На правах рукописи



НУГМАНОВ ДИЛЬШАТ ИЛХАМОВИЧ

РАЗРАБОТКА НАУЧНО-ОРГАНИЗАЦИОННЫХ МЕТОДОВ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЦИФРОВОГО ПРОИЗВОДСТВА

2.5.22. Управление качеством продукции.
Стандартизация. Организация производства

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Казань – 2026

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

Научный руководитель: **Нургалиев Рустам Карлович**
доктор технических наук, доцент

Официальные оппоненты: **Харитонов Дмитрий Викторович**
доктор технических наук, доцент, заслуженный изобретатель Российской Федерации, акционерное общество «Обнинское научно-производственное предприятие «Технология» им. А.Г. Ромашина», заместитель директора научно-производственного комплекса по производственной деятельности – начальник цеха 19;

Скорнякова Елизавета Алексеевна
кандидат технических наук, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова», доцент кафедры «Программная инженерия и интеллектуальные системы».

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королева», г. Самара.

Защита состоится 24 декабря 2026 года в 12:00 на заседании диссертационного совета 24.2.312.08, созданного на базе ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет» (420015, г. Казань, ул. К. Маркса, д. 68, зал заседаний Ученого совета, А – 330).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет» и на сайте https://www.kstu.ru/servlet/contentblob?id=598476.

Автореферат диссертации разослан «____» _____2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.312.08,
доктор экономических наук, доцент



Кудрявцева
Светлана
Сергеевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. 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, Дж. Джураном, Ф. У. Тейлором, А. Фейгенбаумом, У. Э. Шухартом и др., и получили развитие в трудах Т. А. Салимовой, В. А. Лапидуса, посвященных изучению и практическому применению положений концепции Качество 4.0, а также О. А. Горленко, А. Я. Дмитриева, Т. А. Митрошкиной, внимание которых обращено на реализацию QFD-методологии («дом качества») как метода управления ка-

чеством продукции. Наилучшие доступные технологии как инструмент управления качеством раскрыт в работах Т. В. Гусевой, Д. О. Скобелева и др. Значимый вклад в решение научно-практических проблем в области бережливого производства внесли В. М. Бабушкин, А. В. Кизим, Т. В. Малышева, академик РАН В. П. Мешалкин, Р. Д. Фарисов, Д. В. Харитонов 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, Я. А. Ерисов, С. С. Кудрявцева, Е. Р. Мошев, С. В. Новикова, Р. К. Нургалиев, Е. К. Савич, Е. А. Скорнякова, И. Н. Хаймович, А. И. Шинкевич и др. Цифровой трансформации подсистемы управления качеством посвящены труды следующих ученых: Д. И. Благовещенский, В. А. Васильев, С. А. Васин, И. А. Гарькина, Е. А. Горбашко, А. М. Данилов, В. Н. Козловский, О. В. Пантюхин, Д. И. Панюков, Н. В. Переборова, Ю. Ю. Черемухина и др. В частности, специфика «цифровой фабрики» как инструмента организации производства раскрыта в научных публикациях Д. В. Антипова, А. В. Куприянова, И. С. Ткаченко, В. П. Часовских 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 обусловливает необходимость разработки соответствующих новых организационно-технических решений.

Цель и задачи диссертационного 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:

– разработать структурно-параметрическую модель «цифровой фабрики» для эффективной организации анодного производства;

– предложить методику оценки эффективности производственной системы в разрезе модулей «цифровой фабрики» анодного производства;

– сформировать комплексный инструментарий организации производства на основе модели «цифровой фабрики», интегрирующий предложенные разработки в единую систему управления производственными процессами;

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

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

Предметом диссертационного 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 фабрике», 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 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.

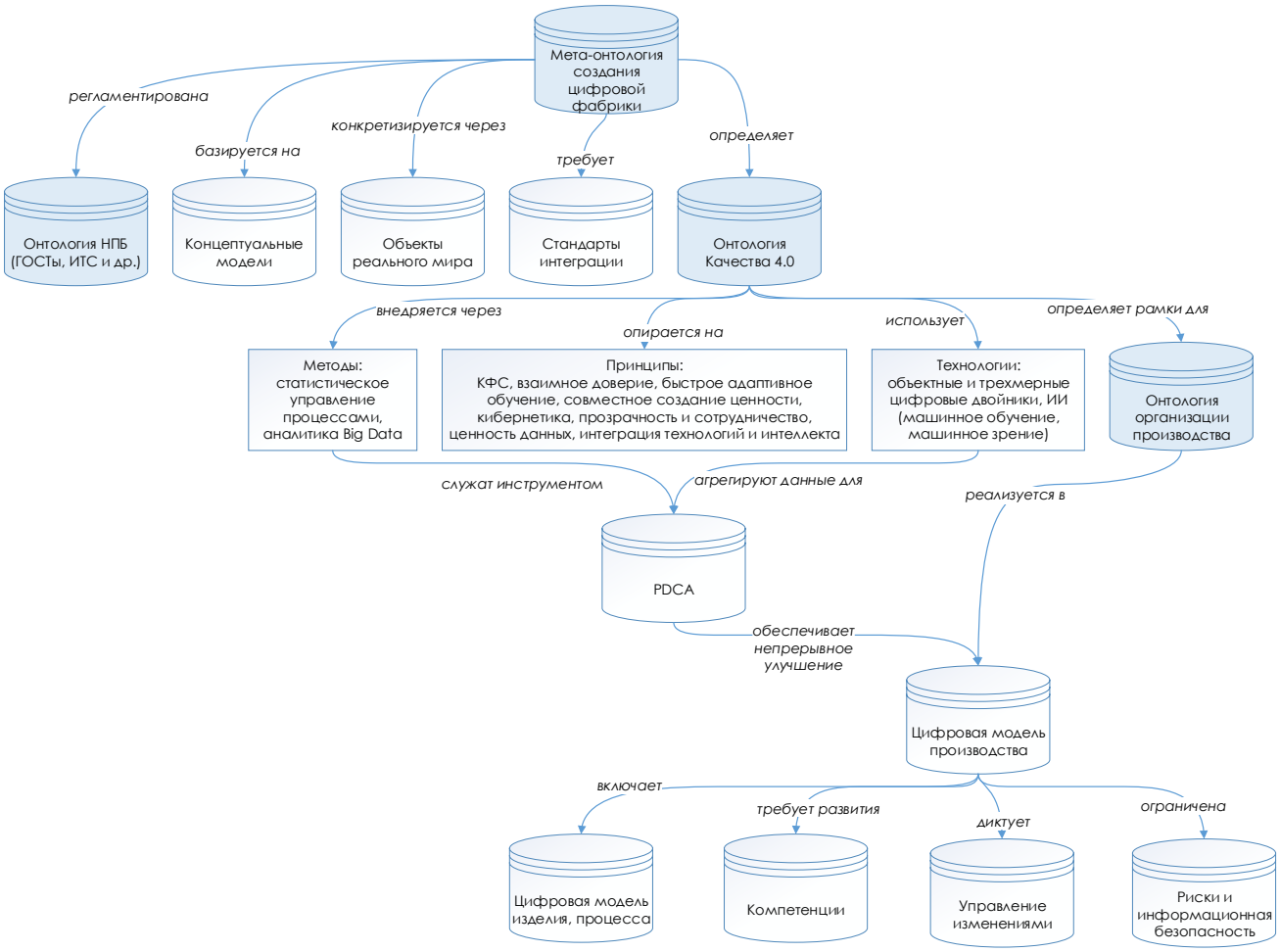
ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении раскрыта актуальность исследуемой проблематики, обозначены цель и задачи, объект и предмет исследования, раскрыта научная новизна, теоретическая и практическая ценность результатов исследования, обоснована степень их достоверности.

В первой главе «Научно-технический обзор и анализ современных проблем организации производства в условиях цифровой трансформации» исследована эволюция концептуальных подходов к организации производства и управлению качеством. Обосновано, что 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.

В диссертации формализована онтология организации производства в модели «цифровой фабрики» (рис. 1), отличающаяся 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.



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

Рисунок 1 – Прикладная онтология организации производства в модели «цифровой фабрики» (составлено автором)

В работе систематизированы перспективы интеллектуализации производственных систем в условиях Индустрии 4.0 и Индустрии 5.0. Выявлена тенденция устойчивого роста затрат и числа 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.

В ходе исследования выявлены ключевые проблемы организации производства при переходе к модели «цифровой фабрики», обусловленные 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.

В результате исследования проблем проектирования цифрового производства построена концептуальная структура моделирования анодного производства, которая 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 (рис. 2).



Рисунок 2 – Концептуальная структура моделирования анодного производства (предложена автором)

Во второй главе «Разработка модели «цифровой фабрики» и ее инструментальное обеспечение» 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. На рис. 3 представлен фрагмент модели, сфокусированный на блоке управления качеством. 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.).

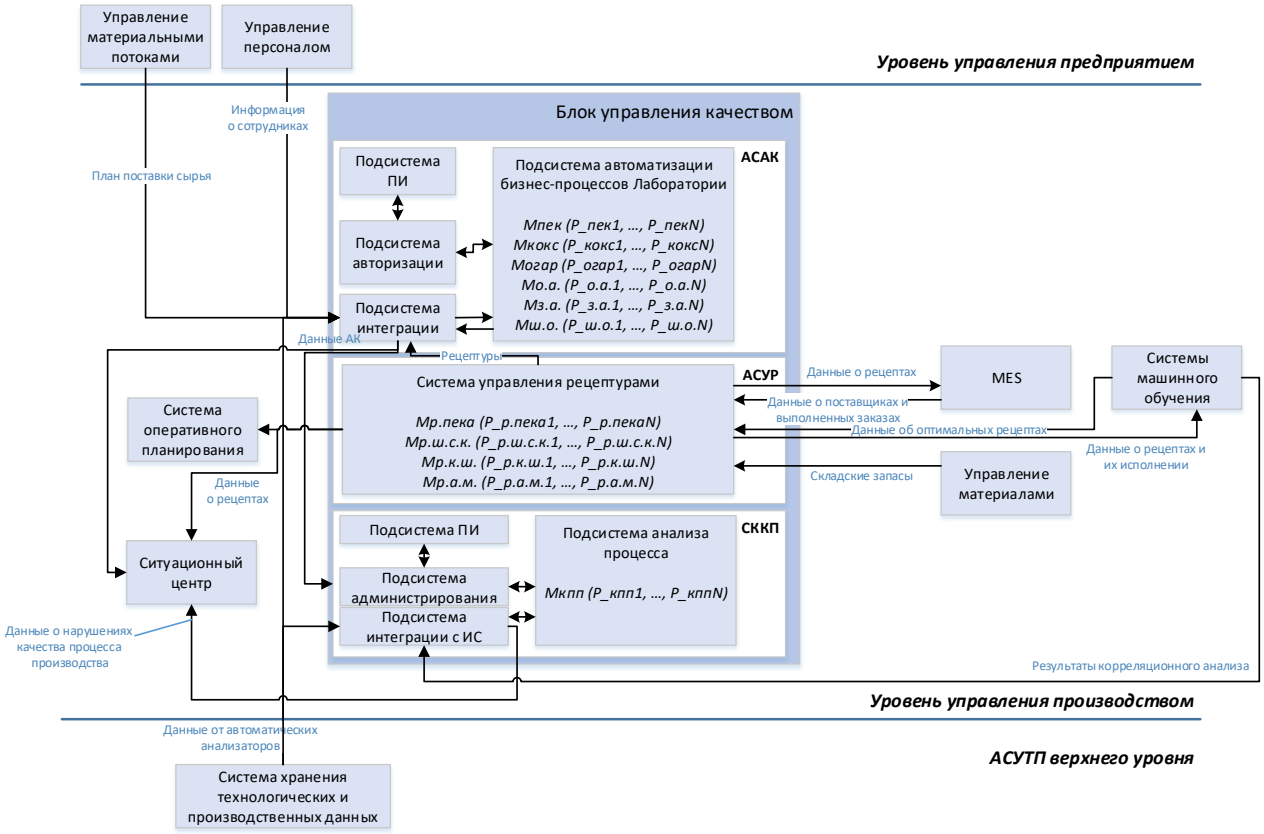


Рисунок 3 – Структурно-параметрическая модель блока «Управление качеством» (разработана автором)

1) АСАК. Модель подсистемы автоматизации бизнес-процессов Лаборатории, обслуживающей производство анодов, учитывает следующую совокупность параметров: Мпек (параметры входного контроля пека каменноугольного) – массовая доля воды в твердом пеке, температура размягчения, коксовое число, вязкость, зольность и др.; Мкокс (параметры кокса нефтяного сырого) – массовая доля общей влаги, зольность, массовая доля летучих веществ, примеси и др.; Могар (огарки обожженных анодов) – действительная плотность, зольность, влага, вибрационная объемная плотность, удельное электрическое сопротивление и др.; Мо.а. (обожженные аноды) – действительная плотность, кажущаяся плотность, зольность, удельное электрическое сопротивление, предел прочности на сжатие и др.; Мз.а. (зеленые аноды) – действительная плотность, кажущаяся плотность, зольность, примеси, прочность на сжатие; 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: технологического пека (Мр.пека); шихты сырого кокса (Мр.ш.с.к.); коксовой шихты (Мр.к.ш.); 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, простои 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 цифровым объектами, интеграцию разнородных данных в едином цифровом пространстве, служит базой для имитационного моделирования производственных процессов.

Разработан алгоритм внедрения модели «цифровой фабрики» (рис. 4), к особенностям которого относятся: проектирование структурно-параметрической модели; соответствие требованиям ГОСТ Р МЭК 62381-2016 в части испытаний FAT, SAT и SIT; кадровое обеспечение процессов в раках модели «цифровой фабрики». Алгоритм применим при создании «зеленой цифровой фабрики», масштабной цифровой трансформации действующей производственной системы, а также внедрении отдельных подсистем автоматизации (MES, IIoT и др.).

С учетом представленного алгоритма внедрения модели «цифровой фабрики» и специфики производства обожженных анодов выделены функциональные подсистемы производства: методологическая (M), технологическая (T), процессная (P), испытательная (I), кадровая (H), цифровая (D) подсистемы, «фабрика данных» (DX), управление качеством (Q). Каждая подсистема характеризуется сменой состояний элементов производственной системы и связями между состояниями (потоки информации или управления). Перечисленные подсистемы объединены в метаграф, который представляет собой логико-функциональную структуру производства анодов в контексте создания «цифровой фабрики» (рис. 5). 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 устойчи-

вость функционирования подсистем и их элементов, локализовать точки управления качеством, проводить экспериментальные симуляции с подсистемами.

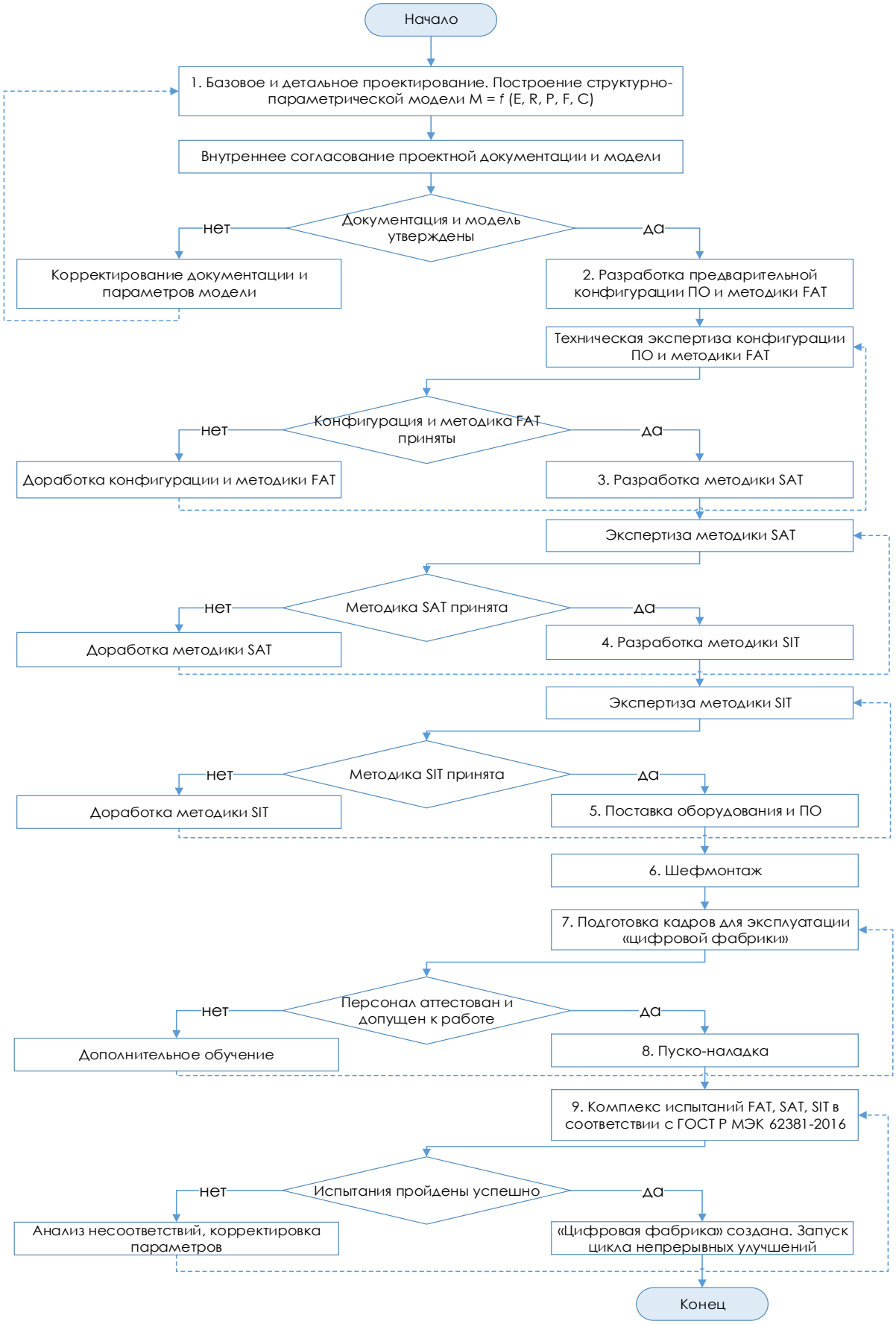


Рисунок 4 – Алгоритм внедрения модели «цифровой фабрики» на новом производственном объекте (предложен автором)

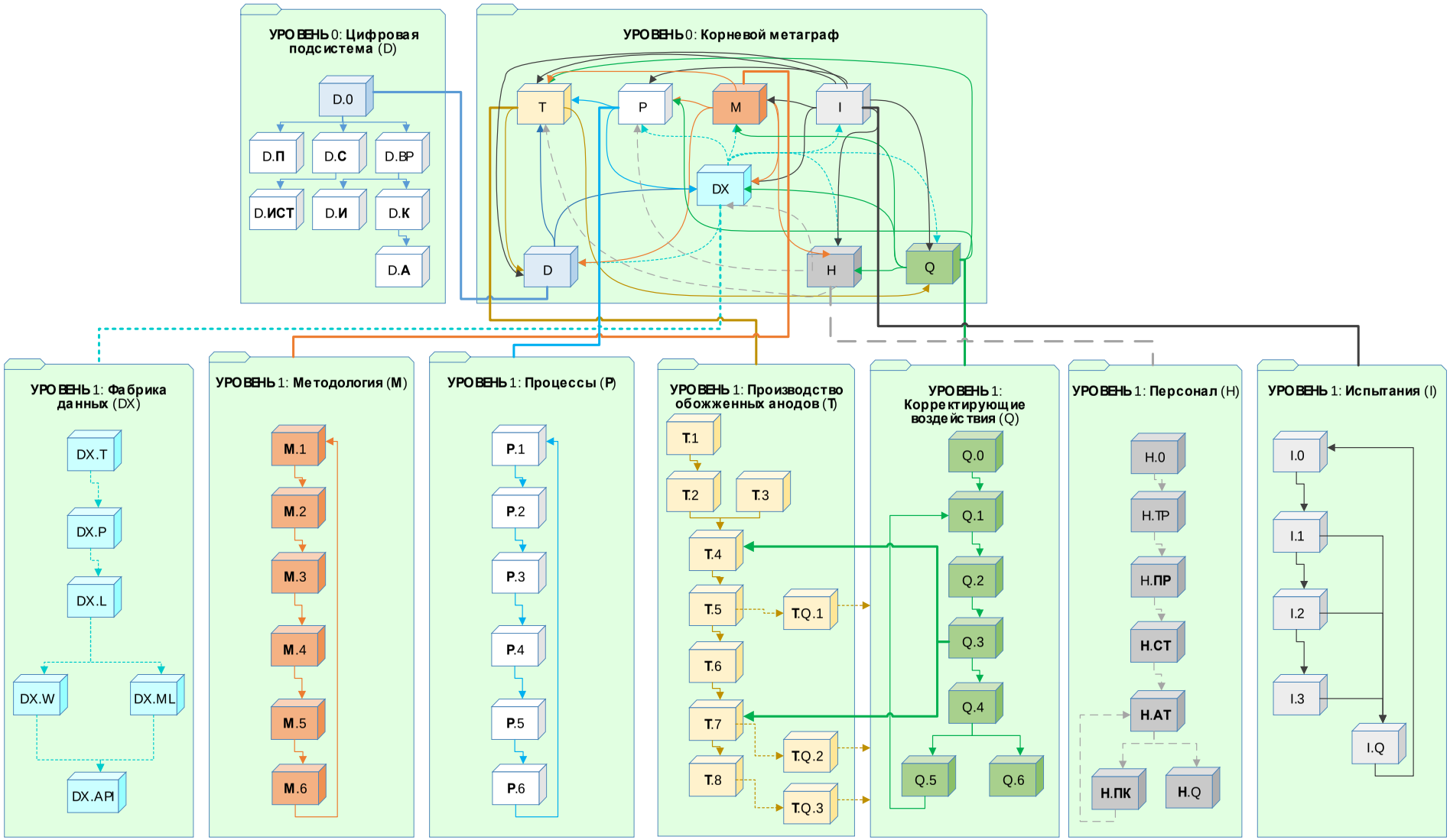


Рисунок 5 – Метаграф «цифровой фабрики» производства анодов (разработан автором)

В третьей главе «Совершенствование методического обеспечения производственных процессов в рамках развертывания «цифровой фабрики»» сформулированы базовые положения усовершенствованной методики оценки эффективности производственной системы в условиях функционирования модели «цифровой фабрики»: принципы (иерархичность структуры показателей по уровням управления; динамичность показателей; интегральность), требования (учет динамического характера производственных процессов, оценка качества управления, определение синергетического эффекта взаимодействия цифровых компонентов), условия (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) и этапы оценки эффективности «цифровой фабрики».

Разработан комплекс методических положений для структурных блоков цифровой фабрики – планирования, управления качеством, управления материалами.

1) 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 (рис. 6). Весовые коэффициенты определены методом анализа иерархий.

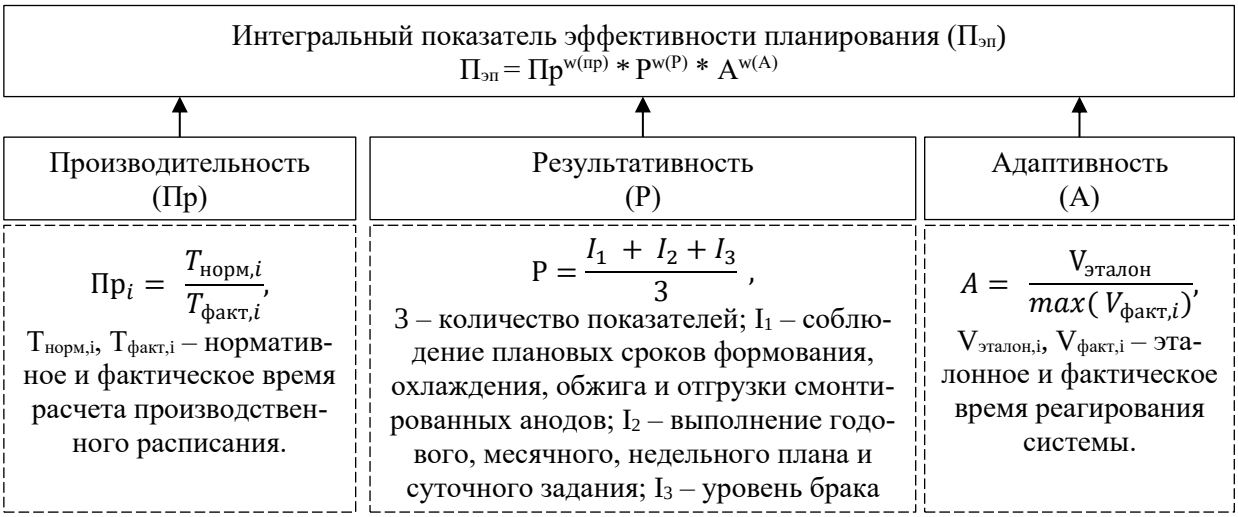


Рисунок 6 – Трёхпараметрический подход к оценке эффективности планирования в условиях «цифровой фабрики» (предложен автором)

2) Интегральная эффективность подсистемы управления качеством ($П_{эУК}$) представляет собой мультипликативную функциональную зависимость от показателей эффективности трех элементов:

– автоматизированной системы аналитического контроля (АСАК),
– автоматизированной системы управления рецептурами (АСУР),
– системы контроля качества процесса (СККП).

а) 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» (рис. 7).



Рисунок 7 – Интегральный подход к оценке эффективности АСАК (предложен автором)

б) АСУР предназначена для управления рецептами и спецификациями, рецептурным документооборотом, а также выявления взаимосвязи между качеством готовой продукции и параметрами исполнения рецепта (рис. 8).

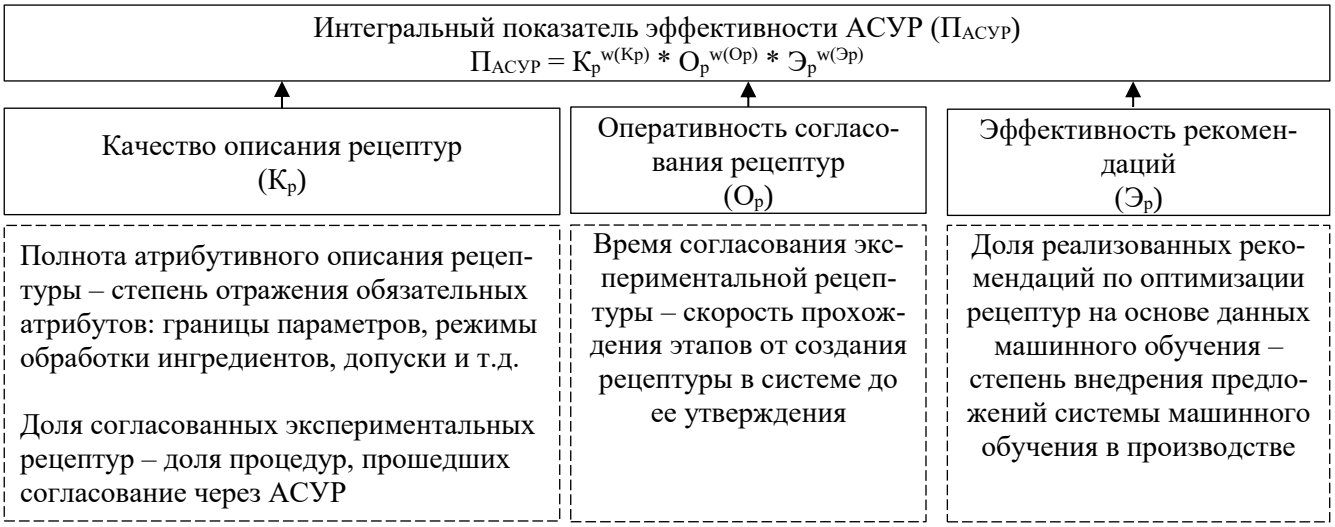


Рисунок 8 – Интегральный подход к оценке эффективности АСУР (предложен автором)

в) СККП. В отличие от традиционного подхода, где ключевыми оцениваемыми параметрами являются дефекты и доля брака, «цифровая фабрика» требует оценки качества обнаружения отклонений, скорости реагирования на них и эффективности предиктивного управления (рис. 9).



Рисунок 9 – Интегральный подход к оценке эффективности СККП (предложен автором)

3) В контексте «цифровой фабрики» в производственной системе изготовления анодов 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. В целях автоматизации процесса идентификации анода к ID должны быть привязаны данные, позволяющие отследить жизненный цикл соответствующего анода: данные о сырье, о его лабораторных исследованиях, об изготовлении анода, о длительности и местонахождении на складах хранения, о режиме работы оборудования, о лабораторных исследованиях изделия, об отгрузке, рекламации.

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 (1):

$$I_{НП(id)} = \frac{N_{идент(id)}}{N_{общ(id)}}, \quad (1)$$

где id – экземпляр анода;

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

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

Разработанный комплекс методических положений служит инструментом количественной диагностики подсистем «цифровой фабрики» анодного производства, позволяет выявлять «узкие места» в технологическом процессе и скрытые резервы повышения операционной эффективности и качества цифрового производства.

В четвертой главе «Апробация разработанных инструментов «цифровой фабрики»» систематизированы требования к обеспечению качества функционирования «цифровой фабрики» в виде диаграммы Исикавы (рис. 10). Структура сфокусирована на критически важных аспектах проектирования «цифровой фабрики» с ориентацией на снижение рисков неполноты технического задания, обеспечение прослеживаемости влияния требований на качество модели, а также носит превентивный характер.

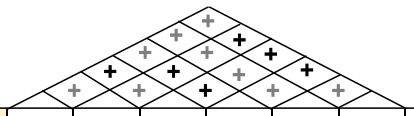


Рисунок 10 – Диаграмма Исикавы требований для обеспечения качества функционирования «цифровой фабрики» (составлена автором)

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.

На этой основе построен «дом качества» QFD для «цифровой фабрики» анодного производства, который позволяет организовать замкнутый цикл непрерывного улучшения качества производственных процессов (рис. 11). 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 ML 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.

Условные обозначения:
◉ - сильная связь (9 баллов)
❍ - средняя связь (3 балла)
△ - слабая связь (1 балл)
+ - сильная положительная связь
+ - слабая положительная связь



№	Ожидания	Важность	Подсистема КОП	АСАК	АСУР	СККП	Подсистема ПА	Интеграция с системой ML	Сравнительный анализ	
									Решение ООО НПП «ГКС»	Siemens
1	Повышение качества анодных блоков	5	❍	◉	◉	◉	△	◉	5	4
2	Снижение себестоимости производства	5	◉	△	◉	◉	❍	◉	5	3
3	Обеспечение стабильности производственного процесса	4	❍	△	❍	◉	△	◉	5	4
4	Минимизация человеческих ошибок	4	◉	◉	◉	◉	◉	❍	4	4
5	Обеспечение сквозной прослеживаемости анодов	5	❍	❍	❍	△	◉	△	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	❍	◉	◉	◉	△	△	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 11 – «Дом качества» QFD для «цифровой фабрики» анодного производства (построен автором)

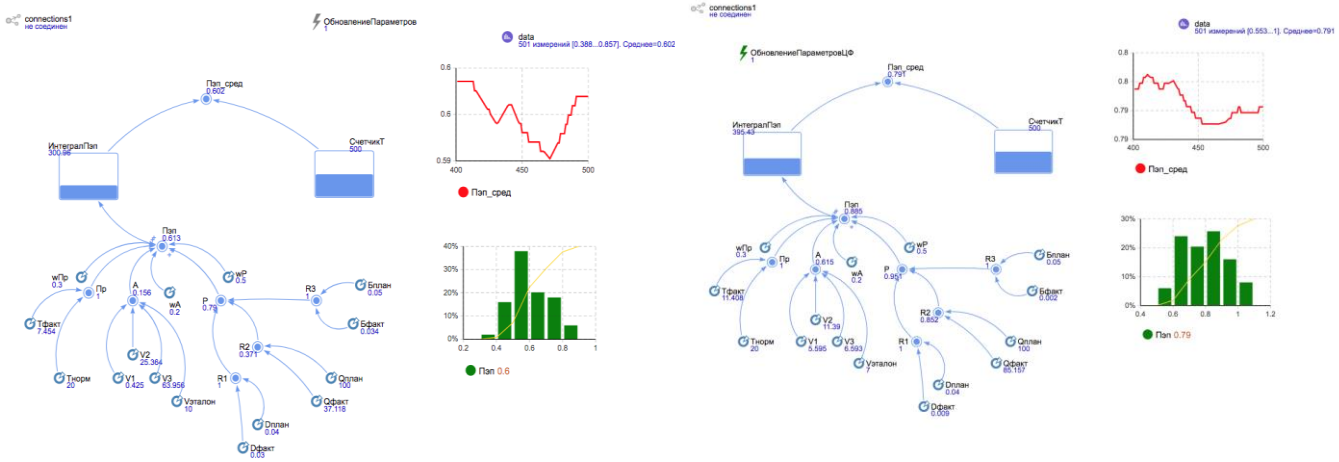
Разработан программно-методический комплекс имитационного моделирования оценки эффективности планирования производства в контексте «цифровой фабрики», предназначенный для автоматизации процесса диагностики эффективности блока планирования производственной системы, выявления «узких» мест в технологической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

Программно-методический комплекс включает методический инструментарий и 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. Модель позволила определить превосходство уровня эффективности планирования цифрового производства над традиционным (средние значения интегрального показате-

ля 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).

Системно-динамическая модель диагностики планирования производства в модели «цифровой фабрики», реализованная в программе AnyLogic, 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. 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, рис. 12). Преимущество системно-динамической модели заключается в возможности управления параметрами в процессе симуляции.



а) Традиционное производство б) Цифровое производство

Рисунок 12 – Системно-динамические модели эффективности планирования производства (построены 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;

– накопление данных;

– настройка модельного времени планирования;

– визуализация динамики, плотности и функции распределения;

– изменение параметров моделирования в процессе имитации процесса.

Таким образом, в результате апробации подтверждено, что внедрение предложенных научно-организационных методов проектирования цифрового производства обеспечивает прирост операционной эффективности организации анодного производства.

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. Систематизирована концептуальная структура моделирования анодного производства, 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»; 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, прогнозировать повышение надежности и эффективности производственных процессов путем оптимизации рецептур, автоматизации формирования производственного расписания, учитывающего ресурсные ограничения.

2. Разработаны методические решения для функциональных блоков «цифровой фабрики» (планирование, управление качеством, управление материалами), дополняющие традиционные показатели эффективности (загрузки оборудования, производительности труда, оборачиваемости ресурсов и др.) специфичными для цифровой среды метриками, включая трёхпараметрический подход к оценке эффективности планирования (производительность, результативность и адаптивность системы планирования в цифровой среде), трехкомпонентный алгоритм предиктивного управления качеством (диагностика АСАК, диагностика АСУР и диагностика СККП) и индекс непрерывности прослеживаемости анодов в контексте оценки модуля управления материалами. Методика позволяет количественно оценивать качественные показатели функционирования «цифровой фабрики», оперативно принимать организационно-технические решения и реализовать проактивный подход к организации производства.

3. Разработан комплексный организационно-технический инструментарий управления цифровым производством, основанный на предложенной методике диагностики структурных блоков «цифровой фабрики», включающий систематизацию функциональных требований к подсистемам «цифровой фабрики» в виде диаграммы Исикавы; «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 произ-

водства 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, 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. Авторские решения апробированы на примере модуля календарного и оперативного планирования. Реализация стохастической и системно-динамической моделей позволила определить превосходство уровня эффективности планирования цифрового производства над традиционным (в первом случае средние значения интегрального показателя эффективности планирования составили 0,799 и 0,696 соответственно; во втором – 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 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 РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

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

1. 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. – 0,34 п. л./0,25 п.л.

2. 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. – 0,56 п. л./0,42 п.л.

3. 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. – 0,54 п. л.

Свидетельства о регистрации электронных ресурсов

4. 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.

Публикации в других научных изданиях и сборниках материалов конференций

5. 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. – 0,23 п.л.

6. 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. – 0,31 п. л./ 0,25 п. л.

7. Нугманов, Д. И. Стандартизация в формировании цифровой фабрики / Д. И. Нугманов // 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. – 0,29 п. л.

8. Нугманов, Д. И. Цифровая фабрика как инструмент совершенствования процессов организации производства // 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. – 0,21 п. л.

9. Нугманов, Д. И. Эволюция концепций организации производства и управления качеством: от бережливого производства к Индустрии 4.0 // 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. – 0,27 п. л.