в отличие от стандартного применяется не для того, чтобы исправлять существующий процесс, а для построения нового процесса. В данном случае цикл действий включает определение, измерение, анализ, проектирование, проверка (цикл DMADV) [27].

Поступательная автоматизация сбора данных позволила проводить статистический анализ производственных процессов, обрабатывать большие массивы данных, повысить скорость реагирования на отклонения в параметрах процессов. Датчики Интернета вещей обеспечивают непрерывный поток данных со всего оборудования на производственном участке, аналитические инструменты позволяют выявлять неочевидные взаимосвязи, выходящие за пределы методологии бережливого производства и TQM. Предиктивная аналитика и машинное обучение позволяет прогнозировать будущие потери и дефекты, отказы оборудования, отклонения качества до их возникновения, что способствовало переходу от реактивного подхода к проактивному.

Изучению проблемы интеграции информационных технологий в управление производственными процессами посвящены многочисленные научные исследования отечественных и зарубежных ученых, таких как В. И. Бобков [29], Я. А. Ерисов [34], С. С. Кудрявцева [56], Е. Р. Мошев [67], С. В. Новикова [95, 96], Р. К. Нургалиев [77], Д. В. Харитонов [106, 107], А. И. Шинкевич [114, 115] и др.

Особый интерес в контексте настоящего диссертационного исследования представляют разработки Е. К. Савич в области создания интеллектуальной цифровой системы менеджмента качества (рисунок 1.1): во-первых, данная система рассматривается как составляющий блок модели «цифрового завода»; во-вторых, предусматривается внедрение цифровых инструментов управления качеством на этапах жизненного цикла продукции; в-третьих, система принятия решений основана на машинном обучении; в-четвертых, учитывается необходимость развития компетенций по применению интеллектуальной системы менеджмента качества [83].



Рисунок 1.1 – Структурная модель цифровой системы менеджмента качества по Е. К. Савич [83]

Вместе с тем, фокус предприятий на эффективности процессов требует системного подхода, объединяющего различные концепции, технологии и инструменты организации производства.

В настоящее время Индустрия 4.0 не отменяет бережливое производство, а дополняет его, предоставляя эффективные инструменты организации производства. Применение цифровых решений в картировании потока создания ценности предполагает сбор данных в режиме реального времени и в наиболее полном объеме для формирования карты производственного процесса. А технологии Интернета вещей, машинного обучения [102], предиктивной аналитики в виде рекомендательных моделей могут подсказать инженеру, аналитику, что именно необходимо усовершенствовать для повышения качества и предотвращения отклонений. С точки зрения вытягивания аналитические инструменты позволяют более точно прогнозировать спрос и оптимизировать цепи поставок.

Модернизация бережливого производства в условиях цифровой трансформации сводится к следующему: принцип вытягивания позволяет реализовать киберфизическая система, принцип визуализации и канбан – цифровой канбан и дополненная реальность и т.д. [26]. А внедрение цифровых технологий способствует энергосбережению и рационализации водопользования [35].

Концептуальное взаимодополнение концепций бережливого производства и Индустрии 4.0 заключается в том, что первая определяет объекты, требующие улучшения, а вторая – методы, инструменты и время данных улучшений (рисунок 1.2). Интеллектуализация процессов способствует формированию «умного» производства – сеть оборудования и вычислительных мощностей, используемых на всех этапах производства продукции, интегрирующая бизнес-процессы с целью минимизации ошибок, дефектов, простоев оборудования и удовлетворения потребностей клиентов [131].



Рисунок 1.2 – Результат интеграции инструментов бережливого производства и Индустрии 4.0 (обобщено автором)

Ученые всесторонне исследуют потенциал цифровизации и бережливого производства.

Вопросам энергоресурсосбережения, инжиниринга, цифровизации посвящен ряд работ академика РАН – В. П. Мешалкина [37, 66, 121]. Идеи ученого заключаются в том, что цифровая трансформация – инструмент повышения ресурсоэффективности, экологической безопасности производственных систем, принципы бережливого производства лежат в основе методологии инжиниринга и интегрированной логистической поддержки, а импортозамещение диктует необходимость создания собственных цифровых технологий и отечественной сырьевой базы.

В диссертационном исследовании В. М. Бабушкина, посвященном развитию методов адаптивного планирования организации бережливого цифрового производства, представлен системный подход, позволяющий непрерывно адаптировать процессы и операции в ответ на изменения условий внутренней и

внешней среды и повысить производительность производственной системы. Последняя декомпозируется ученым следующим образом: производительность первого рода – объем продукции, произведенной в единицу времени; второго рода – скорость выполнения производственных заданий; третьего рода – результативность организации производства. При этом система адаптивного планирования автоматизирована по принципу вытягивания – на основе прогноза точки перезаказа [25].

А. В. Кизимом предложено интегрировать принципы бережливого производства и цифровые инструменты (цифровые двойники, метаонтологическая модель, многоагентные системы) в рамках проактивного технического обслуживания и ремонта, что позволяет достичь синергетического эффекта в виде повышения эффективности обслуживания, сокращения потерь и повышения общей производительности оборудования [51].

В научной работе Т. В. Малышевой изложены положения в области экологического мониторинга производства, определяющие методологической основой – принципы бережливого производства, а инструментарием – цифровизацию, в частности, автоматизированную систему поддержки принятия решений и прототип модели цифровой производственной платформы управления жизненным циклом химико-технологической системы с внутренним и внешним контуром [63].

Р. Д. Фарисов в контексте развития методологии постоянного улучшения массового чугунолитейного производства, интеграции принципов бережливости и быстро реагирующего производства применяет цифровые технологии как инструмент контроля мероприятий по повышению качества продукции [98].

Немаловажным в настоящее время является учет политики импортозамещения при совершенствовании подхода предприятия к организации производства, что нашло отражение в трудах Я. В. Денисовой [65, 112]. Автор рассматривает Индустрию 4.0 и бережливое производство как взаимодополняющие концепции, а импортозамещение, технологический

суверенитет – как контекстный фактор, определяющий выбор инструментов и стратегию их внедрения в условиях российской действительности.

Среди зарубежных исследований интерес представляют работы, посвященные:

1) апробации концептуальной модели интеграции бережливого производства и технологий Индустрии 4.0 на основе имитационного моделирования [123];

2) разработке модели зрелости, основанной на синергии бережливого производства и технологий Индустрии 4.0; уровни зрелости рассматриваются через три перспективы – «умные» процессы (уровни зрелости: ценность, интеграция, интеллектуализация, сотрудничество, автономность), «умные» люди (уровни зрелости: осознание, адекватность, внедрение, продвижение, культура), «умные» продукты (уровни зрелости: пригодный к использованию, прослеживаемый, анализируемый, связанный, интерактивный) [137];

3) выявлению ключевых факторов успешности цифровизации (приверженность высшего руководства) и устойчивости принципов бережливого производства (принцип «пойди и посмотри»), а также подтверждению положительного влияния цифровой трансформации производственной системы на эффективность бережливого подхода [124];

4) поиску баланса между технологическим прогрессом и человекоцентричными практиками [126] и т.д.

Таким образом, современная эффективная производственная система – это система, которая гармонично сочетает положения концепций бережливого производства, ориентированного на сокращение потерь и повышение качества продукции при оптимальном использовании ресурсов, и Индустрии 4.0, предоставляющей инструменты для предиктивной аналитики, адаптивного планирования и сквозной прослеживаемости. При этом импортозамещение служит важным критерием выбора технологических решений.

Синергия бережливого производства и технологий Индустрии 4.0, обеспечивая устранение потерь, гибкость производства, создает предпосылки для развития и трансформации системы менеджмента качества. Фундаментальные

основы теории управления качеством заложены Ф. У. Тейлором (системное, научно обоснованное управление процессами, основанное на стандартизации, разделении труда, обучении и контроле выполнения заданий) [136], У. Э. Шухартом (статистическое управление процессами) [58], А. Фейгенбаумом (концепция Всеобщего контроля качества, TQC) [122], Дж. Джураном (смещение фокуса с контроля продукции на управление процессами; триединая концепция качества – планирование, контроль и улучшение качества; «малое качество» («little q») и «большое качество» («big Q»)) [128], У. Э. Демингом (14 принципов преобразования системы менеджмента, цикл Шухарда-Деминга – схема улучшения продукта или услуги, концепция статистической управляемости) [42, 41] и др.

В отличие от традиционного подхода к управлению качеством, который опирался на контроль и мониторинг, статистические методы, Четвертая промышленная революция дополнила этот ряд инструментами обеспечения прослеживаемости, прогнозирования дефектов, адаптивного управления на основе данных в реальном времени и т.п. Проблеме управления качеством, в том числе с учетом цифровизации, посвящены труды таких ученых, как Д. В. Антипов [20, 21], С. А. Васин [32, 33], В. А. Васильев [31], Е. А. Горбашко [38], В. Н. Козловский, Д. В. Айдаров, В. Г. Мосин [52-54], Д. И. Панюков и Д. И. Благовещенский [28], Н. В. Переборова [78], Ю. Ю. Черемухина [105], И. А. Гарькина, А. М. Данилов [36], А. В. Челенко [110] и др. Дополняет ряд инструментов управления качеством и наилучшие доступные технологии, которые позволяют организовать производственные процессы с учетом ресурсных и экологических аспектов [88].

Конвергенция технологий Индустрии 4.0 и методологии управления качеством определила формирование концепции «Качество 4.0» («Quality 4.0»). В руководстве «Quality 4.0. Impact and strategy handbook. Getting Digitally Connected to Transform Quality Management», опубликованном консалтинговой компанией LNS Research, отмечается, что «Качество 4.0» – это термин, связанный с Индустрией 4.0 и критическими технологическими изменениями, охватывающими прогресс в области данных, аналитики, масштабируемости и сотрудничества [138]. По мнению Т. А. Салимовой и Н. Ш. Ватолкиной «Качество 4.0 основано на

устранении разрыва между требованиями потребителей и свойствами продукции, который возникает из-за необходимости адаптации массовой продукции к индивидуальным потребностям человека или организации» [84, с. 62]. В научной статье В. В. Макарова и О. В. Волчик представлена следующая дефиниция: Качество 4.0 – это «совершенствование деятельности организации за счет применения больших данных, промышленного интернета вещей, искусственного интеллекта, внедрения в производство киберфизических систем, робототехники» [61, с. 286].

Специалисты в области качества Д. Оклэнд и М. Тёрнер определяют Качество 4.0 как «использование технологий с участием людей для улучшения качества организации, её продукции, услуг и создаваемых ею результатов» и выделяют 8 принципов качества, сфокусированных на потребностях, ожиданиях и удовлетворённости клиентов: киберфизические системы, взаимное доверие, быстрое адаптивное обучение, совместное создание ценности, кибернетика, прозрачность и сотрудничество, ценность данных, интеграция технологий и интеллекта [59, 120].

Среди положений, сформулированных зарубежными авторами в части развития концепции управления качеством, следует выделить следующие:

- «использование передовых технологий для проектирования, функционирования и улучшения адаптивных, прогнозирующих, самокорректирующихся, автоматизированных систем качества, работающих во взаимодействии с человеком, с целью достижения целей организации через планирование, обеспечение, контроль и улучшение качества» [119, с. 1175];
- интеграция технологий Индустрии 4.0 с традиционными подходами к управлению качеством, позволяющая перейти от реактивного контроля к предиктивному и автоматизированному на всех этапах жизненного цикла продукции [127];
- проблематика Качества 4.0 связана с переосмыслением того, как управление качеством должно трансформироваться в эпоху цифровизации [132];

– ключевыми факторами успеха, способствующими внедрению парадигмы Качество 4.0, являются прогнозирование и аналитика данных, организационная культура в области Качества 4.0 и взаимодействие между машинами, что критически важно для достижения нулевого уровня дефектов и высокой прослеживаемости [135] и др.

Таким образом, традиционные инструменты организации производства, включая подсистемы календарного и оперативного планирования, управления качеством, управления материальными потоками, требуют фундаментального пересмотра. Усовершенствованный подход требует встраивания цифровых технологий непосредственно в процессы. Это особенно актуально для технологических процессов, представляющих собой сложный комплекс взаимосвязанных химических, физико-химических и физических процессов [16].

В контексте проектирования модели цифровой трансформации производственной системы (сложной киберфизической системы) возникает объективная необходимость формализации представления и структурирования разнородных сущностей и отношений между ними. Национальный стандарт ГОСТ Р ИСО/МЭК 21838-1-2021 «Информационные технологии. Верхнеуровневые онтологии (TLO). Часть 1. Требования» определяет онтологию как «артефакт, предназначенный для использования компьютерами» [13, с. 4], для автоматизации системы поддержки принятия решений. Онтология позволяет систематизировать понятийный аппарат, выделить связи между сущностями, интегрировать нормативно-правовые акты, обеспечить формализованную основу для создания цифровых двойников изделий, процессов и «цифровой фабрики» в целом.

Примером онтологии в контексте настоящего исследования может служить модель организации цифровой платформы предприятия, отражающая взаимосвязи между мета-онтологией, прикладными онтологиями и онтологиями предприятия (рисунок 1.3). Такая система служит методической основой создания протоколов взаимодействия между физическими элементами производственной системы [103].

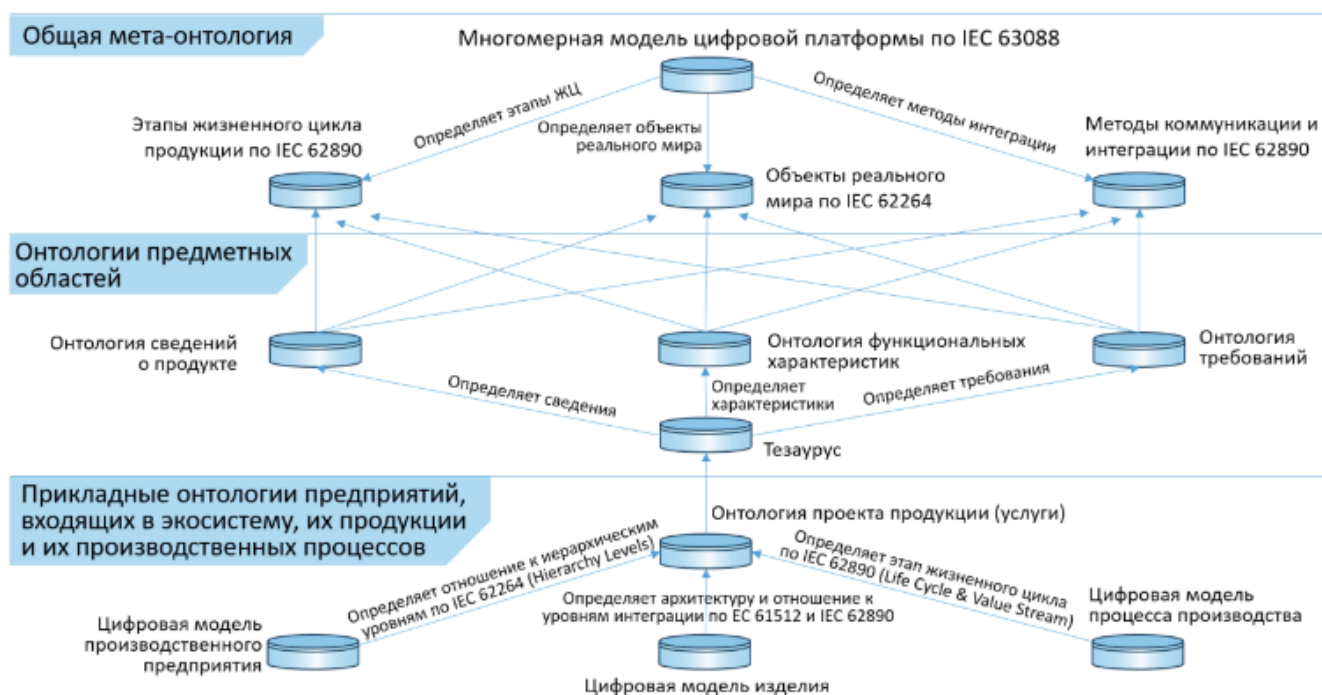


Рисунок 1.3 – Система онтологий для организации цифровой платформы предприятия (И. Н. Фомин) [103]

В развитие существующих подходов предложена онтология организации производства в модели «цифровой фабрики» (рисунок 1.4).

На верхнем уровне мета-онтология определяет общую систему сущностей, это концепция верхнего уровня, интегрирующая технологические, организационные и управленческие аспекты развития производственной системы.

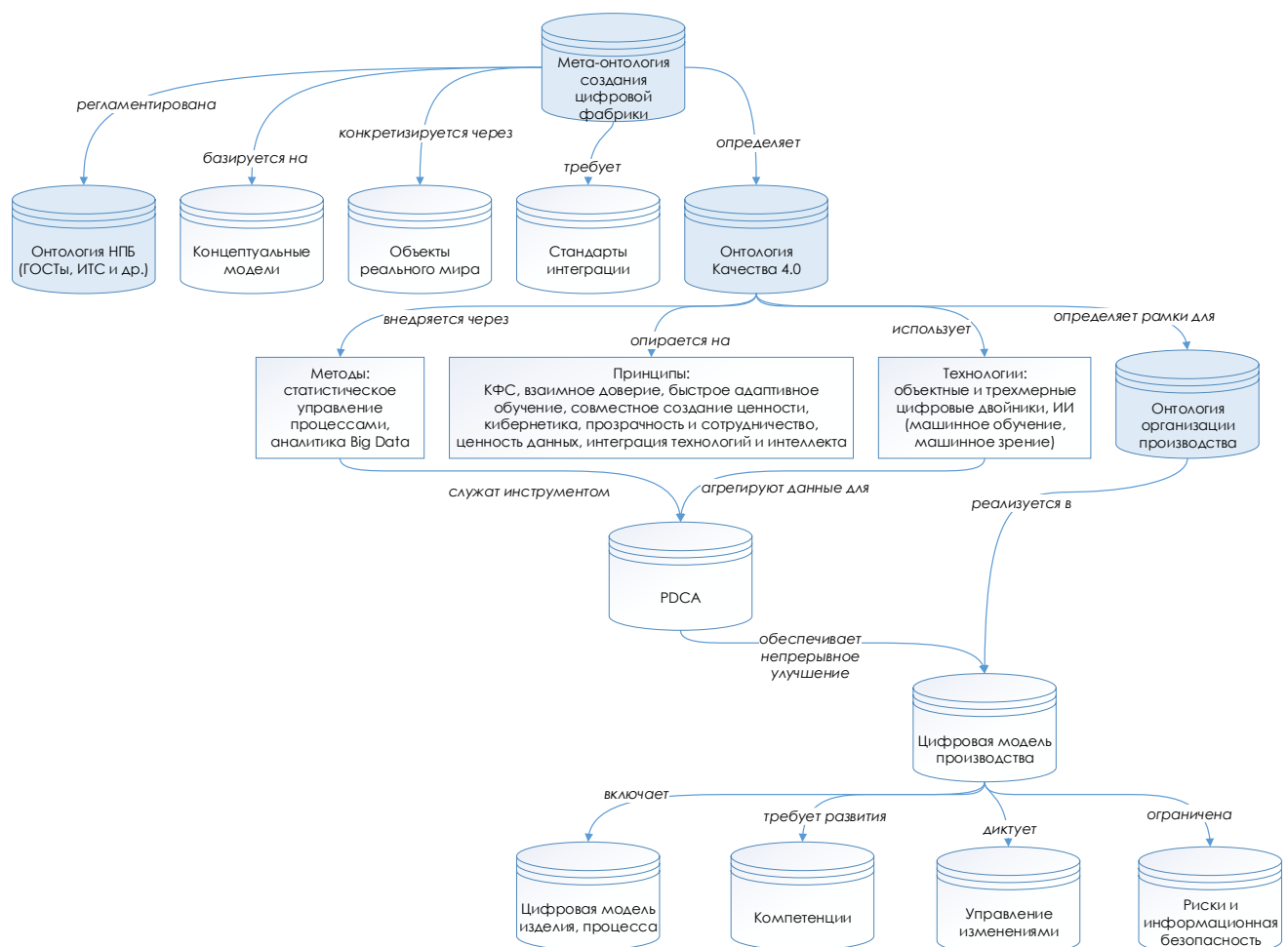
На следующем уровне:

- концептуальные модели учитывают уровни автоматизации производства, жизненный цикл продукции;
- объекты реального мира подразумевают сырье, продукцию, оборудование;
- стандарты промышленной интеграции охватывают стандарты обмена данными между устройствами, датчиками, серверами (OPC UA, Open Platform Communications Unified Architecture), протоколы обмена сообщениями между системами (AMQP, Advanced Message Queuing Protocol), правила взаимодействия между программами (API, Application Programming Interface) и др.

Онтологии предметных областей (нормативно-правовой базы (НПБ), Качества 4.0, организации производства) раскрывают соответствующие аспекты цифровизации производственной системы.

Прикладные онтологии уточняют цифровые модели.

В модели также учтены сквозные сущности – PDCA (цикл Шухарта-Деминга «Plan – Do – Check – Act», «планирование – осуществление – проверка – корректирующее действие»), компетенции (кадровое обеспечение), управление изменениями, управление рисками и информационная безопасность.



Примечание: ИТС – отраслевые информационно-технические справочники, КФС – киберфизическая система, ИИ – искусственный интеллект

Рисунок 1.4 – Прикладная онтология организации производства в модели «цифровой фабрики» (составлено автором)

Формализованная онтологическая модель «цифровой фабрики» отличается включением онтологии Качества 4.0 и отражением связей с блоками управления и кадрового обеспечения производственной системы. Система представленных связей служит основой для адаптивного управления и непрерывного улучшения; онтологии – для построения системы поддержки принятия решений, формализации требований к цифровым двойникам изделий, процессов, предприятия.

Приходим к выводу, что сформированный к настоящему времени научно-технический задел имеет большой потенциал для реализации. Вместе с тем, практическая реализация концепций требует разработки новых методик, регламентов, прикладных онтологий, адаптированных к отраслевым производственным процессам, включая производство алюминия, стремительно развивающееся в последние годы.

1.2 Перспективы интеллектуализации производственных систем в условиях Индустрии 4.0 и Индустрии 5.0

Условием повышения эффективности функционирования и качества организации производственных систем, независимо от отраслевой принадлежности, становится масштабирование практики внедрения цифровых технологий. Конкурировать на международном уровне позволяет рациональный подход к организации производства. Накопленный исторически инструментарий повышения качества продуктов, услуг и процессов позволяет подобрать и реализовать комплекс оптимальных методов моделирования и управления производственными процессами с целью удовлетворения потребностей заказчиков. Такой комплекс является основой модели интеллектуального предприятия, позволяющего управлять несоответствиями в едином цифровом контуре.

Развитие производственных систем проходит закономерные фазы эволюции, начиная от Индустрии 1.0, которая связана с механизацией производства и далее до Индустрии 5.0, характеризуемой такими элементными составляющими, как

применение когнитивных технологий, цифровая трансформация промышленности (рисунок 1.5).

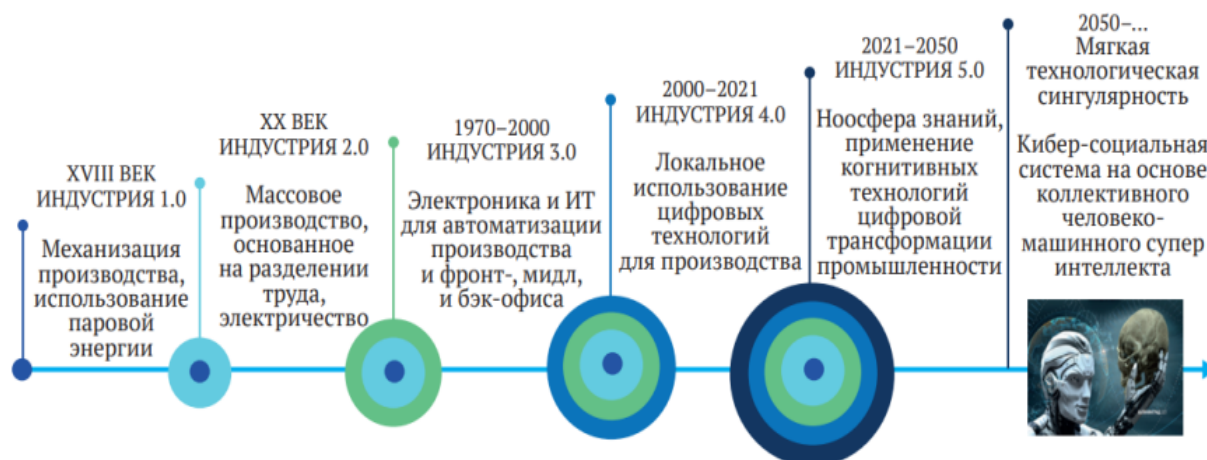


Рисунок 1.5 – Этапы эволюции Индустрии [24]

Решение вопросов импортозамещения и достижения технологического суверенитета России невозможно представить без цифровизации производственных систем, которые достаточно широко отражены в рамках концепции Индустрии 4.0 и находят свое продолжение в ее новом воплощении – концепции Индустрии 5.0.

Технологии Индустрии 4.0 – это комплексная интеграция в производственных системах роботов, информационно-коммуникационных технологий, промышленного интернета вещей, облачных вычислений и искусственного интеллекта. «Цифровые фабрики» или «умные фабрики» символизируют собой примеры коллаборации промышленных и научно-исследовательских организаций в режиме реального времени, что позволяет эффективно решать такие проблемы, как сокращение жизненного цикла продукта, рост производительности, усложнение цепей поставок и технологий производства, повышение операционной эффективности и т.п.

Если концепция Индустрии 4.0 уже вошла в обиход современной науки организации производства, то Индустрия 5.0 только начинает развиваться в теории и практики управления производственными системами. Характерные особенности Индустрии 4.0 систематизированы на рисунке (рисунок 1.6).

Индустрия 5.0 развивает и совершенствует концепцию Индустрии 4.0, ставя в приоритет не только технологии производства, но и их интеграцию с инновациями для разрешения экологических и социальных вопросов на основе системного подхода к организации и управлению производством. Индустрия 5.0 основана на принципе 6 Re:

- переосмысление (Rethink);
- осознанность (Refuse);
- ремонт/ починить (Repair);
- меньшее потребление (Reduce);
- повторное использование (Reuse);
- переработка (Recycle).



Рисунок 1.6 – Ключевые технологии Индустрии 4.0 (обобщено автором по данным [50, 92, 104])

При этом, следует выделить ключевые составляющие Индустрии 5.0 – фокус на человека, обеспечение устойчивого развития и восстановление. Ключевые особенности Индустрии 5.0 представлены на рисунке (рисунок 1.7).



Рисунок 1.7 – Ключевые особенности Индустрии 5.0 (обобщено автором по данным [22, 44, 49, 81])

Систематизация отличительных особенностей Индустрии 4.0 и Индустрии 5.0 представлена на схеме, где акцентируется внимание на том, что Индустрия 4.0 подразумевает повышение эффективности производственных систем на основе цифровой связи и искусственного интеллекта, а минимизация затрат достигается благодаря оптимизации бизнес-моделей при этом, рост киберфизических целей оставляет за гранями внимания вопросы устойчивого развития. Напротив, в Индустрии 5.0 взаимодействие конкурентоспособности и устойчивости позволяет использовать альтернативные модели управления технологиями для достижения устойчивых и стабильных результатов (рисунок 1.8).



Рисунок 1.8 – Отличительные особенности Индустрии 4.0 и Индустрии 5.0 [113]

Таким образом, можно заключить, что концепция Индустрии 4.0 сформировала основы цифровизации производственных систем и их автоматизацию, а концепция Индустрии 5.0 расширила и дополнила ее, сделав упор на человекоцентричность, устойчивость производственных систем и достигаемых результатов.

Как было отмечено ранее, Индустрия 4.0 с последующим переходом к Индустрии 5.0 развиваются в рамках цифровой трансформации, затраты на которую в бюджете Российской Федерации увеличились с 3,3 трлн. рублей в 2017 г. до 6,7 трлн. рублей в 2024 г., однако в относительном выражении – в процентах к ВВП, начиная с 2020 г. – максимальное значение – 3,8%, они незначительно

сократились до 3,3% (в 2017 г. составляли 3,6%). Динамика затрат на цифровую трансформацию в России представлена на рисунке (рисунок 1.9).

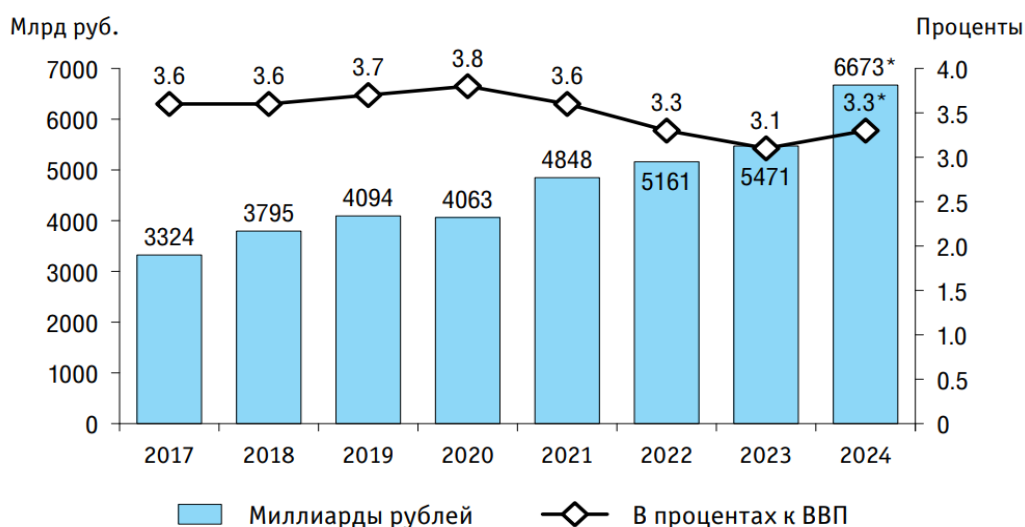


Рисунок 1.9 – Динамика затрат на цифровую трансформацию в России [108]

В структуре затрат промышленных предприятий на цифровизацию производства преобладала закупка машин и оборудования – 33,2%, покупка лицензий на программного обеспечение и его масштабирование под производственную и информационную систему предприятия – 22,8% (рисунок 1.10).

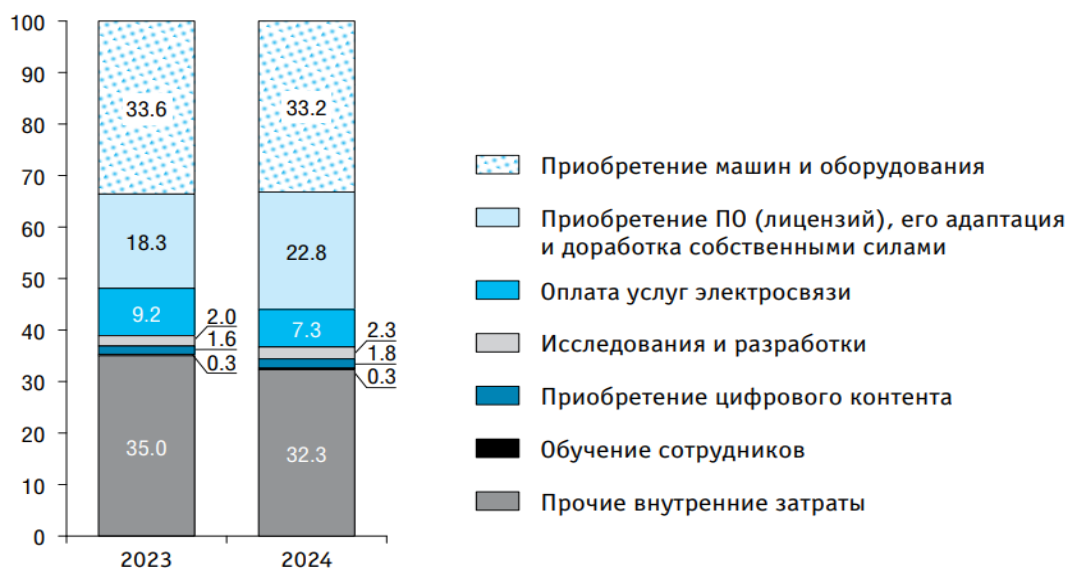


Рисунок 1.10 – Структура затрат промышленных предприятий на цифровизацию производства, в процентах от совокупных затрат [108]

В целях изучения уровня развития цифровых технологий в обеспечении производственных систем, полагаем целесообразным изучить направления использования цифровых технологий на предприятиях промышленности в условиях Индустрии 5.0. Так, технологии промышленного интернета вещей на промышленных предприятиях использовались в большей степени для дистанционного мониторинга состояния удаленных объектов – 68% от общего количества обследованных предприятий (обследование проведено Росстатом и Минцифры и опубликовано в источнике: [108]), 45,1% предприятий использовались промышленный интернет вещей для оптимизации потребления энергии, 43,1% – для дистанционного контроля и управления удаленными объектами (рисунок 1.11).



Рисунок 1.11 – Направления использования промышленного интернета вещей на промышленных предприятиях, в процентах от общего количества обследованных предприятий, использующих промышленный интернет вещей [108]

Среди основных причин, затрудняющих внедрение промышленного интернета вещей, предприятия отмечают:

– высокие затраты – 50,5% обследованных предприятий указали данный тип барьера;

– недостаточно развита ИКТ-инфраструктура предприятия – 32,6%;

– недостаточный массив данных – 31,8%.

Технологии Больших данных применялись в сборе, накоплении и анализе данных по основным производственным процессам – 68,9%, 58% приходилось на обеспечивающие процессы и 44,1% – на управленческие процессы (рисунок 1.12).

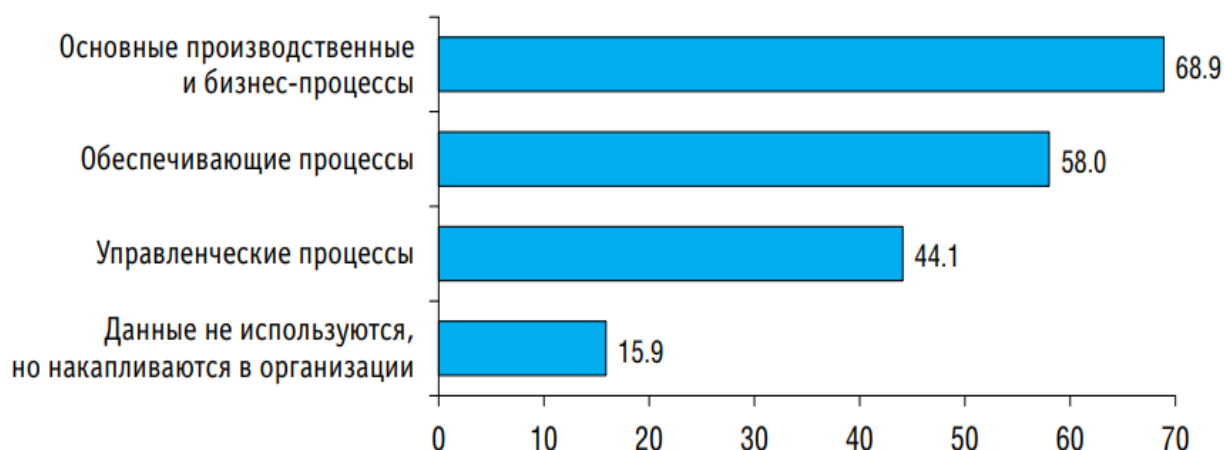


Рисунок 1.12 – Направления использования технологий Больших данных на предприятиях, в процентах от общего количества обследованных предприятий, использующих технологии Больших данных [108]

Источниками использования технологий Больших данных на промышленных предприятиях преимущественно выступают: веб-сайты предприятий – 66,6% от общего количества обследованных предприятий, использующих технологии Больших данных; данные учетных систем (ERP, CRM, SCM и др.) – 64%; данные, передаваемые цифровыми датчиками оборудования – 57,8% (рисунок 1.13).

Среди причин, затрудняющих внедрение технологий Больших данных на промышленных предприятиях, также преобладают высокие затраты, недостаточно развита ИКТ-инфраструктура предприятия и недостаточный массив данных.



Рисунок 1.13 – Источниками использования технологий Больших данных на промышленных предприятиях, в процентах от общего количества обследованных предприятий, использующих технологии Больших данных [108]

Направлениями использования технологий искусственного интеллекта на промышленных предприятиях являются компьютерное зрение и обработка визуальных данных – 66,3% от общего количества обследованных предприятий, использующих технологии искусственного интеллекта; интеллектуальная поддержка принятия управленческих решений – 50,2%; распознавание и синтез речи, обработка звука – 35,7% (рисунок 1.14).



Рисунок 1.14 – Направления использования технологий Искусственного интеллекта на предприятиях, в процентах от общего количества обследованных предприятий, использующих технологии Искусственного интеллекта [108]

Следует указать, что 57,2% обследованных предприятий отмечают повышение качества и эффективности процессов производства и управления за счет использования цифровых технологий; 46,2% отмечают повышение качества и эффективности производственных процессов; 38,3% – рост добавленной стоимости; 19,6% – рост производительности труда (рисунок 1.15).

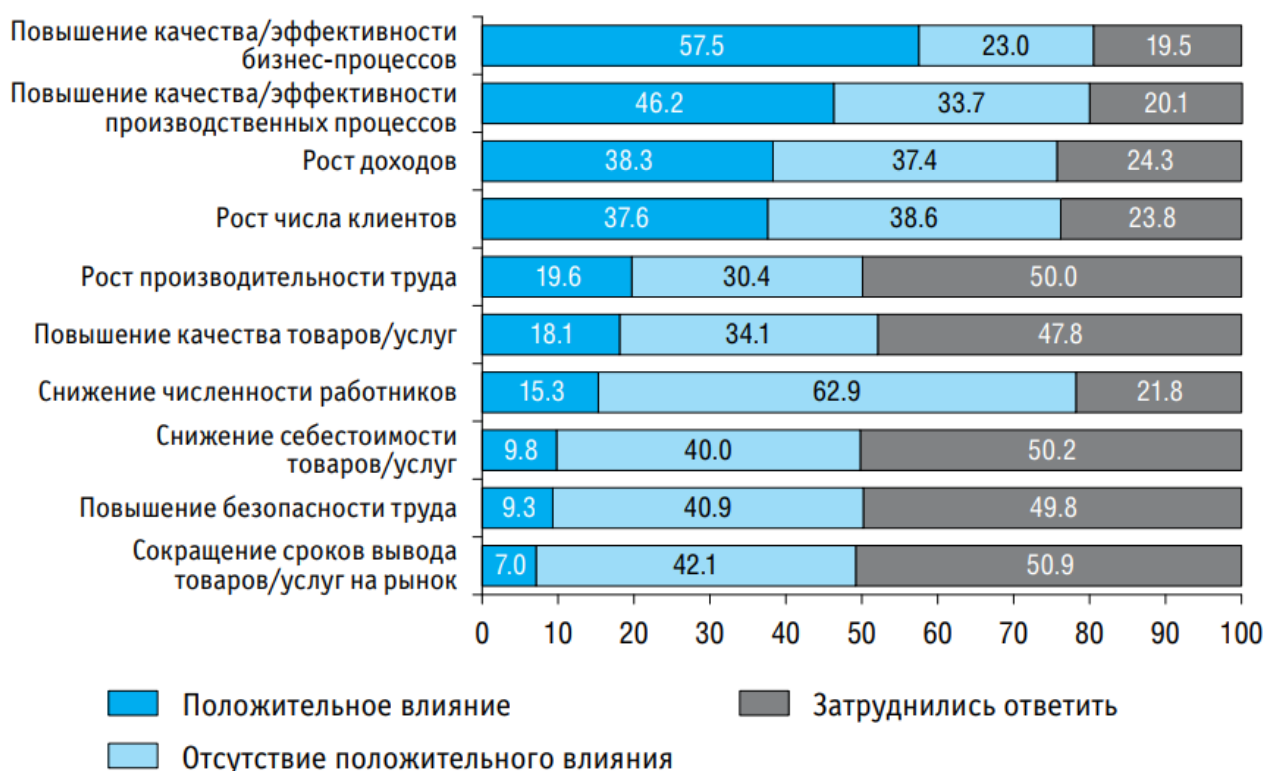


Рисунок 1.15 – Оценка результатов использования цифровых технологий на промышленных предприятиях, в процентах от общего количества обследованных предприятий, использующих цифровые технологии [108]

Сводка статистических данных по использованию цифровых технологий на предприятиях обрабатывающих производств и в частности, на предприятиях металлургического производства, представлена в таблице, где также демонстрируется рост применения цифровых инструментов в данных типах производств (таблица 1.1).

В условиях Индустрии 5.0 активно начинают внедряться в процессы производства технологии роботизации. Так, на предприятиях металлургического

производства 12,2% предприятий использовали промышленных роботов, складских и логистических роботов – 1,5%. Сравнительный анализ использования промышленных роботов на предприятиях обрабатывающих производств, в том числе на предприятиях металлургической промышленности (приложение А).

Таблица 1.1 – Направления использования цифровых технологий (составлено автором по данным [99])

	Серверы	Локальные вычислительные сети	Веб-приложения
	Обрабатывающие производства		
2017	74,5	94,2	63,8
2018	72,2	92,8	61,6
2019	73,7	93,2	63,2
2020	62,9	83,9	52,5
2021	61,4	84,0	56,1
2022	61,9	84,0	55,7
2023	58,9	84,3	55,7
2024	57,9	84,9	58,6
	Металлургическое производство		
2017	86,3	98,3	70,9
2018	82,2	95,3	67,7
2019	81,5	96,1	67,5
2020	78,1	93,3	63,0
2021	68,3	90,4	63,3
2022	64,9	89,8	58,8
2023	62,3	86,6	63,8
2024	62,9	88,4	63,9

Развитие Индустрии 5.0 невозможно представить без разработки и внедрения в процессы производства передовых технологий. Статистические данные демонстрируют прирост числа разработанных передовых технологий производства на предприятиях обрабатывающей промышленности, число которых возросло с 442 единиц в 2017 г. до 707 единиц к 2025 г., прирост составил 60%. Число разработанных передовых технологий производства на предприятиях металлургической отрасли, напротив, несколько снизилось – с 58 единиц в 2017 г. до 53 единиц к 2025 г. Динамика числа разработанных передовых технологий

производства на предприятиях металлургической отрасли показана на рисунке (рисунок 1.16).

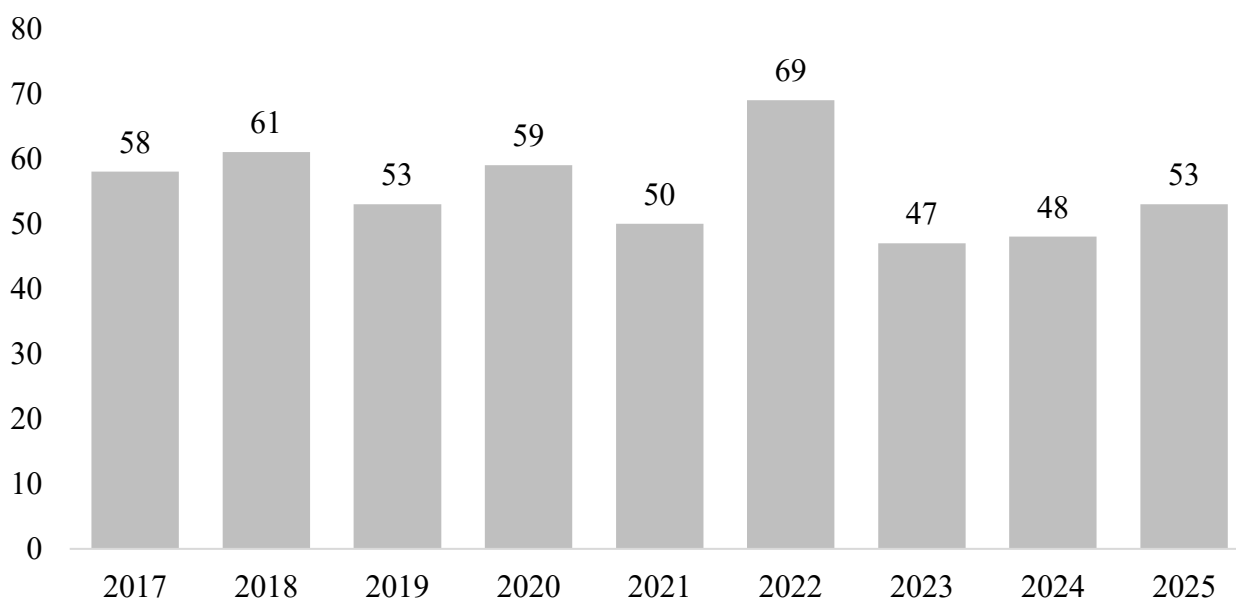


Рисунок 1.16 – Динамика числа разработанных передовых технологий производства на предприятиях металлургической отрасли, единиц (составлено автором по данным [99])

Число разработанных принципиально новых передовых технологий производства в целом по обрабатывающей промышленности увеличилось с 409 единиц в 2017 г. до 649 единиц в 2025 г., прирост составил 58,7%. На предприятиях металлургической промышленности их количество, напротив, несколько сократилось – с 58 единиц в 2017 г. до 49 единиц в 2025 г. Динамика числа принципиально новых разработанных передовых технологий производства на предприятиях металлургической отрасли показана на рисунке (рисунок 1.17). Данные за 2018-2019 гг. не публикуются из-за соблюдения конфиденциальности информации.

Использование передовых технологий производства на предприятиях обрабатывающей промышленности имеет устойчивую динамику роста. Так, их количество увеличилось с 157,9 тыс. единиц в 2017 г. до 191,8 тыс. единиц в 2025 г.

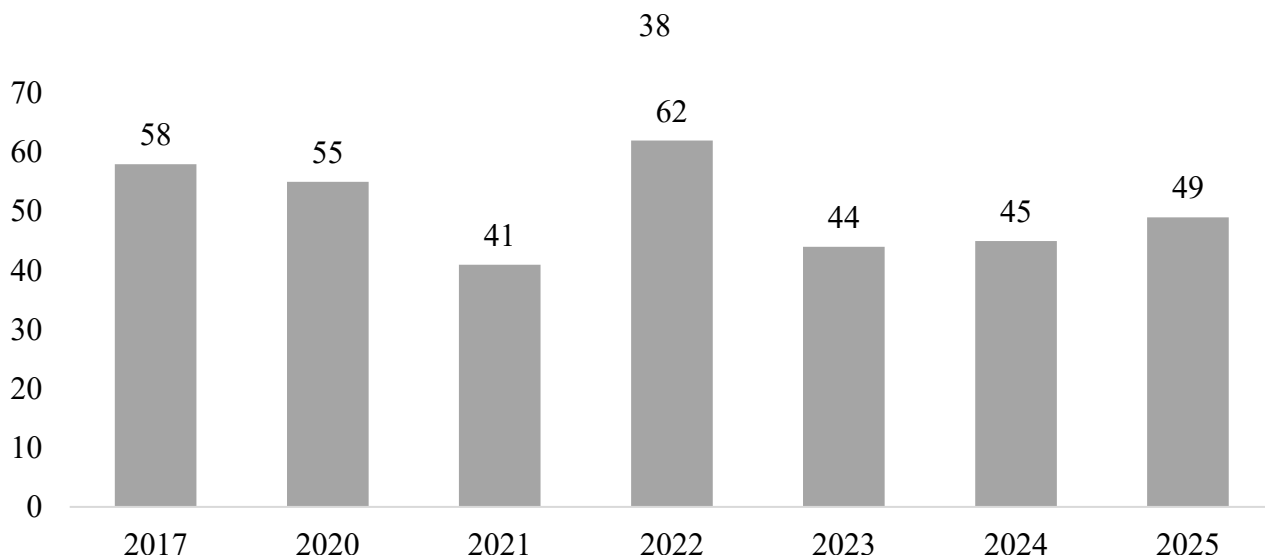


Рисунок 1.17 – Динамика числа разработанных принципиально новых передовых технологий производства на предприятиях металлургической отрасли, единиц (составлено автором по данным [99])

Аналогичная тенденция характерна и для предприятий металлургическое отрасли, где также отмечался рост с 8,8 тыс. единиц в 2017 г. до 11,4 тыс. единиц в 2025 г., прирост составил 129,8%. Динамика числа внедренных передовых технологий производства на предприятиях металлургической отрасли показана на рисунке (рисунок 1.18).

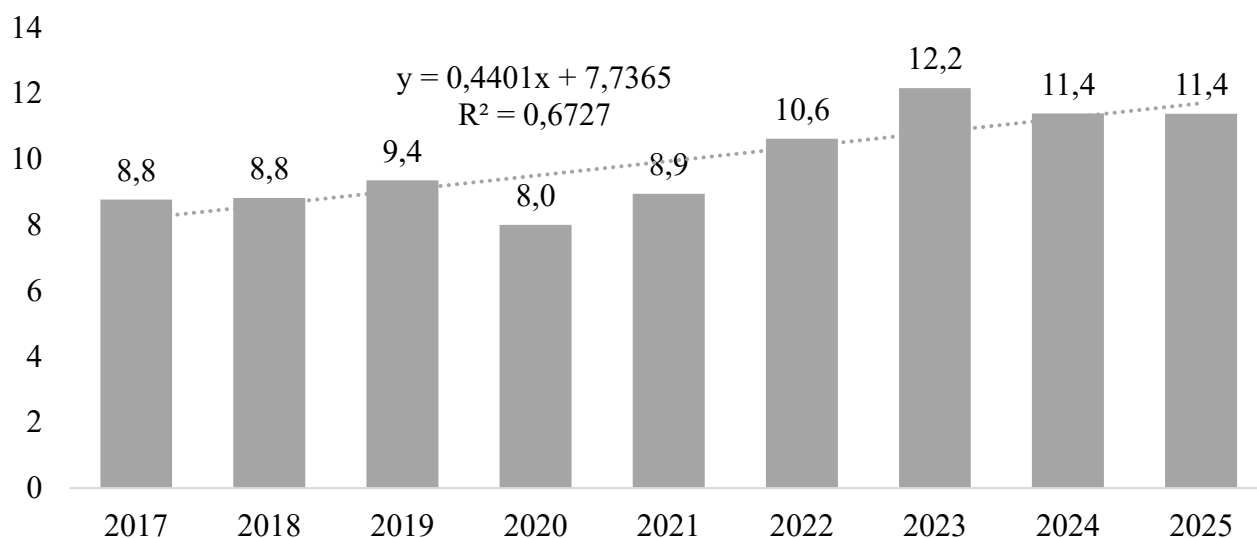


Рисунок 1.18 – Динамика числа внедренных передовых технологий производства на предприятиях металлургической отрасли, тыс. единиц (составлено автором по данным [99])

Расчет относительного показателя использования передовых технологий производства также показал их рост в расчете на одно предприятие металлургической отрасли, значение показателя возросло с 2,6 в 2017 г. до 3,4 в 2025 г. (рисунок 1.19).

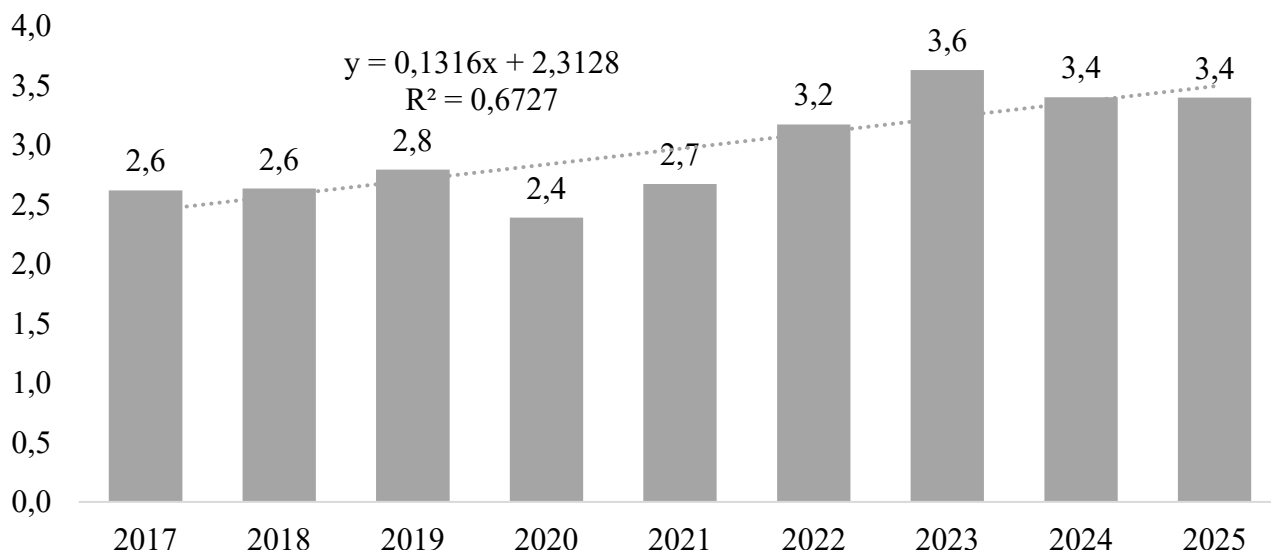


Рисунок 1.19 – Динамика числа внедренных передовых технологий производства в расчете на одно металлургическое предприятие, единиц (составлено автором по данным [99])

Детальный анализ использования цифровых технологий на предприятиях металлургической промышленности показал, что около 20% от их общего количества применяют цифровые технологии в организации и управлении процессами производства. Из числа предприятий металлургической отрасли, использовавших цифровые технологии, преобладали их следующие виды:

- электронный обмен данными – 58,9% от общего количества предприятий металлургии, использовавших цифровые технологии;
- технологии радиочастотной идентификации объектов (RFID) – 32%;
- цифровые платформы – 31,2%;
- геоинформационные системы – 28,8%;
- облачные сервисы – 23,7%;
- промышленные роботы – 20,1%;

- промышленный интернет вещей – 16%;
- центры обработки данных – 16,7%;
- технологии Больших данных – 14%;
- цифровые двойники – 6,1%.

В таблице представлен свод по использованию программных средств в решении прикладных задач производства на предприятиях металлургической отрасли (приложение Б). Как демонстрируют данные приложения, среди направлений использования программных средств в решении прикладных задач производства на предприятиях металлургической отрасли преобладали системы электронного документооборота, электронные справочно-правовые системы, обеспечение информационной безопасности, управление складским комплексом, материально-техническое обеспечение.

Совокупная величина затрат на внедрение и использование цифровых технологий на предприятиях металлургической отрасли в 2024 г. составила 50232,4 млн. рублей, что в расчете на одно предприятие металлургической отрасли составляет 15 млн. рублей. В структуре затрат на внедрение и использование цифровых технологий на предприятиях металлургической отрасли преобладали следующие:

- техническая поддержка программного обеспечения – 21,4%;
- техническое обслуживание и ремонт, лизинг оборудования – 20,0%;
- приобретение цифровых машин и цифрового оборудования – 19%;
- приобретение программного обеспечения – 11,5%;
- приобретение вычислительной техники – 7,4%.

Структура затрат на внедрение и использование цифровых технологий на предприятиях металлургической отрасли в 2024 г. представлена на рисунке (рисунок 1.20).

В структуре затрат на внедрение и использование цифровых технологий на предприятиях металлургической отрасли в 2024 г. по типам металлургического производства наибольшую долю занимали предприятия следующих типов производств:

- производство чугуна, стали и ферросплавов – 30,4%;
- производство основных драгоценных металлов и прочих цветных металлов, производство ядерного топлива – 51,6%;
- производство стальных труб, полых профилей и фитингов – 14,9%.

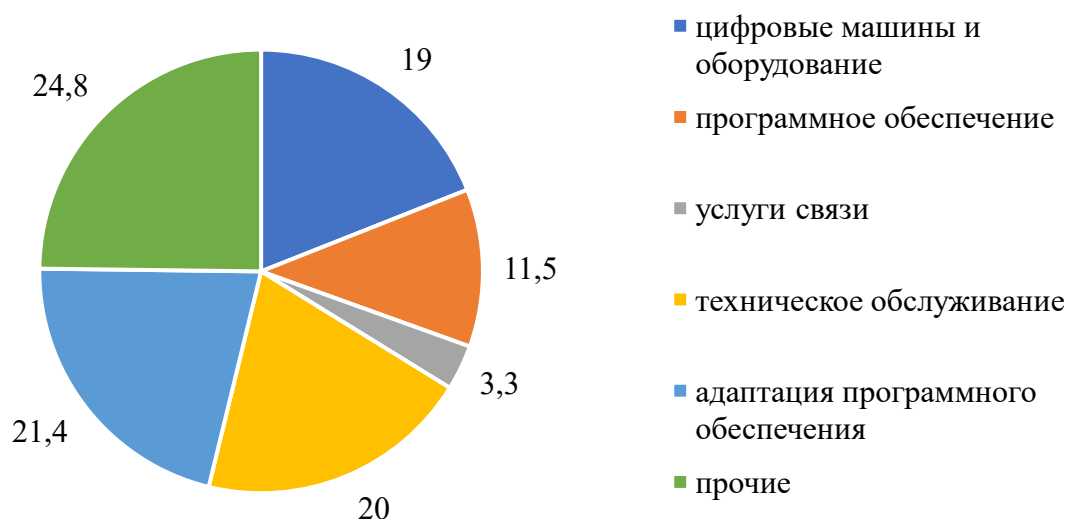


Рисунок 1.20 – Структура затрат на внедрение и использование цифровых технологий на предприятиях металлургической отрасли в 2024 г., % (построено автором по данным [99])

Структура затрат на внедрение и использование цифровых технологий на предприятиях металлургической отрасли в 2024 г. по типам металлургического производства представлена в таблице (приложение В).

Таким образом, по результатам исследования, следует резюмировать следующие выводы.

Во-первых, концепция Индустрии 5.0 является эволюционным продолжением концепции Индустрии 4.0, основу ее развития составляют человекоцентричность, коботы, персонализация, устойчивое развитие, цифровая безопасность, цифровые двойники, цифровые умные фабрики.

Во-вторых, отмечается тенденция устойчивого роста затрат и используемых цифровых технологий на предприятиях обрабатывающей промышленности. Однако среди факторов, сдерживающих цифровизацию основных процессов

производства и управления выделяются, прежде всего, высокие затраты, недостаточный уровень развития ИКТ-инфраструктуры предприятий и недостаточный массив данных.

В-третьих, использование цифровых технологий на предприятиях промышленности имеет положительные эффекты, которые, в первую очередь, связаны с такими направлениями, как повышение качества и эффективности процессов производства и управления за счет использования цифровых технологий; повышение качества и эффективности производственных процессов; рост добавленной стоимости; рост производительности труда.

В-четвертых, на предприятиях металлургической отрасли, использующих цифровые технологии, преобладали следующие типы цифровых технологий: электронный обмен данными, технологии радиочастотной идентификации объектов (RFID), цифровые платформы, геоинформационные системы, облачные сервисы, промышленные роботы, промышленный интернет вещей, центры обработки данных, технологии Больших данных, цифровые двойники.

В-пятых, в структуре затрат на внедрение и использование цифровых технологий на предприятиях металлургической отрасли преобладали следующие: техническая поддержка программного обеспечения, техническое обслуживание и ремонт, лизинг оборудования, приобретение цифровых машин и цифрового оборудования, приобретение программного обеспечения, приобретение вычислительной техники.

Таким образом, цифровые технологии Индустрии 5.0 будут способствовать решению ряда комплексных системных задач, среди них: повышение производительности машин, оборудования и труда, повышение качества процессов и готовой продукции, сокращение операционных расходов, проектирование гибких систем производства, достижение устойчивости результатов, оптимизация использования материальных и энергетических ресурсов и другие.

1.3 Выявление ключевых проблем в области организации производства при переходе к модели «цифровой фабрики»

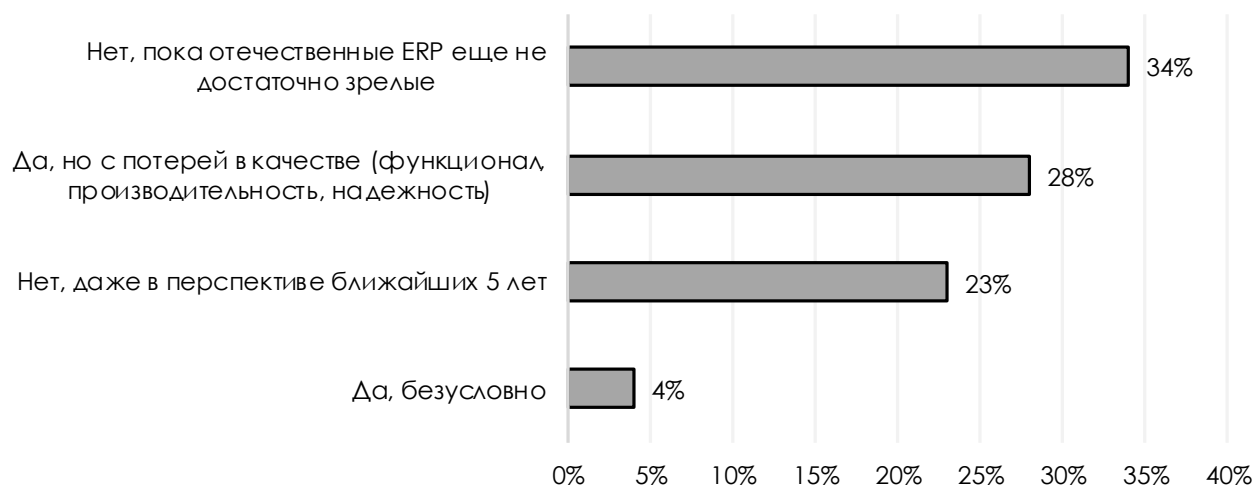
Независимо от потенциального эффекта цифровизации производственных систем, существует ряд проблем и барьеров для использования соответствующих технологий. Общими для предприятий различных отраслей препятствиями являются [45]:

- высокие затраты на внедрение и эксплуатацию, привлечение квалифицированных кадров;
- недостаточный объем больших данных;
- сложность интеграции в существующую ИТ-среду предприятия;
- неструктурированность, неполнота и другие недостатки данных, сложность их обработки для применения и др.

На уровне производственной системы проблемы носят преимущественно технический характер, однако, требующий организационных решений, развития компетенций.

Глобальная проблема заключается в зависимости от зарубежных ИТ-продуктов. Согласно исследованиям SAPLAND преобладающая доля предприятий продолжает использовать внедренные ранее SAP-системы (58%), другие предприятия модернизируют и замещают отдельные модули программы (27%). Доработке подвергаются преимущественно модули ERP, технического обслуживания и ремонта, планирования производства, системы управления производственными процессами (MES) и др. [47]. Переход на отечественные продукты ERP видится в долгосрочной перспективе (рисунок 1.21).

**Перевод масштабных инсталляций SAP ERP в крупных
организациях на российские платформы – это реализуемая
задача сегодня?**



**Рисунок 1.21 – Результаты опроса предприятий в контексте импортозамещения
ПО (по результатам исследования SAPLAND [47])**

По результатам исследования рынка АСУТП в России (786 компаний) ключевыми поставщиками АСУТП являлись Siemens (основной для 25% респондентов и используемый в производственных процессах 58% респондентов, рисунок 1.22), Schneider Electric, Honeywell и ABB. Уход компаний с российского рынка повлек за собой ряд проблем, связанных с поддержкой ранее интегрированных решений и внедрением на новых объектах. При этом в машиностроении – ранок поставщиков разнообразен, а российские продукты слабо востребованы; нефтеперерабатывающие производства опираются на разработки от Honeywell и Yokogawa, а металлургические производства (включая алюминиевые) существенно зависимы от продуктов Siemens. Импортозамещению препятствуют следующие обстоятельства: отечественные решения уступают импортным по техническим характеристикам, стоимости, срокам поставки, комплексности предложений [48].

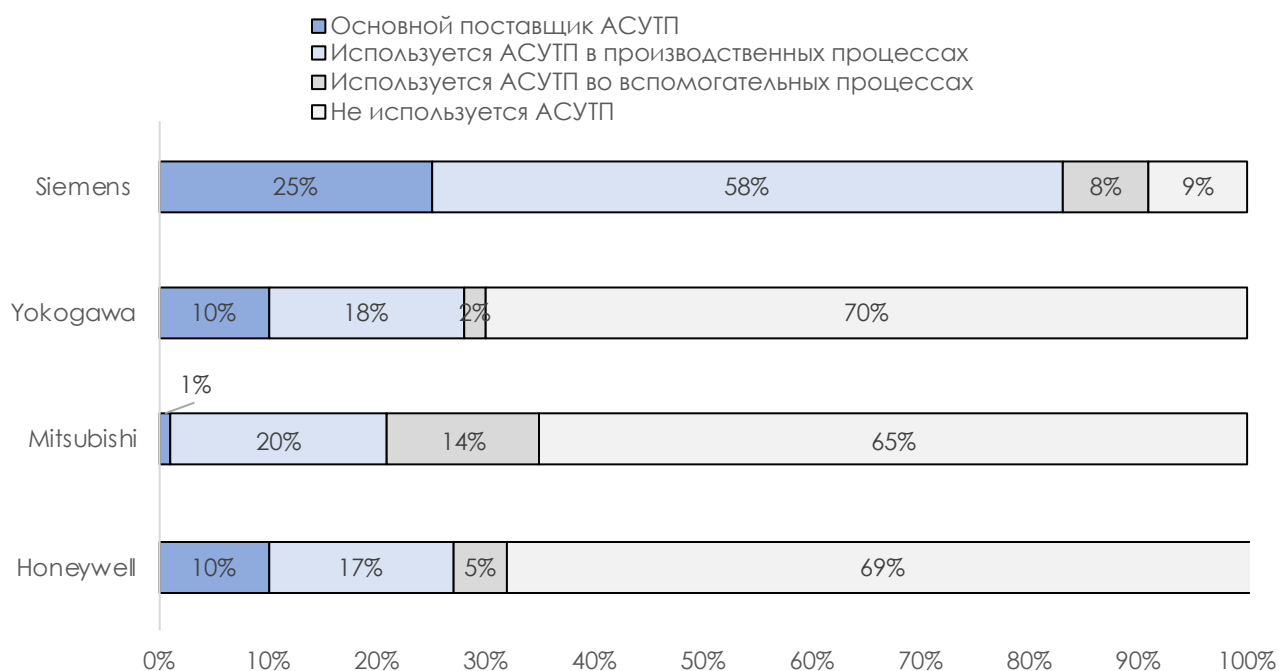


Рисунок 1.22 – Результаты опроса предприятий в контексте импортозамещения АСУТП (по результатам исследования «УльтимаТек» и партнеров [48])

На рисунке 1.23 структурированы проблемы импортозамещения в контексте формирования цифровых производственных систем. Практика показывает, что проблемы носят системный характер, охватывая все уровни управления производственной системой. На полевом уровне доминирует импортная база физических объектов фиксации данных и протоколов передачи данных; на уровне АСУТП – сформированная десятилетиями архитектура управления непрерывными и дискретными производствами; на уровне управления производством – сложность бесшовной интеграции со смежными уровнями; на уровне управления предприятием – необходимость обновления регламентов процессов, кадрового обеспечения, учета ресурсов. Фрагментарное решение проблем импортозамещения системы управления производственной системой грозит снижением операционной эффективности.



Рисунок 1.23 – Систематизация проблем импортозамещения по уровням «цифровой фабрики» (обобщено по данным [30, 47, 48])

Помимо проблемы импортозамещения существуют барьеры технического характера. Ключевой проблемой верхнего уровня управления является разрыв между стратегическими целями цифровизации предприятия и операционными решениями. В исследовании Р. Grefen и А. Wilbik подчеркивается, что зачастую стратегии развития формулируются в виде высокоуровневых целей, а проекты цифровизации требуют конкретных целей, конкретных структурных решений [125].

На уровне управления производством сложности обусловлены интеграцией новых решений в функционирующую систему информационно-коммуникационных технологий. Технологии полевого уровня, уровня АСУТП и АСУП (MES) должны быть интегрированы с системами верхнего уровня (ERP, SRM, CRM и др.) в режиме реального времени.

Как отмечается на практике, в большинстве случаев «умные фабрики» пока функционируют в виде фрагментарных автоматизированных решений, данные передаются на верхние уровни системы недостаточно надежно. «Умная фабрика»

предполагает эффективную организацию потоков данных сквозь все этапы жизненного цикла изделия [133].

Другая проблема связана с ограниченностью документов стандартизации в области цифровых производств. Согласно опросам, «только 19% ИТ-специалистов используют в работе национальные стандарты», в связи с чем требуется опережающая стандартизация [101]. В рамках решения данной проблемы в январе 2025 года был представлен план стандартизации в области передовых производственных технологий на 2025–2030 гг., утвержденный Росстандартом и Минпромторгом России [79]. Актуализированная версия плана включает более 80 стандартов по 5 направлениям Индустрии 4.0. В частности, план охватывает 29 стандартов в области «умного» производства и «цифровых фабрик», где объектами стандартизации выступают цифровые двойники производства, интероперабельность (функциональная совместимость), поведение оборудования, интерфейсы, унифицированные модели производства, карта интеллектуальных производственных стандартов и др.

Система действующих стандартов обобщена в работе Е. В. Бабенко [23]. На рисунке 1.24 представлена структурированная автором схема стандартов, формирующих основу цифровой трансформации производства. Автором подчеркнуто превалирование положений международных стандартов в российской практике цифровизации и уточнено, что система стандартов обеспечивает «гармонизацию терминологической базы, системность требований, исключение дублирования при параллельной разработке большого числа документов и сокращение на 30-40 % продолжительности подготовки стандартов» [23, с. 9].

На качество предиктивной аналитики также влияет качество данных, бесперебойный поток данных. Данная проблема может привести к принятию некорректных решений, увеличению потерь и дефектов, выходу из строя оборудования и травматизму [129].

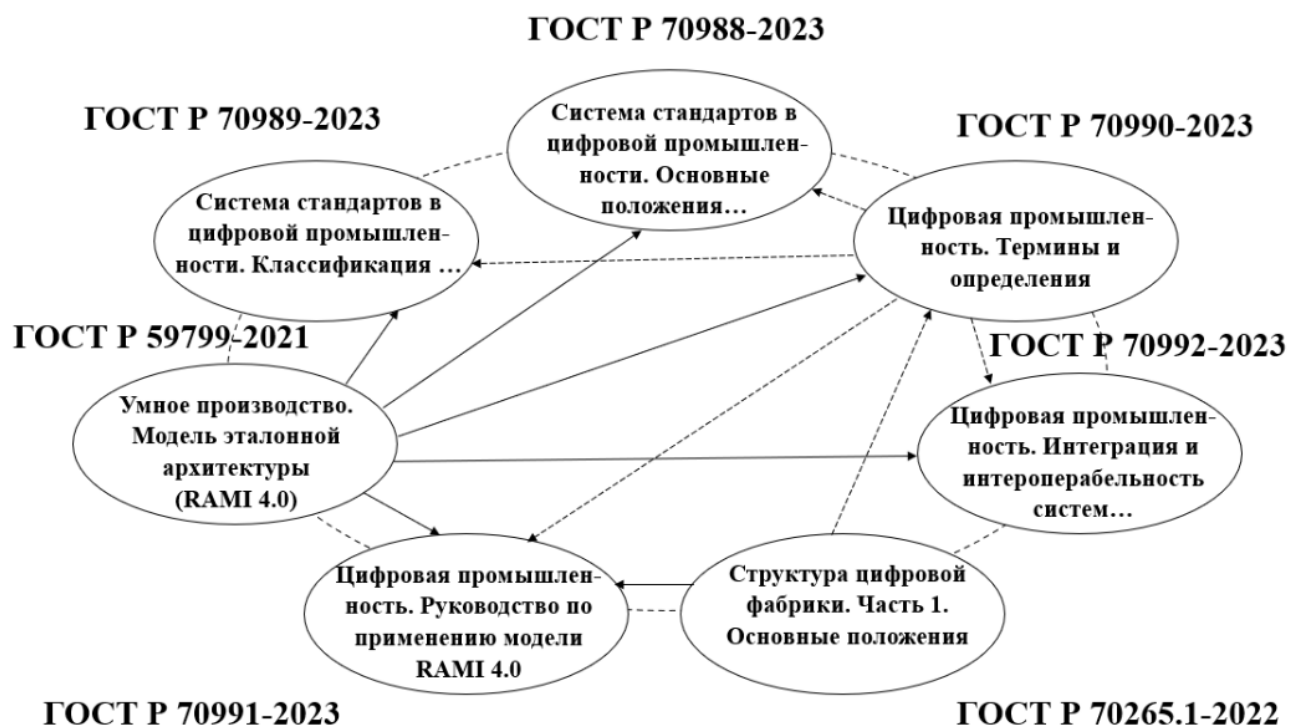


Рисунок 1.24 – Система стандартов в области цифровизации производства по
Е. В. Бабенко [23]

Смежной проблемой является обеспечение сквозного управления данными, обеспечиваемого непрерывностью информационных потоков об изделии на всех этапах его жизненного цикла. Исследователи отмечают, что качественному анализу данных препятствуют разрозненность данных, характерная для организационных элементов производственной системы [118], фрагментированные информационные экосистемы данных, изолированные хранилища и зависимость от бумажной документации [130], разрыв данных между контурами проектирования, производства и контроля [117]. Решению данной группы проблем призвана способствовать концепция «цифровой нити», позволяющая интегрировать данные об изделии на протяжении всего жизненного цикла – с момента проектирования и завершая утилизацией [90], тем самым повысить уровень прослеживаемости изделия в режиме реального времени.

Вышесказанное определило содержание концептуальной структуры моделирования анодного производства.

Алюминиевое производство представляет собой сложную технологическую систему, определяющую жесткие требования к разрабатываемым математическим моделям и, как следствие, необходимость формирования концептуальной структуры, интегрирующей структурные, параметрические и функциональные аспекты моделирования (рисунок 1.25).

Потребность формирования цифровой инфраструктуры предприятия обусловлена рядом причин, наиболее острыми из которых являются необратимый переход к интеллектуальным технологиям организации производства, технологическая политика государства и принципы устойчивого развития. Это определяет объект, предмет и цель моделирования производственной системы.



Рисунок 1.25 – Концептуальная структура моделирования анодного производства
(составлен автором)

Нормативно-правовую основу создания модели «цифровой фабрики» образуют национальные стандарты (включая ГОСТ Р МЭК 62264-2-2016 Интеграция систем управления предприятием. Часть 2. Объекты и атрибуты [14], ГОСТ Р ИСО 9001-2015 Системы менеджмента качества. Требования [12]), информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям ИТС 11-2022 Производство алюминия [16] и другие документы.

Среди принципов моделирования выделим принципы иерархичности и полноты данных. В первом случае речь идет о четырехуровневой структуре модели, где:

- полевой уровень объединяет контрольно-измерительные приборы, датчики, камеры;
- уровень АСУТП обеспечивает автоматическое регулирование технологических параметров, первичную обработку данных (АСУТП именникового оборудования, операторские системы управления основным и вспомогательным производством, система хранения данных и др.);
- уровень управления производством обеспечивает календарное и оперативное планирование, управление качеством и материалами, обслуживание активов;
- уровень управления предприятием обеспечивает стратегическое планирование, управление материальными потоками, активами, финансами, продажами, персоналом и др.

Принцип полноты данных предполагает включение в модель «цифровой фабрики» всех значимых параметров, определяющих качество выпускаемой продукции и техническую эффективность производства. Исходя из этого массив параметров объединяет:

- 1) входные – характеристики сырья и материалов (пек каменноугольный, кокс нефтяной сырой и др.), складские остатки запасов, численность персонала;
- 2) технологические – параметры процессов (рецептуры, температура, скорость литья, давление, расход воды и др.);

3) выходные – характеристики готовой продукции, включая коэффициент годного продукта;

4) параметры состояния – износ оборудования, отклонения процесса производства от состояния статистической управляемости, индексы пригодности и воспроизводимости процесса и др.;

5) ресурсные – потребление энергетических, водных ресурсов.

Совокупность знаний о производственных процессах позволяет сформулировать обобщенную модель «цифровой фабрики» алюминиевого производства (1.1):

$$M = f(E, R, P, F, C), \quad (1.1)$$

где $E = \{e_1, e_2, \dots, e_n\}$ – множество элементов моделируемой системы (машины, оборудование, цеха и др.);

$R_{inf} = \{r_{inf_1}, r_{inf_2}, \dots, r_{inf_n}\}$ и $R_{mat} = \{r_{mat_1}, r_{mat_2}, \dots, r_{mat_n}\}$ – множество информационных и материальных потоков, связывающих элементы системы между собой;

$P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ – множество параметров, характеризующих состояние элементов системы;

$F = \{f_1, f_2, \dots, f_n\}$ – множество функций, описывающих изменение параметров, связи между элементами;

$C = \{c_1, c_2, \dots, c_n\}$ – множество ограничений производственной системы (ресурсные, технологические, предельные / пороговые значения).

Предложенная концептуальная структура моделирования анодного производства служит методологической основой для разработки структурно-параметрической модели «цифровой фабрики» и инструментария управления производством, ориентирована на внедрение отечественных программных решений, отличается интеграцией проблемно-ориентированного подхода, иерархической структуры управления, параметрической классификацией и математической формализации.

Выводы по главе 1

На основе результатов научно-технического обзора и анализа современных проблем организации производства в условиях цифровой трансформации сформулированы выводы, определяющие вектор настоящего исследования.

1. Модель «цифровой фабрики» требует учета принципов бережливого производства, Индустрии 4.0, Качества 4.0, конвергенция которых является системообразующим фактором, определяющим структуру, функциональные возможности и систему показателей эффективности «цифровой фабрики», что принципиально важно для многостадийных производств, в том числе алюминиевого производства.

2. В силу объективной необходимости формализации представления и структурирования разнородных сущностей и отношений между ними построена онтологическая модель «цифровой фабрики», отличающаяся включением онтологии Качества 4.0 и отражением связей с блоками управления и кадрового обеспечения производственной системы, применяемая для адаптивного управления и непрерывного улучшения процессов, а также для построения системы поддержки принятия решений, формализации требований к цифровым двойникам изделий, процессов, предприятия.

3. Систематизированы перспективы интеллектуализации производственных систем в условиях Индустрии 4.0 и Индустрии 5.0. Выявлена тенденция устойчивого роста затрат и используемых цифровых технологий на предприятиях обрабатывающей промышленности. На предприятиях металлургической отрасли, использующих цифровые технологии, преобладают такие типы цифровых технологий, как электронный обмен данными, RFID, цифровые платформы, геоинформационные системы, облачные сервисы, промышленные роботы, промышленный интернет вещей, центры обработки данных, технологии Больших данных, цифровые двойники. В структуре затрат на внедрение и использование цифровых технологий на предприятиях металлургической отрасли преобладают техническая поддержка программного обеспечения, техническое обслуживание и ремонт, лизинг оборудования, приобретение цифровых машин и цифрового

оборудования, приобретение программного обеспечения, приобретение вычислительной техники.

4. Ключевые проблемы организации производства при переходе к модели «цифровой фабрики» связаны с уходом основных зарубежных поставщиков информационных систем, ограниченностью стандартов в области цифровых производств, фрагментарностью цифровизации производственной системы, сложностью интеграции цифровых технологий в существующие корпоративные платформы, недостаточным объемом больших данных, недостатками в формировании данных, высокими затратами, потребностью в цифровых компетенциях.

5. Построена концептуальная структура моделирования анодного производства, интегрирующая структурные, параметрические и функциональные аспекты моделирования, образующая металогическую основу развития инструментов организации производства в рамках модели «цифровой фабрики». Последняя обусловлена совокупностью факторов: элементы физического мира, их состояние, потоки материалов и данных, функциональные зависимости, ограничения производственной системы.

2 РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ «ЦИФРОВОЙ ФАБРИКИ» И ЕЕ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

2.1 Структурирование элементов модели «цифровой фабрики»

Поиск методов повышения эффективности, безопасности и экологичности производства приводит к целесообразности автоматизации процессов, интеллектуализации моделирования и организации производственных систем. Не является исключением алюминиевое производство, где цифровые технологии активно внедряются на разных этапах технологической цепочки. Однако актуальной становится задача воплощения системного подхода к цифровой трансформации производственного предприятия.

Такой системный подход в условиях Индустрии 4.0 позволяет реализовать «цифровая фабрика», под которой понимается «цифровое представление производственной системы» и которая определяет модель активов, модель отношений между активами и потоки информации об активах производственной системы (ГОСТ Р 70265.1-2022 Измерение, управление и автоматизация промышленного процесса. Структура цифровой фабрики. Часть 1. Основные положения) [6].

Ученые трактуют «цифровую фабрику» как элемент цифрового завода (первый уровень), входящий в структуру умной фабрики (второй уровень), которая, в свою очередь, в совокупности с формирует виртуальную фабрику (третий уровень цифрового завода). Содержательно, «цифровая фабрика» представляет собой киберфизическую систему, обеспечивающую проектирование и разработку конкурентоспособной продукции в оптимальные сроки [94].

Создание модели «цифровой фабрики» требует подбора технологий в зависимости от специфики производства, т.е. цепочки технологий, эффективной для конкретного предприятия. Перечень таких технологий включает CAD-, CAE-, CAO-, PDM-системы, PLM (управление жизненным циклом продукта), HPC (производительные вычисления), цифровые двойники, аддитивные технологии,

CNC (числовое программное управление) [109]. На верхнем уровне управления используются инструменты цифрового администрирования и корпоративной автоматизации [62]. Управление процессами умного производства включает: симуляцию и моделирование процесса, синхронизацию реальных и виртуальных данных, интеллектуальный анализ данных, уведомление оператора о характере протекания процессов, контроль качества процессов [77].

Вместе с тем, наряду с базовой структурой модель «цифровой фабрики» должна учитывать и технологические особенности производства. Как следствие, цель исследования – формирование специфичной для алюминиевого производства структурной схемы «цифровой фабрики».

Автоматизированная система управления предприятием (АСУП) представляет собой многоуровневую киберфизическую систему, построенную по иерархическому принципу в целях интеграции и координации всех процессов и операций предприятия. Она включает следующие уровни:

- полевой;
- управление технологическими процессами;
- управление производством;
- управление предприятием (ERP).

«Цифровая фабрика» – это иной концептуальный подход к управлению и проектированию, дополняющий АСУП и обеспечивающий сквозную цифровизацию производственной системы на основе технологий искусственного интеллекта и цифровых двойников. Если автоматизированная система управления предприятием направлена на оптимизацию существующих процессов, позволяет управлять физическими объектами, то «цифровая фабрика» ориентирована на сквозное управление и симуляцию производства, снижает неопределенность до запуска процесса, управляет виртуальными системами и данными.

В исследовании [94] представлено описание модели «цифровой фабрики», которая основывается на интеллектуальной системе конструкторско-технологического сопровождения производства, использовании цифрового двойника изделия и цифрового двойника материала. На уровне умной фабрики

имеют место цифровые двойники производственного процесса и производственной системы.

На рисунке 2.1 представлена структурная схема «цифровой фабрики», адаптированная к условиям алюминиевого производства. Автоматизированная система управления предприятием помимо основных иерархических уровней управления включает также блок информационной безопасности (ИБ): управление рисками, управление доступом, антивирусная защита, предотвращение вторжений и др.



Рисунок 2.1 – Структурные элементы модели «цифровой фабрики» алюминиевого производства (обобщено автором)

Ключевыми элементами с точки зрения моделирования производственной системы являются цифровые двойники (ЦД) и искусственный интеллект (ИИ). На

среднем и верхнем уровнях АСУТП целесообразно внедрение ИИ в виде систем машинного обучения и машинного зрения. На уровнях управления производством и предприятием имеют место модели следующих цифровых двойников:

1) объектный: цифровой двойник технологической системы, цифровой двойник электрической системы, цифровой двойник АСУТП, хранилище документации и Workflow и др.;

2) трехмерный: трехмерная среда завода, трехмерные виртуальные тренажеры;

3) цифровой двойник технологического процесса;

4) цифровой двойник производственного процесса.

1) Объектная модель строится на основе объектного подхода к хранению данных, позволяет автоматизировать создание перечня основного оборудования и соответствующих взаимосвязей, ведение нормативно-справочной информации, создание и ведение схем автоматизации, чертежей расположения основного и вспомогательного оборудования, проектной документации, поиска информации и др. Например, цифровой двойник технологической системы обеспечивает возможность создания и ведения моделей технологического оборудования, инженерной инфраструктуры, с уточнением характеристик оборудования, единиц измерения; цифровой двойник электрической системы позволяет моделировать электротехнические объекты, параметры их функционирования, схемы; цифровой двойник АСУТП моделирует систему автоматизации, включая шкафы автоматизации, их расположение, внутришкафные соединения и т.д.; хранилище документации и Workflow обеспечивает ведение производственного документооборота в части условно неизменяемой информации (информация, изменяемая не чаще 1 раза в месяц).

Каждый объект модели (симулирующий работу оборудования) характеризуется набором атрибутов, к числу которых относятся:

- наименование;
- идентификатор;
- локация;

- код функционально-технологической принадлежности;
- параметры для информационного обмена (ссылки на таблицы данных);
- потребление ресурсов;
- документация.

С учетом специфики алюминиевого производства могут быть предусмотрены дополнительные атрибуты оборудования для узлов: газоход от печи обжига, аспирационная система, аспирационная установка, барабанный магнитный железоотделитель, вибропитатель, газоанализатор, гранулометр, дозатор и др.

Атрибутами подсистем автоматизации являются:

- наименование;
- документация;
- локальная АСУТП;
- порождаемые параметры;
- параметры для информационного обмена.

Наборы атрибутов уточняются также для объектов класса «Сотрудники», «Местоположение», «Документы».

2) Трехмерный цифровой двойник предоставляет персоналу предприятия доступ к виртуальному пространству с описанием оборудования, сопроводительной документации (технологические схемы, схемы подключения, руководства пользователя, регламенты ремонтов и т.д.), а также возможность воздействовать на объекты в виртуальной реальности. Доступ к трехмерному цифровому двойнику может быть предоставлен дирекции по производству, службе технического директора, дирекции по персоналу, отделу охраны труда и промышленной безопасности.

3) Цифровой двойник технологического процесса предприятия включает две подсистемы: имитационного моделирования и виртуальных тренажеров. Объектами имитации выступают технологический процесс цеха или отдельного вспомогательного производства в объеме АСУТП; работа АСУТП и их компонентов; операторские системы и системы диспетчерского контроля и управления среднего и верхнего (АСОДУ) уровней. Блок виртуальных тренажеров

предназначен для интерактивного обучения персонала (административного, оперативного, обслуживающего, ремонтно-технического и прочего) в виртуальном пространстве «цифровой фабрики» на основе комплексной имитационной модели технологических процессов.

4) Цифровой двойник производственного процесса имитирует работу производственных участков и комплексов, предназначен для:

- прогнозирования энергопотребления при загрузке оборудования;
- оптимизации транспортных-логистических операций;
- модернизации оборудования, логистического или технологического процесса;
- симуляции различных вариантов управления материальными потоками и режимами оборудования.

Технологии машинного обучения могут быть применены для формирования рекомендаций персоналу, предсказания изменений технологического процесса, диагностики и определения причин отклонений от установленных технологических параметров, выявления взаимосвязей и закономерностей между параметрами модели, обучения моделей (с учителем и без учителя).

Моделирование «цифровой фабрики» направлено на достижение таких целей, как:

- минимизация ошибок в ведении документации;
- минимизация ошибок при эксплуатации оборудования;
- сокращение времени разработки и внедрения изменений при модернизации производственной системы;
- сокращение времени проведения технического обслуживания и ремонтов;
- повышение эффективности производства;
- повышение срока службы и безопасности эксплуатации оборудования;
- снижение простоев;
- сокращение влияния человеческого фактора и др.

Содержательно модель связывает в единую систему физическую, цифровую и управляющую подсистемы (рисунок 2.2). Согласно стандарту ГОСТ Р 70265.1-2022 базовая структура «цифровой фабрики» определяет [6]:

- модель активов производственной системы (детали, устройства, оборудование, программное обеспечение и т.п., т.е. объекты в составе производственной системы);
- модель отношений между активами (взаимосвязи между двумя и более элементами);
- поток информации об активах (идентификационная, о статусе актива, серийный номер, роль, ссылки и др.).

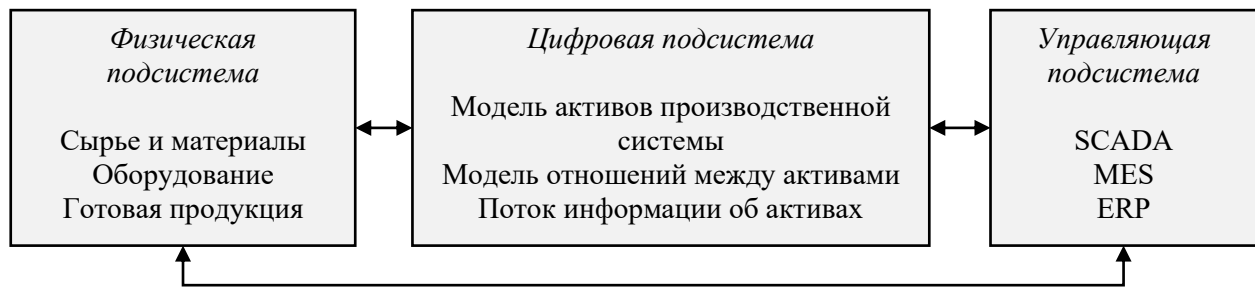


Рисунок 2.2 – Подсистемы модели «цифровой фабрики» (обобщено автором)

Структурно-параметрическая модель представляет собой формализованное описание сложной системы, которое отражает структурный и параметрический аспект. В контексте моделирования производственных процессов под структурой понимается иерархия уровней управления и совокупность параметров, характеризующих тот или иной элемент моделируемой системы.

Далее представлен фрагмент модели, сфокусированный на блоке управления качеством (рисунок 2.3). Блок объединяет 3 подблока: автоматизированную систему аналитического контроля (АСАК), автоматизированную систему управления рецептурами (АСУР) и систему контроля качества процесса (СККП). Каждый подблок включает подсистемы (пользовательский интерфейс (ПИ), авторизация, интеграция с информационными системами (ИС) и др.).

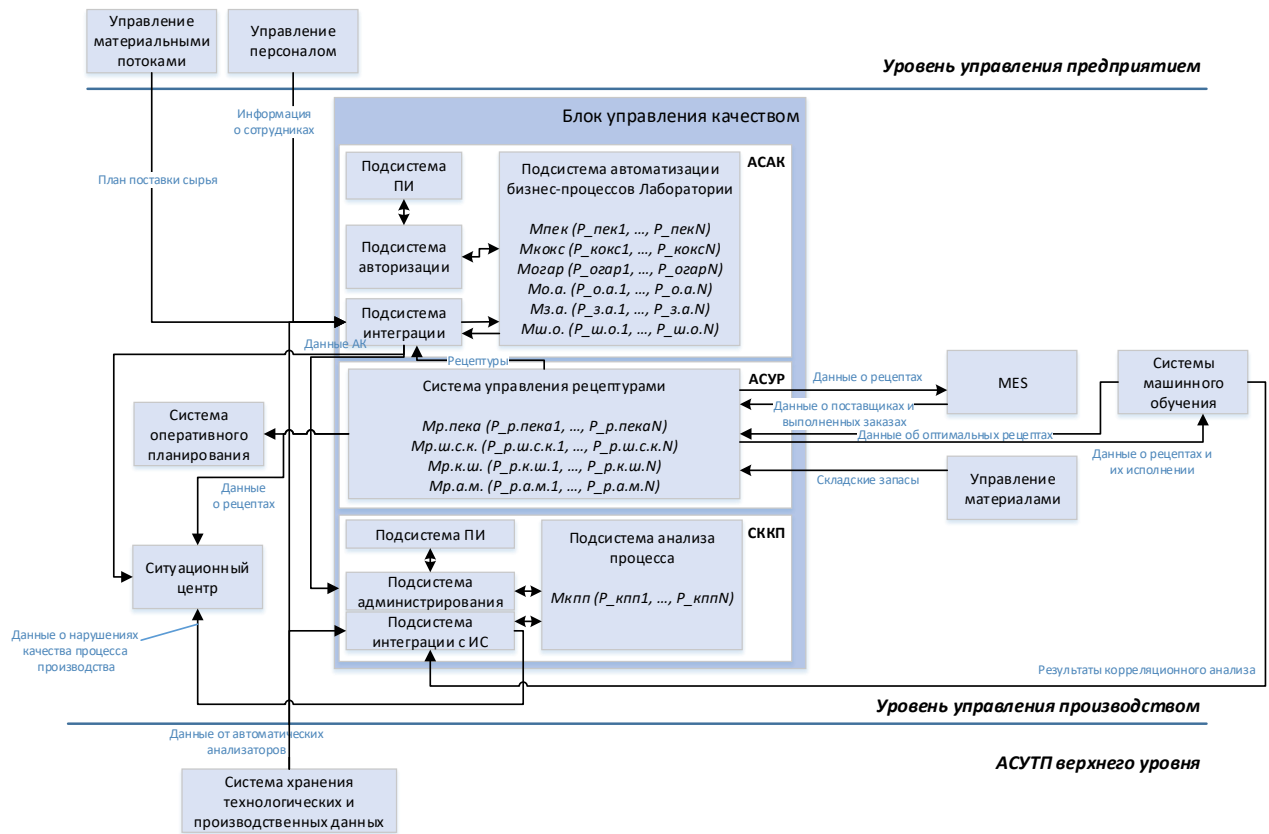


Рисунок 2.3 – Структурно-параметрическая модель блока «Управление качеством» (составлено автором)

1) АСАК. Модель подсистемы автоматизации бизнес-процессов Лаборатории, обслуживающей производство анодов, учитывает следующую совокупность параметров:

а) Мпек (параметры входного контроля пека каменноугольного) – массовая доля воды в твердом пеке, температура размягчения, коксовое число, вязкость, зольность и др.;

б) Мкокс (параметры кокса нефтяного сырого) – массовая доля общей влаги, зольность, массовая доля летучих веществ, примеси и др.;

в) Могар (огарки обожженных анодов) – действительная плотность, зольность, влага, вибрационная объемная плотность, удельное электрическое сопротивление и др.;

г) Мо.а. (обоженные аноды) – действительная плотность, кажущаяся плотность, зольность, удельное электрическое сопротивление, предел прочности на сжатие и др.;

д) Мз.а. (зеленые аноды) – действительная плотность, кажущаяся плотность, зольность, примеси, прочность на сжатие;

е) Мш.о. (шихта огарков) – действительная плотность, вибрационная объемная плотность, влага, удельное электрическое сопротивление и др.

2) АСУР. Модель подсистемы управления рецептурами опирается на ингредиентный состав рецептур:

а) технологического пека (Мр.пека);

б) шихты сырого кокса (Мр.ш.с.к.);

в) коксовой шихты (Мр.к.ш.);

г) анодной массы (Мр.а.м.).

3) СККП. Модель подсистемы анализа процесса учитывает следующие показатели качества: количество обнаружений признаков отклонения процесса производства от состояния статистической управляемости, количество пропущенных фактов отклонений, коэффициент достоверности идентифицированного признака отклонения, коэффициент годной продукции и др.

Блок управления качеством интегрируется с блоками верхнего уровня управления (управление персоналом, управление материальными потоками), третьего уровня (АСУР, СККП, управление заказ-нарядами в блоке MES, система управления складом сырья в блоке управления материалами, ситуационный центр), второго уровня (система хранения данных), а также системой машинного обучения в части обмена данными о рецептах.

Цифровой двойник позволяет усовершенствовать производственные процессы путем реализации рекомендательных моделей, сократить брак, простой оборудования, повысить скорость принятия наилучшего решения за счет консолидации информационных потоков, поступающих от:

– операторских систем управления производством, автоматизированной системы оперативно-диспетчерского управления (оперативные данные);

- системы оперативного планирования производства (третий уровень);
- системы управления основными данными (верхний четвертый уровень).

В концепции «цифровой фабрики» построенная структурно-параметрическая модель учитывает специфические параметры алюминиевого производства, обеспечивает синхронизацию между физическими и цифровыми объектами, интеграцию разнородных данных в едином цифровом пространстве, служит базой для имитационного моделирования производственных процессов.

Таким образом, разработка модели «цифровой фабрики» представляет собой создание цифрового каркаса производственной системы, который интегрирует и синхронизирует данные, процессы и решения на всех этапах жизненного цикла продукта. Предложенная выше структурная модель решает задачи импортозамещения за счет использования российских ИТ-инструментов, повышает устойчивость и безопасность производства (в том числе алюминиевого), позволяет реализовать проактивный подход к организации производства за счет симуляции и оптимизации процессов.

2.2 Формализация поэтапного внедрения модели «цифровой фабрики»

Процесс цифровой трансформации производства представляет собой сложный организационный механизм, реализуемый в комплекс этапов.

В диссертационном исследовании Е. В. Бабенко реализация процесса цифровой трансформации предприятия включает следующие подпроцессы: 1) обоснование концепции и стратегии, 2) проектный менеджмент и планирование процессов, 3) проектирование и разработка процессов цифровой трансформации, 4) приобретение активов, 5) разработка проекта экосистемы цифрового предприятия, 6) внедрение, развитие и сопровождение [23].

Согласно идее Е. К. Савич методика цифровизации СМК включает 6 этапов: 1) разработка контекстной модели предприятия, 2) матрицы влияния процессов СМК на элементы контекста, 3) определение рисков процессов СМК, 4) оценка

рисков процессов СМК, 5) определение уровня цифровизации процессов СМК, 6) сценарный анализ цифровизации процессов СМК [83].

Отметим, что интеграция модели «цифровой фабрики» имеет свои особенности в зависимости от базового состояния производственной системы. Прежде всего, это касается того, является ли ИТ-инфраструктура производства функционирующей или планируется создание нового производства с передовыми технологиями организации процессов. Данный аспект определяет содержание алгоритма внедрения модели «цифровой фабрики». В связи с этим разработаны альтернативные алгоритмы.

1) В первом случае предложение (рисунок 2.4) носит универсальный характер и применимо для развития действующей производственной системы. Алгоритм включает 7 основных этапов, переход между которыми определяется выполнением конкретных условий. Ниже представлено описание данных этапов, объединенных логическими блоками принятия решений.

Первый этап носит аналитический характер, включает диагностику существующего состояния производственной системы, анализ проблем цифровизации, импортозамещения (анализ критичности использования зарубежных программных продуктов), базы российских стандартов в области цифровизации производства и их применимости, а также определение базовых элементов структуры «цифровой фабрики» (модель активов, модель отношений между активами и потоки информации об активах производственной системы). Логическое условие проверяет достаточность нормативно-правовой и эмпирической базы данных и активирует переход к следующему этапу или запускает цикл доработки базы.

Второй этап – разработка структурно-параметрической модели «цифровой фабрики», включая состав элементов системы (блоки / модули), уровни автоматизации, ключевые параметры функционирования активов, потоки данных. Также на данном этапе осуществляется стандартизация процессов обмена данными. Логическое условие проверяет полноту данных в модели.

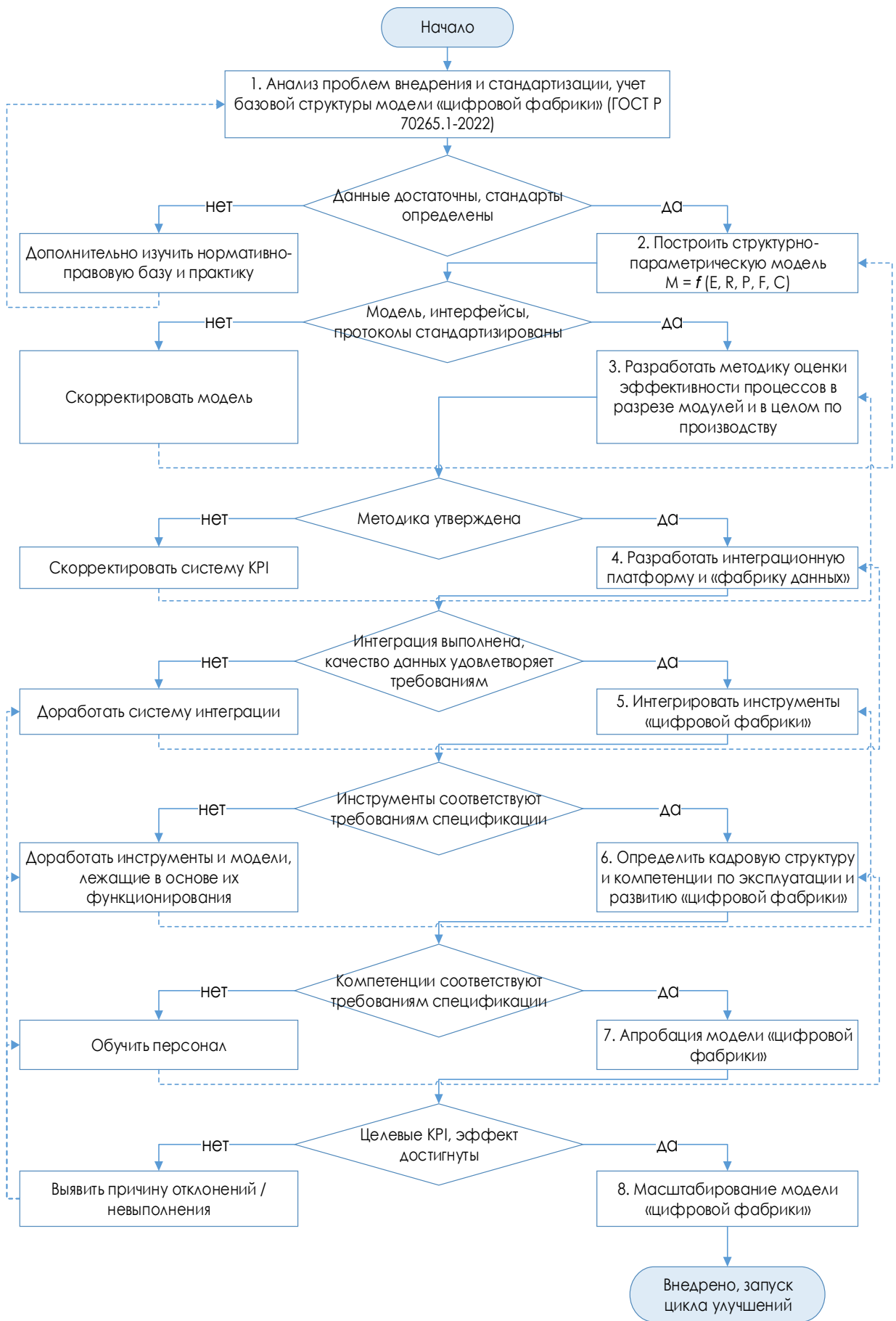


Рисунок 2.4 – Алгоритм «развертывания» модели «цифровой фабрики» на текущем производстве (построен автором)

Третий этап предполагает разработку методики оценки эффективности процессов.

На четвертом этапе разрабатывается интеграционная платформа и «фабрика данных». Под последней понимается «централизованная система, разработанная для сбора, обработки, хранения и анализа данных с целью обеспечения эффективного управления информацией» [93, с. 196], совокупность инструментов управления данными [64]. Источниками данных являются смежные информационные системы предприятия, включая PLM, MES, ERP и т.д. Логическим условием является проверка успешности интеграции и качества данных.

На пятом этапе предполагается разработка и внедрение инструментов «цифровой фабрики»: цифровые двойники активов и процессов, предиктивная аналитика, искусственный интеллект (включает машинное обучение и машинное зрение). Логическим условием является проверка на соответствие инструментов требованиям спецификации, невыполнение которого требует доработки инструментария.

На шестом этапе решается вопрос кадрового обеспечения, систематизация требований к компетенциям специалистов, вовлеченных в процесс эксплуатации «цифровой фабрики». Возможно формирование центра компетенций, направление сотрудников на курсы повышения квалификации или профессиональной переподготовки. Логическое условие заключается в проверке соответствия фактически достигнутого уровня компетенций требуемому уровню для эффективной эксплуатации «цифровой фабрики».

Седьмой этап – верификация и апробация разработанного комплекса решений на производственной системе. При достижении целевых параметров работы модели (ресурсосбережение, энергосбережение, повышение производительности, сокращение потерь и др.) осуществляется трансфер разработки в реальную производственную систему, описываемую в терминах «умной» фабрики – гибкое производство с внедрением промышленных роботов, промышленного Интернета вещей и других передовых технологий производства

(рисунок 2.5). При невыполнении логического условия предполагается анализ причин отклонения и доработка модели.

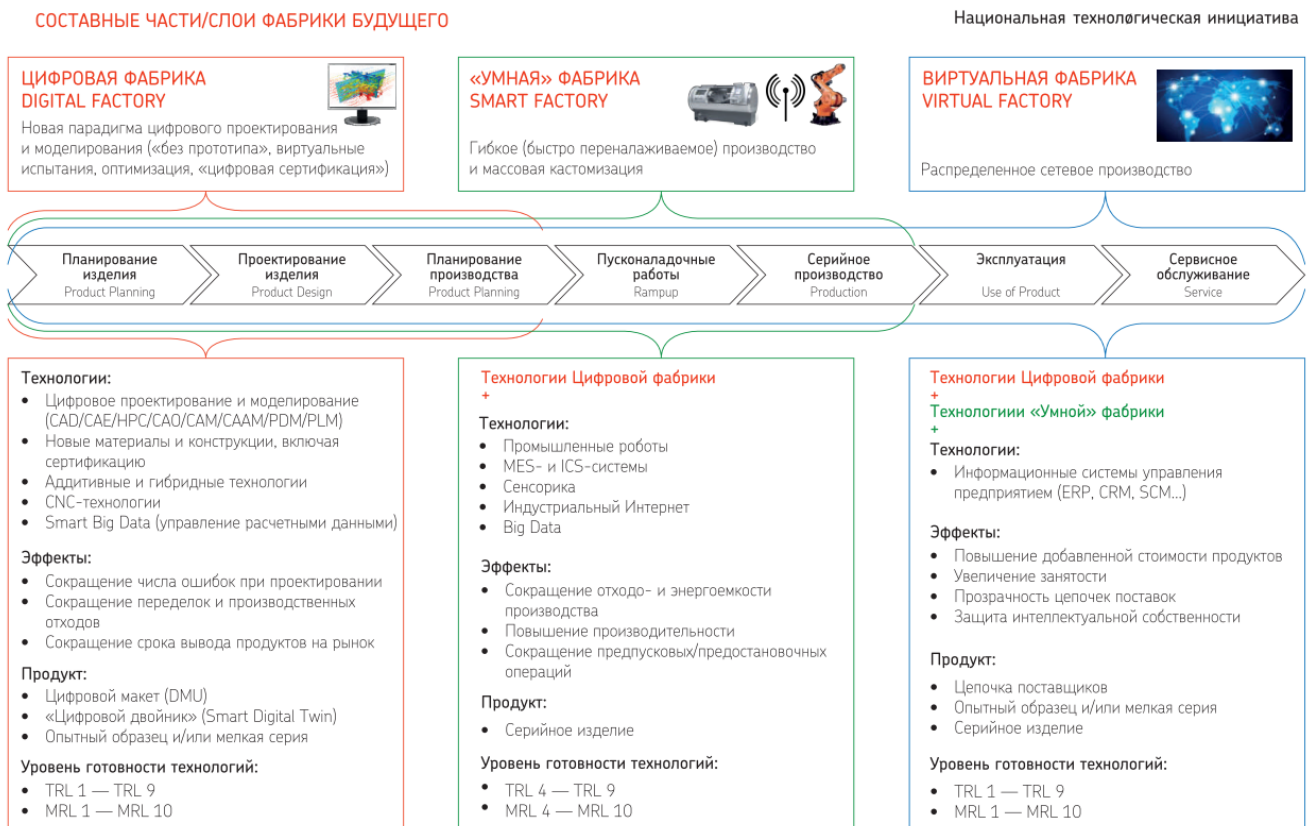


Рисунок 2.5 – Структура Фабрики Будущего (материалы Института передовых производственных технологий СПбПУ [97])

При положительном результате модель масштабируется и переходит в режим непрерывного мониторинга и модернизации.

2) Во втором случае спроектирована модель «цифровой фабрики» организации новой производственной системы (рисунок 2.5). Алгоритм включает три блока:

- согласование проектной и эксплуатационной документации (1-4 этапы);
- техническая реализация (5-8 этапы);
- валидация и совершенствование (9 этап).

Допускается параллельное исполнение этапов 2-4 при достаточном ресурсообеспечении.

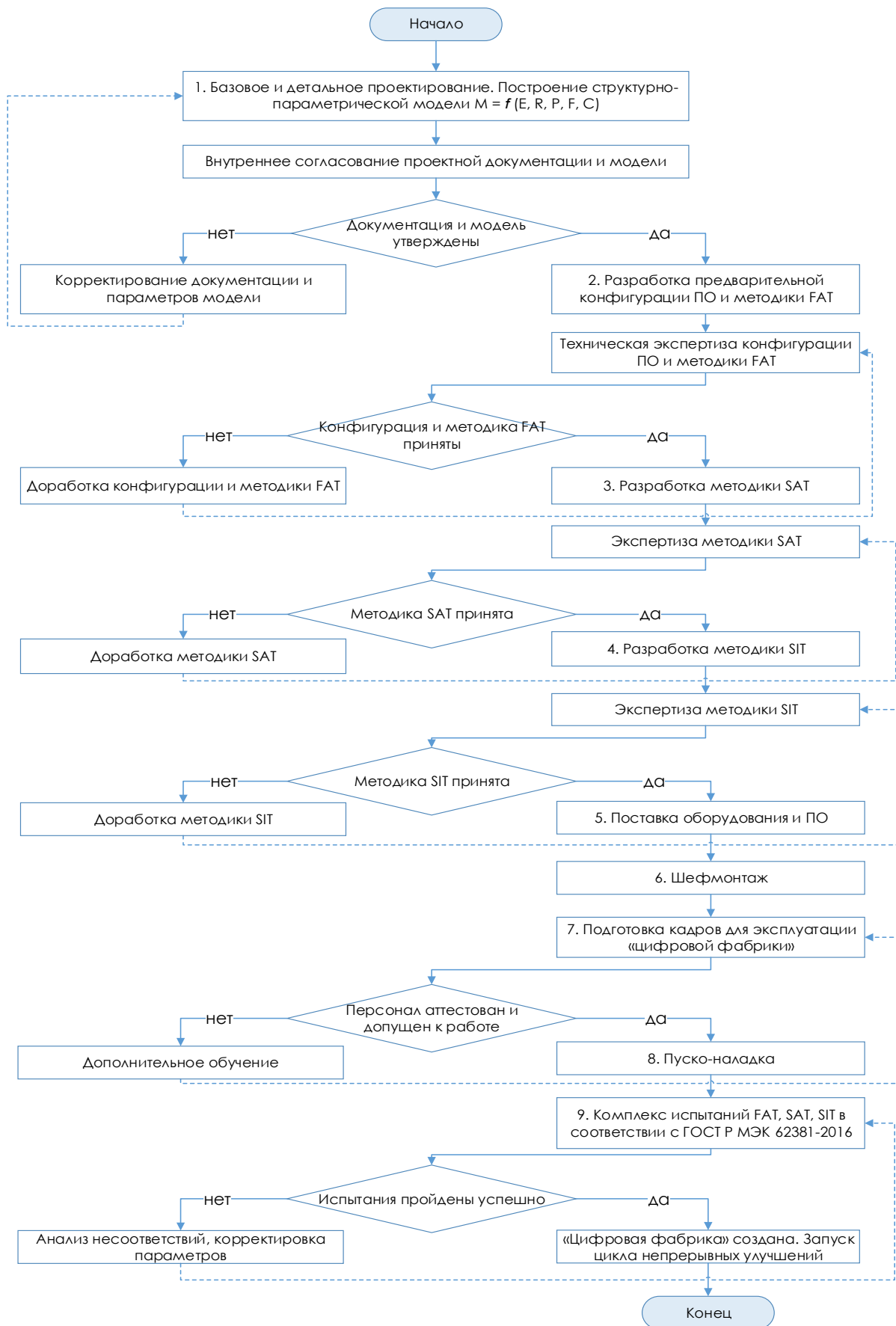


Рисунок 2.5 – Алгоритм внедрения модели «цифровой фабрики» на новом производственном объекте (построен автором)

Обратная связь (пунктирные линии) указывают на необходимость корректирующих воздействий на том или ином этапе алгоритма.

К особенностям алгоритма относятся:

- построение структурно-параметрической модели;
- соответствие требованиям ГОСТ Р МЭК 62381-2016 Системы автоматизации в обрабатывающей промышленности. Заводские приемочные испытания (FAT), приемочные испытания на месте эксплуатации (SAT) и объектовые интеграционные испытания (SIT) [15];
- кадровое обеспечение процессов в раках модели «цифровой фабрики», включая компетенции в области интерпретации параметров модели, предпринимаемых действий при обнаружении отклонений, обновления конфигурации системы.

Предложенная схема «развертывания» модели «цифровой фабрики» на новом производственном объекте применима при создании «зеленой цифровой фабрики», масштабной цифровой трансформации действующей производственной системы, а также внедрении отдельных подсистем автоматизации (MES, IoT и др.).

Как было отмечено ранее, важную роль играет стандартизация процессов цифровизации производства. Внедрение цифровых технологий в производственные системы сопряжено с необходимостью интеграции информационных систем и технологических процессов. Обеспечить системный подход и повышение эффективности комплексных решений позволяет стандартизация, направленная на упорядочение процессов и повышение конкурентоспособности выпускаемой продукции [100].

Прорывное развитие технологий, необходимое для обеспечения технологического лидерства, основано на принципе опережающего характера. В данном контексте набирает обороты понятие «опережающая стандартизация» – повышение требований к качеству процессов и продуктов, стимулирующее модернизацию производственных систем в соответствии с большими вызовами современности [86]. Эффективность опережающей стандартизации обусловлена согласованностью с разработками отечественных ученых, документами

стратегического развития страны, что делает ее не просто документом технического регулирования, но и действенным инструментом обеспечения технологического лидерства, устойчивого развития промышленности.

Базовым документом, определяющим требования к цифровизации промышленности и созданию умного производства, является ГОСТ Р 70988-2023 Система стандартов в цифровой промышленности. Основные положения. Общие требования к системе [9]. Стандартом закреплены терминология, общие требования к системе стандартов в сфере цифровизации производственных систем, а также отмечено, что унификация и стандартизация моделей (процессных, продуктовых) характеризуют уровень цифровой зрелости предприятия. Существенные дополнения содержатся в национальном стандарте, устанавливающем требования к обмену информацией об объекте производства в среде автоматизированных систем управления [10].

Конкретизация требований к модели цифровой фабрики нашла отражение в стандартах, определяющих структуру модели:

- ГОСТ Р 70265.1-2022 Измерение, управление и автоматизация промышленного процесса. Структура цифровой фабрики. Часть 1. Основные положения) [6],

- ГОСТ Р 70265.2-2024 Измерение, управление и автоматизация промышленного процесса. Структура цифровой фабрики. Часть 2. Элементы модели [7],

- ГОСТ Р 70265.3-2024 Измерение, управление и автоматизация промышленного процесса. Структура цифровой фабрики. Часть 3. Применение цифровой фабрики для управления жизненным циклом производственных систем [8].

Документы разработаны с учетом международных стандартов, устанавливают требования к структуре модели «цифровой фабрики», взаимосвязям между элементами. Серия указанных стандартов открывает возможности для перехода от точечного внедрения цифровых технологий к сквозной цифровизации системы управления предприятием. Для этого необходима формализация модели

активов, модели отношений между активами и потока информации об активах, что определено положениями стандартов в области «цифровых фабрик».

Важным требованием к формированию «цифровой фабрики» является интероперабельность, которая в национальном стандарте трактуется как «способность двух или более информационных систем или компонентов к обмену информацией и к использованию информации, полученной в результате обмена» [1, с. 2]. В стандарте представлена эталонная модель интероперабельности – модель, в рамках которой взаимодействие между двумя системами происходит как минимум на трех уровнях – техническом (интерфейсы, службы связи и др.), семантическом и организационном.

Обеспечиваемое интероперабельностью бесшовное взаимодействие компонентов «цифровой фабрики», в свою очередь, формирует основу для эффективного управления данными, бизнес-процессами, создания единой стандартизированной базы для перехода к отечественным ИТ-разработкам. Таким образом возможно обеспечить непрерывность технологических процессов и гармоничную интеграцию новых ИТ-компонентов российского производства в существующую архитектуру «цифровой фабрики».

Обобщая положения стандартов, следует подчеркнуть, что объектом стандартизации выступают активы предприятия как унифицированная единица управления в масштабах умного производства, характеризуемая определённым набором атрибутов и связей. Такая система является эмпирической основой для машинного обучения, создания цифровых двойников изделий, материалов, процессов, и, как следствие, планирования производства и эффективного управления ресурсами.

Перспективным направлением развития стандартизации являются SMART-стандарты. В настоящее время в России действуют предварительные национальные стандарты, утверждающие общие положения умных стандартов [17] и архитектуру данных [18]. Особенность таких стандартов состоит в их способности быть распознаваемыми и используемыми информационными системами, без привлечения человека, адресно взаимодействовать с ИТ-системами предприятия,

устанавливая режимы работы оборудования, критерии качества и пределы допустимых значений параметров процессов. Нормативные документы определяют 3 обязательных формата SMART-стандартов: машиночитаемый, машиноинтерпретируемый и машинопонимаемый [18].

Ключевая роль SMART-стандартов в формировании «цифровой фабрики» заключается в возможности интегрировать требования к продукции, процессам, данным непосредственно в контур управления производством, осуществлять мониторинг технологических карт, оперативно корректировать технологические процессы в соответствии с обновляемыми спецификациями. Такой инструмент служит основой создания самоорганизующихся интеллектуальных систем, умных производств.

Трансформация бумажных стандартов в SMART обусловлена потребностями отраслей промышленности, требует соответствующих ресурсов и компетенций. Приоритетными направлениями интеллектуализации являются стандарты на рецептуры, методы анализа, методы измерений, методы испытаний и т.п., интеграция которых в среду АСУТП, MES, ERP способна обеспечить повышение качества производства. Это особенно актуально для отраслей, предъявляющих жесткие требования к качеству сырья, готовой продукции, отличающихся сложностью технологических процессов, генерацией больших объемов данных (фиксируемых датчиками, контрольно-измерительными приборами, камерами), а также нуждающихся в замене импортных ИТ-решений на конкурентоспособные отечественные разработки.

Цифровой двойник, симулирующий функционирование физических систем, процессов, также будет связан со SMART-стандартом путем синхронизации данных, атрибутов, что позволит осуществлять мониторинг режимов производства, прогнозировать поведение системы и качество процессов и продукции, оптимизировать параметры работы оборудования и др.

Отдельного внимания требует экологический аспект производства. В контексте настоящего исследования речь идет об информационно-технических справочниках по наилучшим доступным технологиям и стандартам, посвященных

системам экологического менеджмента. SMART-стандарты способны: автоматически контролировать технологические показатели НДТ в режиме реального времени, формировать отчетности об объемах загрязнения окружающей среды и потребления ресурсов, сравнивать эффективность различных технологий.

Таким образом, система национальных стандартов (действующих и планируемых) в области цифровой трансформации производств является системообразующим фактором, позволяет снизить зависимость от зарубежных стандартов, учесть специфику отечественных производств и технологической политики государства, а также создать условия для разработки и внедрения собственных цифровых решений. SMART-стандарты как перспективное направление развития организации российских производств способны обеспечить такие эффекты, как повышение качества, энергоресурсоэффективности, безопасности, прослеживаемости материальных потоков, сокращение времени проектирования новой продукции.

С учетом представленного алгоритма внедрения модели «цифровой фабрики» и специфики производства обожженных анодов выделены функциональные подсистемы производства: методологическая, технологическая, процессная, испытательная, кадровая, цифровая подсистемы, «фабрика данных», управление качеством. Каждая подсистема характеризуется сменой состояний элементов производственной системы и связями между состояниями (потоки информации или управления). Перечисленные подсистемы объединены в метаграф – графический метод описания сложных систем, широко используемый в сфере информатизации и цифровизации производства [85, 91, 111].

Построенный метаграф представляет собой логико-функциональную структуру производственной системы в контексте создания «цифровой фабрики» (рисунок 2.6). Далее следует описание подсистем.

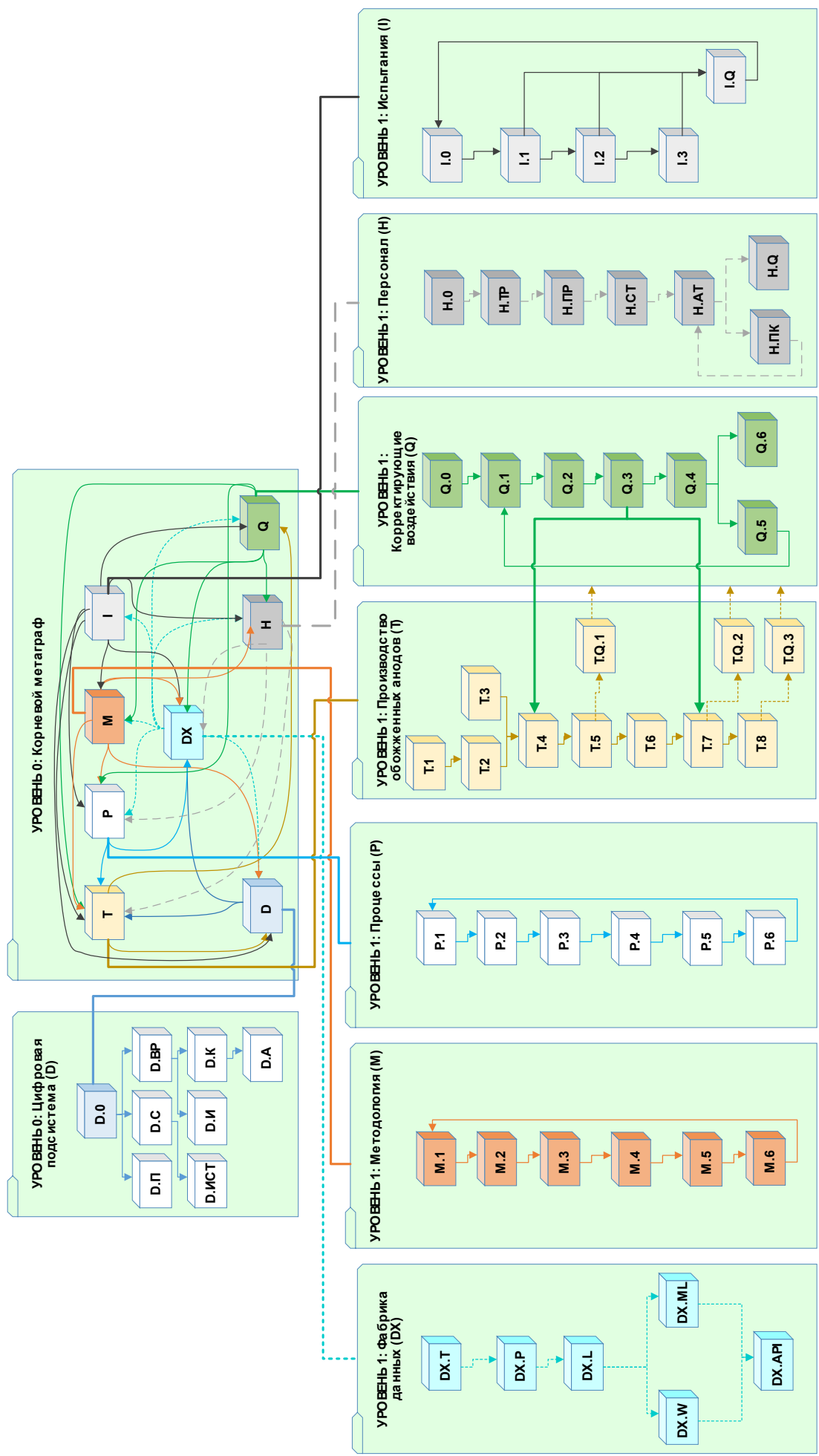


Рисунок 2.6 – Метаграф «цифровой фабрики» производства анодов (построен автором)

На нулевом уровне в рамках корневого метаграфа заданы подсистемы (сущности) как агенты и связи между ними на верхнем уровне: Т – технологическая, DX – «фабрика данных», D – цифровая подсистема, Н – персонал (администраторы, операторы, технологи, инженеры, лаборанты, менеджеры), Р – процессная, М – методологическая, Q – подсистема качества, I – испытательная.

Обособление подсистем D и DX обусловлено необходимостью разделения функций: «фабрика данных» агрегирует данные, осуществляет очистку данных, сжатие данных, дает описательные статистики, делится данными (по запросу); цифровая подсистема на основе данных позволяет контролировать процессы, реагировать на события, анализировать отклонения, их причины, формировать рекомендации.

Ребра между подсистемами нулевого уровня описывают следующие связи:

- а) $\{T, D, H, Q, I, M, P\} \rightarrow DX$: данные из соответствующих подсистем консолидируются в «фабрике данных»;
- б) $DX \rightarrow \{T, D, H, Q, I, M, P\}$: «фабрика данных» обеспечивает соответствующие подсистемы необходимой информацией;
- в) $T \rightarrow Q$: технология может быть источником отклонений;
- г) $Q \rightarrow T$: на основе данных об отклонениях корректируется технология;
- д) $D \rightarrow T$: цифровая подсистема управляет технологическим процессом;
- е) $T \rightarrow D$: параметры процессов отслеживаются в цифровой подсистеме и т.д.

На нулевом уровне отдельно выделена цифровая подсистема (D) как подсистема, управляющая «цифровой фабрикой» путем сбора данных, их обработки, построения прогноза и формулирования рекомендаций для соответствующих подсистем. Внутри цифровой подсистемы (D) происходит смена состояний:

D.0 – исходное состояние, подсистема активна;

D.П – подсистема формирует план производства (состав шихты, загрузка печей, график обжига и др.);

D.C – подсистема в режиме реального времени отслеживает параметры (температура печи, давление и др.);

D.BP – активный цифровой двойник, идет синхронизация данных (в режиме реального времени), подсистема отражает текущее состояние физического актива;

D.ИСТ – модели, события, рекомендации архивируются в хранилище данных (формируются исторические данные);

D.И – имитационное моделирование, моделирование поведения системы в прогнозном режиме;

D.K – подсистема контролирует, анализирует отклонения, их причины;

D.A – аналитика, подсистема формирует рекомендации для оператора или системы (изменить дозировку в рецептуре, скорректировать температуру или темп обжига, отбраковать анод и др.).

Далее описана детализация состояний отдельных подсистем (уровень 1).

«Фабрика данных» (DX) в построенном метаграфе представляет собой совокупность следующих узлов:

DX.T – собирает первичные данные с оборудования (включая использование IoT-датчиков);

DX.P – передача данных, предобработка;

DX.L – хранение «сырых» данных (data lake);

DX.W – хранение структурированных и агрегированных данных;

DX.ML – обучение моделей (машинное обучение);

DX.API – предоставление другим подсистемам доступа к данным и моделям.

Технологическая подсистема (T) описывает технологический процесс производства обожженных анодов [116] и точки контроля качества:

T.1 – прием кокса нефтяного сырого, огарков анодов, хранение, предварительное дробление;

T.2 – дробление, размол, рассев на фракции;

T.3 – прием, хранение, пекоподготовка;

T.4 – дозирование, смешение;

T.5 – формование (на выходе – «зеленые» аноды);

T.6 – охлаждение;

T.7 – обжиг «зеленых» анодов (на выходе – обожженные аноды);

T.8 – монтаж анодов (на выходе – смонтированные аноды);

T.Q.1 – контроль геометрической формы анодов после формования;

T.Q.2 – контроль качества обожженных анодов после обжига;

T.Q.3 – контроль качества смонтированных анодов.

Контрольные точки T.Q.1–T.Q.3 передают данные в контур Q об отклонениях: T.Q.1 – данные об отклонениях геометрической формы, плотности, трещины, T.Q.2 – данные о недожоге анодов, трещинах и др., T.Q.3 – данные о геометрии, загрязнении, повреждениях.

В свою очередь, подсистема качества (корректирующие воздействия, Q) характеризуется совокупностью состояний производственной системы:

Q.0 – принят сигнал об отклонении;

Q.1 – обнаружение отклонения;

Q.2 – диагностика причины отклонения;

Q.3 – формулирование и запуск корректирующего воздействия (генерация потока данных в блоки T.4 (дозирование, смешение) и T.7 (обжиг «зеленых» анодов));

Q.4 – оценка эффекта – достигнут ли ожидаемый эффект в результате корректирующего воздействия;

Q.5 – изменение и закрепление пороговых значений, правил;

Q.6 – архивирование данных о дефектах.

Подсистема кадрового обеспечения (H) описывает каждого сотрудника как агента системы «цифровой фабрики», особенностью которого является приращение компетенций, рост квалификации:

H.0 – базовое состояние, потенциальный риск;

H.TP – требования к компетенциям, дифференцированные по ролям;

H.ПР – прием и допуск сотрудника (проверка на соответствие требованиям);

H.СТ – стандартные операции, инструкции для сотрудника, пошаговый алгоритм действий, доступный на автоматизированном рабочем месте;

H.АТ – периодическая аттестация сотрудников (посредством симулятора, тестирования и т.п.);

Н.ПК – повышение квалификации как объективная необходимость развития компетенций;

Н.Q – сотрудник участвует в согласовании рекомендаций, сформулированных цифровой подсистемой.

Подсистема испытаний (I) обеспечивает замкнутый цикл верификации и валидации всех компонентов «цифровой фабрики»:

I.0 – получен запрос от смежной подсистемы на запуск проверки;

I.1 – заводские приемочные испытания FAT;

I.2 – приемочные испытания на месте эксплуатации SAT;

I.3 – объектовые интеграционные испытания SIT;

I.Q – обработка отклонений и коррективы процедуры испытаний.

Процессная подсистема (P) описывает контур организации процессов в «цифровой фабрике»:

P.1 – стартовый блок подсистемы, определяет перечень процессов, их цели, владельцев процесса, границы, систему KPI;

P.2 – система фиксирует регламентов в виде документов или цифровых маршрутов;

P.3 – система строит сквозное взаимодействие элементов (полей, подсистем, стадий технологического процесса и др.);

P.4 – система формирует инструкции для исполнителей на уровне АРМ;

P.5 – система контролирует соответствие действий сотрудника утвержденным регламентам;

P.6 – система инициирует корректирующие действия в случае выявления отклонений.

Методологическая подсистема (M) представляет собой совокупность знаний о производственных процессах, включая принципы, алгоритмы, методы расчета параметров, математические модели, имитационные модели и другие компоненты модели «цифровой фабрики»:

М.1 – система определяет или актуализирует методы расчетов (состава анодной массы, параметров формования, обжига, оценки качества анода, экологических параметров производства и др.);

М.2 – система строит цифровые модели процесса (цифровой двойник печи, модель плотности анода и т.п.);

М.3 – система трансформирует модели в рабочие алгоритмы для цифровой подсистемы (D), например, алгоритм диагностики причин недожога;

М.4 – система стандартизирует методы, модели и алгоритмы;

М.5 – система фиксирует пороговые значения параметров;

М.6 – система оценивает достижение ожидаемых результатов на тестовых и реальных данных.

Построенная метаграфовая модель «цифровой фабрики» описывает поведение статических и динамических агентов производственной системы, позволяет автоматизировать систему управления качеством анодов, организовать производство анодов как замкнутую систему управления, где каждая стадия технологического процесса связана с потоками данных и обратными связями.

2.3 Описание трансформации требований к кадровому обеспечению цифровой производственной системы

Внедрение модели «цифровой фабрики» расширяет перечень требований к квалификации сотрудников. В условиях традиционной системы организации производства роль сотрудников сводилась преимущественно к оператору, реагирующему на поступающие сигналы и аварийные ситуации. В условиях «цифровой фабрики» функционал смещается в сторону аналитики и управления в режиме реального времени.

Согласно представленному алгоритму (рисунок 2.5 выше) пуско-наладочным работам предшествует аттестация персонала. В зависимости от роли к сотрудникам предъявляются соответствующие требования.

Совокупно все роли по работе с «цифровой фабрикой» можно классифицировать на две категории:

- 1) обслуживающий персонал;
- 2) оперативный персонал.

Главная задача обслуживающего персонала заключается в обеспечении стабильного функционирования «цифровой фабрики», техническая поддержка программно-аппаратного комплекса. У специалистов данной категории отсутствует потребность в глубоких знаниях технологических процессов, деятельность носит реактивный и превентивный характер: устранение сбоев, обновление версии программных продуктов, выявление и обработка инцидентов информационной безопасности.

Оперативный персонал использует цифровой инструмент для управления физическими объектами производства. К сотрудникам оперативного профиля предъявляются требования к знаниям технологических процессов, рецептур, статистических методов контроля, планирования.

Далее разработаны матрицы компетенций персонала «цифровой фабрики» для блоков планирования, управления качеством и управления материалами с учетом категории персонала и уровня требуемых знаний, умений, навыков. Учтена специфика алюминиевого производства (анодная фабрика), к особенностям которого относятся лабораторные исследования и разработка рецептур. В таблице 2.1 детализированы компетенции обслуживающего персонала «цифровой фабрики» (на уровне администраторов), в таблице 2.2 – компетенции оперативного персонала в разрезе функциональных блоков «цифровой фабрики».

К сквозным компетенциям относятся:

- знание и соблюдение требований охраны труда, промышленной безопасности и охраны окружающей среды при работе с системой;
- умение применять руководство пользователя при работе в системе «цифровой фабрики»;
- умение работать в программных компонентах системы, к которым персонал имеет доступ;

- владение навыками выполнения типовых операций в цифровой производственной среде.

Таблица 2.1 – Уровни компетенций обслуживающего персонала «цифровой фабрики» (разработано автором)

Роль	Знает	Умеет	Владеет навыками
Администратор приложений / системный администратор / администратор баз данных	архитектуру и принципы работы соответствующего модуля; методы установки обновлений и мониторинга, методы настройки СУБД, резервного копирования и др.	устанавливать, настраивать, обновлять, контролировать работоспособность программного обеспечения, устранять неисправности функционирования, обрабатывать запросы пользователей, управлять правами доступа и др.	ведения учетных записей, резервного копирования данных, восстановления баз данных, составления документов на дефектацию технических и программных средств и др.
Администратор информационной безопасности	нормативные требования, методы аудита и анализа событий информационной безопасности и др.	контролировать доступ пользователей к ресурсам системы, проводить аудит и анализ событий информационной безопасности, администрировать механизмы защиты системы и др.	выявления и обработки инцидентов информационной безопасности, тестирования функций механизмов защиты с использованием средств анализа защищенности и др.

Таблица 2.2 – Уровни компетенций оперативного персонала «цифровой фабрики» (разработано автором)

Роль	Знает	Умеет	Владеет навыками
<i>Блок планирования</i>			
Пользователь	предметную область планирования производства, принципы построения производственного расписания, интерфейс, методику и приёмы работы в программных компонентах системы и др.	разрабатывать производственное расписание, вносить изменения в построенное системой расписание, строить диаграмму Ганта, формировать отчеты и др.	построения производственного расписания, просмотра и контроля полученных данных в виде диаграммы Ганта, формирования отчетов на основе имеющихся шаблонов и исходных данных и др.
<i>Автоматизированная система аналитического контроля</i>			
Лаборант	методику проведения аналитических испытаний	работать с системой в рамках исполнения должностных обязанностей	проведения аналитических испытаний

Продолжение таблицы 2.2

Роль	Знает	Умеет	Владеет навыками
Специалист	нормативную базу и методологию проведения аналитических испытаний	конфигурировать базовое ПО системы, оказывать помощь пользователям с ролью «лаборант» в вопросах работы с системой	разработки методологии аналитических исследований в соответствии с требованиями производства
Руководитель	методы планирования и распределения ресурсов; контроля выполнения плана	планировать и распределять ресурсы, контролировать выполнение плана, оказывать помощь пользователям с ролью «специалист» в вопросах работы с системой	управления аналитическими исследованиями лаборатории в цифровой среде
<i>Система контроля качества процессов</i>			
Специалист по контролю качества процесса	методику расчета индексов пригодности и воспроизводимости для каждого из показателей качества, методы анализа с использованием контрольных карт Шухарта	выбирать показатели качества продукции, которые будут изучаться с помощью контрольных карт Шухарта, выбирать тип контрольных карт для разных показателей качества, идентифицировать новые признаки отклонения процесса от состояния статистической управляемости и др.	контроля корректности оценки состояния статистической управляемости, перенастройки параметров карт в итерационном режиме, формирования отчётов и др.
<i>Автоматизированная система управления рецептурами</i>			
Пользователь	интерфейс системы управления рецептурами, состав и свойства рецептов (анодных смесей)	просматривать информацию по рецептурам	работы в системе в соответствии с руководством пользователя
Технолог	технологические требования к рецептурам, методы согласования и утверждения	согласовывать рецептуры анодных смесей, проверять соответствие технологическим нормам	технологической экспертизы рецептов в системе
Специалист по разработке рецептов	методы разработки и рецептов, порядок согласования	создавать, редактировать, согласовывать рецептуры	разработки новых рецептов в цифровой среде
<i>Система прослеживаемости анодов</i>			
Оперативный персонал в целом	технологический процесс и оборудование; расшифровку шифров, кодов и обозначений, применяемых в процессе идентификации; технологию выбранных способов маркировки	работать в системе в соответствии с руководством пользователя	идентификации и прослеживаемости продукции в цифровой среде

В соответствии с построенным алгоритмом поэтапного внедрения модели «цифровой фабрики» и раскрытой выше системой компетенций предложена процессно-компетентностная модель цифровой трансформации производственной системы (рисунок 2.7).



Рисунок 2.7 – Процессно-компетентностная модель внедрения «цифровой фабрики» (разработана автором)

Предложенная модель представляет собой описание внедрения модели «цифровой фабрики» в производственную систему, интегрированное с функциями и квалификацией сотрудников, что позволяет синхронизировать подготовку кадров с календарным планом цифровизации производства. Вопрос кадрового обеспечения рассматривается как критически важный процесс, определяющий сроки и эффективность цифровой трансформации производства. Недостаточный уровень квалификации рассматривается как отклонение, требующее корректирующих воздействий в виде повышения квалификации.

Выводы по главе 2

1. Обобщена иерархическая архитектура модели «цифровой фабрики», объединяющая структуру управления производством (4 уровня: полевой уровень, АСУТП, управление производством и управление предприятием) и ключевые

инструменты цифровизации (информационная безопасность, цифровые двойники, искусственный интеллект).

2. Предложена структурно-параметрическая модель цифровой фабрики анодного производства (на примере системы управления качеством), учитывающая специфические отраслевые параметры, интегрирующая современные цифровые инструменты и иерархическую систему управления потоками, обеспечивающая сквозное управление, возможность проектирования новых и модернизации действующих производств.

3. Разработан алгоритм внедрения модели «цифровой фабрики», к особенностям которого относятся: во-первых, проектирование структурно-параметрической модели; во-вторых, соответствие требованиям ГОСТ Р МЭК 62381-2016 в части испытаний FAT, SAT и SIT; в-третьих, кадровое обеспечение процессов в рамках модели «цифровой фабрики». Алгоритм применим при создании «зеленой цифровой фабрики», масштабной цифровой трансформации действующей производственной системы, а также внедрении отдельных подсистем автоматизации (MES, IoT и др.).

4. Построена логико-функциональная структура производства обожженных анодов в контексте создания «цифровой фабрики» в виде метаграфа (метаграфовая модель «цифровой фабрики»), в которой выделены и описаны ключевые подсистемы и связи между ними. Ядром метаграфа является «фабрика данных», с которой связаны другие функциональные подсистемы прямыми и обратными информационными потоками, правилами обмена данными. Такая система позволяет выявлять «узкие» места в передовой производственной системе, количественно оценивать надежность и устойчивость функционирования подсистем и их элементов, локализовать точки управления качеством, проводить экспериментальные симуляции с подсистемами.

5. Систематизированы компетенции обслуживающего и оперативного персонала «цифровой фабрики», а также сквозные компетенции сотрудников, что позволяет формировать программы обучения и аттестации, минимизировать

человеческие ошибки на критических стадиях технологического процесса, обеспечить эффективную и безопасную эксплуатацию «цифровой фабрики».

6. Разработана процессно-компетентностная модель цифровой трансформации производственной системы, сформированная путем объединения процессного и компетентностного подхода к внедрению «цифровой фабрики», основанная на трактовке кадрового обеспечения как критически важного процесса, встроенного в алгоритм интеграции «цифровой фабрики», позволяющая минимизировать риски, связанные с человеческим фактором.

3 СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В РАМКАХ РАЗВЕРТЫВАНИЯ «ЦИФРОВОЙ ФАБРИКИ»

3.1 Развитие системы показателей эффективности блока планирования производства

Переход от классических методов организации производства к цифровым инструментам управления характеризуется изменением способов управления данными и скорости реагирования на изменения под влиянием внутренних и внешних факторов, что в результате позволяет эффективно реализовать «тянущий» принцип управления материальными потоками. В отличие от традиционных моделей предприятия «цифровая фабрика» базируется на организации киберфизических систем, их взаимодействия между собой и с физическими объектами и процессами.

Как следствие, в условиях цифровой трансформации традиционных подходов к оценке эффективности производственных систем недостаточно. Требуется усовершенствованная методика оценки эффективности производственной системы, учитывающая специфику цифровых моделей и предиктивных алгоритмов.

Данная проблематика нашла отражение в научных исследованиях, посвященных моделированию деятельности предприятия с учетом совокупности ориентированных графов [60], цифровому управлению производительностью [134], оценке эффективности цифрового труда [19] и т.д.

Особый интерес представляют разработки Савич Е.К., работы которой посвящены оценке качества функционирования цифровой платформы системы менеджмента качества (СМК) [82]. Автор использует метод интегральной оценки и предлагает оценку таких показателей, как индекс результативности процессов СМК, индекс цифровой зрелости процессов СМК, индекс качества данных, индекс пользовательской эффективности, индекс адаптивности процессов СМК. Оценка

цифровой СМК на верхнем уровне методики предполагает сумму взвешенных значений перечисленных индексов. Эталонное значение интегрального показателя – более 90%. Однако исследование ограничено блоком управления качеством.

В исследовании Скобелева К.Д. методика также сфокусирована на системе менеджмента качества в контексте оценки ее результативности. Автором предложена методика оценки качества функционирования испытательной лаборатории, а именно – система показателей в разрезе оценки результатов аудита, функционирования процессов и выполнения целей в области качества [89]. Однако речь идет не столько о цифровом производстве, сколько о развитии испытательных лабораторий.

Как следствие, обзор известных подходов позволяет судить об отсутствии разработанной методики оценки эффективности производства в условиях модели «цифровой фабрики».

В основе разработки усовершенствованной методики лежит формулирование базовых положений.

В отличие от традиционного производства модель цифровой фабрики основана на потоковых процессах, адаптивном принятии решений, обработке данных в режиме реального времени в контексте управления процессами или изделиями. Исходя из этого предъявляются следующие требования к методике оценки: учет динамического характера производственных процессов, оценка качества управления, определение синергетического эффекта взаимодействия цифровых компонентов.

К ключевым принципам усовершенствованной методики могут быть отнесены:

- иерархичность структуры показателей по уровням управления;
- динамичность показателей;
- интегральность (учет взаимосвязей между оцениваемыми параметрами).

Как было отмечено ранее, фокус внимания автора обращен на три ключевые блока «цифровой фабрики»: планирование (календарное и оперативное), управление качеством и управление материалами.

Цифровая специфика данных модулей заключается в следующем:

- 1) планирование: наличие обратной связи в режиме реального времени, что расширяет границы план-фактного анализа до перманентной адаптации планов;
- 2) управление качеством: происходит трансформация от контроля результатов к контролю параметров процесса и предсказанию отклонений на основе предиктивной аналитики;
- 3) управление материалами: возможность управлять каждой единицей материалов в режиме реального времени.

Источниками данных для оценки показателей служат автоматизированные системы – MES, система аналитического контроля, система контроля качества процессов, система управления рецептурами и др. Это исключает ошибки ручного ввода данных, ускоряет процессы мониторинга, планирования и прогнозирования, повышает достоверность результатов оценки.

Кроме того, внедрение усовершенствованной методики требует учета следующих условий:

- интеграция методики с системой искусственного интеллекта;
- интеграция в контур цифровой фабрики с уточнением периодичности мониторинга, пороговых значений, лица, принимающего решения;
- гибкость методики, обеспечивающая возможность внесения корректив в состав показателей, весовых коэффициентов, нормативных значений по мере накопления статистических данных и модернизации производственной системы.

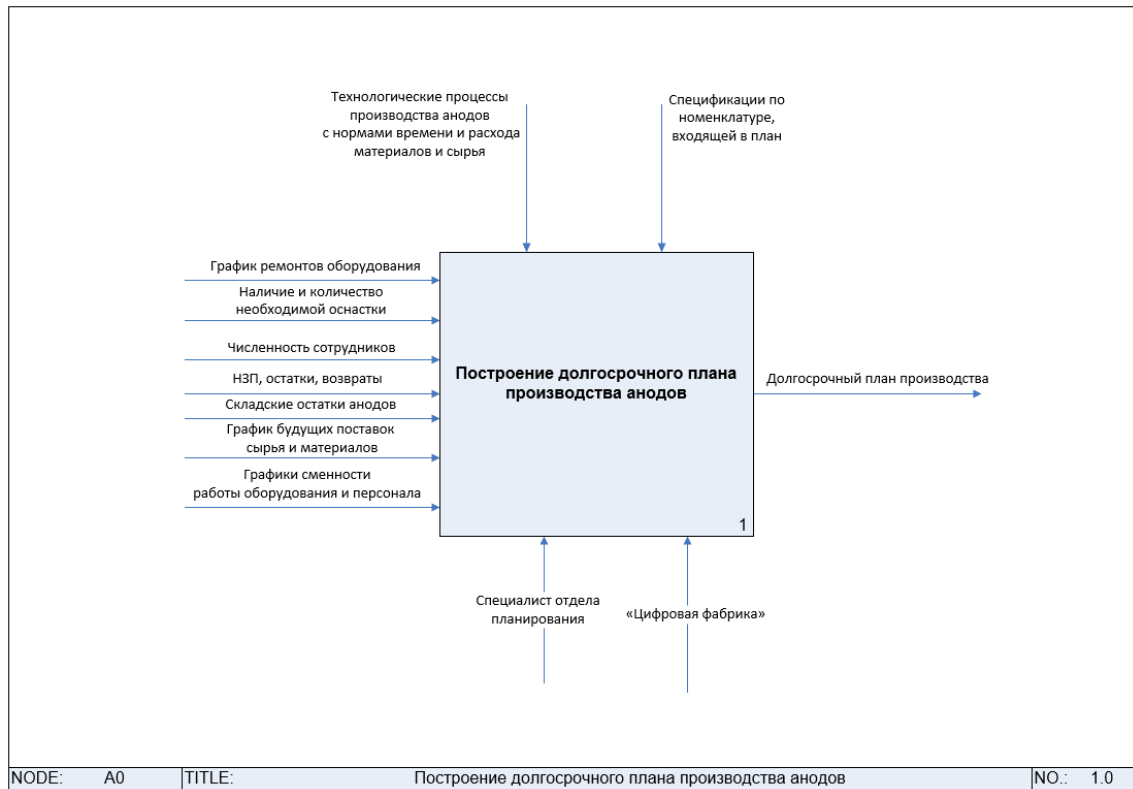
Процесс реализации методики можно описать обобщенной последовательностью этапов (рисунок 3.1). Представленная схема описывает механизм обратной связи, за счет измерения в режиме реального времени позволяет оперативно выявлять «узкие» места, оценивать эффект цифровизации производства, служит основой разработки регламента оценки эффективности цифрового производства.

Далее сформулированы методические положения в области эффективности планирования: схема организации процессов, алгоритмы планирования, система показателей.

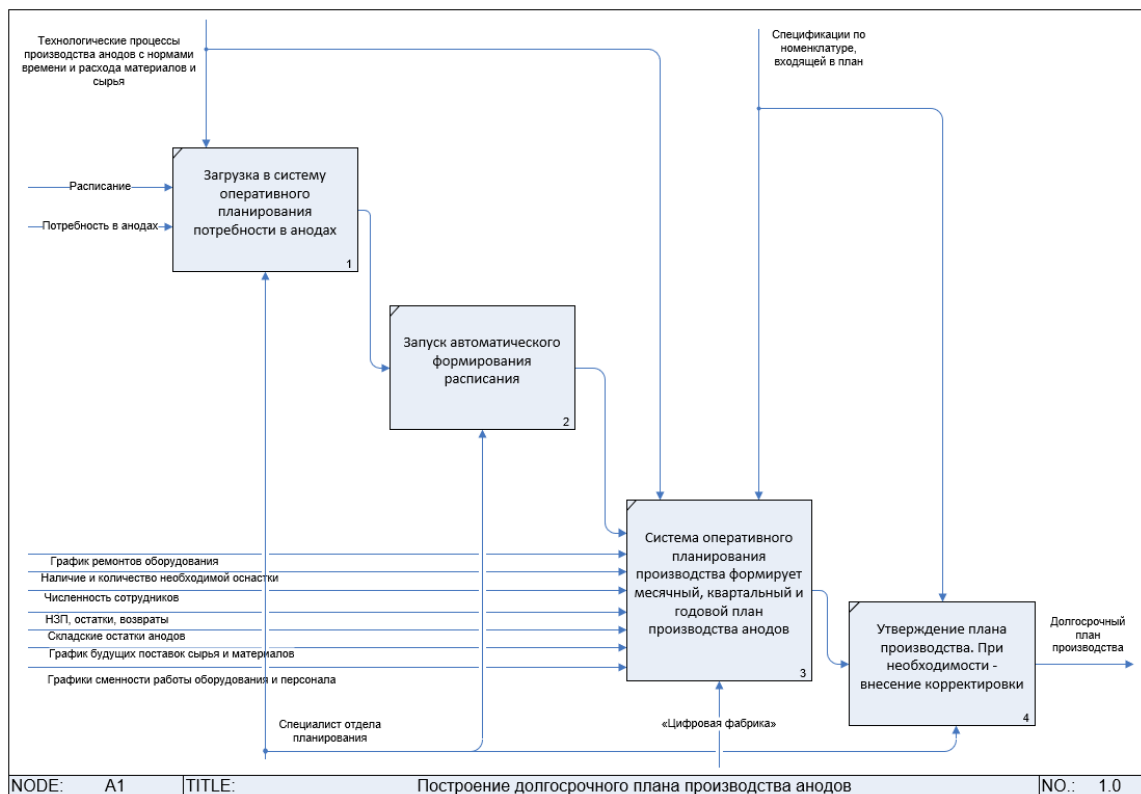


Рисунок 3.1 – Этапы оценки эффективности «цифровой фабрики» (составлено автором)

Организация процессов различается при горизонтах планирования. В связи с этим построены логико-информационные модели, различающиеся по этапам планирования и использования инструментария «цифровой фабрики». Схема организации планирования производства в долгосрочной перспективе (рисунок 3.2) отражает четыре ключевых этапа, где специалист отдела планирования осуществляет подготовку данных, а «цифровая фабрика» формирует планы.



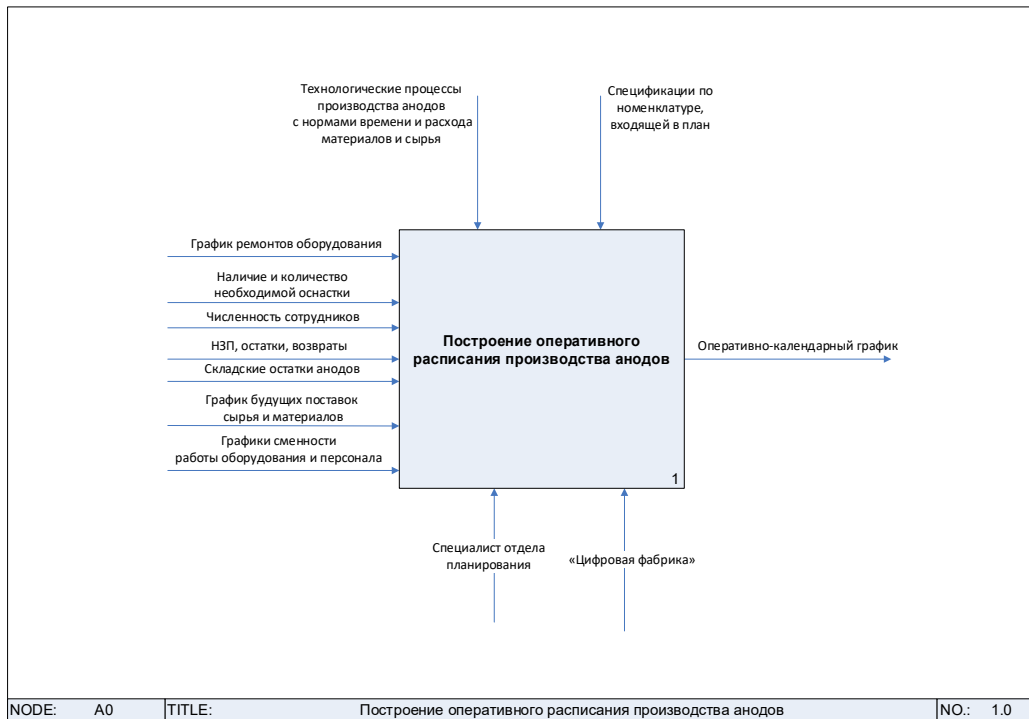
а) Контекстная диаграмма



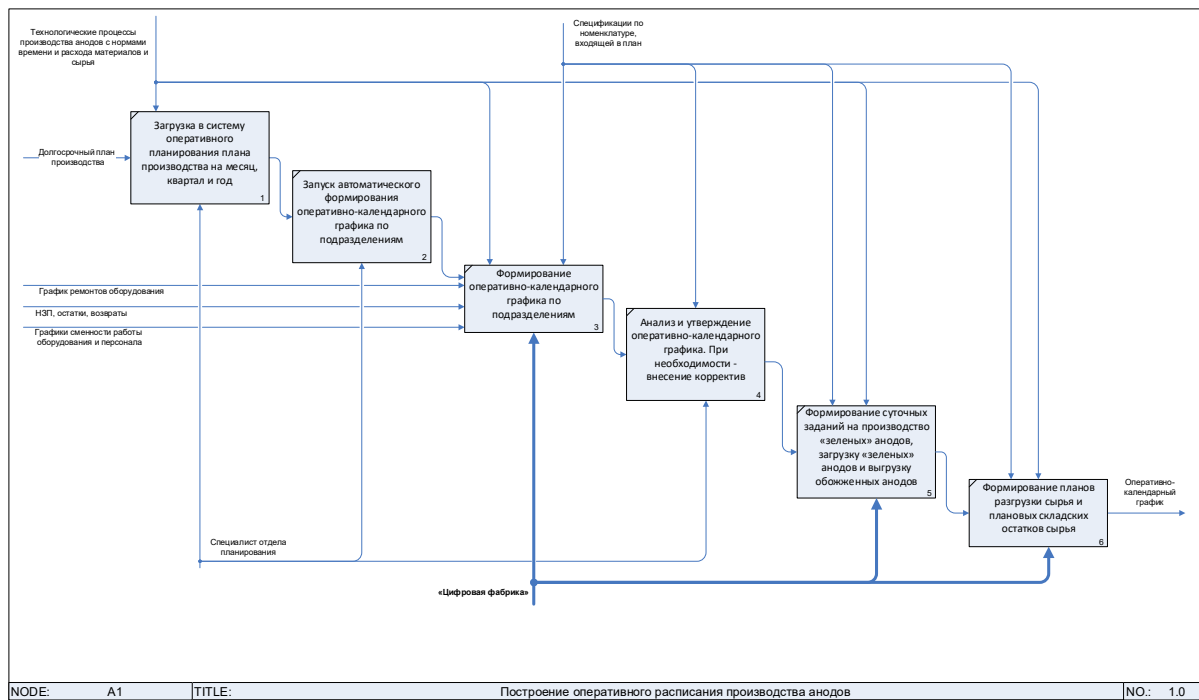
б) Декомпозиционная схема

Рисунок 3.2 – Схема организации планирования производства в долгосрочной перспективе

На рисунке 3.3 представлена схема организации планирования производства на сутки. Участие специалиста и «цифровой фабрики» чередуется в зависимости от задач.



а) Контекстная диаграмма



б) Декомпозиционная схема

Рисунок 3.3 – Схема построения оперативного расписания

Следующий компонент методики – алгоритмы планирования. «Цифровая фабрика» предусматривает альтернативные алгоритмы.

1) Планирование в прямой последовательности. Алгоритм предполагает последовательную загрузку заказов и размещение каждой операции (код операции: 10, 20 и т.п.) на доске планирования на необходимый ресурс в первом доступном временном интервале (рисунок 3.4). Последовательность задается оператором: загрузка по дате заказа или приоритетности заказа.

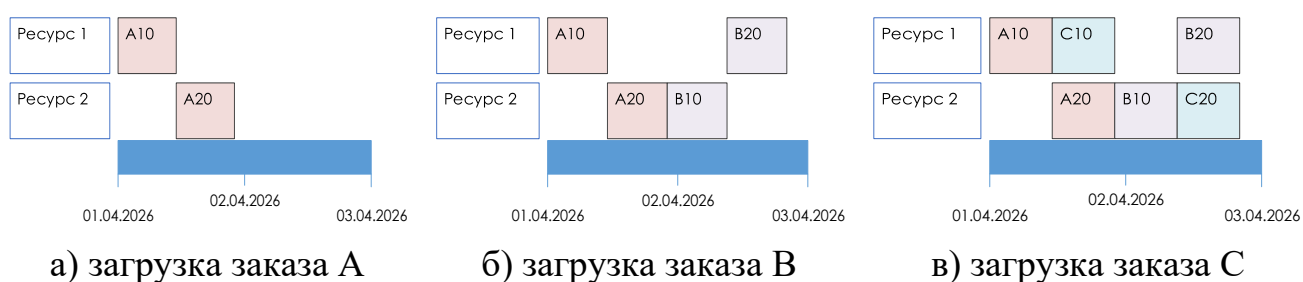


Рисунок 3.4 – Алгоритм планирования производства в прямой последовательности

2) Планирование в обратной последовательности. Оперативное планирование загрузки заказов начинается с планирования последней операции, с целью выполнить заказ в срок (рисунок 3.5).

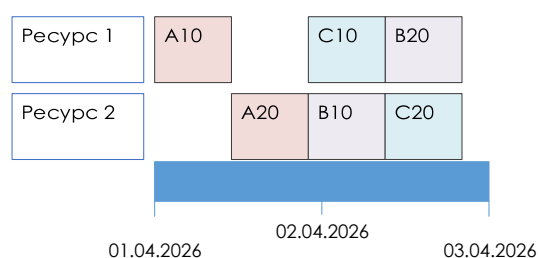


Рисунок 3.5 – Алгоритм планирования производства в обратной последовательности

3) Предпочтительная последовательность. Данный алгоритм определяется следующими данными:

- коэффициент критического соотношения (отношение времени, оставшегося до срока сдачи заказа, ко времени, необходимому для его завершения): чем меньше значение коэффициента, тем критичнее ситуация с выполнением заказа в срок;

- дата отгрузки заказа;
- время выполнения операции;
- время наладки оборудования;
- приоритетность;
- атрибуты продукции;
- период планирования (дней).

4) Минимизация незавершенного производства в прямой и обратной последовательности. Алгоритм ориентирован на сокращение времени выполнения каждого заказа.

5) Выбираемое «узкое место». В основе алгоритма лежит теория ограничений. Оператор выбирает ресурсы, являющиеся «узким местом» в производственной системе и имеющие низкую производительность. Далее алгоритм планирует заказ в обратном порядке от даты сдачи заказа с учетом настраиваемого времени буфера доставки. Однако «узкое место» будет меняться в зависимости от портфеля заказов в производстве.

6) Динамическое «узкое место». Алгоритм вычисляет «узкое место» индивидуально для каждого заказа. Операции после «узкого места» планируются в обратной последовательности, используя буфер узкого места и доставки, как в предыдущем алгоритме.

7) Собственные правила планирования. Предполагается предоставление системе возможности самостоятельно определять алгоритм планирования производства, включая критерии, атрибуты, последовательность.

Третий компонент методики – показатели. Выделены 3 группы показателей.

1) Принимая во внимание критерий скорости расчетов и обновления данных, можно выделить показатель временной эффективности (Π_v), в соответствии с которым устанавливается время расчета расписания на конкретный горизонт

планирования. Целевые значения показателя Π_B различаются по горизонтам планирования следующим образом:

- а) сутки ($\Pi_{B(1)}$) – до 10 минут;
- б) неделя ($\Pi_{B(2)}$) – до 30 минут;
- в) месяц ($\Pi_{B(3)}$) – до 1 часа;
- г) год ($\Pi_{B(4)}$) – до 12 часов.

Выполнение или невыполнение показателя может оцениваться двоичной системой (1 и 0; 100% и 0 соответственно). Показатели позволяют реализовать многовариантное ситуационное моделирование и определить оптимальный сценарий.

2) Вторая группа показателей оценивает точность и скорость реагирования на отклонения (Π_{TC}):

а) точность прогнозирования сроков выполнения заказов (например, цветовые индикаторы для обозначения заказов, которые не могут быть выполнены в срок при текущем производственном расписании), $\Pi_{TC(1)}$;

б) степень выявления факторов невыполнения заказов – способность модели идентифицировать причины («узкие» места), $\Pi_{TC(2)}$;

в) скорость реагирования на отклонения – время от обнаружения отклонения до корректировки производственного расписания, $\Pi_{TC(3)}$.

3) Коэффициент адаптивности планирования (Π_{ap}) отражает способность системы сохранять эффективность при возникновении возмущений, представляет собой относительный показатель, зависящий от времени реакции в цифровой модели и времени реакции в традиционной модели.

Помимо представленных частных показателей также возможно оценить интегральную эффективность планирования (Π_{Σ}), которая обусловлена корректностью алгоритмов планирования, вычислений и математических моделей (рисунок 3.6). Речь идет о мультипликативной функции зависимости от взвешенных значений (w_i) производительности, результативности и адаптивности планирования. Выбор в пользу мультипликативной зависимости обусловлен тем, что, во-первых, в аддитивной функции один компонент с низким значением может

компенсироваться другим компонентом с высоким значением; во-вторых, мультипликативный подход исключает механизм компенсации, т.е. если один из компонентов функции стремится к 0, то и интегральный показатель будет стремиться к 0, что должно расцениваться как тревожный сигнал.

Существует ряд подходов к определению весовых коэффициентов: экспертный, метод последовательных исключений, ранжирование по величине стоимостных или временных потерь, метод анализа иерархий и др. Остановимся на последнем. Метод анализа иерархий основан на попарном сравнении критериев и балльной оценке важности. Если оцениваемый критерий важнее – 2 балла, примерно равная важность – 1 балл, менее важный – 0 баллов.



Рисунок 3.6 – Трёхпараметрический подход к оценке эффективности планирования в условиях «цифровой фабрики» (составлено автором)

Примем в основу утверждение, что результативность планирования приоритетнее производительности и адаптивности, производительность важнее адаптивности. Далее путем суммирования баллов и ранжирования показателей определяется весовой коэффициент (таблица 3.1).

Таблица 3.1 – Определение весовых коэффициентов методом анализа иерархий (рассчитано автором)

Показатели	Пр	Р	А	Σ баллов	Ранг	Вес
Пр	-	0	2	2	2	0,3
Р	2	-	2	4	3	0,5
А	0	0	-	0	1	0,2

Данные значения применимы для расчета эффективности планирования производства в условиях «цифровой фабрики», формула которой представлена выше (рисунок 3.6).

А) *Производительность планирования* (Пр) показывает, как быстро цифровая система производства составляет и корректирует расписание. Система оперативного планирования формирует месячный, квартальный и годовой план производства анодов, а также суточные задания на производство и загрузку «зеленых» анодов и выгрузку обожженных анодов. Учитывая горизонты планирования, формула расчета показателя производительности планирования может быть уточнена (3.1):

$$Пр_i = \frac{T_{норм,i}}{T_{факт,i}}, \quad (3.1)$$

где i – горизонт планирования: 1 – сутки, 2 – неделя, 3 – месяц, 4 – год;

$T_{норм,i}$, $T_{факт,i}$ – нормативное и фактическое время расчета производственного расписания (нормативное время указано выше).

Значения показателя, превышающие 1, следует признать удовлетворительной производительностью (расчет осуществляется быстрее, чем установлено нормативом); менее 1 – неудовлетворительной. Невыполнение целевого показателя является критичным как для суточных графиков производства, так и для годовых планов (таблица 3.2). Степень критичности снижается от суточного планирования до годового.

Таблица 3.2 – Степень критичности невыполнения плана (составлено автором)

Период	Степень критичности	Обоснование
Сутки	****	Нарушение суточного графика ведёт к срыву отгрузки заказов, остановке печей обжига, простоем смежных переделов. Поломка оборудования или брак требуют немедленного перепланирования.
Неделя	***	График поставок сырья формируется еженедельно. Недельный горизонт позволяет синхронизировать производство «зеленых» анодов с поступлением кокса и пека без остывания печей.
Месяц	**	Месячный план производства, необходимый для расчёта потребности в сырье и загрузки печей, пересматривается реже, чем суточный / недельный, так как ремонты в основном заранее запланированы.
Год	*	Стратегический горизонт для планирования бюджета и закупки оборудования. Запускается по графику (не по событию). Скорость расчёта не критична для оперативного управления, так как изменения вносятся редко.

Примечание: **** – высокая, * – низкая

Следует также дополнить, что производительность как частный показатель является универсальным и прозрачным показателем для любой производственной системы. С учетом специфики технологии производства анодов можно выделить 2 блока производства и соответствующий показатель планирования:

а) смесильно-прессовое отделение, обеспечивающее условия производства «зеленых» анодов:

- участок подготовки анодной массы (показатель – производительность тонн в час);

- участок прессования анодной массы (показатель – производительность тонн в час);

б) производство «обожжённых» анодов (производительность задается временем хода движения огня).

Б) *Результативность планирования (Р)*. Показатель демонстрирует точность планирования и реализации оперативного расписания. С точки зрения производства анодов к частным показателям результативности планирования следует отнести:

- соблюдение плановых сроков формирования, охлаждения, обжига и отгрузки смонтированных анодов (I_1):

$$I_1 = \frac{1 - D_{\text{факт}}}{1 - D_{\text{план}}}, \quad (3.2)$$

где $D_{\text{факт}}$, $D_{\text{план}}$ – фактическая и плановая доля партий, отгруженных с нарушением срока;

- выполнение годового, месячного, недельного плана и суточного задания (по объему работ или трудозатратам) (I_2):

$$I_2 = \frac{Q_{\text{факт}}}{Q_{\text{план}}}, \quad (3.3)$$

где $Q_{\text{факт}}$, $Q_{\text{план}}$ – фактический и плановый объём производства;

- уровень брака (I_3):

$$I_3 = \frac{1 - B_{\text{факт}}}{1 - B_{\text{план}}}, \quad (3.4)$$

где $B_{\text{факт}}$, $B_{\text{план}}$ – фактическая и допустимая доля брака.

Ключевой показатель результативности может быть выражен в виде среднего арифметического значения I_1 , I_2 , I_3 :

$$P = \frac{I_1 + I_2 + I_3}{3}, \quad (3.5)$$

где 3 – количество включенных показателей;

I_i – включенные показатели результативности планирования производства.

В) *Адаптивность системы планирования (А)*. Показатель характеризует скорость реагирования «цифровой фабрики» на отклонения, которые негативно

сказываются на выполнении текущих планов, и корректирования расписания. Для этого предлагается использовать следующую формулу (3.6):

$$A = \frac{V_{\text{эталон}}}{\max(V_{\text{факт},1}, V_{\text{факт},2}, \dots, V_{\text{факт},n})}, \quad (3.6)$$

где $V_{\text{эталон},i}$, $V_{\text{факт},i}$ – эталонное и фактическое время реагирования системы (время от возникновения события до формирования и выдачи нового корректного расписания).

Если сбоев и возмущений не было, то A составит 1; при значениях A ниже 1 имеет место неудовлетворительная адаптивность системы; при значениях A выше 1 можно судить о достаточной адаптивности «цифровой фабрики».

Далее систематизированы методика и источники данных для оценки эффективности планирования производства в условиях «цифровой фабрики» (таблица 3.3), что позволяет структурировать источники информации и автоматизировать расчет трёхкомпонентного критерия эффективности планирования в режиме реального времени, выявлять «узкие места» в информационном обеспечении подсистемы планирования.

Таблица 3.3 – Источники данных для реализации и автоматизации предложенной методики (составлено автором)

Показатель	Формула расчета	Источники данных
Производительность планирования (Пр)	$\text{Пр}_i = \frac{T_{\text{норм},i}}{T_{\text{факт},i}},$ $T_{\text{норм},i}$, $T_{\text{факт},i}$ – нормативное и фактическое время расчета производственного расписания.	- APS / MES (журналы времени выполнения планирующих алгоритмов), - цифровой двойник (время симуляции расписаний), - система мониторинга ИТ-сервисов (журналы сервера планирования).

Продолжение таблицы 3.3

Показатель	Формула расчета	Источники данных
Результативность планирования (Р)	$P = \frac{I_1 + I_2 + I_3}{3},$ 3 – количество показателей; I_i – включенные показатели результативности планирования производства.	- MES (факт/план по количеству, срокам, браку анодов), - АСУТП (режимные параметры), - ERP (плановые / целевые показатели, нормативы, эталонные значения), - система управления качеством (данные о дефектах).
Адаптивность системы планирования (А)	$A = \frac{V_{\text{эталон}}}{\max(V_{\text{факт},i})},$ $V_{\text{эталон},i}$, $V_{\text{факт},i}$ – эталонное и фактическое время реагирования системы.	- MES (время фиксации события и время выдачи скорректированного плана / расписания), - АСУТП (момент отклонения параметров – авария, простой, брак), - SCADA (сигналы о сбоях), - журналы событий «цифровой фабрики», «фабрика данных», - система оповещений (для начала отсчета).

Шкалирование значений интегрального показателя эффективности планирования ($P_{\text{эп}}$) основано на положении о том, что максимальное значение составных показателей (ПР, Р и А) составляет 1 (таблица 3.4).

Таблица 3.4 – Уровни эффективности планирования производства (составлено автором)

Уровень	Диапазон значений	Характеристика	Периодичность мониторинга
Эталонный	$P_{\text{эп}} \geq 0,9$	«Цифровая фабрика» функционирует в соответствии с целевыми установками, в штатном режиме. Акцент на формировании больших данных	Ежемесячно
Стабильный	$0,8 \leq P_{\text{эп}} < 0,9$	Допустимый уровень эффективности, отклонения возникают эпизодически, что требует выявления «узких мест» и адресной оптимизации процессов	Еженедельно
Неустойчивый	$0,7 \leq P_{\text{эп}} < 0,8$	Требуется аудит процессов, качества данных, и корректирующие воздействия	Ежедневно
Критический	$P_{\text{эп}} < 0,7$	Система требует существенной модернизации подсистемы планирования и смежных подсистем	Немедленно

Предложенная мультипликативная модель показателей эффективности блока планирования производства позволяет количественно оценить синергетический эффект сбалансированного развития трех аспектов планирования – расчётно-оптимизационного, исполнительского и реактивного.

3.2 Формирование алгоритма предиктивного управления качеством на основе анализа больших данных

В параграфе 2.1 настоящего исследования была представлена структурная схема блока управления качеством, который включает 3 модуля:

- автоматизированная система аналитического контроля (АСАК);
- автоматизированная система управления рецептурами (АСУР);
- система контроля качества процессов (СККП).

Принимая во внимание включенные элементы, интегральная эффективность подсистемы управления качеством ($P_{\text{зук}}$) представляет собой мультипликативную функциональную зависимость от показателей эффективности трех элементов (3.7):

$$P_{\text{зук}} = P_{\text{засака}}^{w(\text{АСАК})} * P_{\text{засур}}^{w(\text{АСУР})} * P_{\text{зскпп}}^{w(\text{СККП})}. \quad (3.7)$$

Взвешивание показателей реализовано методом анализа иерархий (таблица 3.5). Приоритетность $P_{\text{засака}}$ обусловлена критичностью контроля сырья и продукции, реализуемого в лаборатории. Контроль качества процессов и управление рецептурами уступают по критичности, но не менее важные автоматизированные подсистемы управления качеством. Расчетные значения весов являются базовым вариантом методики и могут быть скорректированы в условиях программы организации конкретного производства.

Таблица 3.5 – Определение весовых коэффициентов методом анализа иерархий (рассчитано автором)

Показатели	$P_{\text{АСАК}}$	$P_{\text{АСУР}}$	$P_{\text{СКПП}}$	Σ баллов	Ранг	Вес
$P_{\text{АСАК}}$	-	2	2	4	3	0,4
$P_{\text{АСУР}}$	0	-	1	1	2	0,3
$P_{\text{СКПП}}$	0	1	-	1	2	0,3

1) Автоматизированная система аналитического контроля также требует новых измерительных инструментов, что связано с предиктивностью и прослеживаемостью (рисунок 3.7). Интегральный показатель эффективности АСАК позволяет оценить повышение качества продукции, снижение затрат, рисков, увеличение количества исследований в лаборатории, степень интеграции в цифровое пространство в результате перехода к модели «цифровой фабрики».

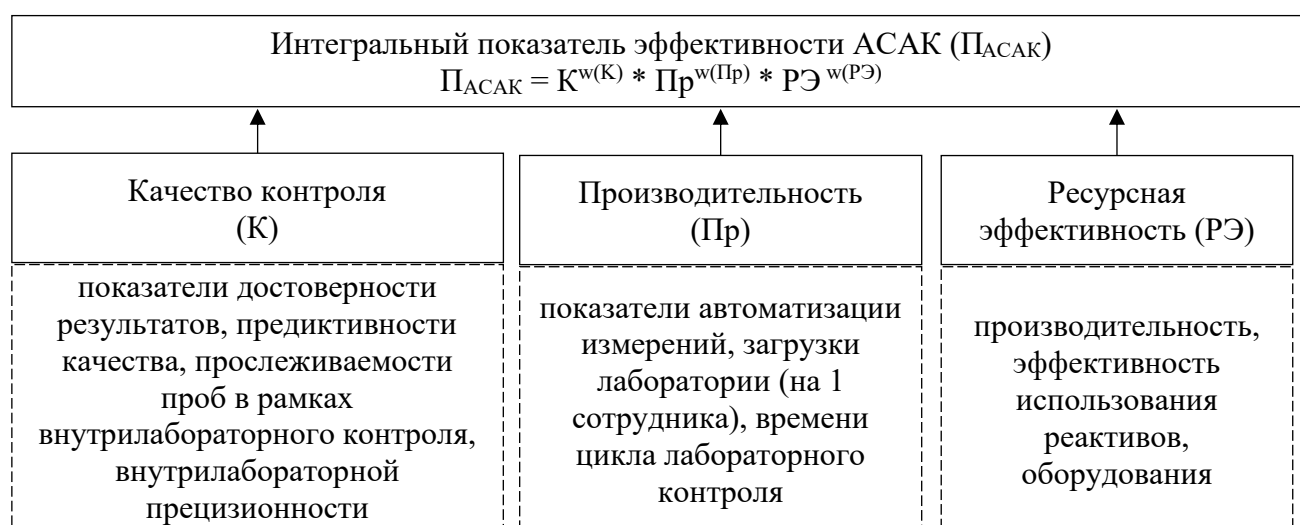


Рисунок 3.7 – Интегральный подход к оценке эффективности автоматизированной системы аналитического контроля (составлено автором)

Для каждого компонента (K, Pr, PЭ) предложена система метрик, адекватная условиям анодного производства и «цифровой фабрики» (таблица 3.6). С целью избежать перегруженности формул решено включить по 3 наиболее важных показателя в каждый из трех компонентов.

Таблица 3.6 – Метрики оценки эффективности АСАК (составлено автором)

Показатели	Формула	Сущность
Качество контроля ($K = kk_1 * kk_2 * kk_3$)		
Достоверность результатов	$kk_1 = \frac{N_{\text{верн}}}{N_{\text{общ}}},$ $N_{\text{верн}}, N_{\text{общ}}$ – количество проведенных исследований (верных и всего).	Доля результатов исследований, подтверждённых контрольными образцами.
Предиктивность качества	$kk_2 = \frac{N_{\text{подтв.прогн.}}}{N_{\text{всего_прогн.}}},$ $N_{\text{подтв.прогн.}}, N_{\text{всего_прогн.}}$ – количество прогнозов подтверждённых и всего.	Доля случаев, когда система точно предсказала отклонение качества.
Прослеживаемость проб	$kk_3 = \frac{N_{\text{полн.ЖЦ}}}{N_{\text{всего_проб}}},$ $N_{\text{полн.ЖЦ}}, N_{\text{всего_проб}}$ – количество проб, жизненный цикл которых прослеживается полностью, и общее число проб.	Степень полноты данных о конкретном экземпляре анода на каждом этапе технологического процесса.
Производительность ($Пр = пр_1 * пр_2 * пр_3$)		
Автоматизация измерений	$пр_1 = \frac{N_{\text{авт}}}{N_{\text{общ}}},$ $N_{\text{авт}}, N_{\text{общ}}$ – количество методик измерений, автоматизированных и общее.	Доля «безлюдных» методик, со сквозной автоматизацией измерений.
Загрузка лаборатории	$пр_2 = \frac{N_{\text{проб}}}{ПС},$ $N_{\text{проб}}$ – количество проб, анализируемых за период; $ПС$ – пропускная способность лаборатории.	Уровень фактической загрузки лаборатории относительно ее возможностей.
Время цикла лабораторного контроля	$пр_3 = \frac{T_{\text{цнорм}}}{T_{\text{цфакт}}},$ $T_{\text{цнорм}}, T_{\text{цфакт}}$ – нормативное и фактическое время цикла лабораторных исследований.	Степень оперативности работы АСАК в условиях «цифровой фабрики».
Ресурсная эффективность ($РЭ = рэ_1 * рэ_2 * рэ_3$)		
Производительность	$рэ_1 = \frac{N_{\text{проб}}}{T},$ $N_{\text{проб}}$ – количество проб, прошедших лабораторное исследование за время T .	Эффективность работы лаборантов, функционирования лаборатории в целом.
Эффективность использования реактивов	$рэ_2 = \frac{P_{\text{норм}}}{P_{\text{факт}}},$ $P_{\text{норм}}$ и $P_{\text{факт}}$ – нормативное и фактическое значение расхода реактивов.	Нормативное, экономное использование реактивов или перерасход.
Загрузка оборудования	$рэ_3 = \frac{\sum_{i=1}^n t_{\text{лаб.иссл.}}}{T_{\text{доступ}}},$ $t_{\text{лаб.иссл.}}$ – суммарное время, затраченное на лабораторные исследования за конкретный промежуток времени; $T_{\text{доступ}}$ – доступное для лабораторных исследований время.	Степень использования лабораторного оборудования.

Путем взвешивания значений K , Pr и $PЭ$ рассчитывается интегральный показатель эффективности АСАК ($\Pi_{АСАК}$). Весовые коэффициенты также определены методом анализа иерархий (контроль качества приоритетнее производительности и ресурсной эффективности, производительность приоритетнее ресурсной эффективности), т.е. $w(K) = 0,5$; $w(Pr) = 0,3$; $w(PЭ) = 0,2$.

2) Автоматизированная система управления рецептурами. Система предназначена для управления рецептами и спецификациями, рецептурным документооборотом, а также выявления взаимосвязи между качеством готовой продукции и параметрами исполнения рецепта. В целях приведения расчетов к единому показателю, характеризующему эффективность АСУР, предложена структура, включающая 3 компонента: качество описания рецептур, оперативность согласования и эффективность рекомендаций, формируемых на основе данных из системы и ее блоков (рисунок 3.8).

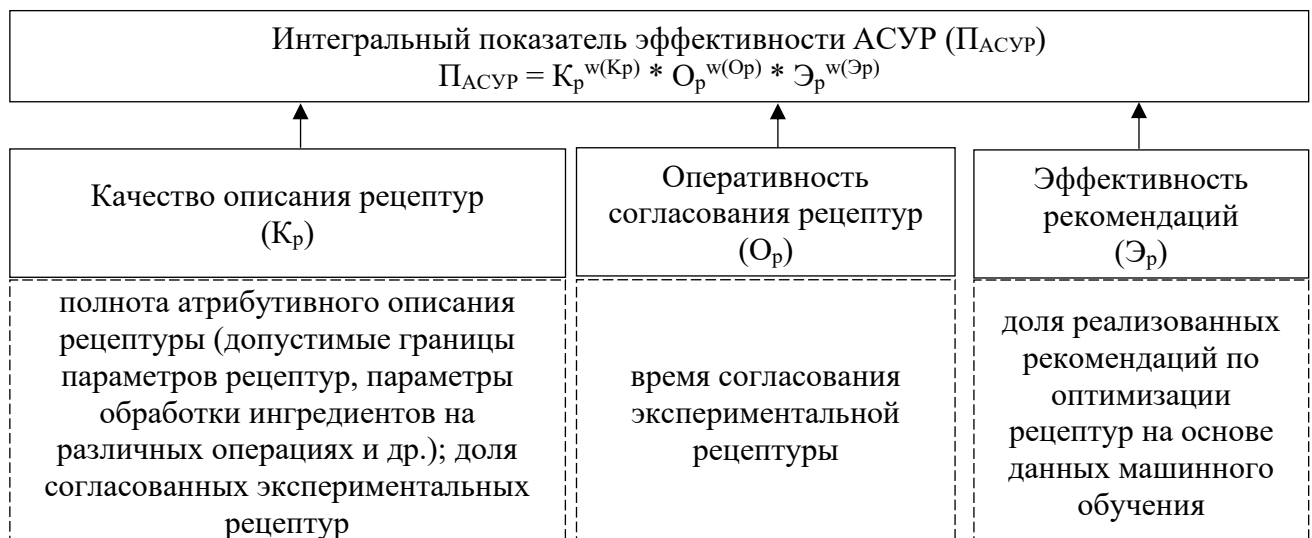


Рисунок 3.8 – Интегральный подход к оценке эффективности автоматизированной системы управления рецептурами (составлено автором)

Весовые коэффициенты определены методом анализа иерархий: $w(K_p) = 0,5$; $w(O_p) = 0,3$; $w(E_p) = 0,2$.

Перечень показателей (таблица 3.7) позволяет оценить, как полно описаны рецептуры, как быстро обновляется рецептурная база в соответствии с новыми

вводными параметрами, насколько успешно используются рекомендации машинного обучения, насколько корректно формулируются рекомендации искусственным интеллектом.

Таблица 3.7 – Метрики оценки эффективности АСУР (составлено автором)

Показатели	Формула	Сущность
Качество описания рецептур ($K_p = k_{p1} * k_{p2}$)		
Полнота атрибутивного описания рецептуры	$k_{p1} = \frac{N_{\text{полн.рец.}}}{N_{\text{общ.рец.}}},$ $N_{\text{полн.рец.}}$, $N_{\text{общ.рец.}}$ – количество рецептур с полным описанием и общее количество.	Степень отражения обязательных атрибутов: границы параметров, режимы обработки ингредиентов, допуски и т.д.
Доля согласованных экспериментальных рецептур	$k_{p2} = \frac{N_{\text{рец.}}}{N_{\text{общ.рец.}}},$ $N_{\text{согл.эксп.рец.}}$, $N_{\text{общ.эксп.рец.}}$ – количество согласованных в системе экспериментальных рецептур и общее их количество.	Доля процедур, прошедших согласование через АСУР
Оперативность ($O_p = o_{p1}$)		
Время согласования экспериментальной рецептуры	$o_{p1} = \frac{T_{\text{норм.рец.}}}{T_{\text{факт.рец.}}},$ $T_{\text{норм.рец.}}$, $T_{\text{факт.рец.}}$ – нормативное и фактическое время согласования рецептур.	Скорость прохождения этапов от создания рецептуры в системе до ее утверждения
Эффективность рекомендаций ($E_p = e_{p1}$)		
Доля реализованных рекомендаций по оптимизации рецептур на основе данных машинного обучения	$e_{p1} = \frac{N_{\text{реал.реком.}}}{N_{\text{общ.реком.}}},$ $N_{\text{реал.рек.}}$, $N_{\text{общ.рек.}}$ – количество принятых к реализации рекомендаций и их общее количество, полученное от системы машинного обучения.	Степень внедрения предложений системы машинного обучения в производстве

3) Система контроля качества процессов. В отличие от традиционного подхода, где ключевыми оцениваемыми параметрами являются дефекты, доля брака, цифровая фабрика требует оценки качества обнаружения отклонений, скорости реакции на них и эффективности предиктивного управления. В связи с этим целесообразно оценивать комплекс показателей, агрегированный по трем элементам (рисунок 3.9). Основой оценки перечисленных показателей служит автоматическая регистрация событий, интеграция с другими модулями и подсистемами цифровой фабрики, возможность накопления больших данных.

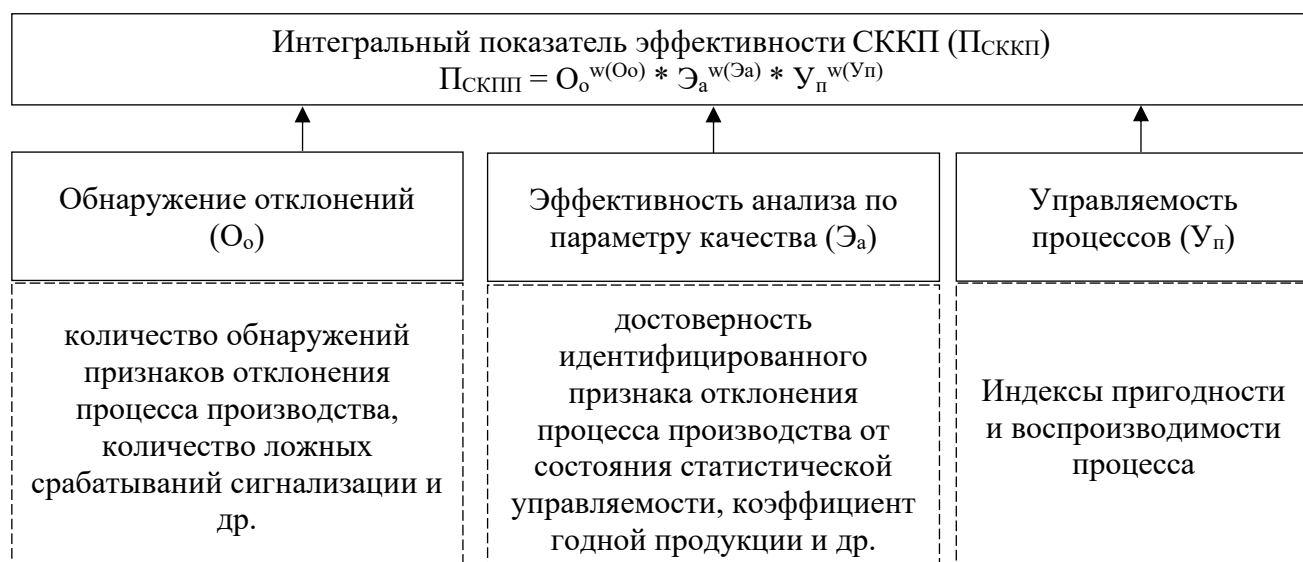


Рисунок 3.9 – Интегральный подход к оценке эффективности автоматизированной системы контроля качества процессов (составлено автором)

В таблице 3.8 представлена декомпозиция трех компонентов – обнаружения отклонений, эффективности анализа по качеству, управляемости процессов. Последний компонент характеризуется индексами пригодности и воспроизводимости процесса. Методические основы оценки индексов регламентированы ГОСТ Р ИСО 22514-4-2021 «Статистические методы. Управление процессами. Часть 4. Оценка показателей воспроизводимости и пригодности процесса». Ключевое отличие показателей состоит в том, что «для анализа пригодности процесса нет требований относительно наличия у процесса состояния статистической управляемости и применения для управления процессом контрольной карты» [11, с. 13].

Весовые коэффициенты для расчета интегрального показателя эффективности системы контроля качества процессов ($P_{СККП}$) присвоены по результатам анализа иерархий: обнаружение отклонений как фундамент всей системы контроля качества процессов более приоритетно ($w(O_o) = 0,5$), эффективность анализа ($w(\Theta_a) = 0,3$) приоритетнее пригодности и воспроизводимости процессов, которые, в свою очередь, являются результатом работы системы ($w(Y_n) = 0,2$).

Таблица 3.8 – Метрики оценки эффективности СККП

Показатели	Формула	Сущность
Обнаружение отклонений (O_o)		
Коэффициент обнаружения отклонений	$O_o = \frac{N_{\text{кор.}}}{N_{\text{реал.}} + N_{\text{проп.}}},$ $N_{\text{кор.}}$ – количество корректных обнаружений признаков отклонения процесса производства от состояния статистической управляемости; $N_{\text{проп.}}$ – количество пропущенных фактов отклонений.	Доля корректно выявляемых отклонений.
Эффективность анализа по параметру качества (Θ_a)		
Коэффициент эффективности анализа по параметру качества	$\Theta_a = D * O_o * \Gamma =$ $= \frac{N_{\text{кор.}}}{N_{\text{реал.}}} * O_o * \frac{V_k}{V_{\text{п}}}$ V_k – объем качественной продукции; $V_{\text{п}}$ – совокупный объем продукции.	Эффективность процессов с учетом брака.
Управляемость процессов ($Y_{\text{п}}$)		
Индексы пригодности и воспроизводимости процесса	$I_{\text{п}}/I_{\text{в}} = \frac{U - L}{X_{99,865\%} - X_{0,135\%}}$ U – верхняя граница поля допуска; L – нижняя граница поля допуска; $X_{99,865\%}$ и $X_{0,135\%}$ – квантили уровней 0,135 % и 99,865 %, их разность определяет опорный интервал.	Способность процесса обеспечить на выходе качественную (годную) продукцию.

Суммируя изложенное, обобщены методические положения в виде алгоритма предиктивного управления качеством (рисунок 3.10):

- 1) систематизация источников и сбор данных;
- 2) агрегирование, структурирование, трансформация (преобразование) сырых данных (нормализация, сортировка, группировка и т.д.);
- 3) расчет частных показателей эффективности функционирования подсистем управления качеством (АСАК, АСУР, СККП);
- 4) расчет интегральной эффективности блока управления качеством;
- 5) предиктивный анализ и формулирование рекомендаций в области организации производства обожженных анодов;
- 6) реализация корректирующих действий в соответствии с рекомендациями моделей машинного обучения (ML).

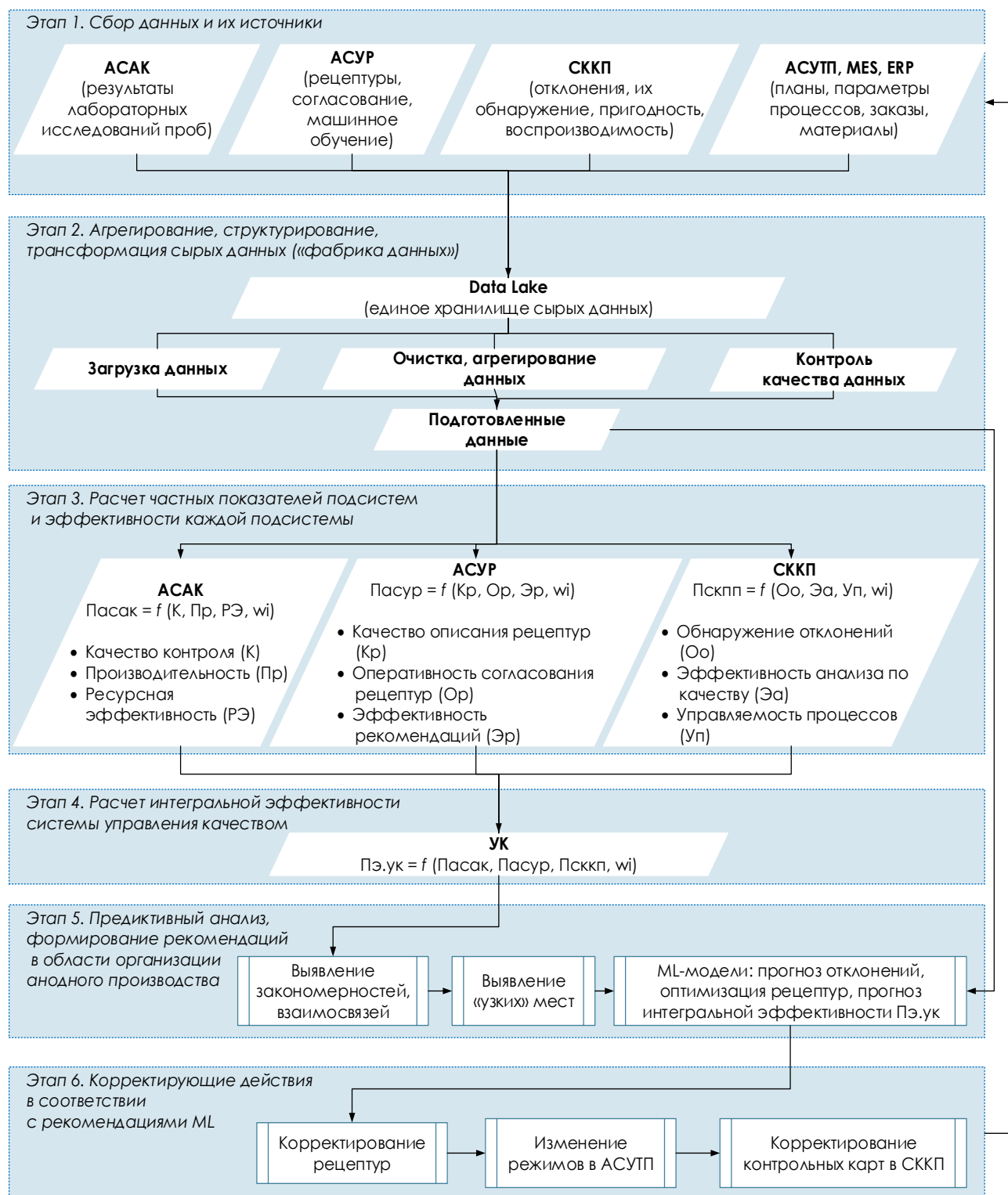


Рисунок 3.10 – Алгоритм предиктивного управления качеством в контексте «цифровой фабрики»

Таким образом, предложенный алгоритм предиктивного управления качеством в условиях реализации модели «цифровой фабрики» производства анодов основан на замкнутом цикле управления качеством с акцентом на

непрерывное совершенствование методик анализа проб в условиях лабораторных исследований, рецептур технологического пека, шихты сырого кокса, коксовой шихты и анодной массы, и, как следствие, качество процессов и готовой продукции.

3.3 Разработка методики оценки эффективности управления материалами

В производственной системе изготовления анодов следует выделить четыре принципиально важных блока управления материалами:

- 1) подсистема управления складом сырья;
- 2) подсистема управления складом «зеленых» анодов;
- 3) подсистема управления складом обожженных анодов;
- 4) подсистема прослеживаемости анодов (включает подсистему идентификации анодов и подсистему идентификации анододержателей).

В контексте «цифровой фабрики» приоритетную роль играет блок прослеживаемости, в связи с чем методика оценки эффективности управления материалами сфокусирована на данном элементе.

Функция прослеживаемости предназначена для автоматизации процесса идентификации конкретного экземпляра изделия на каждом этапе технологического процесса. Данные о жизненном цикле анодов и анододержателей передаются на уровень АСУТП в систему хранения производственных и технологических данных. Также подсистема прослеживаемости анодов обменивается данными с такими подсистемами «цифровой фабрики», как MES, управление качеством, ситуационный центр (рисунок 3.11).

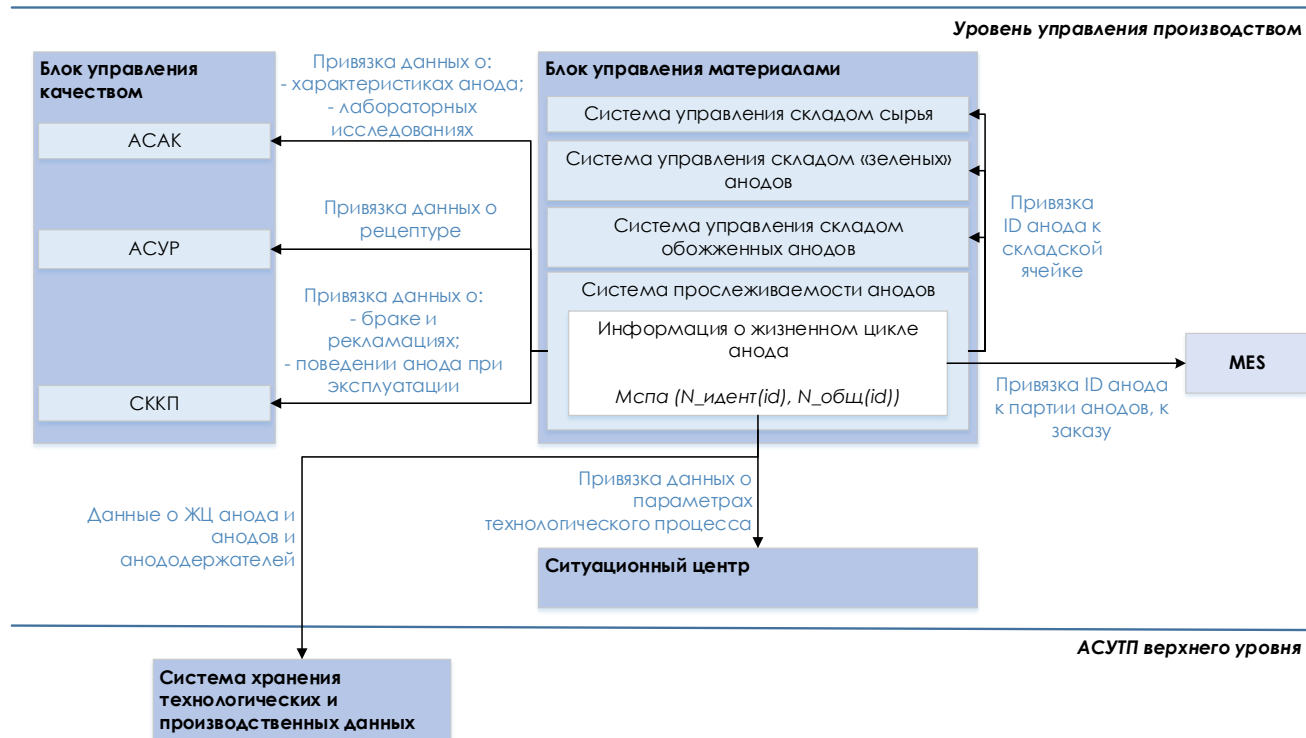


Рисунок 3.11 – Поток данных блока прослеживаемости со смежными подсистемами в среде «цифровой фабрики»

В процессе управления производственными операциями на основе возможности прослеживаемости анодов функционирование смежных подсистем позволяет оперативно выявлять и локализовать несоответствия, а также агрегировать данные в базах данных соответствующих подсистем (рисунок 3.12).

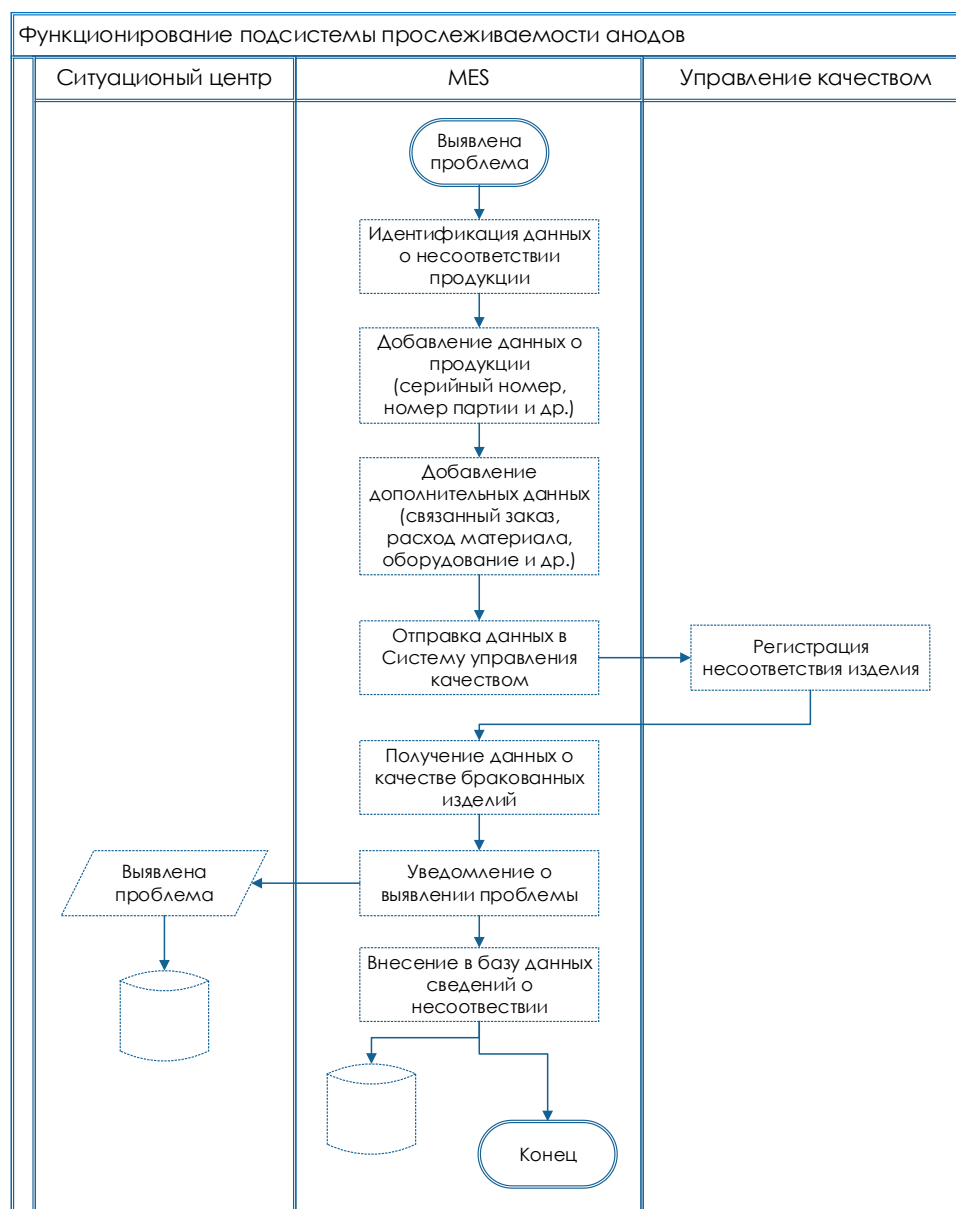


Рисунок 3.12 – Процесс прослеживаемости анодов в среде «цифровой фабрики»

В целях автоматизации процесса идентификации анода к ID должны быть привязаны данные, позволяющие отследить жизненный цикл соответствующего анода (рисунок 3.13). Отсюда следует, что каждому экземпляру анода присваивается уникальный код, который должен быть устойчив к различным технологическим воздействиям (высоким температурам, влажности, пыли и т.д.).

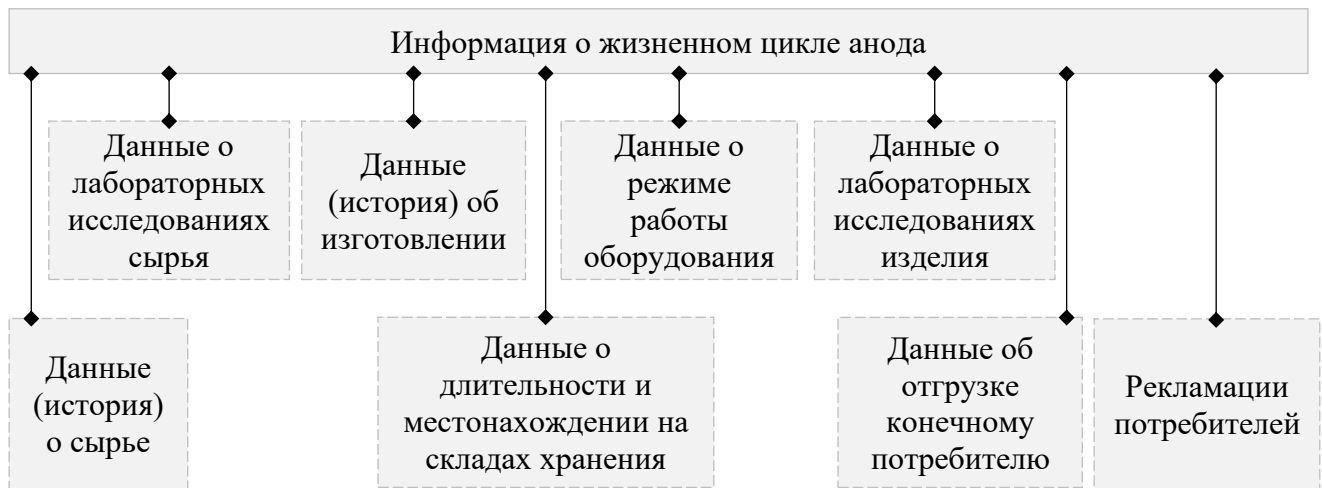


Рисунок 3.13 – Данные для обеспечения прослеживаемости анодов

Необходимость учета перечисленных данных предполагает расчет такого показателя, который отражает системный взгляд на функционирование «цифровой фабрики». В связи с этим предложен индекс непрерывности прослеживаемости анодов (3.8):

$$I_{\text{НП}(id)} = \frac{N_{\text{идент}(id)}}{N_{\text{общ}(id)}}, \quad (3.8)$$

где id – экземпляр анода;

$N_{\text{идент}(id)}$, $N_{\text{общ}(id)}$ – количество идентифицированных (успешно зафиксированных в MES) и общее количество контрольных точек жизненного цикла анода.

Представленный методический подход основан на сборе данных об анодах с целью управления качеством производственной системы.

Дополнительно могут быть рассмотрены также показатели:

– коэффициент информационной насыщенности основан на модели «сущность – связь» и позволяет определить полноту привязки данных к ID изделия (дата и время изготовления, номер партии, статус «годен» или «отбракован», отметка прохождения изделием устройств считывания кода и т.д.);

– коэффициент своевременности отбраковки, предназначенный для минимизации бракованных изделий и их доведения до следующих стадий после обнаружения.

Таким образом система обеспечивает прозрачность процессов и возможность выявления причинно-следственных связей в производстве.

Следует подчеркнуть, что в данном разделе диссертационного исследования фокус внимания обращен на специфичные для цифрового производства показатели. Безусловно, они не могут быть оценены изолированно от традиционных показателей эффективности – фондоотдачи, загрузки оборудования, производительности труда, оборачиваемости ресурсов и др. Более того, именно дополнение традиционной методики формирует целостное представление об эффективности производства, цифровой фабрики. Классические метрики оценивают преимущественно результат, в то время как показатели цифровой модели характеризуют качество процессов управления данными.

Выводы по главе 3

1. Сформулированы базовые положения усовершенствованной методики оценки эффективности производственной системы в условиях функционирования модели «цифровой фабрики» (принципы, требования, условия) и этапы оценки эффективности «цифровой фабрики».

2. Дополнение традиционной методики цифровыми показателями формирует целостное представление об эффективности производства в условиях реализации модели цифровой фабрики.

3. Предложена мультипликативная модель показателей эффективности блока планирования производства, обусловленная корректностью алгоритмов планирования, вычислений и математических моделей, дополненная источниками данных в модели «цифровой фабрики», что позволяет сформировать системный взгляд на процесс планирования производства.

4. Предложен алгоритм предиктивного управления качеством в условиях реализации модели «цифровой фабрики» производства анодов, основанный на

мультипликативной оценке эффективности блока управления качеством и его подблоков и сквозной обработке данных, отличающийся декомпозицией методики на три элемента (АСАК, АСУР, СККП), встроенной обратной связью и прогнозированием на основе моделей машинного обучения, позволяющий диагностировать текущий уровень эффективности, выявлять «узкие» места, формировать рекомендации по методикам анализа проб, рецептурам, организации процессов до момента возникновения брака.

5. Для оценки эффективности блока управления материалами предложено применять индекс непрерывности прослеживаемости, который носит сквозной характер (охватывает все этапы жизненного цикла анодов) и характеризует информационную полноту цифрового двойника анода, отличается требованием непрерывности прослеживаемости, позволяет квантифицировать (количественно выразить качественные признаки) потери данных в контексте управления качеством и жизненным циклом анодов, и, как следствие, уровень зрелости «цифровой фабрики».

6. Таким образом, разработан комплекс методических положений для структурных блоков цифровой фабрики (планирование, управление качеством, управление материалами), отличающийся от традиционной системы оценки эффективности производства включением специфичных для цифровой среды метрик, что создает инструментальную основу для количественной оценки цифровой трансформации производственной системы и управления ее эффективностью на принципиально новом уровне.

4 АПРОБАЦИЯ РАЗРАБОТАННЫХ ИНСТРУМЕНТОВ «ЦИФРОВОЙ ФАБРИКИ»

4.1 Систематизация требований к блокам планирования, управления качеством, управления материалами

Внедрению функций «цифровой фабрики» предшествует формулирование требований к системе и ее работе: к структуре и функционированию, кадровому обеспечению и режиму работы персонала, показателям оценки, надежности, эргономике, техническому обслуживанию системы, защите информации, патентной чистоте, стандартизации и унификации и т.д.

1) Требования к блоку календарного и оперативного планирования.

Ключевой особенностью трансформации системы планирования является переход от статичного планирования к динамичному, на основе поступающих в режиме реального времени данных об оборудовании, запасах сырья, персонале и т.д. Формируемые системой планы производства должны проходить валидацию в модуле цифрового двойника производственной системы с целью своевременного выявления «узких» мест и принятия превентивных мер до момента запуска физической системы.

а) Общие требования к подсистеме планирования заключаются в следующем (перечислены ключевые требования, которые могут быть расширены и уточнены):

- наличие функционала для управления производственным расписанием в автоматическом и ручном режиме, для создания индивидуальных сценариев и алгоритмов планирования в зависимости от особенностей технологического процесса;

- использование ограничений по кадровому обеспечению, вспомогательным ресурсам (оснастка и инструменты, электроэнергия, водные ресурсы и т.д.);

- возможность автоматической проверки вводимых вручную параметров расписания на соответствие технологии производства;

- возможность сценарного моделирования (неограниченное количество альтернативных планов) и варьирования значениями параметром расписания (производительность оборудования, численность персонала, графики работы, объемы запасов и др.);

- синхронизация с уровнем планирования ERP, а также автоматизированной системой управления производственным процессом (MES).

б) Требования к структуре и функционированию блока планирования:

- наличие таких модулей, как:

- настройка модели планирования (ведение справочника оборудования, вторичных ограничений, матриц переналадок и настройки оборудования);

- создание и настройка алгоритмов планирования (ведение перечня алгоритмов и правил планирования, создание и редактирование правил планирования);

- визуализация (диаграммы Ганта, цветовая индикация опаздывающих заказов, визуализация данных по плановой загрузке оборудования или производственного персонала и т.д.);

- формирование отчетов (конфигурирование, формирование и просмотр периодических отчетов);

- взаимодействие с такими смежными подсистемами, как: информационная безопасность (идентификация и аутентификация), продажи и распределение (ERP), управление основными данными (ERP), управление материальными потоками (ERP), управление заказ-нарядами (MES), управления производственным персоналом (MES), управление энергетическими и экологическими данными, АСУР (управление качеством), управление обслуживанием и ремонтами (управление обслуживанием активов), управление материалами, цифровой двойник, ситуационный центр;

- два режима работы: нормальный (непрерывно) и техническое обслуживание.

в) Требования к квалификации персонала блока планирования. В параграфе 2.3 настоящего исследования были сформулированы компетенции (и их уровни) обслуживающего и оперативного персонала «цифровой фабрики».

г) Требования к надежности функционирования блока планирования:

- возможность расчета производственного расписания на горизонт сутки не более чем за 10 минут, на горизонт неделя не более, чем за 30 минут, на горизонт месяц не более, чем за 1 час, на горизонт год не более, чем за 12 часов;

- возможность масштабирования без модификации программного обеспечения;

- сохранение работоспособности при возникновении нештатных ситуаций;

- наличие запасных изделий и приборов для поддержания нормального функционирования программного обеспечения и др.

д) Требования к эргономике:

- русифицированный интерфейс;

- скевоморфизм пользовательского интерфейса;

- сигналы об ошибках должны сопровождаться инструкцией к дальнейшим действиям;

- использование цветовых индикаторов, в спокойных тонах;

- наличие и доступность словарей и справочников и т.д.

2) Требования к блоку управления качеством.

2.1) Автоматизированная система аналитического контроля (АСАК).

а) Общие требования к АСАК подразумевают:

- наличие следующих компонентов:

- сервер баз данных;
- Web-сервер;
- сервер приложений;
- принтеры этикеток с нанесением штрих и/или QR-кода (для нанесения информации на пробы);

- считывающие устройства;

- мобильные устройства;

- автоматизированное рабочее место.

б) Требования к структуре и функционированию:

- наличие следующих модулей:

- автоматизация бизнес-процессов (включает следующие функции: управление жизненным циклом образца, управление испытаниями, поддержка внутрилабораторного контроля качества, управление ресурсами лаборатории (персоналом, реагентами и расходными материалами, оборудованием), управление документацией, управление аналитикой и т.д.);

- интеграция (с периферийными устройствами, с лабораторным оборудованием, а также с информационными системами «цифровой фабрики», включая управление персоналом и управление материальными потоками на уровне ERP, управление рецептурами, контроль качества процесса, MES, блок отчетности и аналитики производства, ситуационный центр, хранение производственных и технологических данных на уровне АСУТП);

- пользовательский интерфейс (управление отчетными формами);

- авторизация (доступ пользователей в соответствии с их уровнем доступа, ролевая модель, хранение и использование в документах электронной подписи пользователей);

- два режима работы: штатный (режимы конфигурирования, исполнения и технического обслуживания) и режим восстановления.

в) Требования к квалификации персонала также изложены в параграфе 2.3 настоящего исследования.

г) Требования к обеспечению АСАК предполагают:

- математическое обеспечение для анализа результатов лабораторных исследований и их оптимизации;

- информационное обеспечение, которое включает набор метаданных в базе данных АСАК, идентификационную информацию, результаты лабораторных исследований, нормативно-справочную информацию; должно быть достаточным по объему;

- программное обеспечение, в том числе системное, базовое, СУБД, прикладное;
- организационное обеспечение (должностные инструкции, инструкции по ведению эксплуатационной документации, инструкции по видам работ, связанным с эксплуатацией АСАК) и др.

2.2) Автоматизированная система управления рецептурами (АСУР).

а) Требования к структуре и функционированию (предусмотрен перечень модулей, аналогичный со структурой АСАК):

- автоматизация бизнес-процессов: включает функции управления ингредиентами, управления рецептурами, оптимизации рецептур, управления экспериментальными рецептурами, управления документацией;
- интеграция с такими информационными системами «цифровой фабрики», как: MES, управление складом сырья, система оперативного планирования, ситуационный центр, АСАК, система машинного обучения и др.;
- пользовательский интерфейс;
- авторизация.

б) Требования к обеспечению АСУР включают:

- математическое обеспечение;
- информационное обеспечение, которое включает набор метаданных в базе данных АСУР, идентификационную информацию для поиска рецептов, ингредиентов, поставщиков, результаты совмещенного анализа АСУР и подсистемы машинного обучения, нормативно-справочную информацию;
- программное обеспечение, в том числе системное, базовое, СУБД, прикладное;
- организационное обеспечение (должностные инструкции, инструкции по ведению эксплуатационной документации, инструкции по видам работ, связанным с эксплуатацией АСУР) и др.

Прочие требования совпадают с блоком АСАК и не требуют дублирования.

2.3) Система контроля качества процесса (СККП).

Требования к структуре и функционированию (специфичные):

- модули СККП:

- анализ процессов (модуль сбора и хранения данных, модуль расчета показателей качества процесса (включая описательные статистики, индекс пригодности и воспроизводимости процесса), модуль построения контрольных карт Шухарта, модуль идентификации признаков отклонения);
- пользовательский интерфейс (модуль мониторинга (визуализация таблиц Шухарта в табличном и графическом виде, визуализация индексов пригодности и воспроизводимости процесса), модуль управления отчётами);
- администрирование (ролевая модель, аутентификация пользователей, хранение и использование в документах электронной подписи пользователей);
- интеграция (с системой хранения производственных и технологических данных (уровень АСУТП), система машинного обучения, АСАК, ситуационный центр);

- три режима работы: штатный (режимы конфигурирования и исполнения), технического обслуживания (резервное копирование данных, обновление ПО, общесистемные плановые работы) и режим восстановления.

3) Требования к блоку управления материалами.

Поскольку в модели «цифровой фабрики» фокус внимания обращен не столько на физические потоки, сколько на информационные, то в блоке управления материалами приоритетную важность имеют требования к подсистеме прослеживаемости анодов. Роль подсистемы заключается в оптимизации затрат ресурсов на производство анодов, увеличении производительности труда, улучшении качества продукции, сокращении брака и рекламаций, повышении гибкости производства, фиксировании полной информации о производстве изделий.

а) Общие требования включают:

- обособление подсистем идентификации анодов и идентификации анододержателей;
- обособление баз данных каждой подсистемы, но взаимодействующих между собой.

б) Требования к функционированию системы прослеживаемости анодов :

- интеграция с блоками: управления заказ-нарядами (MES), управления рецептурами (АСУР), аналитического контроля (АСАК), контроля качества процессов (ССКП), ситуационным центром;

- функции подсистемы идентификации анодов:

- создание и запись в базу данных уникального кода анода (ID анода);
- привязка к ID анода основных характеристик (дата и время изготовления «зеленого» анода, номера партии, статуса (годен, отбракован и т.д.) и др.;

- считывание и обработка изображения кода на всех этапах жизненного цикла анода;

- извлечение из базы данных информации об аноде для других подсистем «цифровой фабрики»;

- передача данных в систему хранения производственных и технологических данных;

- функции подсистемы идентификации анододержателей:

- формирование ID анододержателя;
- привязка ID анода к ID анододержателя;
- считывание и обработка кода экземпляра анододержателя;
- передача данных в базу данных системы идентификации анодов.

Прочие требования к функционированию подсистемы носят универсальный характер, включая требования к персоналу, защите информации, различным видам обеспечения, надежности подсистемы, эргономике и т.д.

Совокупность наиболее важных требований к обеспечению качества функционирования «цифровой фабрики» систематизирована в виде схемы причинно-следственных связей (диаграммы Исикавы) на рисунке 4.1. Представленная структура акцентирует внимание на критически важных аспектах создания «цифровой фабрики» с ориентацией на снижение рисков неполноты технического задания, обеспечение прослеживаемости влияния требований на качество модели, а также носит превентивный характер.

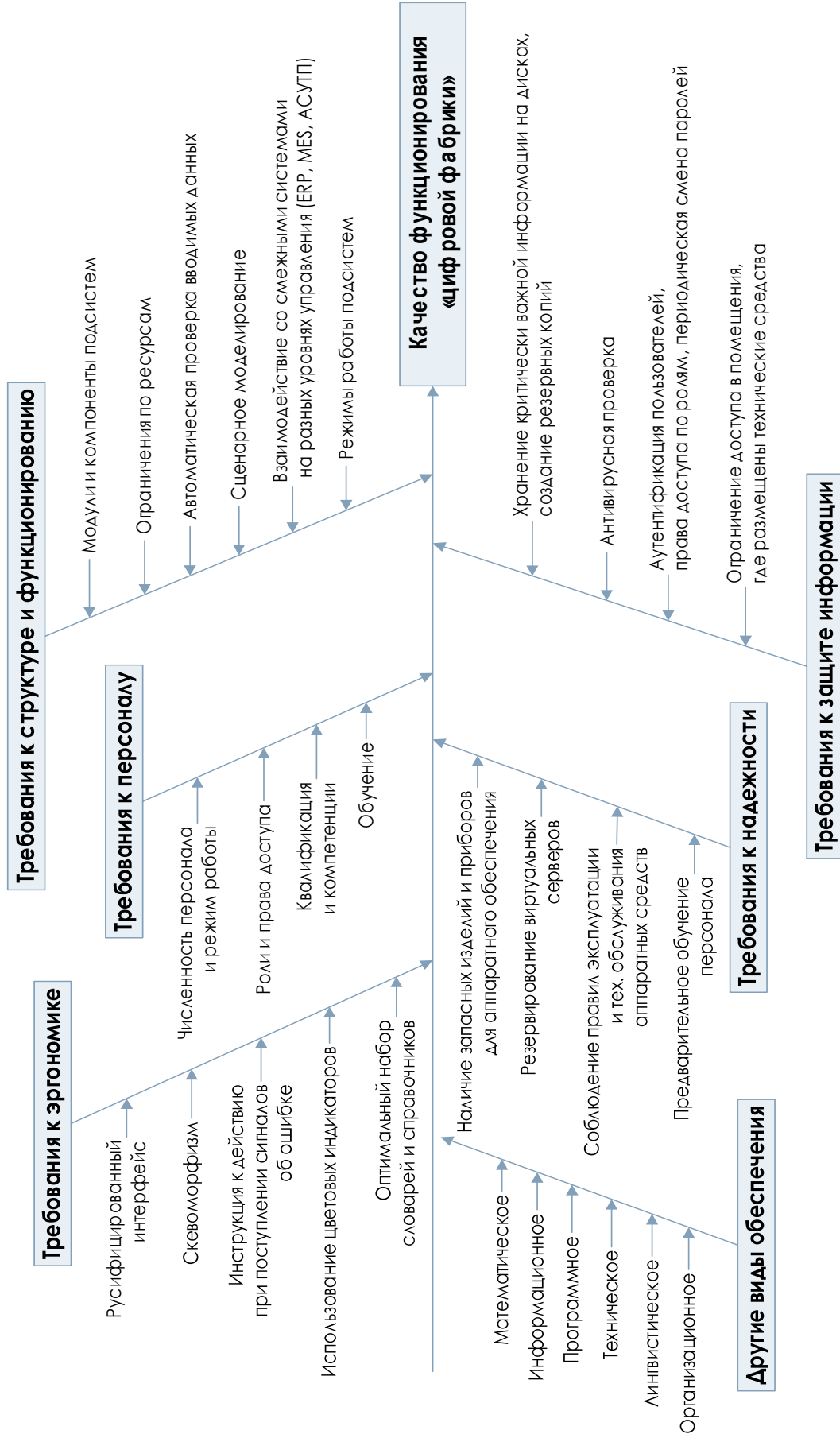


Рисунок 4.1 – Диаграмма Искиavy требований для обеспечения качества функционирования «цифровой фабрики»
(составлена автором)

Систематизация изложенных требований обеспечивает прозрачность разработки и внедрения «цифровой фабрики», образует методический базис для перехода от реактивного управления производственными процессами к проактивному, основанному на предотвращении отклонений и дефектов в среде киберфизической системы.

4.2 Сравнительный анализ предложенных инструментов и зарубежных аналогов

Цифровая трансформация производственных систем должна отвечать нормативным требованиям политики импортозамещения. В данном контексте приоритетным является выбор в пользу российских разработок в части создания и внедрения «цифровой фабрики». В связи с этим проведен сравнительный анализ российских разработок и продуктов от компании Siemens:

- ООО НПП «ГКС» предлагает комплекс работ по созданию передового производства анодов, организованного по принципам «цифровой фабрики»;
- Siemens предлагает комплексное решение по внедрению «цифровой фабрики» на предприятии, но сталкивается с рядом барьеров в условиях российской действительности.

1) Подсистема календарного и оперативного планирования.

Российское платформенное решение от ООО НПП «ГКС» основано на интеграции платформы BFG iMES в структуру «цифровой фабрики» анодного производства. Преимущества данного решения заключаются в соответствии требованиям политики импортозамещения, высокой производительности, архитектурной совместимости.

а) Соответствие требованиям политики импортозамещения. Система BFG iMES включена в реестр программного обеспечения Минцифры России, созданный для подтверждения российского происхождения [87]. Если внедрение разработки от Siemens сопровождается рисками, связанными с лицензионными ограничениями, ограничениями технической поддержки на территории России, то Система BFG iMES не подвержена влиянию перечисленных факторов.

б) Интеграция и адаптация программного обеспечения. С одной стороны, технологические решения Siemens обладают широкими возможностями симуляции производственных процессов; с другой стороны, зарубежные аналоги требуют длительной адаптации к специфике металлургического и анодного производства. При этом архитектура BFG iMES предполагает высокий уровень адаптации под конкретные требования производства (включая задачи автоматического построения и перерасчета производственного расписания, расчета сменно-суточных заданий и анализа загрузки ресурсов), что подтверждается готовностью разработчика к доработке системы.

в) Производительность вычислительных алгоритмов. Имитационное ядро BFG iMES обеспечивает производительность не менее 1 миллиона технологических операций в час при расчете производственного расписания¹. Также система BFG iMES использует современные широко распространённые языки программирования для написания и расширения продукта (python, javascript, java), что существенно упрощает дальнейшую поддержку и развитие системы силами ИТ-службы предприятия. Напротив, продукты Siemens применяют проприетарные языки программирования, что требует привлечения узкоспециализированных специалистов.

г) Архитектурная совместимость и интеграция. Как было отмечено в главе 2 настоящего исследования, подсистема календарного и оперативного планирования связана потоками данных с модулями уровня ERP, АСУТП, ситуационным центром, модулем машинного обучения и т.д. Такое взаимодействие должно осуществляться через единую сервисную шину предприятия (ESB, обеспечивает обмен данными между различными информационными системами предприятия). Использование решений Siemens требует внедрения эксклюзивной среды интеграции, в частности, Teamcenter Manufacturing – специализированный программный модуль для управления процессами и данными. В свою очередь, система BFG iMES поддерживает интеграцию по открытым стандартным

¹ Пояснительная записка ООО НПП «ГКС».

интерфейсам (REST API, SQL-запросы), что оптимизирует интеграцию с существующей ИТ-инфраструктурой предприятия.

Как следствие, система BFG iMES является предпочтительной в целях построения подсистемы календарного и оперативного планирования анодного производства в контексте «цифровой фабрики».

2) Подсистема управления качеством.

а) Для автоматизации подсистемы аналитического контроля (АСАК) ООО НПП «ГКС» предусмотрено внедрение ЛИМС «АИСТ» от ГК «Термо Техно». Ее относительные преимущества также обусловлены:

- российским происхождением [57] и учетом требований нормативно-правовых актов Российской Федерации в области аналитического контроля;
- возможностью обеспечения сквозной прослеживаемости анодов;
- интеграции в среду «цифровой фабрики» предприятия путем консолидации данных лабораторного и технологического контроля и снижения рисков несовместимости протоколов и форматов данных зарубежных и российских решений;
- гибкостью настройки форм отчетности, включая специализированные протоколы испытаний, журналы учета стандартных образцов предприятия, контрольные карты Шухарта и т. п.

б) Создание автоматизированной системы управления рецептурами (АСУР) в рамках «цифровой фабрики» анодного производства базируется на использовании промышленного фреймворка ИНКА [46], которое проектируется с учетом специфики производства (например, конкретных типов рецептур анодного производства (шихты, анодной массы и др.) со сложным ингредиентным составом), обеспечивая управление полным жизненным циклом рецепта.

в) В качестве инструмента автоматизации системы контроля качества процесса (СККП) ООО НПП «ГКС» также рекомендовано использование промышленного фреймворка ИНКА, представляющего собой ядро системы, которое конфигурируется под конкретные задачи, включая расчет показателей качества, построение карт Шухарта и идентификацию признаков отклонения от

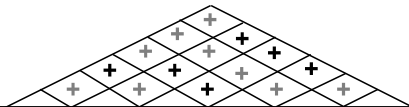
статистической управляемости. Данный фреймворк проектируется как элемент «цифровой фабрики», включающей систему машинного обучения.

Зарубежное решение от Siemens, представленное модулем Opcenter Quality, несмотря на высокопроизводительный функционал, требуют адаптации под специфические требования к расчету индексов пригодности и воспроизводимости, принятые на российских предприятиях, внедрения промежуточного слоя на базе платформы MindSphere (облачная платформа Siemens для промежуточной обработки полевых данных с целью их последующего использования в системе машинного обучения, предиктивной аналитики). Фреймворк ИНКА позволяет оптимизировать данную задачу посредством ESB.

3) Подсистема прослеживаемости анодов.

Для реализации подсистемы прослеживаемости анодов в архитектуре «цифровой фабрики» предлагается российская программная платформа «КАСКАД» [80]. Использование ее в качестве единой платформы, одновременно выступающей ядром АСОДУ ТП «цифровой фабрики», позволяет реализовать сквозную прослеживаемость каждого анода – начиная с момента нанесения кода при прессовании и завершая передачей данных в MES через сервисную шину ESB без дополнительных шлюзов и протоколов преобразования. Напротив, зарубежные MES-решения для обеспечения прослеживаемости продукции требуют построения отдельного интеграционного слоя для связи с производственным оборудованием.

Таким образом, проведен анализ преимуществ российских инструментов цифровизации производственных процессов. Однако для объективной оценки проекта «цифровой фабрики» целесообразно применение методологии QFD (Quality Function Deployment, «дом качества»), которая на основе матричного метода позволяет системно описать приоритетность цифровых инструментов организации производства. На основе методики реализации QFD [39, 43] построена схема «дома качества», представляющая собой визуализацию трансформации ожиданий заказчика (производственной системы) в модулях «цифровой фабрики» (рисунок 4.2).

Условные обозначения: ● - сильная связь (9 баллов) ○ - средняя связь (3 балла) Δ - слабая связь (1 балл) + - сильная положительная связь +- - слабая положительная связь									Сравнительный анализ	
№	Ожидания	Важность	Подсистема КОП	АСАК	АСУР	СККП	Подсистема ПА	Интеграция с системой ML	Решение ООО НПП «ГКС»	Siemens
1	Повышение качества анодных блоков	5	○	●	●	●	Δ	●	5	4
2	Снижение себестоимости производства	5	●	Δ	●	●	○	●	5	3
3	Обеспечение стабильности производственного процесса	4	○	Δ	○	●	Δ	●	5	4
4	Минимизация человеческих ошибок	4	●	●	●	●	●	○	4	4
5	Обеспечение сквозной прослеживаемости анодов	5	○	○	○	Δ	●	Δ	5	3
6	Повышение эффективности процессов планирования и принятия решений	4	●	●	○	●	●	○	5	3
7	Соответствие требованиям импортозамещения	5	●	●	●	●	●	●	5	1
8	Сокращение времени подготовки отчетности	3	○	●	●	●	Δ	Δ	4	3
9	Интеграция данных в единое информационное пространство "цифровой фабрики"	4	○	○	○	○	●	●	5	2
Суммарная оценка			225	225	249	287	225	239	1450	
Приоритетность, %			0,155	0,155	0,172	0,198	0,155	0,165		

Примечание: КОП – календарное и оперативное планирование; АСАК – автоматизированная система аналитического контроля; АСУР – автоматизированная система управления рецептурами; СККП – система контроля качества процессов; ПА – прослеживаемость анодов; ML – машинное обучение

Рисунок 4.2 – «Дом качества» QFD для «цифровой фабрики» анодного производства (построен автором)

В соответствии с классическим содержанием схемы QFD первого уровня «дом качества» для «цифровой фабрики» анодного производства включает:

1) блок ожиданий заказчика: включены 9 целей, каждой из которых присвоен уровень важности по пятибалльной шкале (1-5 баллов) с точки зрения производства качественной конкурентоспособной продукции в условиях санкционных ограничений и развития технологий;

2) блок сравнительного анализа: учтены рассмотренные выше конкурирующие решения от Siemens и ООО НПП «ГКС», которые оценены в разрезе 9 ожиданий также по пятибалльной шкале;

3) функциональные модули (перечислены анализируемые в работе блоки планирования, управления качеством, управления материалами), посредством которых планируется реализовать ожидания заказчиков;

4) внутреннюю матрицу – матрицу связей между ожиданиями и функциональными модулями «цифровой фабрики»;

5) оценку приоритетности модулей: суммарная оценка определена как сумма взвешенных значений важности ожиданий, приоритетность – как удельный вес в общей суммарной оценке;

6) корреляционную матрицу («крыша» QFD), которая отражает взаимосвязи между обследованными функциональными модулями «цифровой фабрики».

По результатам построенного «дома качества» констатирована приоритетность блока контроля качества процессов, что обусловлено его влиянием на повышение качества анодов, снижение себестоимости (в частности, путем сокращения брака) и обеспечение стабильности производственных процессов. Анализ корреляционной матрицы позволяет судить о положительной взаимосвязи между включенными модулями «цифровой фабрики»: модули СККП, АСУР и интеграции с МЛ образуют интеллектуальное ядро системы, а подсистемы планирования, аналитического контроля и прослеживаемости – сквозную «цифровую нить» для моделей цифровых двойников.

Новизна структурированной функции качества заключается в ее применении для описания «цифровой фабрики», что позволяет перейти от интуитивного выбора последовательности цифровой трансформации производства к математически обоснованному плану, в котором ядром системы определена группа модулей, обеспечивающих замкнутый цикл непрерывного улучшения качества продукции.

4.3 Имитационное моделирование оценки эффективности производственных процессов «цифровой фабрики»

Условия цифровой трансформации производства предполагают автоматизацию диагностики эффективности процессов, которая, в свою очередь, нуждается в формализации алгоритмов оценки. В третьем разделе настоящего диссертационного исследования были изложены методические положения, которые предложено реализовать в виде имитационного моделирования.

Авторская методика апробирована в части блока календарного и оперативного планирования. В качестве инструментов моделирования применены средства Excel и AnyLogic. В каждом случае предусмотрено выполнение моделей в двух версиях – функционирования традиционной и цифровой модели производственной системы для сравнения уровней эффективности планирования. Моделирование основано на формулах (3.1) – (3.6), а также на данных рисунка 3.6, таблиц 3.1 и 3.3. Исходные данные для имитационного моделирования представлены в приложении Г.

С целью обеспечения выполнения условия принадлежности расчетных показателей интервалу $[0; 1]$ и содержательной интерпретируемости, все формулы уточнены с учетом позитивной и негативной природы показателей (таблица 4.1).

Различие в данных традиционного и цифрового производства заключается в разных алгоритмах поведения, что сказывается на показателе вариации и, как следствие, законах распределения. В приложении Д представлено обоснование выбора закона распределения случайных величин. Описывая в целом особенности двух моделей организации производства, следует подчеркнуть, что для традиционного производства характерны задержки при обмене информацией, возможны ошибки при формировании или пересчете планов вручную. В свою очередь «цифровая фабрика» базируется на автоматизации сквозного управления информационными потоками, MES обменивается данными с уровнем АСУТП в режиме реального времени, «цифровой двойник» и искусственный интеллект повышают предсказуемость отклонений параметров от нормативных.

Таблица 4.1 – Формулы расчета компонентов интегрального показателя эффективности планирования (Пэп)

Показатель	Формула расчета	
Производительность планирования (Пр)	$Пр = \text{МИН}(1; T_{\text{норм}} / T_{\text{факт}})$	
Результативность планирования (Р)	$P = \text{МИН}(1; (1/3 * (R_1 + R_2 + R_3)))$ $R_1 = \text{МИН}(1; (1 - D_{\text{факт}}) / (1 - D_{\text{план}}))$ $R_2 = Q_{\text{факт}} / Q_{\text{план}}$ $R_3 = \text{МИН}(1; (1 - B_{\text{факт}}) / (1 - B_{\text{план}}))$	R_1 – соблюдение плановых сроков технологических переделов; R_2 – выполнение плановых объемов работ; R_3 – уровень брака.
Адаптивность системы планирования (А)	$A = \text{МИН}(1; V_{\text{эталон}} / (\text{МАКС}(V_1; V_2; V_3)))$	
Пэп	$П_{\text{эп}} = Пр^{w(Пр)} * P^{w(P)} * A^{w(A)}$	

В целях статистического обоснования репрезентативности, оценки плотности распределения значений, оценки вероятности редких событий число случайных чисел, подлежащих генерации, определено в размере 500.

1) *Стохастическая модель диагностики планирования производства методом генерации случайных чисел.*

В соответствии с таблицами приложений Г и Д рассчитаны значения частных и интегрального показателей эффективности планирования в модели традиционного производства. По результатам имитации получен массив расчетных значений $П_{\text{эп}}$, упорядоченный и распределенный по интервалам. Число интервалов k определено по формуле Стёрджеса для $N = 500$:

$$k = 1 + \log_2(N) = 1 + 3,322 * \lg(N) = 9,97. \quad (4.1)$$

Величина интервала определена путем отношения разности между максимальным и минимальным значением в ряду данных к количеству интервалов, равному 10 (определено выше) (таблица 4.2). При заданных условиях наиболее вероятно достижение эффективности планирования в пределах 0,61–0,72 (61–72%).
Таблица 4.2 – Результаты имитационного моделирования

№ п/п	Интервал значений Интегрального показателя эффективности планирования производства (ПЭп)	Количество значений в интервале	Частость
1	0,44-0,50	12	0,024
2	0,50-0,55	38	0,076
3	0,55-0,61	63	0,126
4	0,61-0,66	94	0,188
5	0,66-0,72	97	0,194
6	0,72-0,77	71	0,142
7	0,77-0,83	58	0,116
8	0,83-0,88	33	0,066
9	0,88-0,93	14	0,028
10	0,93-0,99	20	0,040
Итого	-	500	1

Визуализация данных реализована в виде гистограммы частоты (рисунок 4.3). Имеет место левосторонняя асимметрия, наибольшая доля значений сконцентрирована в интервале 0,66–0,72. Высокие значения показателя достижимы с низкой долей вероятности, подсистема планирования функционирует в среднем диапазоне эффективности, нестабильно, подвержена сильным возмущениям.

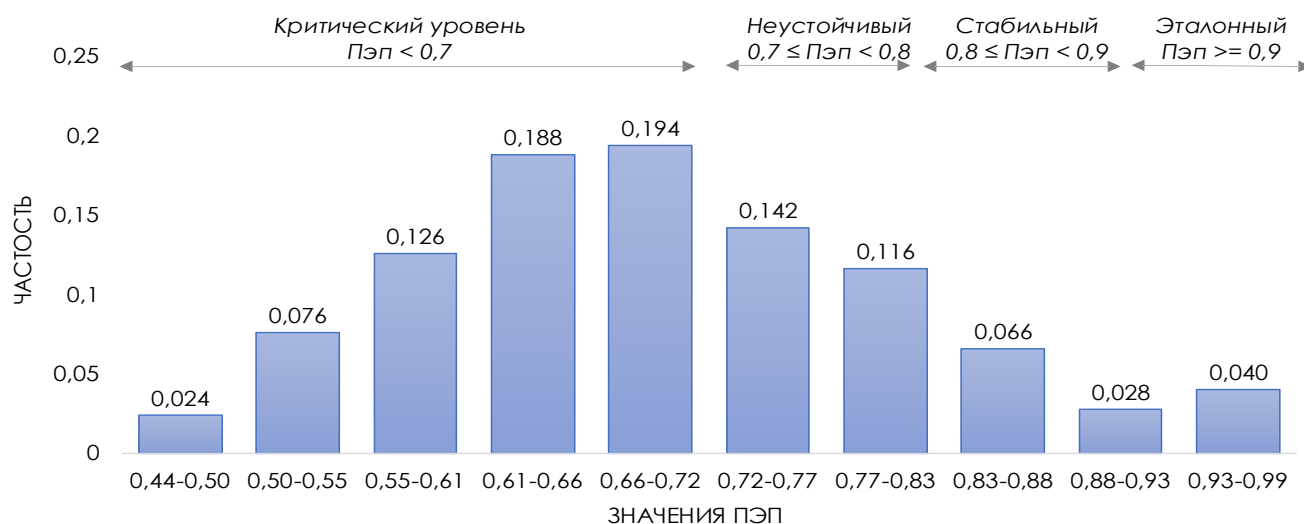


Рисунок 4.3 – Плотность распределения значений интегрального показателя эффективности планирования ($П_{эп}$) традиционного производства (рассчитано автором)

Описательные статистики коэффициента $П_{эп}$ имеют следующие значения:

- минимальное значение — 0,44;

- максимальное значение – 0,99;
- среднее значение – 0,696;
- уровень надежности (95%) – 0,01.

Соответствующий алгоритм применен относительно цифровой модели производства (данные приложений Г и Д). Плотность распределения также визуализирована в виде гистограммы (рисунок 4.4). Общий диапазон значений коэффициента $\Pi_{\text{эп}}$ сместился в сторону более высокого уровня эффективности. Имеет место правосторонняя асимметрия. Превалирующая доля наблюдений сконцентрирована в интервалах 0,72–0,82. Подсистема планирования производства в условиях «цифровой фабрики» функционирует более стабильно и предсказуемо, с низкой долей вероятности уровень эффективности планирования опускается ниже 0,7. Таким образом «цифровая фабрика» поддерживает процесс планирования в управляемом и эффективном диапазоне.

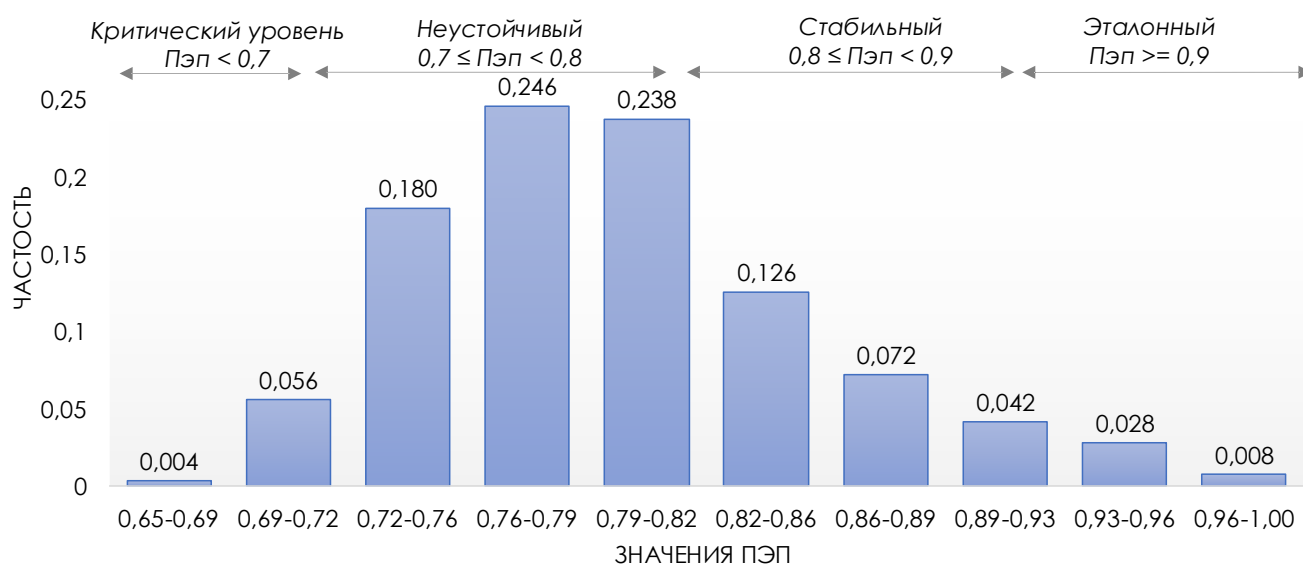


Рисунок 4.4 – Плотность распределения значений интегрального показателя эффективности планирования ($\Pi_{\text{эп}}$) цифрового производства (рассчитано автором)

Сравнивая описательные статистики двух версий моделей, можно резюмировать, что производственная система более предсказуема за счет доступа к точным данным и управления ими, стандартное отклонение и уровень надежности также лучше (таблица 4.3).

Таблица 4.3 – Сравнительный анализ моделей организации производства (проведен автором)

Описательные статистики	Значение интегрального показателя эффективности планирования (Пэп)	
	«Цифровая фабрика»	Традиционное производство
Среднее	0,7986	0,6959
Стандартное отклонение	0,0579	0,1140
Уровень надежности (95,0%)	0,0051	0,0100
Минимум	0,6540	0,4440
Максимум	0,9953	0,9890

2) Системно-динамическая модель диагностики планирования производства в модели «цифровой фабрики» в среде AnyLogic.

Системно-динамическая модель диагностики планирования производства позволяет воспроизвести поведение системы во времени под воздействием управляемых и неуправляемых факторов. Помимо основных элементов (параметры и динамические переменные) в модель включен элемент Событие «Обновление Параметров», обеспечивающий механизм обновления данных. Настройки события для традиционной модели производства учитывают те же законы распределения, что и в случае стохастического моделирования (рисунок 4.5).

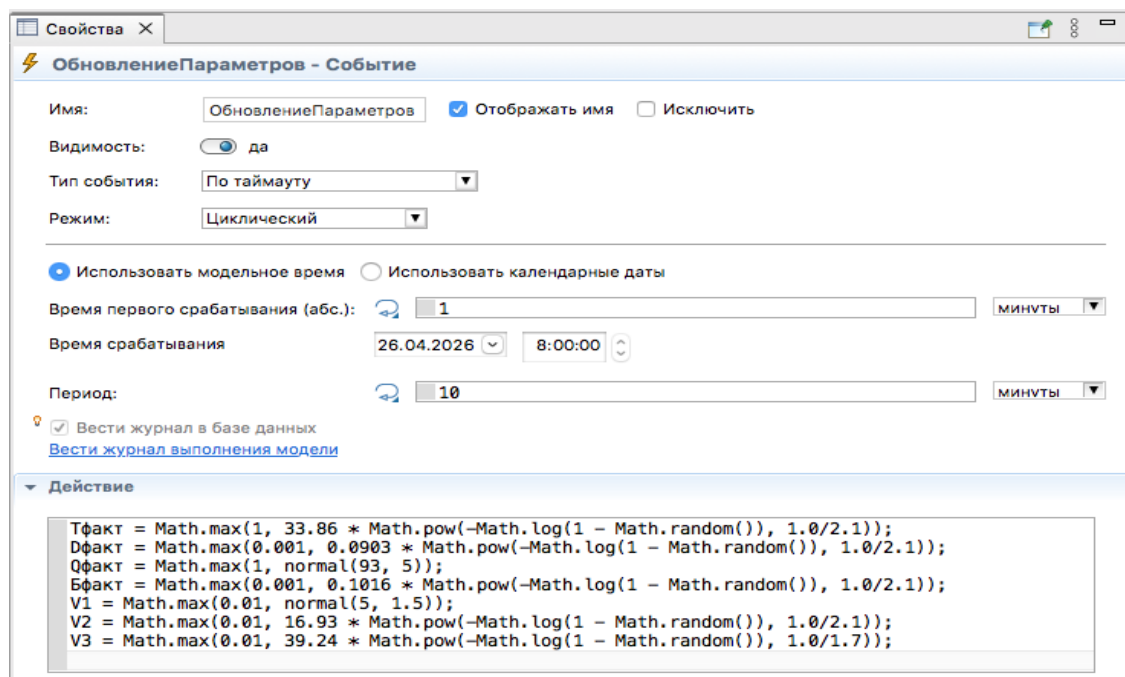


Рисунок 4.5 – Окно свойств события *ОбновлениеПараметров* (традиционная модель производства)

На рисунке 4.6 представлена демонстрация имитации планирования производства в традиционной модели. По аналогии со стохастической моделью установлено 500 единиц модельного времени. Гистограмма распределения значений $\Pi_{\text{эл}}$ демонстрирует большую долю значений коэффициента в интервале 0,5–0,6. Среднее значение интегрального показателя эффективности планирования за время моделирования составило 0,613 (несущественное отклонение от стохастической модели).

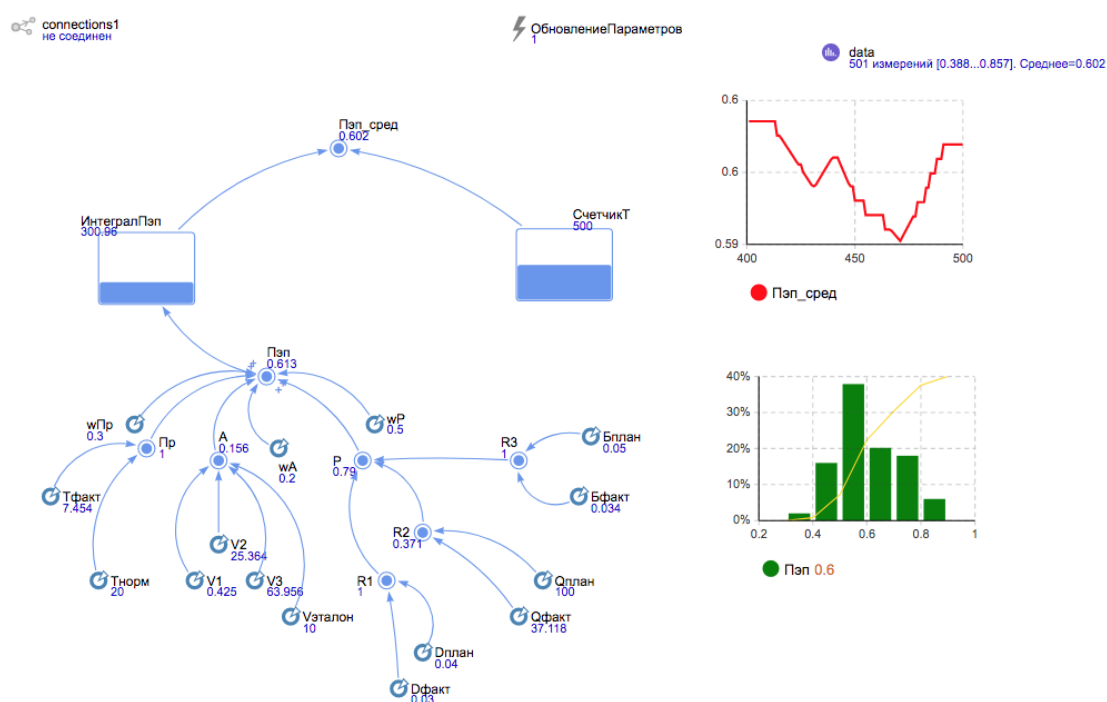


Рисунок 4.6 – Системно-динамическая модель эффективности планирования традиционного производства (получена автором)

В контексте моделирования диагностики планирования цифрового производства настройка события скорректирована с учетом нормального распределения управляемых переменных (рисунок 4.7).

ОбновлениеПараметровЦФ - Событие

Имя: ОбновлениеПараметровL ☒ Отображать имя ☐ Исключить

Видимость: ☒ да

Тип события: По таймауту

Режим: Циклический

☒ Использовать модельное время ☐ Использовать календарные даты

Время первого срабатывания (абс.): 1 МИНУТЫ

Время срабатывания: 26.04.2026 8:00:00

Период: 10 МИНУТЫ

☒ Вести журнал в базе данных
[Вести журнал выполнения модели](#)

Действие

```

Тфакт = Math.max(1, normal(22, 3.3));
Dфакт = Math.max(0.001, normal(0.05, 0.01));
Qфакт = Math.max(1, normal(97, 2.5));
Бфакт = Math.max(0.001, normal(0.06, 0.012));
V1 = Math.max(0.01, normal(3, 0.9));
V2 = Math.max(0.01, normal(7, 2.1));
V3 = Math.max(0.01, normal(18, 5.4));

```

Рисунок 4.7 – Окно свойств события *ОбновлениеПараметровЦФ*
(цифровая модель производства)

Результаты имитации демонстрируются на рисунке 4.8. Средние значения увеличились относительно традиционной модели и соответствуют стохастической модели. Преимущество системно-динамической модели заключается в возможности управления параметрами в процессе симуляции.

Разработанная методика, стохастическая модель и системно-динамическая модель образуют программно-методический комплекс имитационного моделирования диагностики планирования производства в контексте «цифровой фабрики», предназначенный для автоматизации количественной оценки эффективности планирования, обусловленной производительностью, результативностью и адаптивностью системы; сравнительного анализа традиционной и цифровой модели производственной системы на основе единых базовых методических положений (авторская методика); верификации результатов путем сопоставления с данными стохастического моделирования в Excel;

визуализации результатов моделирования, создания дашбордов; формирования эмпирической базы принятия управленческих решений в сфере автоматизации подсистемы планирования (MES, цифровых двойников, искусственного интеллекта); использования в образовательном процессе в рамках лабораторных практикумов по направлениям автоматизации и цифровизации технологических процессов.

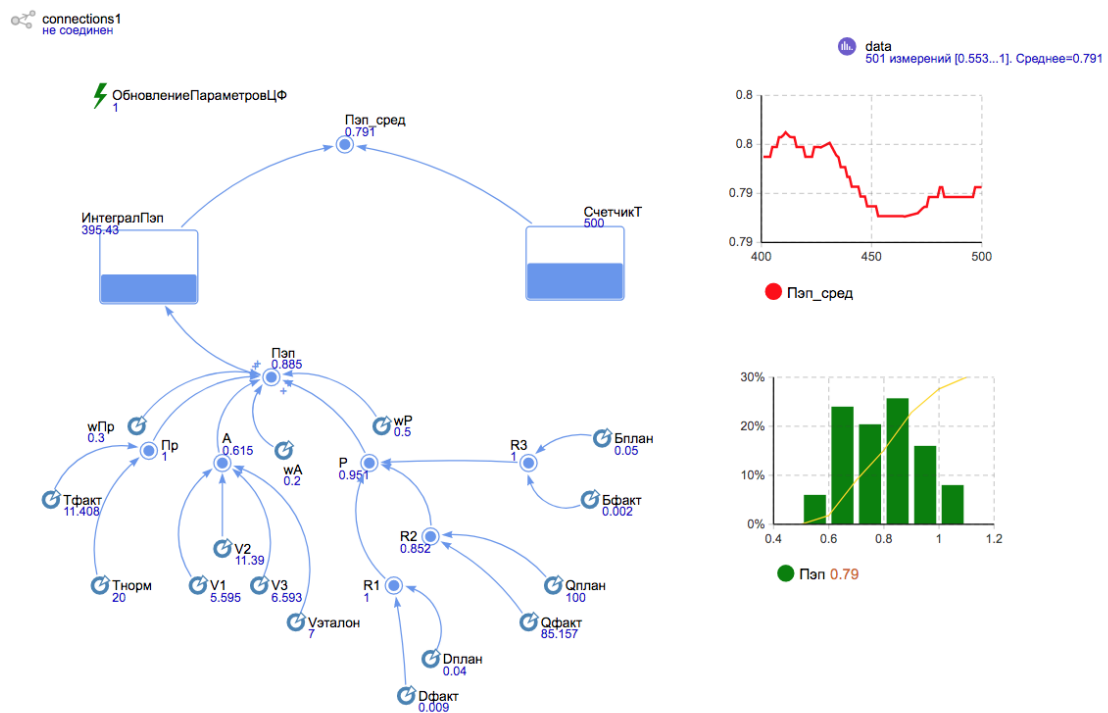


Рисунок 4.8 – Системно-динамическая модель эффективности планирования цифрового производства (получена автором)

К функциональным возможностям разработанного программно-методического комплекса относятся:

- генерация случайных значений первичных параметров планирования в соответствии с заданными законами распределения (нормальное, равномерное);
- автоматизация расчета агрегированных показателей производительности, результативности и адаптивности системы планирования и интегрального показателя эффективности планирования ($\Pi_{\text{эп}}$);
- накопление данных (значений $\Pi_{\text{эп}}$);

- настройка модельного времени планирования;
- визуализация динамики, плотности и функции распределения значений $P_{\text{эп}}$;
- изменение параметров моделирования в процессе имитации процесса.

Разработанные предложения могут представлять интерес для руководителей предприятия в контексте стратегического планирования цифровой трансформации и модернизации производства и инвестирования; руководителей производственных подразделений в целях выявления «узких» мест, повышения качества планирования графиков производства; персонала планово-диспетчерских служб с целью выявления приоритетных параметров контроля исполнения планов; персонала производственных участков для понимания влияния частных параметров на интегральную эффективность планирования; ИТ-службам предприятия в контексте формализации и автоматизации системы мониторинга эффективности планирования; сотрудникам экономического подразделения при расчете экономического эффекта.

Внешними пользователями могут выступать отраслевые научно-исследовательские институты и коллективы ученых, разработчики MES и программного обеспечения для промышленной автоматизации, органы государственной поддержки развития промышленности, образовательные учреждения высшего и дополнительного профессионального образования.

Выводы по главе 4

1. Систематизированы требования к блокам планирования, управления качеством, управления материалами, что обеспечивает прозрачность разработки и внедрения «цифровой фабрики», образует методический базис для перехода от реактивного управления производственными процессами к проактивному, основанному на предотвращении отклонений и дефектов в среде киберфизической системы. Построена диаграмма Исикавы требований для обеспечения качества функционирования «цифровой фабрики».

2. В результате сравнительного анализа российского платформенного проекта «цифровой фабрики» от ООО НПП «ГКС» и Siemens выявлены

преимущества первого в части импортозамещения программного обеспечения «цифровой фабрики» анодного производства, возможности сквозной «бесшовной» интеграции модулей между собой и со смежными системами через единую сервисную шину (ESB) без необходимости развертывания промежуточных облачных платформ, доступа к услугам по доработке технологического решения и его адаптации к конкретным условиям технологического процесса, удовлетворительных показателей производительности системы планирования, отсутствия инфраструктурных и санкционных рисков.

3. Построен «дом качества» QFD для «цифровой фабрики» анодного производства, который позволяет оценить приоритетность модулей системы, синергию между ними и организовать замкнутый цикл непрерывного улучшения качества производственных процессов.

4. Разработан программно-методический комплекс имитационного моделирования оценки эффективности планирования производства в контексте «цифровой фабрики», предназначенный для автоматизации процесса диагностики эффективности блока планирования производственной системы, выявления «узких» мест в технологической цепочке, сравнительного анализа эффективности традиционной и цифровой моделей организации производства, формирования обосновательной базы для принятия инвестиционных решений.

5. Программно-методический комплекс включает имитационные модели, реализованные в двух средах – Excel и AnyLogic, основанные на авторской методике оценки эффективности планирования производства.

Стохастическая модель оценки эффективности планирования производства (в среде Excel) основана на совокупности независимых измерений, что позволяет избежать автокорреляции между последовательными наблюдениями, эффектов накопления данных.

Системно-динамическая модель диагностики планирования производства в модели «цифровой фабрики», реализованная в программе AnyLogic в двух версиях – функционирования традиционной и цифровой моделей производственной системы, позволяет проводить сравнение моделей по компонентам

производительности, результативности и адаптивности системы планирования, носит универсальный характер и может быть адаптирована для любых типов производств, использующих автоматизированные системы оперативно-календарного планирования.

Таким образом, стохастическая модель является инструментом статистической верификации методики и оценки функции распределения интегрального показателя эффективности планирования; системно-динамическая модель – инструментом динамической визуализации и исследования поведения системы во времени.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Решение поставленных задач исследования позволило достичь цели диссертационного исследования и получить ряд научных результатов в области цифровой трансформации и повышения качества производственных систем, апробированных на примере анодного производства и способствующих решению важной научной задачи, имеющей значение для развития отечественного производства.

1. В рамках решения первой задачи диссертационного исследования систематизирована концептуальная структура моделирования анодного производства, раскрывающая структурные, параметрические и функциональные аспекты моделирования и образующая металогическую основу развития инструментов организации производства в рамках модели «цифровой фабрики»; построена логико-функциональная структура производства обожженных анодов в виде метаграфа, отражающая ключевые подсистемы и связи между ними, сформированная вокруг «фабрики данных»; выделены содержательные компоненты модели – физическая, цифровая и управляющая подсистемы; построена структурно-параметрическая модель «цифровой фабрики» анодного производства на примере системы управления качеством, описывающая иерархическую систему управления потоками данных, обеспечивающая синхронизацию между физическими и цифровыми объектами, интеграцию разнородных данных в едином цифровом пространстве, служащая методической базой для имитационного моделирования производственных процессов. Разработка позволяет предварительно оценивать ожидаемый эффект улучшения качества процессов и продукции за счет обеспечения сквозной прослеживаемости анодов и статистического управления, а также прогнозировать повышение надежности и эффективности производственных процессов путем оптимизации рецептур, автоматизации формирования производственного расписания, учитывающего ресурсные ограничения.

2. Решение второй задачи основано на сформулированных в исследовании базовых положениях диагностики (принципы, требования, условия и этапы оценки эффективности «цифровой фабрики») и способствовало усовершенствованию методических решений для функциональных блоков «цифровой фабрики» (планирование, управление качеством, управление материалами), дополняющих традиционные показатели эффективности (фондоотдачи, загрузки оборудования, производительности труда, оборачиваемости ресурсов и др.) специфичными для цифровой среды метриками, включая трёхпараметрический подход к оценке эффективности планирования в условиях «цифровой фабрики» (производительность, результативность и адаптивность системы планирования в цифровой среде), трехкомпонентный алгоритм предиктивного управления качеством (диагностика автоматизированной системы аналитического контроля (АСАК), диагностика автоматизированной системы управления рецептурами (АСУР) и диагностика системы контроля качества процессов (СККП)) и индекс непрерывности прослеживаемости анодов в контексте оценки модуля управления материалами. Предложенный методический инструментарий позволяет количественно оценивать качественные показатели функционирования «цифровой фабрики», оперативно принимать организационно-технические решения и реализовать проактивный подход к организации производства.

3. В результате решения третьей задачи исследования разработан комплексный организационно-технический инструментарий управления цифровым производством, основанный на предложенном методическом инструментарии диагностики структурных блоков «цифровой фабрики», включающий:

- систематизацию функциональных требований к подсистемам «цифровой фабрики» в виде диаграммы Исикавы, что обеспечивает прозрачность разработки и внедрения «цифровой фабрики» и образует методический базис для перехода от реактивного управления производственными процессами к проактивному, основанному на предотвращении отклонений и дефектов в среде киберфизической системы;

– сравнительные преимущества проекта ООО НПП «ГКС» относительно технических решений Siemens, что отвечает задачам политики импортозамещения в России;

– «дом качества» QFD для «цифровой фабрики» анодного производства, позволивший аналитическим путем выявить приоритетность блоков контроля качества процессов (19,8%), АСУР (17,2%) и интеграции с блоком машинного обучения (16,5%), а также классифицировать обследованные подсистемы и модули «цифровой фабрики» на интеллектуальное ядро системы и звенья сквозной «цифровой нити»;

– программно-методический комплекс имитационного моделирования диагностики эффективности планирования производства в контексте «цифровой фабрики», объединяющий стохастическую (инструмент статистической верификации методики и оценки функции распределения интегрального показателя эффективности планирования) и системно-динамическую (инструмент динамической визуализации и исследования поведения системы во времени) модели, предназначенный для автоматизации процесса диагностики эффективности блока планирования производственной системы, выявления «узких» мест в технологической цепочке, сравнительного анализа эффективности традиционной и цифровой моделей организации производства, визуализации результатов моделирования, создания дашбордов, формирования эмпирической базы принятия управленческих решений в сфере автоматизации подсистемы планирования (MES, цифровых двойников, искусственного интеллекта), использования в образовательном процессе в рамках лабораторных практикумов по направлениям автоматизации и цифровизации технологических процессов.

4. Авторская методика апробирована на примере модуля календарного и оперативного планирования. Реализация стохастической модели позволила определить превосходство уровня эффективности планирования цифрового производства над традиционным (средние значения интегрального показателя эффективности планирования составили 0,799 и 0,696 соответственно, стандартное отклонение – 0,058 и 0,114 соответственно, уровень надежности – 0,005 и 0,010

соответственно). В результате системно-динамического моделирования также выявлено превышение средних значений интегрального показателя эффективности планирования в условиях цифрового производства над показателями традиционного (0,791 и 0,602 соответственно). Преимущество системно-динамической модели заключается в возможности управления параметрами в процессе симуляции.

Рекомендуется применение сформулированных выводов и результатов исследования в реализации мероприятий по сквозной цифровизации производственных систем, настройке параметров информационно-аналитических систем планирования анодного производства и системы менеджмента качества анодов, а также повышению надежности, адаптивности и устойчивости производственной системы предприятий.

Перспективы дальнейшего развития темы заключаются в апробации предложенного комплексного организационно-технического инструментария управления производством в алюминиевой промышленности, полномасштабной реализации модели «цифровой фабрики» в производстве анодов, формировании больших данных для непрерывного совершенствования имитационных моделей и разработки системы поддержки принятия решений на основе авторской методики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ Р 55062-2021 Информационные технологии. Интероперабельность. Основные положения. Издание официальное. – М.: Российский институт стандартизации, 2021. – 12 с.
2. ГОСТ Р 56020-2020 Бережливое производство. Основные положения и словарь. Издание официальное. – М.: Стандартиформ, 2020. – 20 с.
3. ГОСТ Р 56404-2021 Бережливое производство. Требования к системам менеджмента. Издание официальное. – М.: Стандартиформ, 2021. – 20 с.
4. ГОСТ Р 56407-2023 Бережливое производство. Основные инструменты и методы их применения. Издание официальное. – М.: Российский институт стандартизации, 2023. – 16 с.
5. ГОСТ Р 57522-2017 Бережливое производство. Руководство по интегрированной системе менеджмента качества и бережливого производства. Издание официальное. – М.: Стандартиформ, 2020. – 21 с.
6. ГОСТ Р 70265.1-2022 Измерение, управление и автоматизация промышленного процесса. Структура цифровой фабрики. Часть 1. Основные положения. Издание официальное. – М.: Российский институт стандартизации, 2022. – 36 с.
7. ГОСТ Р 70265.2-2024 Измерение, управление и автоматизация промышленного процесса. Структура цифровой фабрики. Часть 2. Элементы модели. Издание официальное. – М.: Российский институт стандартизации, 2024. – 40 с.
8. ГОСТ Р 70265.3-2024 Измерение, управление и автоматизация промышленного процесса. Структура цифровой фабрики. Часть 3. Применение цифровой фабрики для управления жизненным циклом производственных систем. Издание официальное. – М.: Российский институт стандартизации, 2024. – 20 с.
9. ГОСТ Р 70988-2023 Система стандартов в цифровой промышленности. Основные положения. Общие требования к системе. Издание официальное. – М.: Российский институт стандартизации, 2023. – 8 с.

10. ГОСТ Р 71719-2024 Цифровая промышленность. Формат обмена информацией об объекте производства. Общие положения. Издание официальное. – М.: Российский институт стандартизации, 2024. – 12 с.
11. ГОСТ Р ИСО 22514-4-2021 Статистические методы. Управление процессами. Часть 4. Оценка показателей воспроизводимости и пригодности процесса. Издание официальное. – М.: Российский институт стандартизации, 2021. – 40 с.
12. ГОСТ Р ИСО 9001-2015 Системы менеджмента качества. Требования. Издание официальное. – М.: Стандартиформ, 2020. – 32 с.
13. ГОСТ Р ИСО/МЭК 21838-1-2021. Информационные технологии. Верхнеуровневые онтологии (TLO). Часть 1. Требования. Издание официальное. – М.: Российский институт стандартизации, 2021. – 28 с.
14. ГОСТ Р МЭК 62264-2-2016 Интеграция систем управления предприятием. Часть 2. Объекты и атрибуты. Издание официальное. – М.: Стандартиформ, 2016. – 170 с.
15. ГОСТ Р МЭК 62381-2016 Системы автоматизации в обрабатывающей промышленности. Заводские приемочные испытания (FAT), приемочные испытания на месте эксплуатации (SAT) и объектовые интеграционные испытания (SIT). Издание официальное. – М.: Стандартиформ, 2016. – 36 с.
16. ИТС 11-2022 Производство алюминия. Утвержден приказом Росстандарта от 16.12.2022 г. № 3197. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://burondt.ru/its>
17. ПНСТ 864-2023 Умные (SMART) стандарты. Общие положения. Издание официальное. – М.: Российский институт стандартизации, 2023. – 16 с.
18. ПНСТ 1016-2025 Умные (SMART) стандарты. Архитектура и форматы данных. Издание официальное. – М.: Российский институт стандартизации, 2025. – 50 с.
19. Анисимова, Н. Ю. Методика оценки эффективности цифрового труда / Н. Ю. Анисимова, И. В. Митрофанова // Экономика: вчера, сегодня, завтра. – 2022. – Т. 12. – № 9–1. – С. 699–710.

20. Антипов, Д. В. Совершенствование требований Системы менеджмента качества к производственным процессам / Д. В. Антипов, Д. А. Горохова, А. В. Артюхов, А. С. Клентак // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2022. – Т. 24. – № 4(108). – С. 137–147.
21. Антипов, Д. В. Структурно-функциональная модель обеспечения качества авиакосмической техники в условиях аддитивного производства / Д. В. Антипов, Р. С. Загидуллин // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2025. – Т. 23. – № 4. – С. 156–167.
22. Аренс, Ю. А. Пятая промышленная революция – инновации в области биотехнологий и нейросетей / Ю. А. Аренс, Н. А. Каткова, Е. А. Халимон, И. С. Брикошина // E-Management. – 2021. – Т. 4. – № 3. – С. 11–19.
23. Бабенко, Е. В. Стандартизация процессов цифровой трансформации машиностроительных производств: дис. ... канд. техн. наук: 2.5.22 / Бабенко Евгения Васильевна. – М., 2025. – 164 с.
24. Бабкин, А. В. Индустрия 5.0: понятие, формирование и развитие / А. В. Бабкин, А. А. Федоров, И. В. Либерман, П. М. Клачек // Экономика промышленности. – 2021. – Т. 14. – № 4. – С. 375–395.
25. Бабушкин, В. М. Методы и средства адаптивного планирования организации бережливого цифрового производства: автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.02.22 / Бабушкин Виталий Михайлович. – Казань, 2019. – 36 с.
26. Барсегян, Н. В. Реализация принципов бережливого производства в условиях цифровой трансформации / Н. В. Барсегян // Вестник Белгородского университета кооперации, экономики и права. – 2021. – № 6(91). – С. 93–102.
27. Баум, С. Создание новых продуктов с помощью DFSS [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://univerlss.ru/2012/03/13/создание-новых-продуктов-с-помощью-dfss/>
28. Благовещенский, Д. И. Ключевые аспекты разработки стандарта оценки качества производства продукции машиностроения глазами потребителя / Д. И. Благовещенский, В. Н. Козловский, Д. И. Панюков, Р. Р. Гафаров // Известия

Тулского государственного университета. Технические науки. – 2021. – № 3. – С. 214–219.

29. Бобков, В. И. Программная реализация математической модели расчета времени дозирования рудного сырья в дозирочно-смесительном комплексе агломерационной фабрики / В. И. Бобков, А. А. Быков, В. А. Орехов, С. В. Незамаев // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2025. – № 1(25). – С. 77–87.

30. Боровков, А. И. Функциональные характеристики отечественных систем управления производством (MES-систем) для дискретных производств. Экспертно-аналитический доклад (по состоянию на апрель 2025 года) / А. И. Боровков, О. И. Рождественский, Е. И. Павлова [и др.]. – СПб.: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2025. – 244 с.

31. Васильев, В. А. Цифровые технологии в управлении качеством / В. А. Васильев, С. В. Александрова, Г. М. Летучев // Идеи и новации. – 2022. – Т. 10. – № 1–2. – С. 125–129.

32. Васин, С. А. Организация процесса управления качеством изделий ответственного назначения / С. А. Васин, О. В. Пантюхин // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2020. – № 4. – С. 195–200.

33. Васин, С. А. Управление качеством производства изделий из композитных материалов / С. А. Васин, А. В. Евсеев, В. Н. Козловский // Стандарты и качество. – 2023. – № 3. – С. 83–89.

34. Воробьев, Д. И. Разработка цифрового двойника прессы для кузнечно-штамповочного производства / Д. И. Воробьев, А. О. Кузин, Я. А. Ерисов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2023. – № 4. – С. 365–371.

35. Галимулина, Ф. Ф. Цифровая трансформация как драйвер ресурсосберегающего развития нефтехимического сектора экономики / Ф. Ф. Галимулина, А. И. Шинкевич // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2020. – Т. 22. – № 4(96). – С. 64–73.

36. Гарькина, И. А. Системный подход к идентификации и управлению качеством / И. А. Гарькина, А. М. Данилов, В. О. Петренко // Московское научное обозрение. – 2013. – № 6(34). – С. 17–19.
37. Глушков, И. В. Разработка цифрового двойника ректификационных установок производства хлорбензола / И. В. Глушков, В. П. Мешалкин, Е. В. Петухова // Успехи в химии и химической технологии. – 2023. – Т. 37. – № 4(266). – С. 141–144.
38. Горбашко, Е. А. Современные аспекты управления качеством в компаниях нефтегазовой отрасли / Е. А. Горбашко, Ю. А. Рыкова, Л. Е. Скрипко // Известия Санкт-Петербургского государственного экономического университета. – 2017. – № 1-1(103). – С. 100–106.
39. Горленко, О. А. Система менеджмента безопасности машиностроительной продукции / О. А. Горленко, Я. А. Вавилин // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2013. – № 3(39). – С. 161–166.
40. Гусева, Т. В. НДТ: новое экологическое измерение качества в промышленности строительных материалов / Т. В. Гусева, Я. П. Молчанова, А. В. Миронов, А. В. Малков // Компетентность. – 2015. – № 8(129). – С. 4–8.
41. Деминг, Э. Выход из кризиса: Новая парадигма управления людьми, системами и процессами / Э. Деминг; перевод Ю. Адлер, В. Шпер. – 7-е изд. – М.: Альпина Паблишер, 2016. – 417 с.
42. Деминг, Э. Менеджмент нового времени: Простые механизмы, ведущие к росту, инновациям и доминированию на рынке / Э. Деминг; перевод с английского Т. Гуреш. – М.: Альпина Паблишер, 2019. – 182 с.
43. Дмитриев, А. Я. Проектирование качества продукции на основе параметрической идентификации моделей, требований потребителей, знаний: онтологическая парадигма / А. Я. Дмитриев, Т. А. Митрошкина // Онтология проектирования. – 2015. – Т. 5. – № 3(17). – С. 313–327.

44. Замараева, Ю. С. Индустрия 4.0 к Индустрии 5.0: концепция Гэри Меткалфа / Ю. С. Замараева, Н. П. Копцева // Цифровизация. – 2024. – Т. 5. – № 2. – С. 8–40.
45. Индикаторы цифровой экономики // НИУ ВШЭ [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.hse.ru/primarydata/iio>
46. ИНКА 4.0 Цифровое производство // Реестр программного обеспечения Минцифры России [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://reestr.digital.gov.ru/reestr/1123361/?sphrase_id=19318411
47. Исследование перспектив развития SAP систем в российских компаниях – 2025 // SAPLAND [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://sappro.sapland.ru/publications/issledovanie-perspektiv-razvitiya-sap-sistem-v-rossiiskih-kompaniyah-2025.html>
48. Исследование рынка АСУТП в России // УльмаТек. – 2025. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://ultimatec.ru/upload/iblock/e25/nqo46m525n74e0befzby50cvbe0ns39z.pdf>
49. Казакова, Н. В. Индустрия сервиса в контексте пятой промышленной революции / Н. В. Казакова, О. В. Лысикова, Л. В. Славнецкова // Сервис plus. – 2025. – Т. 19. – № 4. – С. 42–48.
50. Каххорова, М. А. Менеджмент в Индустрии 5.0 как эволюция концепции Индустрии 4.0 / М. А. Каххорова, Ю. С. Шакирова, Г. Ш. Хонкелдиева // Стратегическое управление цифровой трансформацией интеллектуальной экономики и промышленности в новой реальности: монография. – Санкт-Петербург: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2024. – С. 369–396.
51. Кизим, А. В. Модели и методы интеллектуальной поддержки принятия решений при управлении процессом технического обслуживания, ремонта и модернизации промышленного оборудования: автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.13.01 / Кизим Алексей Владимирович. – Волгоград, 2021. – 36 с.
52. Козловский, В. Н. Машинное обучение в управлении качеством: почему контрольные карты уступают место нейросетям / В. Н. Козловский, В. Г. Мосин // Методы менеджмента качества. – 2026. – № 3. – С. 6–11.

53. Козловский, В. Н. Стратегия цифровизации: новое качество производства / В. Н. Козловский, С. И. Клейменов, Д. В. Айдаров, Д. И. Панюков // Методы менеджмента качества. – 2020. – № 2. – С. 46–55.
54. Козловский, В. Н. Цифровизация. Применение статистических инструментов в улучшении качества сложных производственных процессов / В. Н. Козловский, А. В. Керов, Д. И. Благовещенский, Р. Р. Гафаров // Автомобильная промышленность. – 2022. – № 5. – С. 1–5.
55. Кудрявцева, С. С. Индикативное моделирование эффективности внедрения инструментов бережливого производства в промышленности / С. С. Кудрявцева, Н. Н. Зиятдинов, Т. В. Лаптева, А. С. Титовцев // Современные наукоемкие технологии. – 2023. – № 12–2. – С. 210–215.
56. Кудрявцева, С. С. Технологии цифровизации систем менеджмента качества бизнес-процессов предприятия / С. С. Кудрявцева, И. Р. Матусевич, Р. А. Халиулин // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2022. – Т. 24. – № 4(108). – С. 37–41.
57. Лабораторная информационная менеджмент система «АИСТ» // Реестр программного обеспечения Минцифры России [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://reestr.digital.gov.ru/reestr/2124447/?sphrase_id=19317751
58. Лapidус, В. А. Система Шухарта: монография / В. А. Лapidус. – Н. Новгород: Приоритет, 2004. – 64 с.
59. Лapidус, В. А. Тенденции развития менеджмента: качество 4.0 / В. А. Лapidус // Методы менеджмента качества. – 2022. – № 1. – С. 8–14.
60. Лукина, С. В. Методика формирования и выбора программы цифровой трансформации промышленного предприятия / С. В. Лукина, Е. Д. Коршунова, В. В. Макаров // Социальные и экономические системы. – 2022. – № 4(28). – С. 317–326.
61. Макаров, В. В. Особенности разработки и применения смарт-стандартов как основы реализации концепции «Качество 4.0» / В. В. Макаров, О. В. Волчик // Журнал правовых и экономических исследований. – 2023. – № 3. – С. 285–289.

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

63. Малышева, Т. В. Разработка научно-организационных методов и средств развития малоотходных экологически безопасных химико-технологических систем: автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.02.22 / Малышева Татьяна Витальевна. – Казань, 2021. – 42 с.

64. Маркова, О. М. Использование цифровой банковской платформы для продвижения розничных продуктов и услуг на российском рынке / О. М. Маркова // Финансовые рынки и банки. – 2019. – № 1. – С. 51–54.

65. Мешалкин, В. П. Интегрированная модель проекта технологического суверенитета в машиностроительной отрасли / В. П. Мешалкин, Я. В. Денисова // Компетентность. – 2025. – № 9. – С. 9–15.

66. Мешалкин, В. П. Методы цифровизированного инжиниринга ресурсоэнергосберегающих экологически безопасных химико-технологических систем / В. П. Мешалкин, В. В. Челноков, Д. А. Макаренков // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2021. – Т. 27. – № 4. – С. 564–575.

67. Мошев, Е. Р. Архитектура и информационно-технологические инструменты комплекса программ интегрированной логистической поддержки промышленных трубопроводных систем / Е. Р. Мошев // Программные продукты и системы. – 2015. – № 1. – С. 127–138.

68. Нугманов, Д. И. Имитационное моделирование диагностики эффективности планирования производства в условиях «цифровой фабрики» / Д. И. Нугманов, Р. К. Нургалиев // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2026. – № 7. – С. 66–72.

69. Нугманов, Д. И. Методика оценки эффективности производства в условиях реализации модели цифровой фабрики / Д. И. Нугманов // Информационно-экономические аспекты стандартизации и технического регулирования. – 2026. – № 3(90). – С. 64–69.

70. Нугманов, Д. И. Системно-динамическое моделирование диагностики планирования производства в модели «цифровой фабрики» // Свидетельство о регистрации электронного ресурса № 25639 от 06.06.2026 г. ОФЭРНиО.

71. Нугманов, Д. И. Стандартизация в формировании цифровой фабрики // Эффективные системы менеджмента: Стандартизация. Экономика данных. Кадровое и технологическое лидерство: сборник научных статей XIII Международного научно-практического форума, Казань, 26-28 марта 2026 года. – Казань, Изд-во «Познание» Казанского инновационного университета, 2026. – С. 260–263.

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

73. Нугманов, Д. И. Структурные элементы модели цифровой фабрики алюминиевого производства / Д. И. Нугманов, Р. К. Нургалиев // Математические методы в технологиях и технике. – 2026. – № 1. – С. 96–100.

74. Нугманов, Д. И. Тенденции развития интеллектуальных производственных систем / Д. И. Нугманов // Технологии и техника: пути инновационного развития: сборник научных статей 4-й Международной научно-технической конференции, Воронеж, 17 июня 2026 года. – Курск: ЗАО «Университетская книга», 2026. – С. 267-270.

75. Нугманов, Д. И. Цифровая фабрика как инструмент совершенствования процессов организации производства / Д. И. Нугманов // Актуальные тренды цифровой трансформации промышленных предприятий: Сборник статей Всероссийской научно-практической конференции, Казань, 28–29 ноября 2025 года. – Курск: ЗАО «Университетская книга», 2025. – С. 371–373.

76. Нугманов, Д. И. Эволюция концепций организации производства и управления качеством: от бережливого производства к Индустрии 4.0 / Д. И. Нугманов // Актуальные тренды цифровой трансформации промышленных предприятий: Сборник статей Всероссийской научно-практической конференции,

Казань, 28–29 ноября 2025 года. – Курск: ЗАО «Университетская книга», 2025. – С. 374–377.

77. Нургалиев, Р. К. Логико-информационная модель управления процессами «умного» производства / Р. К. Нургалиев, А. И. Шинкевич // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2021. – Т. 23. – № 2(100). – С. 29–36.

78. Переборова, Н. В. Инновационные методы контроля качества и функциональности полимерных материалов текстильной и легкой промышленности / Н. В. Переборова // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 4: Промышленные технологии. – 2022. – № 1. – С. 27–32.

79. Перспективный план стандартизации в области передовых производственных технологий на 2025–2030 гг. (с изменением № 1, 2, 3). [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://nti2035.ru/documents/standardization/>

80. ПК СТМ КАСКАД // Реестр программного обеспечения Минцифры России [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://reestr.digital.gov.ru/reestr/678216/?sphrase_id=19318561

81. Романова, О. А. От Индустрии 4.0 к Индустрии 5.0: проблемы и возможности развития металлургии России / О. А. Романова, Д. В. Сиротин // Сталь. – 2024. – № 1. – С. 46–52.

82. Савич, Е. К. Методика интегральной оценки качества функционирования цифровой платформы системы менеджмента качества / Е. К. Савич // Известия Самарского научного центра РАН. – 2025. – Т. 27. – № 5. – С. 34–40.

83. Савич, Е. К. Методология создания и функционирования интеллектуальной цифровой системы менеджмента качества: автореф. дис. ... докт. техн. наук: 2.5.22 / Савич Екатерина Константиновна. – Самара, 2025. – 32 с.

84. Салимова, Т. А. Менеджмент качества в условиях перехода к индустрии 4.0 / Т. А. Салимова, Н. Ш. Ватолкина // Стандарты и качество. – 2018. – № 6. – С. 58–62.
85. Самохвалов, Э. Н. Использование метаграфов для описания семантики и прагматики информационных систем / Э. Н. Самохвалов, Г. И. Ревунков, Ю. Е. Гапанюк // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия Приборостроение. – 2015. – № 1(100). – С. 83–99.
86. Сироткин, Р. О. Опережающая стандартизация и ее роль как одного из драйверов развития промышленности / Р. О. Сироткин, А. П. Шалаев // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2018. – № 4. – С. 17–22.
87. Система диспетчеризации «BFG-iMES» // Реестр программного обеспечения Минцифры России [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://reestr.digital.gov.ru/reestr/1969367/?sphrase_id=19317061
88. Скобелев, Д. О. Роль наилучших доступных технологий в управлении качеством продукции / Д. О. Скобелев, И. С. Курошев // Стандарты и качество. – 2023. – № 12. – С. 72–76.
89. Скобелев, К. Д. Совершенствование системы управления качеством испытательной лаборатории в условиях цифровой трансформации: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 2.5.22 / Скобелев Кирилл Дмитриевич. – Казань, 2025. – 22 с.
90. Соколов, Б. В. Методологические основы создания и использования цифровых двойников сложных объектов / Б. В. Соколов, В. В. Захаров // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2022. – Т. 65. – № 12. – С. 916–919.
91. Сычев, В. А. Бизнес-моделирование в задачах эффективной организации производственных процессов / В. А. Сычев // Вестник Южно-Российского государственного технического университета (НПИ). Серия: Социально-экономические науки. – 2017. – № 1. – С. 16–22.
92. Тарасов, И. В. Индустрия 4.0: понятие, концепции, тенденции развития / И. В. Тарасов // Стратегии бизнеса. – 2018. – № 6. – С. 59.

93. Тикки, Д. А. Применение технологии фабрики данных / Д. А. Тикки, В. Е. Никольский, Н. С. Самошкин, Т. В. Сафонова, А. В. Мокряк // Международный журнал информационных технологий и энергоэффективности. – 2024. – Т. 9. – № 7(45). – С. 195–202.

94. Ткаченко, И. С. Концептуальная модель цифрового завода производственного предприятия аэрокосмической отрасли / И. С. Ткаченко, Д. В. Антипов, А. В. Куприянов, В. Г. Смелов, В. В. Кокарева // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2023. – Т. 25. – № 3(113). – С. 90–106.

95. Тунакова, Ю. А. Интеллектуальные технологии для автоматизированного формирования программы производственного экологического контроля (сообщение 1) / Ю. А. Тунакова, С. В. Новикова, А. Р. Шагидуллин, В. С. Валиев // Вестник Технологического университета. – 2022. – Т. 25. – № 9. – С. 105–111.

96. Тунакова, Ю. А. Интеллектуальные технологии для автоматизированного формирования программы производственного экологического контроля (сообщение 2) / Ю. А. Тунакова, С. В. Новикова, А. Р. Шагидуллин, В. С. Валиев // Вестник Технологического университета. – 2022. – Т. 25. – № 9. – С. 118–123.

97. Фабрики Будущего // «Технет» СПбПУ. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://technet.spbstu.ru/article/fabriki-buducshego>

98. Фарисов, Р. Д. Развитие методологии постоянного улучшения массового чугунолитейного производства: автореф. дис. ... докт. техн. наук: 2.5.22 / Фарисов Рисуи Данифович. – Самара, 2023. – 37 с.

99. Федеральная служба государственной статистики [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://rosstat.gov.ru/>

100. Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.gost.ru/portal/gost/home/activity/standardization>

101. Федеральный форум по ИТ и цифровизации в промышленности «ЦИФРОПРОМ» [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.comnews-conferences.ru/ru/conference/industry2025/postreliz>
102. Фомин, И. Н. Искусственный интеллект в СМК: как ИИ-ассистенты трансформируют управление качеством / И. Н. Фомин // Методы менеджмента качества. – 2025. – № 5. – С. 8–12.
103. Фомин, И. Н. Онтологии в проектировании индустриальных цифровых платформ / И. Н. Фомин // Онтология проектирования. – 2025. – Т. 15. – № 4(58). – С. 535–551.
104. Фомина, А. В. Индустрия 4.0. Основные понятия, преимущества и проблемы / А. В. Фомина, К. Ю. Мухин // Экономический вектор. – 2018. – № 3. – С. 34–36.
105. Халилюлина, Н. Б. Проблематика внедрения цифровых технологий в процессе внутреннего аудита системы менеджмента качества предприятия радиоэлектронной отрасли / Н. Б. Халилюлина, Ю. Ю. Черемухина // Наука и бизнес: пути развития. – 2022. – № 7(133). – С. 93–96.
106. Харитонов, Д. В. Повышение производительности участка механической обработки керамических изделий в ОПК / Д. В. Харитонов, А. Н. Блинов, Д. А. Анашкин // Современные наукоемкие технологии. – 2022. – № 1. – С. 114–120.
107. Харитонов, Д. В. Цифровая трансформация оборонно-промышленного комплекса: на примере наукоемкого производства керамических изделий / Д. В. Харитонов, А. В. Грошев // Современные наукоемкие технологии. – 2022. – № 7. – С. 93–99.
108. Цифровая экономика: 2026: краткий статистический сборник / В. Л. Абашкин, Г. И. Абдрахманова, К. О. Вишневский, Л. М. Гохберг и др.; Нац. исслед. ун-т «Высшая школа экономики». – М.: ИСИЭЗ ВШЭ, 2026. – 132 с.
109. Часовских, В. П. Создание эффективных цифровых фабрик посредством формирования цепочек технологий / В. П. Часовских, М. П. Воронов, Е. В. Кох // Фундаментальные исследования. – 2022. – № 10–2. – С. 243–248.

110. Челенко, А. В. Управление качеством изделий машиностроительного производства путем установления функциональных и корреляционных зависимостей точностных показателей / А. В. Челенко // Контроль качества продукции. – 2024. – № 7. – С. 56–60.

111. Черненький, В. М. Метаграфовый подход для описания гибридных интеллектуальных информационных систем / В. М. Черненький, Ю. Е. Гапанюк, Г. И. Ревунков, В. И. Терехов, Ю. Т. Каганов // Прикладная информатика. – 2017. – Т. 12. – № 3(69). – С. 57–79.

112. Шальнев, М. О. Применение цифровых инструментов в области бережливого производства на промышленных предприятиях / М. О. Шальнев, Я. В. Денисова // Омский научный вестник. – 2025. – № 4(196). – С. 35–42.

113. Шестаков, Р. Б. От индустрии 4.0 к индустрии 5.0: формирование, развитие, проблемы и перспективы / Р. Б. Шестаков, А. И. Филиппова-Глебова, Н. А. Яковлев // Вестник техносферной безопасности и сельского развития. – 2024. – № 3(38). – С. 15–18.

114. Шинкевич, А. И. Проектирование цифрового двойника системы организации производства / А. И. Шинкевич, М. Е. Надеждина, В. Ф. Сопин // Стандарты и качество. – 2024. – № 4. – С. 94–99.

115. Шинкевич, А. И. Роль внедрения цифровых производственных систем на фармацевтическом предприятии / А. И. Шинкевич, Л. Р. Мухаматгалеева, В. И. Бобков // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2021. – Т. 23. – № 6(104). – С. 62–66.

116. Энциклопедия технологий. Эволюция и сравнительный анализ ресурсной эффективности промышленных технологий / [гл. ред. Д. О. Скобелев]; ФГАУ «НИИ «ЦЭПП». – М.; СПб.: «Реноме», 2019. – 824 с.

117. Ян, Ч. Архитектура интегрированных PLM MES QMS платформ для сквозного управления качеством на всем жизненном цикле изделия в дискретном производстве / Ч. Ян // Инновации и инвестиции. – 2026. – № 1. – С. 366–369.

118. Abdel-Aty, T. A. Conceptualizing the digital thread for smart manufacturing: a systematic literature review / T. A. Abdel-Aty, E. Negri // Journal of Intelligent

Manufacturing. – 2024. – Vol. 35. – P. 3629–3653. <https://doi.org/10.1007/s10845-024-02407-1>

119. Antony, J. Quality 4.0 conceptualisation and theoretical understanding: a global exploratory qualitative study / J. Antony, O. McDermott, M. Sony // *The TQM Journal*. – 2022. – No. 34(5). – P. 1169–1188.

120. Asian Network for Quality Congress 2021 in Singapore – Day 2 [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://qualityalchemist.blogspot.com/2021/10/anq-congress-2021-in-singapore-day-2.html>

121. Dli, M. Energy and resource efficiency in apatite-nepheline ore waste processing using the digital twin approach / M. Dli, A. Puchkov, V. Meshalkin, I. Abdeev, R. Saitov, R. Abdeev // *Energies*. – 2020. – Vol. 13. – No. 21. – Article 5829.

122. Feigenbaum, A. V. Total quality control / A. V. Feigenbaum. – New York: McGraw-Hill, 1983. – 851 p.

123. Florescu, A. Development trends of production systems through the integration of Lean management and Industry 4.0 / A. Florescu, S. Barabas // *Applied Sciences*. – 2022. – No. 12(10). – Article 4885.

124. Goktas, H.O. Applying the Delphi method to assess critical success factors of digitalization while sustaining Lean at a Lean automaker / H.O. Goktas, N. Yumusak // *Sustainability*. – 2024. – No. 16(19). – Article 8424.

125. Grefen, P. The Need for Digital Architecture in Operationalizing Digital Engineering Strategies for Smart Production Systems / P. Grefen, A. Wilbik // *Systems*. – 2026. – No. 14(3). – Article 297.

126. Jamari, S. Industry 4.0 enablers and lean manufacturing tools in respect of human resources / S. Jamari, F. Fedouaki // *Engineering Proceedings*. – 2025. – No. 97(1). – Article 43.

127. Javaid, M. Significance of Quality 4.0 towards comprehensive enhancement in manufacturing sector / M. Javaid, A. Haleem, R.P. Singh, R. Suman // *Sensors International*. – 2021. – Vol. 2. – Article 100109.

128. Juran, J. M. Juran's quality handbook: the complete guide to performance excellence / J. M. Juran, J. A. De Feo: 6th ed. – New York: McGraw Hill, 2010. – 1136 p.
129. Kaitwanidvilai, S. Optimizing Product Quality Prediction in Smart Manufacturing Through Parameter Transfer Learning: A Case Study in Hard Disk Drive Manufacturing / S. Kaitwanidvilai, C. Sittisombut, Y. Huang, S. Bom // Processes. – 2025. – No. 13(4). – Article 962.
130. Mabkhot, M. M. Introducing the Manufacturing Digital Passport (MDP): A New Concept for Realising Digital Thread Data Sharing in Aerospace and Complex Manufacturing / M. M. Mabkhot, R. S. Kalawsky, A. Liaqat // Systems. – 2025. – No. 13(8). – Article 700.
131. Nurgaliev, R. K. Building a business process management model for a «smart» enterprise / R. K. Nurgaliev, A. I. Shinkevich // Journal of Physics: Conference Series: II International Scientific Conference on Metrological Support of Innovative Technologies (ICMSIT II-2021). – Krasnoyarsk: IOP Publishing Ltd, 2021. – Article 22106.
132. Saihi, A. Quality 4.0: leveraging Industry 4.0 technologies to improve quality management practices – a systematic review / A. Saihi, M. Awad, M. Ben-Daya // International Journal of Quality & Reliability Management. – 2023. – Vol. 40. – No. 2. – P. 628–650.
133. Schmidt, F. Manufacturing 4.0 needs Integration 4.0: Why smart factories still fall short [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://friends.com/insights/manufacturing-4.0-needs-integration-4.0-why-smart-factories-still-fall-short>
134. Smith, N. D. Digital Performance Management: An Evaluation of Manufacturing Performance Management and Measurement Strategies in an Industry 4.0 Context / N. D. Smith, Y. Hovanski, J. Tenny, S. Bergner // Machines. – 2024. – No. 12. – Article 555.
135. Vinodh, S. Analysis of critical success factors of Quality 4.0 implementation in manufacturing SMEs using best–worst method / S. Vinodh, V. A. Wankhede, G. Muruganantham // The TQM Journal. – 2024. – Vol. 38. – Is. 2. – P. 273–296.

136. Taylor, F. W. The Principles of Scientific Management / F. W. Taylor. – New York: Harper & Brothers, 1911. – 144 p.

137. Treviño-Elizondo, B. L. A maturity model to become a smart organization based on lean and Industry 4.0 synergy / B. L. Treviño-Elizondo, H. García-Reyes, R.E. Peimbert-García // Sustainability. – 2023. – No. 15. – Article 13151.

138. Quality 4.0. Impact and strategy handbook. Getting Digitally Connected to Transform Quality Management [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://blog.lnsresearch.com/quality40ebook#sthash.dL0pxfxT.dpbs>

ПРИЛОЖЕНИЯ

Использование промышленных роботов (данные Росстата)

Отрасль	Число сотрудников на производстве, чел.	Число используемых промышленных роботов, ед.	Число используемых логистических роботов, ед.
Обрабатывающие производства	4210543	21740	4676
Производство металлургическое	361115	409	50
Производство чугуна, стали и ферросплавов	147452	137	22
Производство чугуна, стали и ферросплавов	147414	137	22
Производство стальных труб, полых профилей и фитингов	47723	101	5
Производство стальных труб, полых профилей и фитингов	47723	101	5
Производство холодноотянутого штрипса	15789	26	4
Производство проволоки методом холодного волочения	6919	15	...
Производство драгоценных металлов	129952	119	18
Производство алюминия	46448	27	...
Производство свинца, цинка и олова	3513	5	-
Производство меди	16277	21	-
Литье металлов	20199	26	...
Литье чугуна	6832	8	...
Литье стали	11039	8	-

**Использование программных средств в решении прикладных задач производства
на предприятиях металлургической отрасли, единиц (данные Росстата)**

	Число организаций, в которых программные средства для отдельных прикладных задач	из них число организаций, в которых программные средства российского производства для отдельных прикладных задач	
	использовались	преобладают	используются, но не преобладают
Всего	551	230	235
Для научных исследований	90	16	28
Для проектирования / моделирования (CAD/CAE/CAM/CAO)	286	143	74
Для управления автоматизированным производством и/или отдельными техническими средствами и технологическими процессами	224	75	65
Для управления закупками товаров (работ, услуг)	321	187	55
Для управления продажами товаров (работ, услуг)	308	184	53
Для управления складом	356	212	64
Для осуществления финансовых расчетов в электронном виде	422	299	66
Для предоставления доступа к базам данных предприятия через глобальные информационные сети, включая сеть Интернет	185	68	45
Для обеспечения информационной безопасности	418	282	77
Электронные справочно- правовые системы	437	338	71
CRM системы	202	110	34
ERP системы	316	174	57
SCM системы	101	25	22
PLM / PDM системы	107	39	20
HRIS	213	117	40
Редакционно-издательские системы	94	19	18
Обучающие программы	255	159	54
Системы электронного документооборота	458	340	81

**Структура затрат на внедрение и использование цифровых технологий на
предприятиях металлургической отрасли в 2024 г. по типам металлургического
производства (составлено и рассчитано по данным Росстата)**

Тип металлургического производства	Код ОКВЭД	Затраты, тыс. рублей	Процент к итогу, %
Производство металлургическое	24	50 232 427,5	100,0
Производство прочих цветных металлов; производство ядерного топлива	24.04.АГ	12 498 783,0	24,9
Литье легких и прочих цветных металлов, не включенных в другие группировки	24.05.АГ	25 516,0	0,1
Производство чугуна, стали и ферросплавов	24.10	15 283 791,5	30,4
Производство основных продуктов из железа и стали	24.10.1	472 316,8	0,9
Производство чугуна	24.10.11	148 736,7	0,3
Производство ферросплавов	24.10.12	296 942,7	0,6
Производство гранул и порошков из чугуна или стали	24.10.14	25 596,0	0,1
Производство стали в слитках	24.10.2	1 773 566,5	3,5
Производство листового горячекатаного стального проката	24.10.3	6 266 899,4	12,5
Производство листового холоднокатаного стального проката, плакированного, с гальваническим или иным покрытием	24.10.5	132 941,7	0,3
Производство сортового горячекатаного проката и катанки	24.10.6	2 730 018,5	5,4
Производство прочего проката из черных металлов, не включенного в другие группировки	24.10.9	2 008 383,9	4,0
Производство стальных труб, полых профилей и фитингов	24.2	7 502 457,7	14,9
Производство стальных труб, полых профилей и фитингов	24.20	7 502 457,7	14,9
Производство бесшовных труб и пустотелых профилей	24.20.1	2 989 132,2	6,0
Производство сварных труб	24.20.2	4 156 912,5	8,3
Производство стальных фитингов для труб, кроме литых	24.20.3	192 499,0	0,4
Производство прочих стальных изделий первичной обработкой	24.3	943 413,5	1,9
Производство холодноотянутого штрипса	24.32	108 037,3	0,2
Производство профилей с помощью холодной штамповки или гибки	24.33	461 090,1	0,9
Производство проволоки методом холодного волочения	24.34	374 286,1	0,7
Производство основных драгоценных металлов и прочих цветных металлов, производство ядерного топлива	24.4	25 939 577,2	51,6

Продолжение приложения В

Тип металлургического производства	Код ОКВЭД	Затраты, тыс. рублей	Процент к итогу, %
Производство драгоценных металлов	24.41	1 577 364,6	3,1
Производство алюминия	24.42	8 452 818,6	16,8
Производство свинца, цинка и олова	24.43	177 283,4	0,4
Производство свинца	24.43.1	4 206,6	0,0
Производство цинка	24.43.2	164 588,8	0,3
Производство меди	24.44	3 233 327,6	6,4
Литье металлов	24.5	563 187,6	1,1
Литье чугуна	24.51	187 921,6	0,4
Литье стали	24.52	349 750,0	0,7

Параметры настройки стохастической модели

Таблица Г.1 – Параметры настройки для традиционного производства

Описание i-го показателя	Един. измерения	Средн. знач.	Станд. откл.	Коэф. вариации	Закон распредел.
T _{норм} : нормативное время расчета производственного расписания	мин.	20	-	-	-
T _{факт} : фактическое время расчета производственного расписания	мин.	30	15,00	0,5 $0,4 \leq v < 1$	Вейбулла
D _{план} : доля партий, отгруженных с нарушением срока	коэф.	0,04	-	-	-
D _{факт} : доля партий, отгруженных с нарушением срока	коэф.	0,08	0,04	0,5 $0,4 \leq v < 1$	Вейбулла
Q _{план} : плановый объём производства	усл. ед.	100	-	-	-
Q _{факт} : фактический объём производства	усл. ед.	93	5,00	0,054 $v \leq 0,3$	Нормальный
V _{план} : допустимая доля брака по технологии	коэф.	0,05	-	-	-
V _{факт} : фактическая доля брака	коэф.	0,09	0,045	0,5 $0,4 \leq v < 1$	Вейбулла
V _{эталон} : эталонное время реакции	мин.	10	-	-	-
V _{факт,1} : реакция на небольшое отклонение	мин.	5	1,50	0,3 $v \leq 0,3$	Нормальный
V _{факт,2} : реакция на среднее отклонение	мин.	15	7,50	0,5 $0,4 \leq v < 1$	Вейбулла
V _{факт,3} : реакция на аварию	мин.	35	21,00	0,6 $0,4 \leq v < 1$	Вейбулла

Таблица Г.2 – Параметры настройки для моделирования цифрового производства

Условное обозначение	Един. измерения	Средн. знач.	Станд. откл.	Коэф. вариации	Закон распредел.
T _{норм}	мин.	20	-	-	-
T _{факт}	мин.	22	3,30	0,15	Нормальный
D _{план}	коэф.	0,04	-	-	-
D _{факт}	коэф.	0,05	0,01	0,2	Нормальный
Q _{план}	усл. ед.	100,00	-	-	-
Q _{факт}	усл. ед.	97,00	2,50	0,026	Нормальный
V _{план}	коэф.	0,05	-	-	-
V _{факт}	коэф.	0,06	0,012	0,2	Нормальный
V _{эталон}	мин.	7	-	-	-
V _{факт,1}	мин.	3	0,90	0,3	Нормальный
V _{факт,2}	мин.	7	2,10	0,3	Нормальный
V _{факт,3}	мин.	18	5,40	0,3	Нормальный

Обоснование выбора закона распределения случайных величин

Таблица Д.1 – Традиционное производство

Показатель	Закон распред.	Обоснование
$T_{\text{факт}}$: фактическое время расчета производственного расписания	Вейбулла	Ручной сбор данных, непредсказуемые задержки
$D_{\text{факт}}$: доля партий, отгруженных с нарушением срока	Вейбулла	Отсутствие синхронизации переделов
$Q_{\text{факт}}$: фактический объем производства	Нормальный	Небольшие отклонения от плана
$V_{\text{факт}}$: фактическая доля брака	Вейбулла	Без автоматизированного контроля брак носит слабо предсказуемый характер
$V_{\text{факт},1}$: реакция на небольшое отклонение	Нормальный	Опытный мастер быстро решает проблему отклонения
$V_{\text{факт},2}$: реакция на среднее отклонение	Вейбулла	Требуется время на анализ, согласование
$V_{\text{факт},3}$: реакция на аварию	Вейбулла	Каждая аварийная ситуация уникальна по своей природе

Таблица Д.2 – Параметры настройки для моделирования цифрового производства

Показатель	Закон распред.	Обоснование
$T_{\text{факт}}$: фактическое время расчета производственного расписания	<i>Нормальный</i>	Данные MES, автоматизированные алгоритмы обеспечивают стабильность и предсказуемость процессов планирования
$D_{\text{факт}}$: доля партий, отгруженных с нарушением срока	<i>Нормальный</i>	Синхронизация переделов
$Q_{\text{факт}}$: фактический объем производства	Нормальный	Небольшие отклонения от плана
$V_{\text{факт}}$: фактическая доля брака	<i>Нормальный</i>	Мониторинг в режиме реального времени снижает вероятность брака
$V_{\text{факт},1}$: реакция на небольшое отклонение	Нормальный	Опытный мастер быстро решает проблему отклонения
$V_{\text{факт},2}$: реакция на среднее отклонение	<i>Нормальный</i>	Система поддержки решений, предиктивная аналитика обеспечивают проактивность системы
$V_{\text{факт},3}$: реакция на аварию	<i>Нормальный</i>	«Цифровой двойник» и машинное обучение повышают предиктивность параметров системы и скорость реагирования

Формулы для моделирования случайных величин

Таблица Е.1 – Параметры и формулы

Закон распределения, параметры	Расчетная формула
Нормальный, $\bar{x}$, σ	$x_i = \bar{x} + \sigma \cdot \xi_i$
Вейбулла, m , T_0	$x_i = x_0 \sqrt[m]{-\ln \xi_i}$
Гамма-распределение, λ , η	$x_i = -\frac{1}{\lambda} \sum_{j=1}^{\eta} \ln(1 - \xi_i)$

Таблица Е.2 – Коэффициенты для расчета параметров распределения Вейбулла

Коэффициент вариации	Коэффициент b_m	Параметр m
0,910	0,965	1,1
0,837	0,940	1,2
0,776	0,923	1,3
0,724	0,911	1,4
0,679	0,903	1,5
0,640	0,897	1,6
0,605	0,892	1,7
0,575	0,889	1,8
0,547	0,888	1,9
0,523	0,886	2
0,5	0,886	2,1
0,48	0,886	2,2