

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Сибирский государственный индустриальный университет»

На правах рукописи



Губанов Кирилл Николаевич

**МОДЕЛИ И АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЖИЗНЕННЫМ ЦИКЛОМ
ПРОЕКТНОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ В ПРОИЗВОДСТВЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ
КОНСТРУКЦИЙ**

Специальность

2.3.4. «Управление в организационных системах»

Диссертация на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель:

д.т.н., доцент

Рыбенко Инна Анатольевна

Новокузнецк – 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1 АНАЛИЗ НЕДОСТАТКОВ ДЕЙСТВУЮЩЕЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДОКУМЕНТАЦИЕЙ В ПРОИЗВОДСТВЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ, ПОДХОДЫ И СПОСОБЫ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ СИСТЕМЫ.....	11
1.1 Состояние и особенности производства металлических конструкций как объекта управления	11
1.2 Анализ недостатков действующей системы управления документацией	13
1.3 Подходы и способы совершенствования действующей системы	17
1.4 Формирование цели и постановка задач исследования	19
2 СТРУКТУРНЫЕ МОДЕЛИ И АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЖИЗНЕННЫМ ЦИКЛОМ ПРОЕКТНОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ.....	22
2.1 Структуризация жизненного цикла проектной документации	22
2.2 IDEF0-модели процессов жизненного цикла проектной документации	24
2.3 Структуризация системы управления жизненным циклом	31
2.4 Унификация технологий производства элементов металлоконструкций.....	34
2.5 Выводы по главе 2	40
3 РАЗРАБОТКА СОГЛАСОВАННОГО ЭФФЕКТИВНОГО МЕХАНИЗМА ИНВЕСТИРОВАНИЯ В СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ПРОЕКТНОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ.....	42
3.1 Описание типологии организационной системы и механизма управления	42
3.2 Определение ресурсов для усовершенствования процессов стадии	45
3.3 Распределение ресурсов между подсистемами стадий	60
3.4 Определение затрат на улучшение показателя	68
3.5 Выводы по главе 3	71
4 РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ЖИЗНЕННЫМ ЦИКЛОМ ПРОЕКТНОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ И УНИФИКАЦИИ ПРОЕКТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ	73

4.1 Разработка архитектуры учёта и верификации проектной документации	73
4.2 Принципы проектирования и интеграции функциональных модулей комплекса	84
4.3 Техническая реализация и интеграция комплекса с внешними системами	88
4.4 Описание функциональных возможностей комплекса	94
4.5 Выводы по главе 4	108
5 АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВНЕДРЕНИЯ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА	111
5.1 Проверка адекватности алгоритма унификации проектных элементов	111
5.2 Оценка эффективности внедрения программного комплекса	115
5.3 Выводы по главе 5	122
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	125
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	128
ПРИЛОЖЕНИЕ А	145
ПРИЛОЖЕНИЕ Б	151
ПРИЛОЖЕНИЕ В	154
ПРИЛОЖЕНИЕ Г	156
ПРИЛОЖЕНИЕ Д	157
ПРИЛОЖЕНИЕ Е	158
ПРИЛОЖЕНИЕ Ж	159
ПРИЛОЖЕНИЕ И	160
ПРИЛОЖЕНИЕ К	161

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

В настоящее время одним из ключевых и капиталоемких секторов промышленности является производство металлических конструкций, широко применяемых в строительстве, машиностроении, энергетике и других отраслях.

Производственный процесс в данной сфере отличается высокой степенью сложности и многоэтапностью. Он включает разработку 3D-моделей, формирование и согласование чертежей, их архивирование и последующую передачу в производство. Каждый из этих этапов сопровождается обработкой значительных объёмов данных и требует точного отслеживания их статусов, согласованности версий и актуальности информации. Состав задач, операций и порядок их выполнения персоналом не всегда регламентирован. Отсутствие жесткой регламентации порядка функционирования организационной системы приводит к информационным разрывам, к дублированию работ, потере актуальных данных и замедлению производственного цикла.

Современные программные решения, такие как Tekla Structures, AutoCAD или ERP-системы реализуют определенный функционал для отдельных стадий проектирования или учёта. Однако требуются значительные усилия по их взаимной интеграции для улучшения системы управления документооборотом.

Набирающая обороты цифровая трансформация отрасли также стимулирует разработку системных решений по управлению проектной документацией. Системный подход к управлению проектной документацией может быть эффективно реализован на основе представлений о жизненном цикле проектной документации.

Таким образом, актуальными и важными задачами институционального управления при производстве металлических конструкций является разработка структуры и содержания стадий жизненного цикла проектной документации, а также построение системы управления этим жизненным циклом.

Степень разработанности темы исследования

Методологические и теоретические основы управления организационными системами, включая разработку методов институционального, мотивационного, информационного управления и согласованных и эффективных механизмов управления проработаны в трудах В. Н. Буркова, Д. А. Новикова, А. В. Щепкина и М. В. Губко. Полученные авторами результаты составляют хорошую основу для решения большого числа практических задач.

Технологические и организационные аспекты производства металлических конструкций исследованы в работах А. А. Гореликова, Е. В. Плахотниковой, М. А. Синелюбова и других авторов. Вопросы цифровизации промышленности и перехода к сквозному информационному взаимодействию отражены в трудах М. В. Царёва и Ю. С. Андреева. Принципы структурного и имитационного моделирования производственных систем, а также вопросы автоматизации управления развиты С. Н. Григорьевым, Г. Г. Куликовым и А. И. Вальтером. Методология обработки данных и нечеткой кластеризации представлена в исследованиях Т. Т. З. Нгуена и А. Ю. Николаева.

Однако большинство существующих подходов ориентировано на локальную оптимизацию отдельных этапов – проектирования или ресурсного планирования, не обеспечивая целостности процесса. В частности, недостаточно проработанными остаются вопросы формирования структуры управления жизненным циклом проектной документации и создания механизмов унификации проектных элементов в условиях реального производства.

Также применение механизмов согласования интересов центра и агентов к задачам управления жизненным циклом проектной документации в производстве металлоконструкций практически не исследовано. Недостаточно проработаны вопросы определения локальных показателей эффективности стадий, формирования множеств допустимых альтернатив их развития и сведения задачи распределения ресурсов к вычислительно реализуемой оптимизационной модели.

Отсутствие комплексных решений, обеспечивающих сквозное сопровождение проектной документации, унификацию технологий производства проектных

элементов и интеграцию CAD- и ERP-сред, сдерживает цифровую трансформацию отрасли. Это определяет актуальность исследования, направленного на разработку моделей и алгоритмов для построения эффективной системы управления документацией и унификации изделий.

Объектом исследования является процесс управления производством металлических конструкций.

Предмет исследования: система и процессы управления проектной документацией при производстве металлоконструкций, подходы и методы структурного и институционального управления, а также согласованные и эффективные механизмы управления поведением агентов в организационных системах.

Цель работы

Повышение эффективности процесса управления производством металлических конструкций за счет формирования структуры жизненного цикла проектной документации и системы управления жизненным циклом, разработки и применения согласованного и эффективного механизма инвестирования в улучшение процесса управления проектной документацией, а также посредством унификации технологии производства на основе нечеткой кластеризации производимых элементов металлоконструкций.

Задачи исследования

1. Разработать структуру жизненного цикла проектной документации для производства металлоконструкций, построить функциональную структуру системы управления жизненным циклом и разработать IDEF0-модели основных процессов стадий жизненного цикла.

2. Разработать процедуру формирования множеств унифицированных элементов металлоконструкций на основе их геометрических и технологических параметров.

3. Разработать согласованный и эффективный механизм управления инвестициями в совершенствование процесса управления проектной документацией.

4. Разработать программный комплекс, реализующий и интегрирующий предложенные проектные решения по совершенствованию процесса управления

разработкой проектной документации в действующую систему управления и оценить эффективность внедрения.

Научная новизна

1. Структура жизненного цикла проектной документации и функциональная структура системы управления жизненным циклом, отличающиеся полным набором прямых и обратных связей между стадиями цикла, а также встроенными в процессы методами идентификации и верификации цифровых копий чертежей, позволяющих минимизировать количество ошибок.

2. Процедура формирования множеств унифицированных элементов металлоконструкций, отличающаяся комплексированием алгоритма нечеткой кластеризации (метод Fuzzy C-Means) с механизмом комплексной оценки (МКО) числовых, категориальных и структурных признаков и применением критерия Fuzzy Partition Coefficient для выбора оптимального числа кластеров.

3. Согласованный и эффективный механизм управления инвестициями в совершенствование процесса управления проектной документацией, отличающийся тем, что задача, решаемая агентами, представляет собой модифицированную задачу о ранце и относится к классу обратных задач управления, а задача, решаемая центром - модифицированную задачу о ранце, но относящейся к классу прямых задач управления.

Теоретическая и практическая значимость работы

Подход к описанию проектной документации на основе представлений о ее жизненном цикле позволяет получить наиболее полные и системные знания о предмете исследования. Результаты реализации этого подхода для институционального управления проектной документацией при производстве металлоконструкций составляет теоретическую ценность работы. Другими теоретическими результатами работы являются: эффективная интеграция метода нечеткой кластеризации и механизма комплексного оценивания теории управления организационными системами для формирования подмножеств унифицированных элементов изготавливаемых металлоконструкций и разработанный механизм согласованного

инвестирования. Совместное применение методов и механизмов расширяет класс решаемых задач.

Практическая ценность работы состоит в эффективном решении поставленной в исследовании задачи и достижении цели исследования, а также в возможном широком тиражировании решений на предприятиях, выпускающих металлоконструкции, а также в использовании результатов в учебном процессе при подготовке специалистов в области информационных систем управления, автоматизации производственных процессов, цифрового инжиниринга и управления жизненным циклом изделий. Практическую значимость также имеет разработанный механизм управления инвестициями в совершенствование процессов жизненного цикла проектной документации, позволяющий формализовать выбор мероприятий развития, согласовать локальные и глобальные цели подсистем и обеспечить рациональное распределение ограниченных ресурсов предприятия.

Методология и методы исследования

Для достижения цели исследования и решения поставленных задач применялись подходы и методы системного анализа, методы институционального и механизмы согласованного и эффективного управления поведением персонала, методы моделирования бизнес-процессов, аппарат нечеткой математики, методы проектирования программного обеспечения, способы управления чертежами и их интеграция с 3D-моделями, а также методы тестирования для обеспечения надежности и функциональности разработанного комплекса.

Положения, выносимые на защиту

1. Структура и процессы жизненного цикла проектной документации, функциональная структура системы управления жизненным циклом.
2. Процедура формирования множеств унифицированных элементов металлоконструкций
3. Согласованный и эффективный механизм управления инвестициями в процесс управления проектной документацией.
4. Программный комплекс «SZMK», реализующий и интегрирующий разработанные проектные решения в действующую систему управления

Степень достоверности результатов. Основные результаты проведенных исследований подтверждаются их обоснованием с применением: аппарата системного анализа и функционального моделирования, методов сетевого программирования, механизмов организационного управления, натурно-экспертного и компьютерного моделирования, апробацией полученных результатов на 6 международных и всероссийских конференциях, результатами внедрении в производственную среду.

Апробация результатов. Основные результаты работы были изложены на шести научно-практических конференциях, семинарах и совещаниях различного уровня: XI Международная научно-практическая конференция (Кемерово, 2019); Всероссийская научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения (Новокузнецк, 2020, 2023); Всероссийская научно-практическая конференция Системы Автоматизации (в образовании, науке и производстве) (Новокузнецк, 2022, 2023, 2024).

Личный вклад автора заключается в проведении анализа подходов и способов управления жизненным циклом проектной документации в машиностроительной и строительной отраслях; разработке структуры жизненного цикла проектной документации и функциональной структуры системы управления жизненным циклом, построении IDEF0-моделей процессов стадий жизненного цикла проектной документации; комплексировании алгоритма нечеткой кластеризации Fuzzy C-Means с механизмом комплексной оценки признаков для формирования множеств унифицированных элементов металлических конструкций; разработке согласованного и эффективного механизма управления инвестициями в совершенствование процесса управления проектной документацией; проектировании и разработке программного комплекса «SZMK», реализующего функции усовершенствованных процессов жизненного цикла проектной документации и обеспечивающего интеграцию с CAD- и ERP-средами; проведении оценки эффективности внедрения разработанного комплекса на основе сравнительного анализа производственных показателей.

Соответствие паспорту специальности

Диссертация соответствует паспорту специальности 2.3.4. Управление в организационных системах: п. 3 «Разработка методов и алгоритмов решения задач управления в организационных системах»; п. 4 «Разработка информационного и программного обеспечения систем управления и механизмов принятия решений в организационных системах».

Публикации

По материалам диссертации опубликовано 13 печатных работ, в том числе: 3 – в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК; 6 – в сборниках всероссийских и международных конференций. Получено 4 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и приложений. Изложена на 161 странице, содержит 34 рисунка, 16 таблиц, список литературы из 135 наименований и 9 приложений.

1 АНАЛИЗ НЕДОСТАТКОВ ДЕЙСТВУЮЩЕЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДОКУМЕНТАЦИЕЙ В ПРОИЗВОДСТВЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ, ПОДХОДЫ И СПОСОБЫ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ СИСТЕМЫ

1.1 Состояние и особенности производства металлических конструкций как объекта управления

Производство металлических конструкций относится к числу капиталоемких и технологически сложных отраслей промышленности, используемых в строительстве, машиностроении, энергетике и других секторах экономики [1–3]. Данный вид производства характеризуется многостадийной структурой процесса, включающей проектирование, подготовку производства, изготовление деталей, сборку и контроль качества изделий [4–6]. Существенные различия в технологических маршрутах, многообразие конструктивных решений и значительные габаритные размеры изделий формируют высокий уровень неопределенности производственного процесса и обуславливают повышенные требования к управлению потоками информации [7–9].

В условиях многовариантности проектных решений и индивидуализации заказов существенно усложняется координация действий между подразделениями. Конструкторские, технологические и производственные службы функционируют в рамках распределённой организационной структуры, при этом эффективность совокупного результата определяется степенью согласованности их взаимодействия. В таких системах особое значение приобретает формирование единой информационной среды, способной обеспечить синхронизацию решений, их воспроизводимость и формальную прослеживаемость [10–12].

Особенностью рассматриваемой отрасли является высокий уровень зависимости производственного результата от качества проектной документации. Проектная документация не является пассивным объектом хранения, а представляет

собой активный элемент управленческого контура. Через параметры документации осуществляется трансляция управленческих воздействий, определяющих технологические режимы, маршруты изготовления деталей, логистические схемы и эксплуатационные требования. В этом смысле документация не только описывает изделие, но и задаёт допустимые границы и условия его производства [13–14].

Производственный процесс в сфере металлоконструкций сопровождается формированием обширного массива цифровых данных, включающего трёхмерные модели, рабочие чертежи, спецификации, ведомости, файлы станочных программ и сопроводительную документацию [15–18]. Рост объёма и сложности информации требует наличия формализованных процедур управления версиями, регламентированных механизмов контроля актуальности данных и инструментов синхронизации информации между подразделениями. Несогласованность хотя бы одного из звеньев приводит к накоплению ошибок, снижению точности исполнения проектных решений и росту производственных потерь [19–21].

Дополнительной сложностью является динамичность изменяемости проектных решений на протяжении жизненного цикла изделия. Корректировки, вносимые на стадии проектирования, нередко затрагивают состав комплектов документации, что требует повторной актуализации производственных данных. В отсутствие формализованных правил управления изменениями нарушается сквозная прослеживаемость версий, что создаёт риск использования устаревших данных на критических этапах производства.

В современных условиях предприятия отрасли широко используют специализированные программные средства, обеспечивающие поддержку отдельных функций жизненного цикла изделия. Наиболее распространёнными инструментами являются системы автоматизированного проектирования и ERP-системы, решающие задачи проектирования, планирования и учёта производственных ресурсов. Вместе с тем данные средства не реализуют функцию интеграции всех стадий в рамках единого управленческого контура, а потому не обеспечивают комплекс-

ного управления жизненным циклом проектной документации как целостного объекта управления [22–24].

В результате предприятие функционирует как совокупность локально автоматизированных подсистем, между которыми отсутствует единый механизм согласования данных. Это приводит к фрагментации информационного пространства и разрыву управленческого контура между инженерной и производственной средой. Отсутствие системного управления жизненным циклом документации снижает прозрачность процессов и затрудняет реализацию управленческих воздействий в масштабе всей организационной системы.

Таким образом, производство металлических конструкций представляет собой информационно насыщенную организационную систему, в которой проектная документация выполняет функцию связующего управленческого элемента между инженерными, технологическими и планово-экономическими подсистемами. Отсутствие целостной модели управления жизненным циклом документации приводит к росту издержек, снижению контролируемости процессов и уменьшению устойчивости системы управления в целом, что обуславливает актуальность задач её формализации и автоматизации.

1.2 Анализ недостатков действующей системы управления документацией

Действующая система подготовки проектной документации на предприятии ООО «СЗМК» реализована в виде совокупности функционально связанных подразделений: конструкторского бюро, производственно-диспетчерского отдела, отдела подготовки производства и архива. Взаимодействие между подразделениями осуществляется на основе локальных нормативных документов, регламентирующих отдельные операции и процедуры обработки документации. В рамках данной системы обеспечивается трансформация требований заказчика в комплект проектной документации, передаваемый в производство.

Анализ функционирования системы показал, что применение современных инструментальных средств – систем автоматизированного проектирования Tekla Structures и планирования ресурсов предприятия 1C:ERP – не обеспечивает эффективного управления изменениями и перемещениями проектной документации в масштабе всего жизненного цикла. Используемые программные средства реализуют лишь локальные функции проектирования и учёта и не формируют единого управляемого информационного контура.

Порядок движения документов между подразделениями, изменение их статусов, содержания и состава регламентируются отдельными локальными нормативными актами организации, в том числе регламентами «Закрытие заказа» и «Контроль качества процесса моделирования». Указанные документы охватывают лишь отдельные этапы обработки данных и не распространяются на существенное множество операций, прежде всего выполняемых персоналом вручную. В результате не обеспечиваются требования актуальности, достоверности и целостности данных, что является критическим для инженерных организационных систем.

Особенностью действующей системы является большое количество ручных операций. Мониторинг движения проектной документации, выполненный на выборке из 814 чертежей, выявил высокую долю нерегламентированных действий, осуществляемых без использования автоматизированных средств. Средний комплект КМД включает от 150 до 500 файлов различных форматов (DWG, PDF, NC1/DXF, Excel), что затрудняет контроль полноты, согласованности и актуальности проектной информации. В каждом заказе фиксируется от 150 до 180 уникальных деталей, при этом около 20 % из них представляют собой конструктивные дубликаты либо элементы, отличающиеся незначительными параметрами.

Отсутствие механизмов кластеризации и унификации проектных элементов приводит к необоснованному многообразию используемых технологических операций и формированию альтернативных технологических маршрутов [25–26]. Это увеличивает трудоёмкость обработки, усложняет планирование производства и снижает эффективность функционирования организационной системы [27–28].

Задачи и операции, реализуемые в действующем процессе обработки проектной документации, представлены на рисунке 1.1 и включают: разработку 3D-модели, ручную проверку модели, формирование и согласование чертежей, создание ведомостей, подготовку выгрузок в 1С:ERP и архивирование. Представленная модель наглядно демонстрирует последовательность выполнения работ и распределение ответственности между подразделениями.

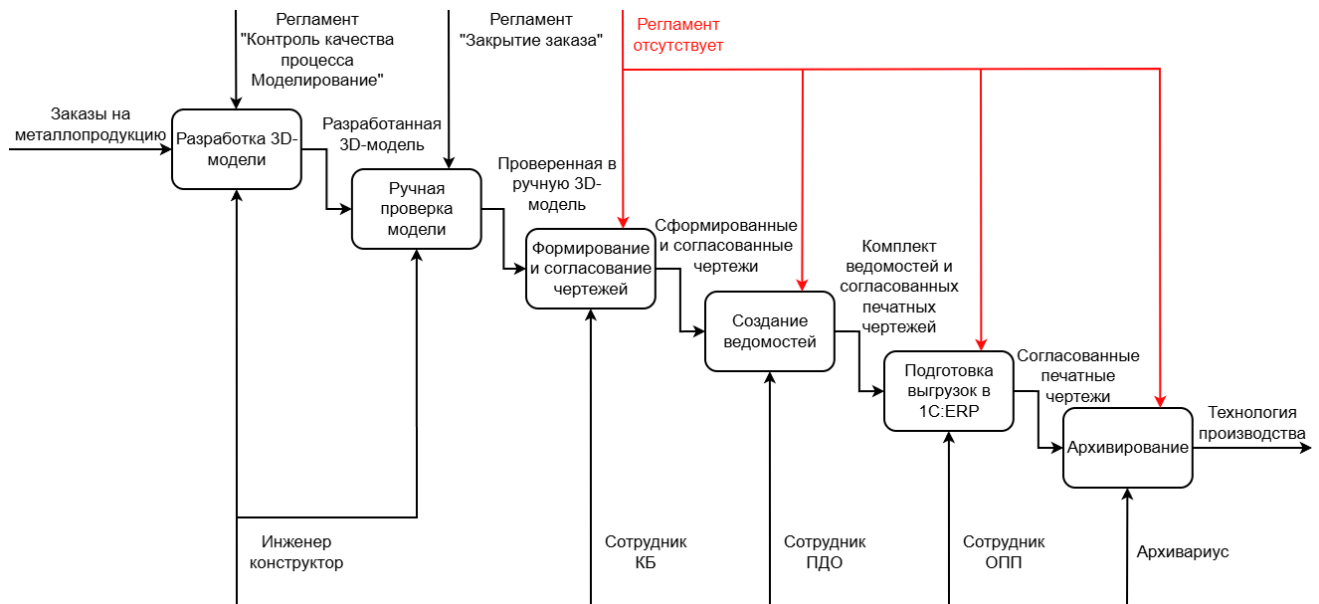


Рисунок 1.1 – IDEF0-модель действующего процесса формирования проектной документации

Анализ структуры процесса показывает, что управление носит фрагментарный характер. Формализованы лишь отдельные этапы (контроль качества моделирования и закрытие заказа), в то время как большинство операций, прежде всего выполняемых вручную, не имеет нормативного и алгоритмического обеспечения. Наибольшее количество нерегламентированных операций приходится на стадии формирования ведомостей, подготовки выгрузок и передачи данных между подразделениями.

Графическая модель выявляет отсутствие целостного управленческого контура [29–31]. Не реализованы процедуры автоматизированного контроля актуальности данных, отсутствуют механизмы верификации целостности проектной ин-

формации, не предусмотрена синхронизация версий при продвижении документации между стадиями жизненного цикла [32–34]. В точках передачи ответственности между подразделениями формируются управленческие разрывы, приводящие к накоплению ошибок и снижению надёжности функционирования системы [35–37].

Из-за отсутствия регламентов для значительного числа операций невозможно их автоматизированное выполнение [38–40]. Это обуславливает высокую трудоёмкость процесса и зависимость результатов от человеческого фактора. Так, регламент «Закрытие заказа» включает более 17 групп ручных проверок, среди которых сверка перечня чертежей DWG/PDF, контроль корректности Excel-ведомостей, проверка нумерации и актуальности ревизий, а также удаление временных файлов. Регламент «Контроль качества процесса моделирования» содержит свыше двадцати пунктов проверки 3D-модели, включая выявление конфликтов деталей, анализ габаритов сборок, контроль сварных швов и болтовых соединений, проверку атрибутов покрытий и корректности маркировки элементов.

Наличие большого объёма ручных операций приводит к систематическим ошибкам в документации. Каждая незафиксированная ошибка переносится на последующие этапы, увеличивая совокупный ущерб от несоответствий. В результате процесс обработки проектной документации становится не только трудоёмким, но и трудноуправляемым, а организационная система в целом утрачивает устойчивость. Дополнительно усиливается скрытый характер ошибок, поскольку их выявление происходит, как правило, на поздних стадиях производственного цикла, что существенно повышает стоимость их устранения и снижает адаптивность системы управления [41–43].

Анализ статистики показал, что до 32 % заказов имеют нарушения сроков прохождения этапов обработки документации. Основными причинами являются отсутствие сквозных механизмов контроля изменений, несогласованность структур данных и высокая зависимость операций от квалификации исполнителя [44–46].

Также существенным недостатком действующей системы является также отсутствие прозрачной процедуры обоснования затрат на совершенствование процессов обработки документации [47–49]. Решения о внедрении отдельных мероприятий принимаются фрагментарно и не опираются на формализованную оценку их вклада в общий результат функционирования организационной системы [50–52]. В результате инвестиции в развитие отдельных стадий носят несогласованный характер и не обеспечивают оптимального распределения ресурсов предприятия [53–54].

Таким образом, установлено, что действующая система управления проектной документацией не обеспечивает целостного управления жизненным циклом документации. Основными недостатками являются неполнота регламентации процессов, избыточное многообразие технологических операций, высокая трудоёмкость обработки, значительное число ошибок, возникающих при выполнении ручных операций и отсутствие согласованного механизма распределения затрат на совершенствование процессов [55–57].

1.3 Подходы и способы совершенствования действующей системы

Совершенствование системы управления проектной документацией целесообразно осуществлять на основе методов теории управления организационными системами, в рамках которых предприятие рассматривается как сложная иерархическая система с множеством взаимосвязанных функций и потоков информации [58–60]. Выявленные недостатки действующей системы обусловлены отсутствием формализованной структуры жизненного цикла документации как объекта управления и недостаточной реализацией институтов, обеспечивающих нормативное закрепление процедур обработки информации [61–63].

Ключевым направлением совершенствования является формирование регламентированной структуры жизненного цикла обработки проектной документации. Формализация состава этапов, задач и операций позволяет устранить фрагментарность управления, определить границы ответственности подразделений и

обеспечить полноту выполняемых функций [64–66]. Закрепление логики переходов между стадиями и стандартизация процедур соответствуют методам институционального управления, ориентированным на формализацию норм деятельности и регламентацию информационных преобразований в организационной системе [67–69].

Важным элементом совершенствования является унификация технологических операций на основе нечеткой кластеризации проектных элементов. Формирование показателя сходства элементов и последующее группирование конструкций на его основе позволяют перейти от субъективной интерпретации к формализованным процедурам унификации [70–72]. В результате сокращается номенклатура используемых технологических операций, повышается степень типизации производственных решений и создаются условия для стабилизации технологических маршрутов [73–75].

Следующим направлением является разработка функциональной структуры системы управления, в которой жизненный цикл проектной документации рассматривается как управляемая подсистема. В рамках данной структуры определяются входные и выходные параметры, управляющие воздействия и механизмы обратной связи, обеспечивающие согласованность решений между инженерными, технологическими и управленческими подсистемами. Это позволяет перейти от фрагментарного контроля отдельных операций к системному управлению процессом в целом [76–78].

Завершающим элементом является автоматизация операций обработки документации на основе формализации алгоритмов и разработки специализированных программных средств. Перевод ручных операций в алгоритмическую форму снижает влияние субъективных факторов, уменьшает вероятность ошибок и обеспечивает воспроизводимость результатов. Реализация автоматизированных механизмов контроля версий, верификации данных и синхронизации с корпоративными системами формирует замкнутый управленческий контур.

В совокупности указанные подходы обеспечивают формирование интегрированной системы управления жизненным циклом проектной документации, ори-

ентированной на согласованность, полноту и прослеживаемость информационных потоков, снижение трудоёмкости операций и повышение устойчивости организационной системы.

Анализ предлагаемых направлений совершенствования показывает, что каждое из них потенциально способно повысить эффективность функционирования соответствующей стадии жизненного цикла. Однако одновременная реализация всех мероприятий требует значительных финансовых вложений, превышающих доступные ресурсы предприятия. Это обуславливает необходимость выбора рационального набора мероприятий по совершенствованию процессов на различных стадиях жизненного цикла с учетом их относительной значимости и ожидаемого эффекта. Таким образом, также возникает задача согласования инвестиционных решений в рамках единой системы управления.

1.4 Формирование цели и постановка задач исследования

Проведённый анализ показал, что действующий процесс обработки проектной документации при производстве металлических конструкций характеризуется высоким уровнем трудоёмкости, значительной долей операций, выполняемых вручную, и отсутствием целостного механизма управления жизненным циклом документации. Существенная часть действий персонала связана с поиском, проверкой, сопоставлением и передачей проектных данных между подразделениями. При этом операции контроля актуальности, согласования версий, сверки моделей и чертежей носят эпизодический характер и не опираются на формализованный алгоритм.

Ручная обработка данных сопровождается высокой вероятностью ошибок, возникающих в процессе копирования файлов, формирования комплектов документации, контроля перечней деталей и подготовке данных для планирования производства. Из-за отсутствия механизмов сквозного контроля нарушается прослеживаемость изменений проектных решений, что приводит к появлению недостоверных данных на производственных этапах. В результате возрастает число

возвратных операций, увеличиваются сроки обработки заказов и снижается устойчивость функционирования системы управления.

Существующие программные средства, используемые на предприятии, ориентированы преимущественно на решение локальных задач проектирования и учёта и не обеспечивают формирования единого цифрового контура, охватывающего весь жизненный цикл проектной документации. Отсутствие механизмов интеграции между инженерной и производственной средой приводит к фрагментации данных и возникновению разрывов в управленческом контуре. В результате затрудняется контроль полноты, актуальности и согласованности проектной информации.

В этих условиях возникает объективная необходимость разработки специализированной системы управления жизненным циклом проектной документации, ориентированной на интеграцию стадий проектирования, подготовки производства, производства и архивирования в рамках единого цифрового пространства. Такая система должна обеспечивать автоматизацию рутинных операций обработки документации, реализацию процедур интеллектуальной кластеризации проектных элементов, контроль версий и статусов документов, а также синхронизацию с корпоративными информационными системами предприятия.

Реализация комплексного подхода позволяет существенно снизить влияние человеческого фактора на процессы обработки проектной информации, повысить прозрачность управления и обеспечить воспроизводимость производственных операций. В результате формируется управляемый контур, в котором все изменения в модели изделия и в составе документации отслеживаются, фиксируются и контролируются в автоматизированном режиме.

Вместе с тем реализация указанных направлений совершенствования требует последовательного принятия инвестиционных решений, затрагивающих различные стадии жизненного цикла проектной документации. Ограниченность финансовых ресурсов предприятия и неоднородность вклада отдельных стадий в конечный результат обуславливают необходимость разработки механизма согласования инвестиционных решений. Такой механизм должен обеспечивать количе-

ственную оценку эффективности развития каждой стадии, сопоставление альтернатив по критерию «эффект–затраты» и выбор рациональной совокупности мероприятий в рамках заданного бюджета.

Целью диссертационного исследования является повышение эффективности процесса управления производством металлических конструкций на основе совершенствования жизненного цикла проектной документации и разработки системы управления данным жизненным циклом, обеспечивающей унификацию технологии производства, автоматизацию обработки данных и интеллектуальную поддержку принятия управленческих решений.

Для достижения поставленной цели в работе предполагается решение следующих задач:

1. Разработать структуру жизненного цикла проектной документации для производства металлоконструкций, построить функциональную структуру системы управления жизненным циклом и разработать IDEF0-модели основных процессов стадий жизненного цикла.

2. Разработать процедуру формирования множеств унифицированных элементов металлоконструкций на основе их геометрических и технологических параметров.

3. Разработать согласованный и эффективный механизм управления инвестициями в совершенствование процесса управления проектной документацией.

4. Разработать программный комплекс, реализующий и интегрирующий предложенные проектные решения по совершенствованию процесса управления разработкой проектной документации в действующую систему управления и оценить эффективность внедрения.

2 СТРУКТУРНЫЕ МОДЕЛИ И АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЖИЗНЕННЫМ ЦИКЛОМ ПРОЕКТНОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ

2.1 Структуризация жизненного цикла проектной документации

С учётом выявленных недостатков действующего процесса формирования проектной документации, а также на основе обобщённых представлений о жизненном цикле как совокупности стадий существования объекта во времени, предложена структура жизненного цикла проектной документации (рисунок 2.1), ориентированная на формирование и поддержание в актуальном состоянии унифицированных технологий производства элементов металлических конструкций. Разработанная структура рассматривает проектную документацию не как статический архив, а как динамическую систему, находящуюся в процессе последовательных преобразований.

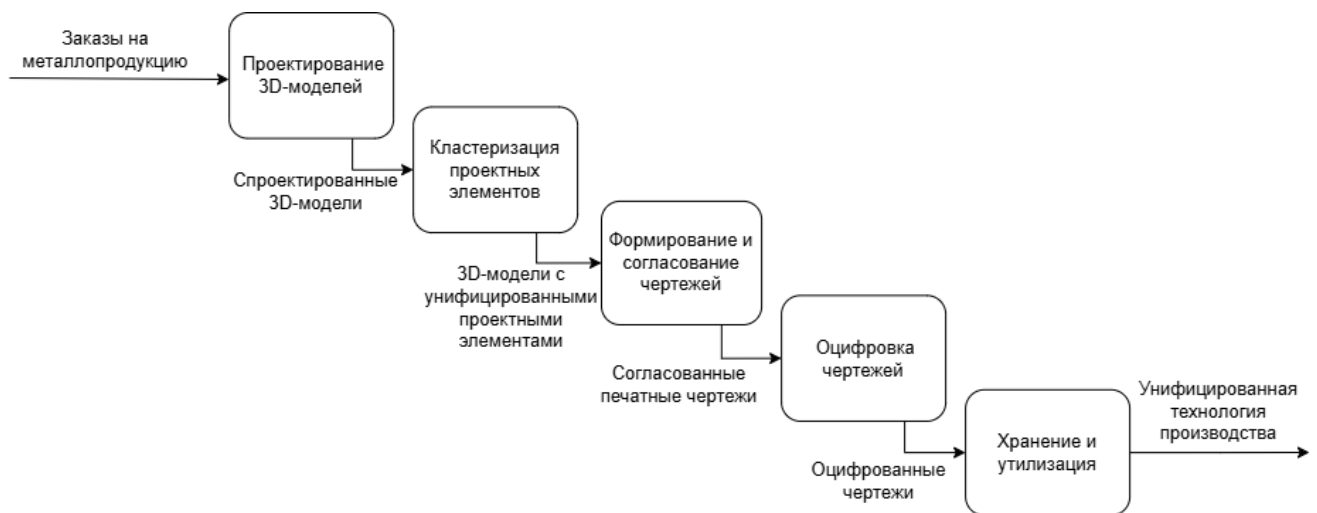


Рисунок 2.1 – Структура жизненного цикла проектной документации

Предложенная структура описывает последовательность стадий обработки проектных данных и форматы документов, передаваемых между этапами жизненного цикла. Начальной стадией является проектирование трёхмерной модели изделия, в рамках которой формируется цифровое представление металлоконструк-

ции с заданными геометрическими, технологическими и атрибутивными параметрами. На данном этапе закладывается основа для всех последующих проектных и производственных решений.

Следующая стадия посвящена кластеризации проектных элементов и направлена на структурное упорядочение и унификацию составных частей изделия. На основе построенных показателей сходства выполняется группирование элементов по их геометрическим и технологическим характеристикам, что позволяет перейти от индивидуальных проектных решений к типовым технологическим схемам и обеспечивает снижение разнообразия используемых операций.

На стадии формирования и согласования чертежей осуществляется преобразование цифровой модели в комплект графической документации, предназначенной для передачи в производство. Подготовка чертежей выполняется исключительно на основе актуальной версии модели, что обеспечивает их соответствие данным проектирования. Контроль согласованности реализуется как на уровне структуры документации, так и на уровне используемых обозначений и атрибутов элементов.

Далее следует стадия оцифровки чертежей, в ходе которой осуществляется преобразование проектных документов в электронную форму, обеспечивающую возможность их долговременного хранения, обработки и передачи. На данном этапе реализуются автоматизированные процедуры проверки полноты комплектов, читаемости цифровых копий и их соответствия исходным данным.

Завершающей стадией жизненного цикла является хранение и утилизация проектной документации. Она направлена на обеспечение целостности цифрового архивного фонда, фиксацию актуальных версий документов и регламентированное исключение устаревших данных с сохранением истории изменений. Реализация данных процедур обеспечивает соблюдение требований к управлению данными и поддержание единого информационного пространства предприятия.

Для снижения зависимости от человеческого фактора каждая стадия жизненного цикла включает набор автоматизированных процедур контроля, ориентированных на проверку ключевых характеристик проектной информации [79–81].

К числу таких процедур относятся контроль корректности геометрии, проверка целостности связей между элементами, сопоставление чертежей с моделью, верификация версионности документов и анализ полноты комплектов.

Все участники процесса работают исключительно с актуальными версиями документов. Введённый механизм управления версиями обеспечивает прослеживаемость модификаций, автоматическую фиксацию изменений и уведомление смежных исполнителей о появлении новых редакций документации [82–83]. Это позволяет устранить риски использования устаревших данных и сформировать управляемый цифровой контур обмена информацией [84–86].

Таким образом, предложенная структура жизненного цикла формирует основу для перехода от разрозненных операций обработки документации к системному управлению проектной информацией в масштабе предприятия. Это создаёт предпосылки для построения функционально целостной системы управления проектной документацией и перехода к унифицированной технологии производства металлоконструкций.

2.2 IDEF0-модели процессов жизненного цикла проектной документации

Для описания процессов стадий жизненного цикла проектной документации применён метод функционального моделирования в нотации IDEF0 [87–89]. На рисунке 2.2 представлена укрупнённая модель жизненного цикла проектной документации, отражающая совокупность ресурсов и ограничений, влияющих на функционирование жизненного цикла в целом. На рисунке 2.3 приведена модель стадий жизненного цикла с указанием ограничений и ресурсов, наложенных на каждую стадию. На рисунках 2.4–2.7 представлена детализированная декомпозиция процессов по отдельным стадиям жизненного цикла. Ключевые этапы включают проектирование трёхмерных моделей, кластеризацию проектных элементов, формирование и согласование чертежей, оцифровку, а также хранение и регламентированную утилизацию проектной документации.

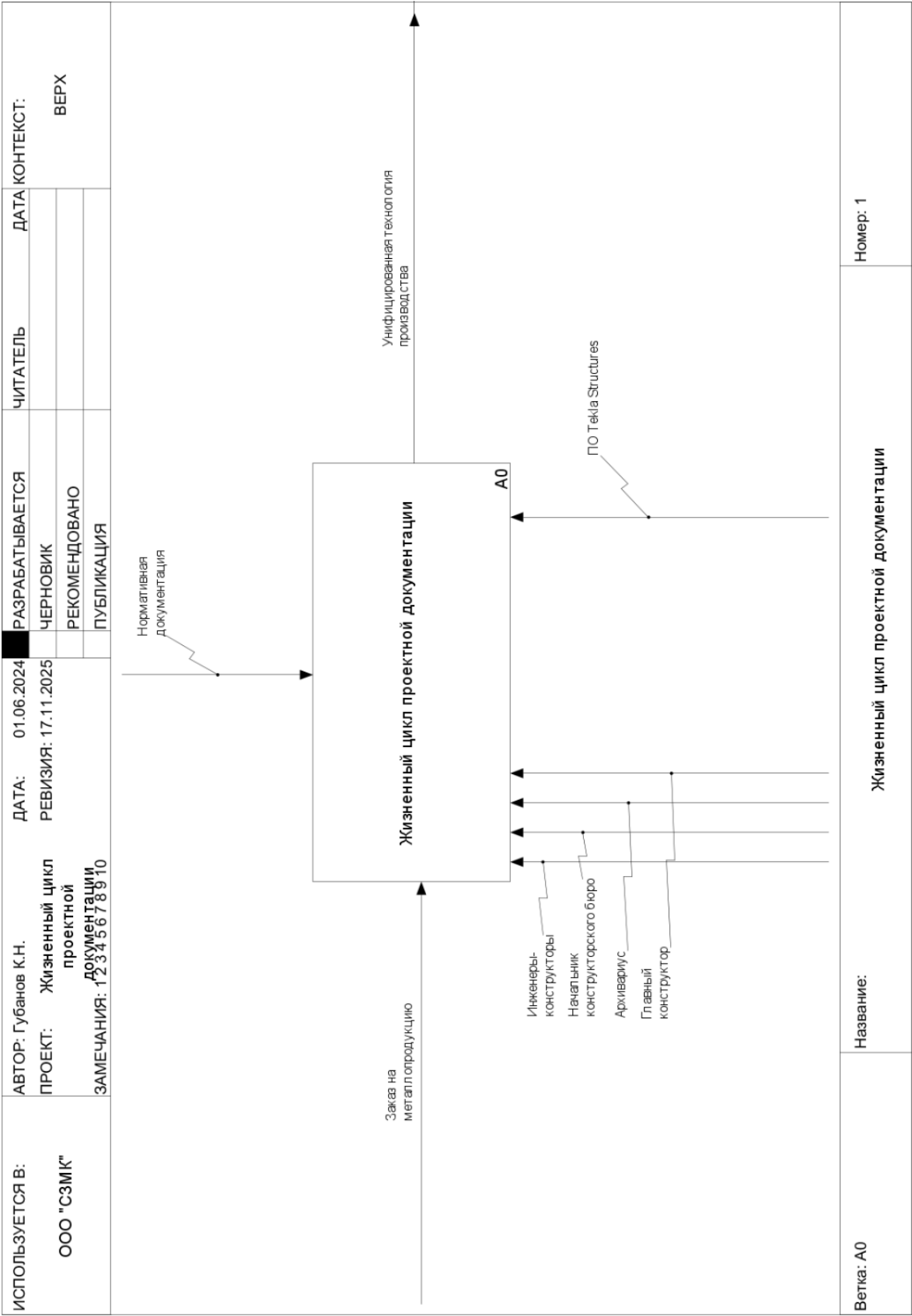


Рисунок 2.2 – Укрупненная IDEF0-модель жизненного цикла

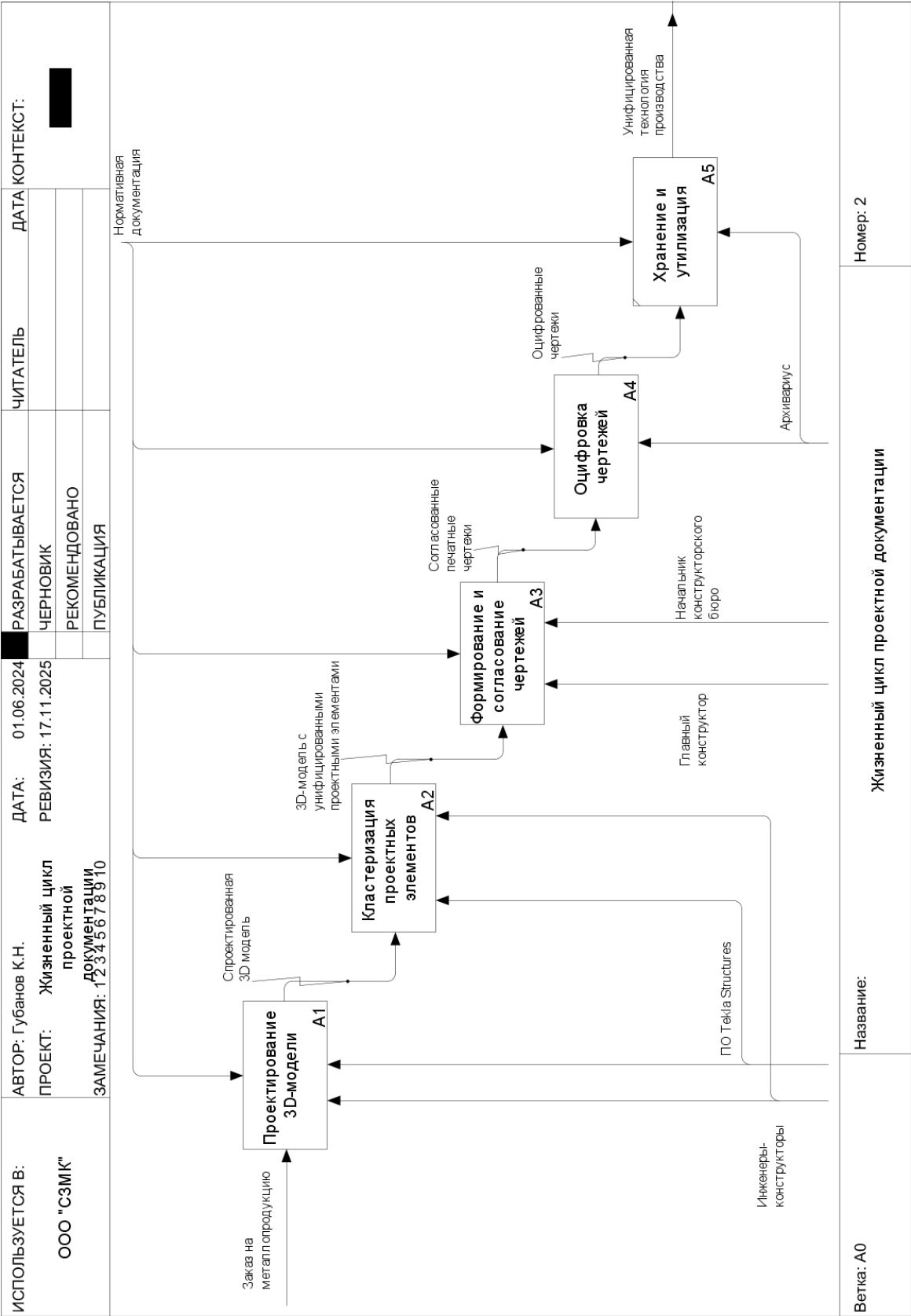


Рисунок 2.3 – IDEF0-модель процессов стадий жизненного цикла проектной документации

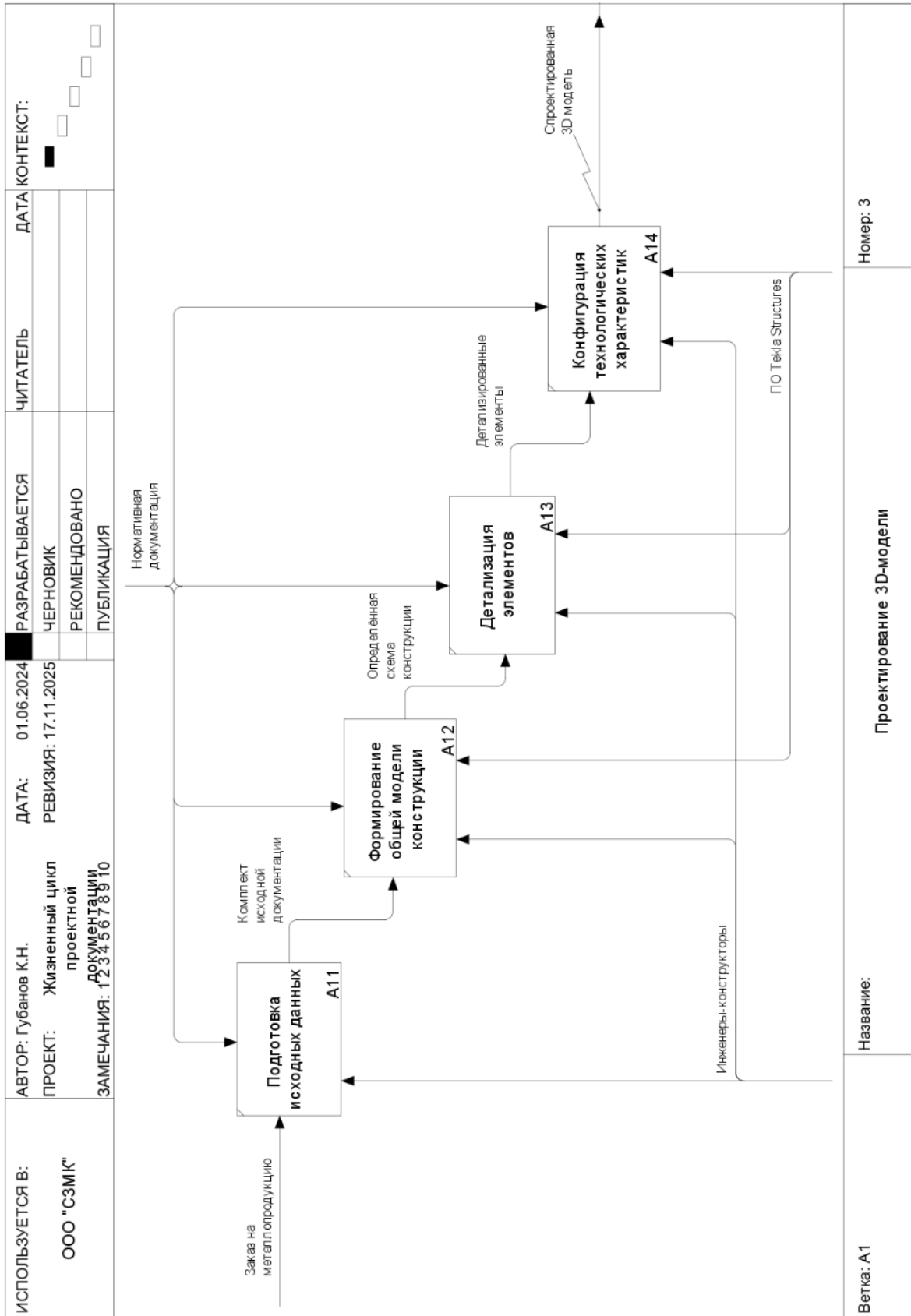
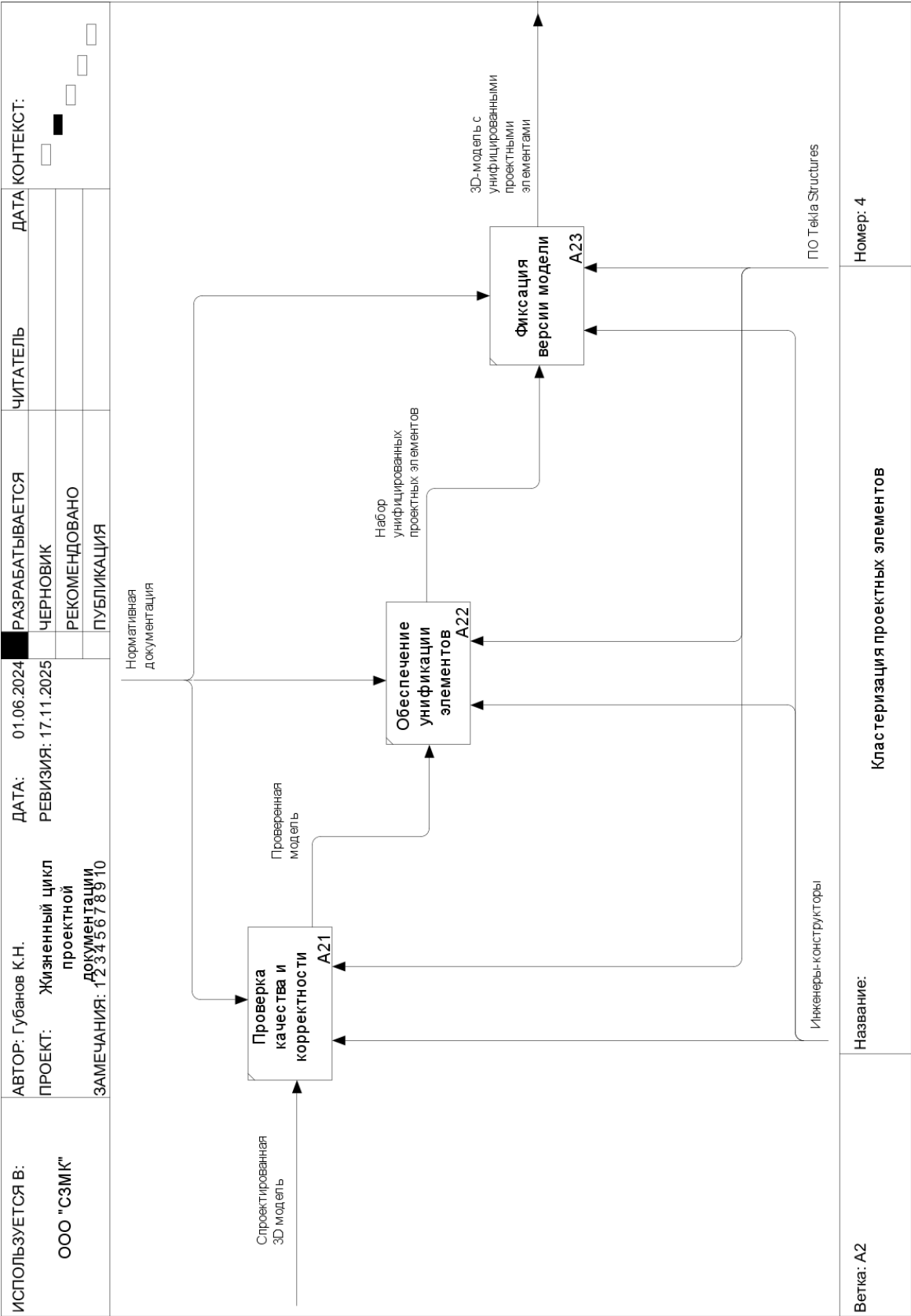


Рисунок 2.4 – Фрагмент IDEF0-модели процесса «Проектирование 3D-моделей»



Ветка: A2

Название:

Кластеризация проектных элементов

Номер: 4

Рисунок 2.5 – Фрагмент IDEF0-модели процесса «Кластеризация проектных элементов»

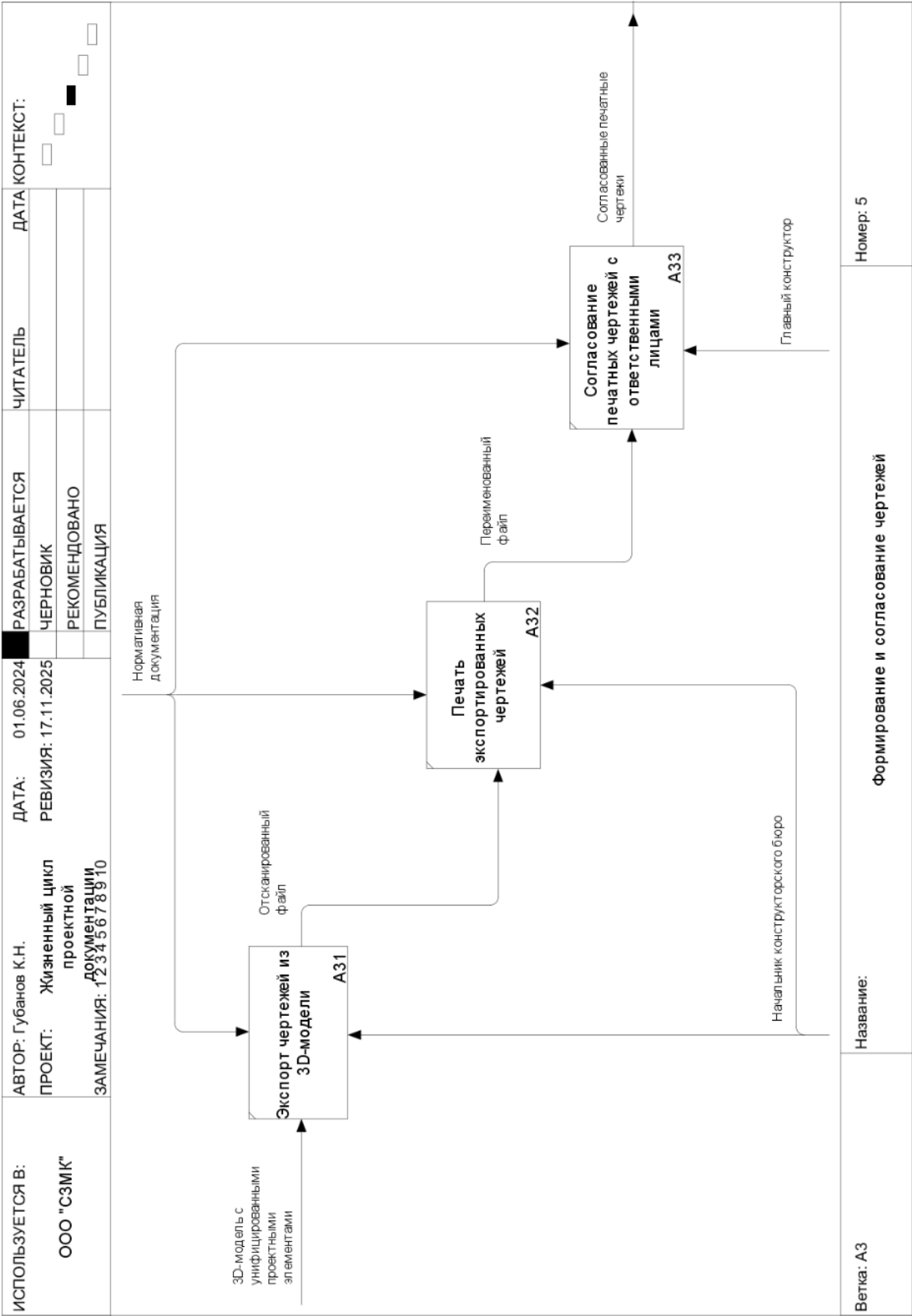


Рисунок 2.6 – Фрагмент IDEF0-модели процесса «Формирование и согласование чертежей»

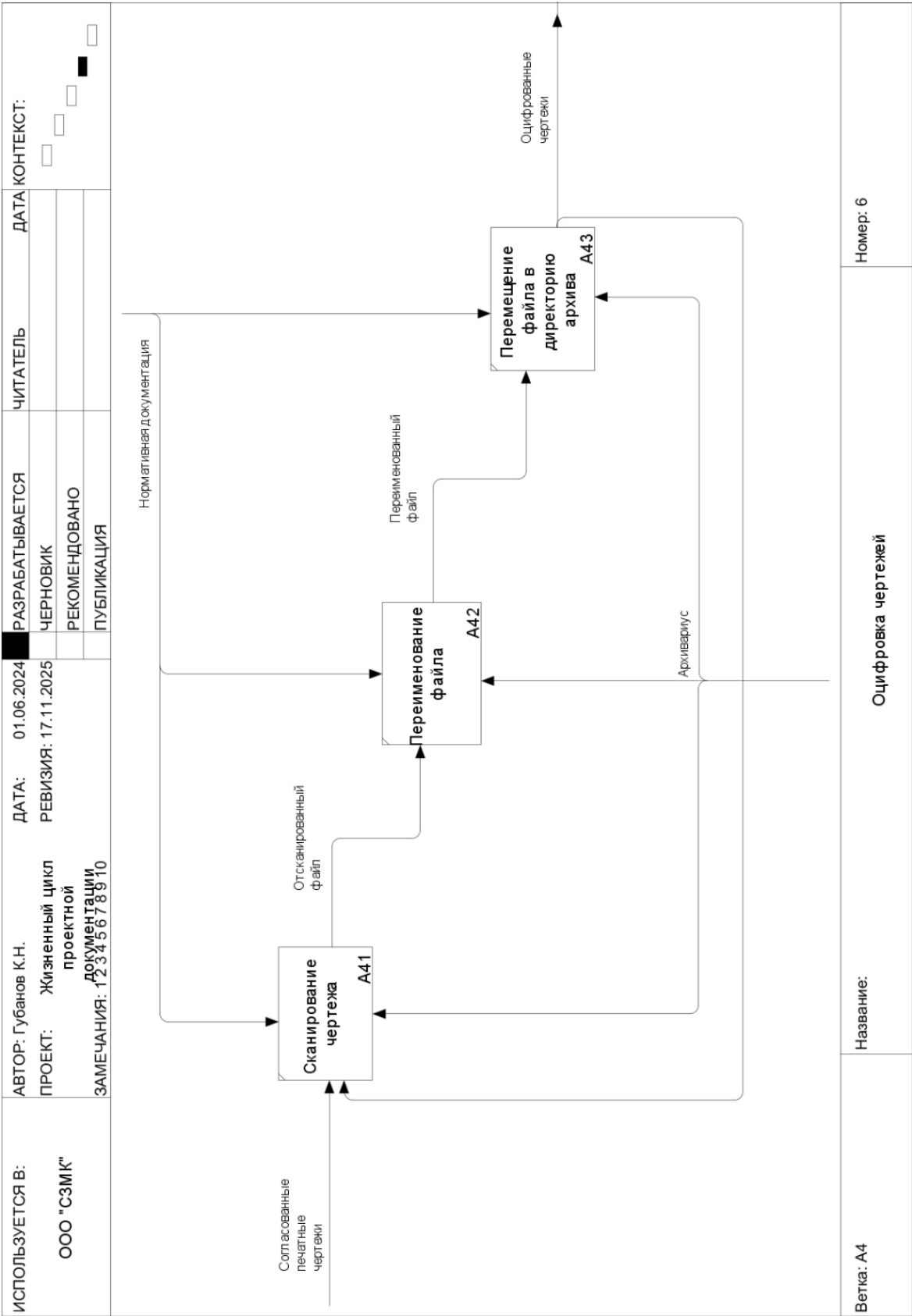


Рисунок 2.7 – Фрагмент IDEF0-модели процесса «Оцифровка чертежей»

На начальной стадии выполняется проектирование трёхмерной модели изделия, в ходе которого формируются геометрические, конструктивные и технологические параметры, а также создаётся единая структура проектных данных. Далее осуществляется кластеризация проектных элементов, включающая анализ структуры модели, выявление повторяющихся и схожих деталей, формирование унифицированных групп элементов и фиксацию версии модели.

На следующем этапе выполняется формирование и согласование чертежей, предусматривающее формирование графической документации на основе актуальной модели, её проверку и утверждение ответственными лицами. После согласования осуществляется оцифровка чертежей, включающая преобразование документации в электронный формат и контроль соответствия цифровых копий оригиналам.

Завершающей стадией являются хранение и регламентированная утилизация документации, направленные на поддержание целостности архива, контроль версий и обеспечение доступности проектных данных на всех стадиях жизненного цикла.

2.3 Структуризация системы управления жизненным циклом

Реализация предложенной структуры жизненного цикла требует создания соответствующей управляющей системы, способной координировать действия, обеспечивать информационный обмен и контролировать качество проектных данных на каждом этапе [90–92].

На основе построенной структуры жизненного цикла проектной документации была разработана функциональная структура системы управления данным жизненным циклом (рисунок 2.8). В отличие от разрозненной совокупности операций, существующей в действующей системе, предложенная модель представляет процесс обработки документации как управляемую иерархическую систему, включающую взаимосвязанные подсистемы управления отдельными стадиями жизненного цикла.

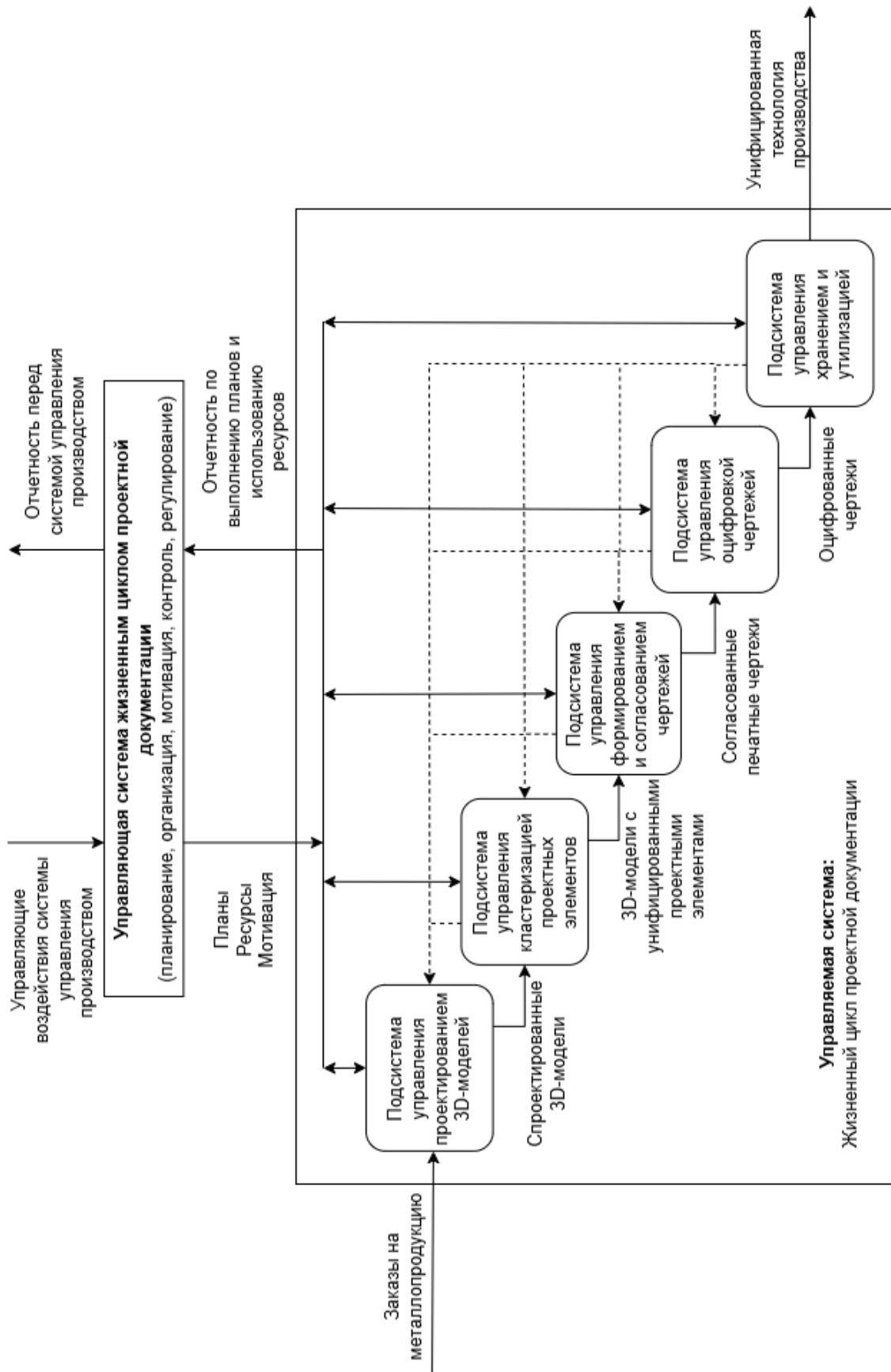


Рисунок 2.8 – Функциональная структура системы управления жизненным циклом проектной документации

Управляющая система жизненным циклом проектной документации, реализует функции планирования, организации, мотивации, контроля и регулирования [93–95]. Она определяет стратегические цели, устанавливает ресурсные лимиты и обеспечивает координацию действий производственных и проектных подразделений [96].

На вход управляемой системы поступают заказы на металлопродукцию, определяющие требования к технологии производства; на выходе формируется унифицированная технология производства, основанная на согласованных и верифицированных данных.

В составе управляемой системы каждая стадия жизненного цикла рассматривается как управляемая подсистема, имеющая собственный набор управляющих воздействий, критериев эффективности и механизмов контроля. Прямые связи отражают передачу результатов одной стадии в качестве входных данных следующей, что обеспечивает последовательность и логическую непрерывность процесса.

Обмен данными между подсистемами осуществляется по прямым и обратным информационным связям: прямые связи (сплошные линии) обеспечивают передачу данных от одного этапа жизненного цикла к следующему, обратные связи обозначены штриховыми линиями.

Обратные связи обеспечивают возможность корректировки деятельности всех предшествующих стадий при выявлении несоответствий на последующих этапах. Таким образом реализуется принцип замкнутого управленческого контура, допускающего управляемое внесение изменений и предотвращающего распространение ошибок.

В действующей системе обработка проектной документации осуществляется в различных программных средах, использующих несогласованные правила и форматы представления данных. Это приводит к дублированию операций, потере актуальных версий документов и росту числа ошибок. В рамках предлагаемой системы реализован единый цифровой контур управления, обеспечивающий цен-

трализованный контроль состояний документации и согласованность действий подразделений.

Механизмы управления версиями, фиксации изменений и стандартизированного информационного обмена встроены в логику функционирования всех подсистем. Это обеспечивает непрерывность управленческих воздействий и реализацию сквозных процедур контроля качества проектных данных.

Такая организация управления создаёт условия для формирования согласованных управленческих решений, минимизации расхождений в данных и оперативного контроля достижения целевых показателей. В результате повышается устойчивость функционирования организационной системы и обеспечивается рост эффективности управления производственным процессом в целом.

2.4 Унификация технологий производства элементов металлоконструкций

Как показал анализ процесса производства металлических конструкций, одной из ключевых проблем, существенно снижающих эффективность функционирования системы управления, является избыточная номенклатура элементов металлоконструкций. Указанная проблема формируется вследствие отсутствия формализованных правил унификации и кластеризации проектных элементов на ранних стадиях жизненного цикла проектной документации. В реальных производственных условиях идентичные либо близкие по геометрическим и технологическим характеристикам элементы нередко получают различные обозначения и рассматриваются как уникальные, что приводит к дублированию конструкторских и технологических решений, увеличению объёмов подготовительных операций, избыточному расходу материалов и времени, усложнению логистических и учётных процедур, а также повышению вероятности ошибок при изготовлении, сборке и монтаже металлоконструкций.

Существенным фактором, усугубляющим данную проблему, является преобладание ручных процедур при принятии решений о схожести элементов. Отсут-

ствие формализованных критериев и количественных показателей различия делает процесс унификации трудоёмким и субъективным, зависящим от опыта и квалификации конкретных специалистов. В то же время накопленные в цифровых системах проектирования и подготовки производства данные обладают устойчивой структурой и высокой повторяемостью, что создаёт предпосылки для их интеллектуальной обработки и автоматизации процедур унификации.

Особенности рассматриваемой задачи обусловлены многомерностью и разнородностью проектных данных, включающих числовые, категориальные и структурные параметры, а также размытостью границ между классами элементов, при которой различия между отдельными деталями могут быть незначительными и носить технологически допустимый характер. Дополнительную сложность вносит неоднозначность нумерации элементов, возникающая под влиянием человеческого фактора. В совокупности указанные особенности определяют необходимость применения методов, способных учитывать неопределённость, допуски и вариативность инженерных данных.

В рамках настоящего исследования формализация задачи унификации осуществляется путём представления каждой детали в виде вектора признаков:

$$x_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{im}), \quad (2.1)$$

где $i = 1, \dots, n$ – количество деталей; m – число признаков.

Признаковое пространство включает численные параметры (массу, габариты, площадь сечения, количество отверстий), категориальные (тип профиля, марку стали, вид обработки) и дискретные структурные характеристики (число вырезов, отверстий и т. д.).

Для обеспечения сопоставимости данных и возможности корректного вычисления мер различия выполняется предварительная обработка признаков. Числовые параметры (x_{ij}^{norm}) нормализуются по схеме min–max:

$$x_{ij}^{norm} = \frac{x_{ij} - \min(x_j)}{\max(x_j) - \min(x_j)}, \quad (2.2)$$

где x_{ij} – значение j -го числового признака i -го элемента металлоконструкции, а индекс j соответствует номеру признака в общем векторе признаков.

Это позволяет привести числовые характеристики к единому диапазону значений. Категориальные и структурные признаки кодируются таким образом, чтобы обеспечить их использование в рамках единого метрического пространства. В результате формируется нормализованная матрица признаков, описывающая множество элементов металлоконструкций в многомерном пространстве.

Для оценки степени различия между элементами в работе используется механизм комплексной оценки, основанный на взвешенном комбинировании метрик различной природы. В отличие от классических подходов, предполагающих использование единой метрики расстояния, предлагаемый механизм учитывает разнородность инженерных данных и различную значимость групп признаков для технологического процесса. Обобщённый показатель различия между элементом x_i и центром k -го кластера (v_k) задаётся квадратичной формой:

$$D^2(x_i, v_k) = \omega_1 D_{num}^2(x_i, v_k) + \omega_2 D_{cat}^2(x_i, v_k) + \omega_3 D_{str}^2(x_i, v_k), \quad (2.3)$$

где D_{num} – евклидово расстояние для нормализованных числовых признаков; D_{cat} – расстояние в пространстве формализованных категориальных характеристик, отражающее технологическую совместимость материалов и профилей; D_{str} – метрика структурной схожести, учитывающая конструктивные особенности элементов; $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ – весовые коэффициенты, определяемые методом экспертного оценивания.

Определение весовых коэффициентов $\omega_1, \omega_2, \omega_3$, отражающих относительную значимость числовых, категориальных и структурных признаков, осуществлялось на основе процедуры экспертного оценивания. В качестве экспертов привлекались специалисты конструкторского и технологического профиля, непосредственно участвующие в разработке проектной документации и подготовке производства металлических конструкций. Экспертам предлагалось выполнить ранжирование групп признаков по степени их влияния на выбор и реализацию технологической схемы производства элементов металлоконструкций. При этом оценивалась не абсолютная значимость отдельных параметров, а их вклад в формирование технологической однородности элементов, что соответствует целям унификации и стандартизации производственных процессов.

Для получения обобщённых весовых коэффициентов использовалась процедура нормализации экспертных рангов. Пусть r_{kj} – ранг, присвоенный j -м экспертом k -й группе признаков; L – количество групп признаков; E – число экспертов. Тогда суммарный ранг группы признаков определяется как:

$$R_k = \sum_{j=1}^E r_{kj}, \quad (2.4)$$

а весовой коэффициент вычисляется по формуле:

$$\omega_k = \frac{R_k}{\sum_{i=1}^L R_i}, \quad k = 1, \dots, L, \quad (2.5)$$

что обеспечивает выполнение условия нормирования $\sum_{k=1}^L \omega_k = 1$.

Согласованность экспертных оценок проверялась с использованием коэффициента конкордации Кендалла W , позволяющего количественно оценить степень согласия между ранжированиями, полученными от различных экспертов. Коэффициент конкордации вычислялся по формуле:

$$W = \frac{12 \sum_{k=1}^L (R_k - \bar{R})^2}{E^2 (L^3 - L)}, \quad (2.6)$$

где $\bar{R} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K R_k$ – среднее значение суммарных рангов.

Значения коэффициента W , близкие к единице, свидетельствуют о высокой согласованности экспертных оценок, тогда как значения, стремящиеся к нулю, указывают на их случайный характер.

Полученные в ходе исследования значения коэффициента конкордации подтвердили допустимый уровень согласованности экспертных суждений, что позволяет рассматривать определённые весовые коэффициенты как обоснованные и воспроизводимые [97–99]. Использование формализованной процедуры экспертного оценивания и проверки согласованности обеспечивает методологическую корректность механизма комплексной оценки и повышает доверие к результатам кластеризации элементов металлоконструкций в контексте принятия проектных и технологических решений [100–102].

На основе введенного обобщенного показателя различия задача унификации элементов металлоконструкций решается с применением алгоритма нечеткой кластеризации Fuzzy C-Means (FCM). Выбор данного метода обусловлен его способностью учитывать размытость границ между классами и допускать частичную принадлежность элемента нескольким кластерам, что соответствует природе инженерных данных и технологических допусков [103–105]. В рамках алгоритма минимизируется целевая функция:

$$J_m = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^c u_{ik}^m D^2(x_i, v_k), \quad (2.7)$$

где n – количество деталей; c – количество кластеров; x_i – вектор признаков i -й детали; v_k – центр k -го кластера; $u_{ik} \in [0,1]$ – степень принадлежности элемента i кластеру k ; $m > 1$ – коэффициент нечеткости, регулирующий «размытость» кластеров, на практике обычно используют значение $m = 2$.

Алгоритм FCM реализуется итеративно и включает последовательное обновление координат центров кластеров:

$$v_k = \frac{\sum_{i=1}^n u_{ik}^m \cdot x_i}{\sum_{i=1}^n u_{ik}^m}, \quad (2.8)$$

и матрицы принадлежности:

$$u_{ik} = \left(\sum_{j=1}^c \left(\frac{D^2(x_i, v_k)}{D^2(x_i, v_j)} \right)^{\frac{1}{m-1}} \right)^{-1}. \quad (2.9)$$

Процесс повторяется до тех пор, пока изменение значений принадлежности не станет меньше заданного порога ε , что свидетельствует о достижении сходимости.

Каждый сформированный кластер интерпретируется как класс элементов, для которых может быть использована единая унифицированная технологическая схема производства. Центр кластера рассматривается как виртуальный технологический эталон, отражающий допустимую вариативность параметров элементов в рамках одной технологии. Для выбора оптимального числа кластеров применяется критерий Fuzzy Partition Coefficient (FPC):

$$FPC = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^c u_{ik}^2. \quad (2.10)$$

Значения FPC, приближающиеся к единице, указывают на формирование хорошо различимых групп, в то время как низкие значения свидетельствуют о пересечении кластеров и слабой структурированности данных.

Результаты кластеризации используются для поддержки принятия проектных и технологических решений. При наличии выраженной принадлежности элемента к одному из кластеров ему автоматически сопоставляется соответствующая унифицированная технология производства. В пограничных случаях, когда степени принадлежности распределены между несколькими кластерами, элемент направляется на дополнительный анализ специалистом. При отсутствии кластера с приемлемой степенью принадлежности элемент трактуется как уникальный, что соответствует необходимости разработки новой технологической схемы и актуализации множества унифицированных технологий.

При обработке новых заказов и до формирования проектной документации для нового элемента x_{new} вычисляются степени его принадлежности к существующим кластерам:

$$u_{new,k} = \left(\sum_{j=1}^c \left(\frac{D^2(x_{new}, v_k)}{D^2(x_{new}, v_j)} \right)^{\frac{1}{m-1}} \right)^{-1}. \quad (2.11)$$

Это позволяет реализовать механизм интеллектуального распознавания элементов по аналогии и обеспечить преемственность технологических решений.

Таким образом, применение нечеткой кластеризации Fuzzy C-Means в сочетании с механизмом комплексной оценки разнородных признаков позволяет формализовать и автоматизировать процесс унификации элементов металлоконструкций, обеспечить формирование и актуализацию множества унифицированных технологий производства, сократить избыточность номенклатуры и повысить эффективность функционирования системы управления производством. Реализация данного подхода создает предпосылки для перехода от фрагментарных проектно-технологических решений к устойчиво управляемой модели производства,

основанной на единых правилах классификации и воспроизводимых технологических маршрутах.

2.5 Выводы по главе 2

1. Предложена структура жизненного цикла проектной документации как динамической системы последовательных преобразований проектных данных – от проектирования 3D-модели до регламентированного хранения и утилизации. Выделение жизненного цикла в качестве самостоятельного объекта управления позволило задать единые принципы формализации операций и контроля на всех стадиях обработки проектной информации. Включение в каждую стадию автоматизированных процедур контроля (версионности, полноты комплектов, соответствия модели и чертежей, целостности связей) обеспечивает прослеживаемость изменений и снижает зависимость качества данных от человеческого фактора.

2. Функциональное моделирование стадий жизненного цикла в нотации IDEF0 позволило формализовать состав операций и их причинно-следственные связи в едином информационном контуре, уточнить структуру входов/выходов, механизмов и управляющих воздействий на каждом этапе.

3. На основе разработанной структуры жизненного цикла сформирована функциональная структура системы управления, в которой каждая стадия рассматривается как управляемая подсистема с собственными критериями эффективности и механизмами контроля. Обосновано применение прямых и обратных информационных связей как средства реализации замкнутого контура управления, обеспечивающего корректировку предшествующих стадий при выявлении ошибок на последующих этапах и предотвращающего распространение несогласованной проектной информации.

4. Введён обобщённый показатель различия элементов, обеспечивающий комплексный учёт числовых, категориальных и структурных характеристик на основе взвешенной квадратичной формы. Определение весовых коэффициентов выполнено методом экспертного оценивания при помощи процедуры экспертного

ранжирования. Согласованность экспертов подтверждена коэффициентом коррдации Кендалла.

5. Применение алгоритма нечеткой кластеризации Fuzzy C-Means на основе введённого показателя различия обеспечивает унификацию элементов с учётом технологически допустимой вариативности параметров и размытых границ классов. Использование критерия качества разбиения (FPC) позволяет обосновывать выбор числа кластеров, интерпретируемых как множество унифицированных технологий производства, тем самым снижая избыточность номенклатуры и сокращая повторяемость производственных операций.

3 РАЗРАБОТКА СОГЛАСОВАННОГО ЭФФЕКТИВНОГО МЕХАНИЗМА ИНВЕСТИРОВАНИЯ В СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ПРОЕКТНОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ

3.1 Описание типологии организационной системы и механизма управления

Совершенствование процессов жизненного цикла проектной документации осуществляется в рамках динамической многоэлементной организационной системы, включающей инвестиционный центр и совокупность управляемых подсистем, соответствующих отдельным стадиям жизненного цикла. Рассматриваемая система относится к классу иерархических организационных систем с обратными связями, в которых управление реализуется на основе согласования локальных и глобальных интересов.

Инвестиционный центр выполняет функции верхнего уровня управления и отвечает за формирование стратегических приоритетов развития, распределение ограниченных инвестиционных ресурсов и оценку совокупного результата функционирования системы. Подсистемы управления стадиями жизненного цикла выступают в роли агентов, обладающих локальной информацией о состоянии процессов, внутренних резервах повышения эффективности и возможных направлениях совершенствования.

Топология рассматриваемой организационной системы характеризуется следующими особенностями:

- иерархическая структура управления, в которой инвестиционный центр занимает верхний уровень, а подсистемы управления стадиями жизненного цикла – нижний уровень;
- многоэлементный характер, обусловленный наличием нескольких функционально различающихся подсистем, каждая из которых соответствует отдельной стадии жизненного цикла проектной документации;

- динамичность, выражающаяся в изменении состояния подсистем, их потребностей в ресурсах и достигнутых результатов во времени;
- наличие прямых и обратных связей, обеспечивающих передачу управляющих воздействий от центра к подсистемам и возврат информации о результатах деятельности подсистем в центр.

В основу взаимодействия элементов системы положен типовой механизм планирования и согласования решений в иерархических организационных системах «центр – агенты». Данный механизм предполагает разграничение функций: нижний уровень формирует допустимые варианты развития в рамках собственных локальных задач, а верхний уровень осуществляет их согласование и окончательный выбор с учетом глобальных целей и ресурсных ограничений.

Механизм согласованного инвестирования в совершенствование процессов жизненного цикла проектной документации реализуется в виде последовательности этапов, отражающих обмен информацией и управляющими воздействиями между инвестиционным центром и подсистемами управления стадиями [106].

I этап. Инвестиционный центр формирует и доводит до подсистем механизм функционирования. Определяются стратегические ориентиры развития, принципы оценки эффективности стадий, порядок формирования альтернатив и правила последующего распределения инвестиционных ресурсов. На данном этапе центр не осуществляет распределение средств, а задаёт институциональные условия функционирования системы и общую архитектуру принятия решений.

II этап. Каждая подсистема стадии жизненного цикла самостоятельно решает задачу повышения эффективности функционирования соответствующих процессов. Обладая детальной локальной информацией, подсистема анализирует текущее состояние, выявляет возможные направления совершенствования и формирует альтернативные варианты развития. Особенностью данного этапа является отсутствие жесткого бюджетного ограничения на уровне подсистемы. Подсистема не выбирает единственный вариант, а формирует множество допустимых альтернатив, представляющих собой компромиссы между достигаемым уровнем эффективности и необходимыми инвестиционными затратами.

III этап. Сформированные альтернативы передаются в инвестиционный центр. Тем самым реализуется восходящая информационная связь. В центр поступают не заявки на конкретные объемы финансирования, а структурированные множества вариантов развития каждой стадии, очищенные от доминируемых решений и отражающие рациональные направления повышения эффективности.

IV этап. Инвестиционный центр решает задачу распределения ограниченного инвестиционного бюджета между стадиями жизненного цикла. В отличие от подсистем, центр действует в условиях жесткого ресурсного ограничения и ориентируется на максимизацию обобщенного показателя эффективности системы управления с учетом приоритетности стадий. На данном этапе происходит согласование локальных предложений подсистем с глобальными целями организационной системы.

V этап. Центр доводит до подсистем результаты принятого решения. Для каждой стадии выбирается один вариант развития из переданного множества альтернатив. Тем самым формируется управляющее воздействие, определяющее состав и масштаб мероприятий по совершенствованию процессов на очередном цикле функционирования системы.

Представленная последовательность этапов отражает замкнутый характер управленческого контура и обеспечивает согласование интересов различных уровней иерархии. Подсистемы ориентированы на локальную оптимизацию своих процессов в координатах «эффективность – затраты», тогда как инвестиционный центр осуществляет глобальную оптимизацию распределения ресурсов с учетом стратегических приоритетов предприятия.

Схема механизма планирования инвестирования представлена на рисунке 3.1. Она наглядно иллюстрирует последовательность информационных и управленческих взаимодействий между уровнями системы и демонстрирует циклический характер процесса согласования решений.



Рисунок 3.1 – Механизм планирования инвестирования

Реализация разработанного механизма обеспечивает формализованную основу для обоснованного распределения инвестиционных ресурсов, повышает прозрачность управленческих решений и создает предпосылки для системного и устойчивого совершенствования процессов жизненного цикла проектной документации.

3.2 Определение ресурсов для усовершенствования процессов стадии

Рассмотрим i -ю подсистему жизненного цикла проектной документации ($i = \overline{1, m}$) функционирующую в рамках иерархической системы управления. Для формального описания эффективности функционирования данной подсистемы введем совокупность локальных показателей, отражающих отдельные аспекты результативности процессов, выполняемых на соответствующей стадии жизненного цикла.

Пусть $j = \overline{1, n_i}$ – номер локального показателя, где n_i – количество показателей, характеризующих i -ю стадию жизненного цикла. Каждый показатель M_{ij} отражает отдельный аспект функционирования подсистемы и может быть измерен либо на основе статистических данных (временные характеристики процессов, количество ошибок и возвратов, доля доработок), либо с использованием экспертных оценок (степень унификации, полнота комплектов, качество проработки проектных решений).

Совокупность показателей:

$$\{M_{ij}\}_{j=1}^{n_i}, \quad (3.1)$$

образует вектор состояния i -й подсистемы и используется для последующего агрегирования при оценке эффективности как отдельных стадий жизненного цикла, так и системы управления в целом.

Поскольку влияние отдельных показателей на результат функционирования стадии неодинаково, для учета их относительной значимости вводятся весовые коэффициенты α_j , отражающие вклад j -го показателя в интегральную оценку эффективности подсистемы. Значения коэффициентов α_j определяются экспертным путём с привлечением специалистов и руководителей, ответственных за функционирование соответствующей стадии, и удовлетворяют условию нормировки:

$$\sum_{j=1}^{n_i} \alpha_j = 1. \quad (3.2)$$

Экспертный характер задания весов обусловлен особенностями организационных систем, в которых формализация значимости показателей исключительно на основе статистических данных, как правило, затруднена.

Локальные показатели M_{ij} имеют различную размерность и измеряются в разных шкалах (временных, относительных, количественных), что делает невозможным их прямое агрегирование. В связи с этим для последующего анализа и построения интегральных показателей выполняется процедура нормализации.

В рамках настоящего исследования нормализация осуществляется путем перевода значений локальных показателей в единую безразмерную балльную шкалу. В качестве базовой принимается ограниченная дискретная шкала:

$$k = \overline{1, R}, \quad (3.3)$$

где R – максимальное возможное значение оценки (например, $R = 10$). Большие значения шкалы соответствуют более высокому уровню эффективности функционирования стадии жизненного цикла.

Нормализованное значение j -го показателя для i -й подсистемы обозначим через k_{ij} . При этом для показателей, подлежащих минимизации (время выполнения операций, количество ошибок, число возвратов), балльная оценка формируется таким образом, что меньшим исходным значениям соответствуют большие значения k_{ij} . Для показателей, ориентированных на максимизацию (доля успешно выполненных операций, степень унификации, полнота комплектов), нормализация осуществляется напрямую.

Использование балльной шкалы позволяет обеспечить сопоставимость разнородных показателей, упростить интерпретацию результатов и задать дискретные уровни эффективности функционирования стадии.

Пусть $k_{ij}^D \in [1, R]$ – текущее (достигнутое) значение нормализованного показателя, соответствующее фактическому состоянию процессов i -й подсистемы на момент принятия управленческого решения. Тогда текущее состояние эффективности i -й подсистемы характеризуется комплексным показателем:

$$q_i^D = \sum_{j=1}^{n_i} \alpha_j k_{ij}^D, \quad q_i^D \in [1, R]. \quad (3.4)$$

Повышение эффективности стадии жизненного цикла связано с реализацией мероприятий по совершенствованию процессов, направленных на улучшение отдельных локальных показателей. Для каждого показателя j множество допустимых целевых значений определяется как:

$$\{k_{ij}^D, k_{ij}^D + 1, \dots, R\}. \quad (3.5)$$

Для формализации выбора целевых уровней нормализованных показателей введем булевы переменные управления:

$$x_{ij}^k = \begin{cases} 1, & \text{если для показателя } j \text{ выбран целевой уровень } k, \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (3.6)$$

Задача i -й подсистемы заключается в формировании альтернативных вариантов развития, характеризуемых достигаемым уровнем эффективности и необходимыми затратами. Итоговый уровень эффективности подсистемы определяется выражением:

$$q_i = \sum_{j=1}^{n_i} \sum_{k_j=k_j^A}^R \alpha_j k_j x_{ij}^{k_j}. \quad (3.7)$$

Затраты на реализацию выбранного варианта развития обусловлены необходимостью повышения отдельных показателей по сравнению с их текущим уровнем. Тогда суммарные затраты составляют:

$$z_i = \sum_{j=1}^{n_i} \sum_{k_j=k_j^A}^R (k_j - k_j^A) z(k_j - k_j^A). \quad (3.8)$$

С учетом введенных обозначений задача, решаемая i -й подсистемой жизненного цикла проектной документации, формализуется в виде следующей задачи дискретной оптимизации:

$$\left\{ \begin{array}{l} z_i = \sum_{j=1}^{n_i} \sum_{k_j=k_j^A}^R (k_j - k_j^A) z(k_j - k_j^A) \rightarrow \min, \\ q_i = \sum_{j=1}^{n_i} \sum_{k_j=k_j^A}^R \alpha_j k_j x_{ij}^{k_j} > q, \quad q_i^A \leq q \leq R \\ \sum_{k_j=k_j^A}^R x_{ij}^{k_j} = 1, \end{array} \right. \quad (3.9)$$

Сформулированная задача выбора целевых уровней локальных показателей представляет собой задачу дискретного распределения ресурсов между альтернативными направлениями улучшения. При этом для каждого показателя j выбира-

ется один из допустимых уровней l , характеризующийся приростом интегральной эффективности Δq_{ij}^l и затратами z_{ij}^l .

Следует отметить, что рассматриваемая постановка имеет характер обратной задачи управления. В классической прямой задаче управления центр задаёт управляющие воздействия и распределяет ресурсы между направлениями деятельности с целью достижения максимального интегрального эффекта при ограниченном бюджете.

В настоящем случае подсистема, не обладая жестким бюджетным ограничением, формирует множество допустимых вариантов повышения эффективности, исходя из внутренних резервов и технологических возможностей. При этом фиксируется зависимость между достигаемым уровнем эффективности и соответствующими затратами.

Тем самым решается задача определения структуры потребности в ресурсах при заданных уровнях улучшения показателей, то есть задача восстановления требуемых затрат по заданным управляющим воздействиям. В этом смысле локальная задача подсистемы представляет собой обратную по отношению к централизованной задаче распределения ресурсов, решаемой на вышестоящем уровне иерархии.

С математической точки зрения данная постановка сводится к задаче о модифицированном ранце, в которой:

- каждая группа альтернатив соответствует одному локальному показателю;
- из каждой группы должен быть выбран ровно один вариант;
- «ценность» предмета определяется приростом эффективности;
- «вес» предмета определяется дополнительными затратами;
- целевая функция отражает максимизацию суммарного эффекта при формировании множества Парето-оптимальных решений.

Решение задачи (3.9) осуществляется методом поэтапного формирования и свёртки множеств Парето-оптимальных альтернатив, аналогично алгоритмам

дискретной оптимизации, применяемым в задачах выбора одного варианта из каждой группы при наличии антагонистичных критериев «эффективность–затраты».

На первом этапе для каждого локального показателя j формируется конечное множество допустимых целевых уровней $\{k_j^D, \dots, R\}$. Каждому уровню k_j ставится в соответствие пара величин (q_{ij}, z_{ij}) , где $q_{ij} = \alpha_j k_j$ – вклад показателя в интегральную оценку эффективности, а z_{ij} – дополнительные затраты, необходимые для перехода от текущего уровня k_j^D к уровню k_j .

На втором этапе осуществляется последовательная свёртка множеств альтернатив по показателям. Для первых двух показателей $j = 1, 2$ формируется множество всех допустимых комбинаций уровней (k_1, k_2) , для каждой из которых вычисляется совокупная пара критериев (q_i, z_i) . Из полученного множества исключаются доминируемые альтернативы, то есть такие, для которых существует другая комбинация, обеспечивающая не меньшую эффективность при меньших или равных затратах. В результате формируется множество Парето-оптимальных вариантов для подзадачи с двумя показателями.

Далее процедура повторяется итеративно: на каждом шаге k множество Парето-оптимальных альтернатив, полученное для первых $k - 1$ показателей, свёртывается с множеством допустимых уровней показателя k . Для всех новых комбинаций пересчитываются значения (q_i, z_i) , после чего вновь выполняется отсечение доминируемых вариантов.

Таким образом, на каждом шаге поддерживается ограниченное по мощности множество Парето-оптимальных решений, что предотвращает экспоненциальный рост числа альтернатив.

Результатом решения данной задачи является не единственное оптимальное решение, а множество Парето-оптимальных альтернатив:

$$\{(q_i^\ell, z_i^\ell) | \ell = \overline{1, \ell_i}\}, \quad (3.10)$$

каждая из которых представляет собой компромисс между приростом эффективности функционирования стадии и необходимыми инвестиционными затратами.

Сформированное множество альтернатив передается в центр системы управления и используется на вышестоящем уровне иерархии при решении задачи согласованного распределения инвестиционных ресурсов между стадиями жизненного цикла проектной документации.

Пример. Выбор показателей осуществляется с учётом выявленных в главе 1 недостатков действующей системы управления и структуры жизненного цикла, представленной в разделе 2.1. Показатели приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Показатели эффективности стадий жизненного цикла проектной документации

Стадия жизненного цикла	Обозначение показателя	Наименование показателя
Проектирование 3D-моделей	$M_{1,1}$	Среднее время разработки 3D-модели
	$M_{1,2}$	Доля ошибок моделирования, выявленных после передачи модели
	$M_{1,3}$	Количество возвратов модели на доработку
Кластеризация проектных элементов	$M_{2,1}$	Степень сокращения числа уникальных проектных элементов
	$M_{2,2}$	Доля элементов с пограничной принадлежностью
Формирование и согласование чертежей	$M_{3,1}$	Среднее время формирования и согласования комплекта чертежей
	$M_{3,2}$	Доля несоответствий между 3D-моделью и чертежами
	$M_{3,3}$	Количество итераций согласования комплекта
	$M_{3,4}$	Доля чертежей, автоматически сформированных из модели без ручной доработки
Оцифровка чертежей	$M_{4,1}$	Доля чертежей, успешно прошедших автоматическую оцифровку
	$M_{4,2}$	Среднее время оцифровки одного чертежа
	$M_{4,3}$	Количество ошибок распознавания
Хранение и утилизация	$M_{5,1}$	Среднее время поиска документа
	$M_{5,2}$	Количество случаев использования устаревшей документации

Стадия проектирования трёхмерных моделей формирует первичное цифровое представление изделия и оказывает определяющее влияние на последующие этапы жизненного цикла. Ошибки и неточности, допущенные на данном этапе, как правило, выявляются на стадиях формирования чертежей, подготовки производства или непосредственно в производственном процессе, что существенно увеличивает совокупные издержки.

Для оценки эффективности стадии проектирования используются показатели, отражающие трудоёмкость моделирования и качество исходной информации. К таким показателям относятся среднее время разработки 3D-модели, доля ошибок моделирования, выявленных после передачи модели на последующие стадии, а также количество возвратов модели на доработку. Совокупность указанных показателей позволяет оценить не только скорость выполнения работ, но и качество моделирования.

Стадия кластеризации проектных элементов представляет собой ключевой элемент жизненного цикла и направлена на формирование множеств элементов, изготавливаемых по унифицированной технологии.

Для оценки эффективности кластеризации используются показатели, характеризующие степень сокращения числа уникальных позиций, и доля элементов с пограничной принадлежностью к кластерам, отражающая уровень неопределённости классификации.

Стадия формирования и согласования чертежей является одной из наиболее трудоёмких и уязвимых с точки зрения возникновения ошибок, что подтверждается результатами анализа действующей системы управления. Существенная часть операций на данном этапе выполняется вручную, а контроль соответствия чертежей трёхмерной модели носит фрагментарный характер.

Эффективность стадии характеризуется средним временем формирования и согласования комплекта чертежей, долей выявленных несоответствий между 3D-моделью и графической документацией, количеством итераций согласования, а также долей чертежей, автоматически сформированных из модели без ручной доработки.

Стадия оцифровки проектной документации обеспечивает включение архивных и бумажных чертежей в единый цифровой контур управления. Актуальность данной стадии обусловлена необходимостью сохранения и повторного использования проектных решений, а также снижением рисков утраты информации.

Для оценки эффективности оцифровки используются показатели, отражающие долю чертежей, успешно прошедших автоматическую обработку, среднее время оцифровки одного документа и количество ошибок распознавания данных с чертежа.

Заключительная стадия жизненного цикла определяет информационную устойчивость системы управления проектной документацией. Отсутствие регламентированных процедур хранения и утилизации приводит к накоплению устаревших версий, росту объёма архива и увеличению вероятности использования неактуальных данных.

Эффективность стадии хранения и утилизации характеризуется средним временем поиска проектной информации, а также количеством случаев использования устаревшей документации.

Рассмотрим решение задачи для стадии формирования и согласования чертежей в которой используется четыре локальных показателя приведенные в таблице 3.1.

Получение достигнутой эффективности. В соответствии с общей постановкой формул 3.1 – 3.4 каждый показатель должен быть приведён к единой безразмерной балльной шкале $k \in [1, R]$, $R = 10$. Для этого используются либо статистические данные, либо согласованные экспертные оценки (балльные шкалы и пороги уровней). Такой подход к нормализации и агрегированию показателей соответствует распространённым практикам статистики и анализа данных.

Предположим, что по результатам анализа данных за год и экспертной калибровки шкал получены следующие фактические значения и нормализованные оценки (в баллах), приведенные в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Фактические и нормализованные значения показателей стадии формирования и согласования чертежей

Показатель	Условное обозначение	Фактическое значение	Направление влияния	Нормализованная оценка
1	$M_{3,1}$	11 дней	меньше - лучше	6
2	$M_{3,2}$	4,5 %	меньше - лучше	7
3	$M_{3,3}$	3 итерации	меньше - лучше	5
4	$M_{3,4}$	40 %	больше - лучше	4

Первые три показателя являются затратными (ориентированы на минимизацию), при нормализации меньшему исходному значению соответствует больший балл k_{3j} . Четвёртый показатель является результативным (ориентирован на максимизацию), нормализация для него выполняется напрямую: большему значению доли автоматической генерации соответствует больший балл.

Для учёта различной значимости локальных показателей на стадии устанавливаются весовые коэффициенты α_j , $j = \overline{1,4}$, удовлетворяющие условию нормировки формулы 3.2. Пусть по результатам экспертной процедуры (ранжирование, последующее согласование с руководством подразделения) получены следующие значения, представленные в таблице 3.3:

Таблица 3.3 – Весовые коэффициенты локальных показателей стадии формирования и согласования чертежей

Показатель	Описание	Весовой коэффициент
$M_{3,1}$	Среднее время формирования комплекта	0,25
$M_{3,2}$	Доля несоответствий между 3D-моделью и чертежами	0,35
$M_{3,3}$	Количество итераций согласования комплекта	0,20
$M_{3,4}$	Доля чертежей, автоматически сформированных	0,20
Итого		$\sum_{j=1}^4 \alpha_j = 1$

Тогда текущий интегральный уровень эффективности стадии согласно формуле 3.4 равен:

$$q_3^A = \sum_{j=1}^{n_i} \alpha_j k_{3j}^A = 0,30 \cdot 6 + 0,25 \cdot 7 + 0,20 \cdot 5 + 0,25 \cdot 4 = 5,55. \quad (3.11)$$

Таким образом, в исходном состоянии эффективность подсистемы формирования и согласования чертежей оценивается на уровне $q_3^A = 5,55$ балла по десятибалльной шкале.

Формирование вариантов улучшения по отдельным показателям. Повышение эффективности стадии связано с проведением мероприятий, улучшающих отдельные показатели. В данном примере для простоты будем считать, что для каждого показателя рассматриваются два возможных уровня:

- сохранение текущего уровня k_{3j}^A ;
- повышение на один балл до уровня $k_{3j}^A + 1$.

Такое упрощение не ограничивает общности метода: при необходимости множество целевых уровней может быть расширено до $\{k_{3j}^A, k_{3j}^A + 1, \dots, R\}$ в соответствии с формулой 3.5.

Пусть улучшение показателя на один балл требует следующих дополнительных затрат на основе экспертной оценки:

- сокращение времени формирования комплекта $M_{3,1}$ 80 тыс. руб. на 1 балл;
- снижение доли несоответствий $M_{3,2}$ 100 тыс. руб. на 1 балл;
- сокращение числа итераций согласования $M_{3,3}$ 60 тыс. руб. на 1 балл;
- увеличение доли автоматической генерации чертежей $M_{3,4}$ 90 тыс. руб. на 1 балл.

Варианты улучшения по отдельным показателям приведены в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Варианты улучшения по отдельным показателям

Показатель	Текущий уровень	Улучшенный уровень	Приращение	Приращение интегральной оценки	Дополнительные затраты, тыс. руб.
$M_{3,1}$	6	7	+1	0,30	80
$M_{3,2}$	7	8	+1	0,25	100
$M_{3,3}$	5	6	+1	0,20	60
$M_{3,4}$	4	5	+1	0,25	90

Экономический смысл этих параметров состоит в том, что каждое улучшение на 1 балл соответствует определённому пакету мероприятий (дополнительная автоматизация, регламентация процессов, обучение персонала), оцениваемому в денежном выражении и дающему формализованный вклад Δq_j в интегральный показатель эффективности стадии.

Этап 1. Формирование альтернатив по первым двум показателям. На первом шаге формируется множество альтернатив по показателям $M_{3,1}$ и $M_{3,2}$. Для каждого показателя возможны два уровня: «без изменений» и «улучшение на 1 балл». Используя булевы переменные x_{3j}^k из формулы 3.6, это соответствует выбору значения $x_{31}^6, x_{31}^7, x_{32}^7, x_{32}^8 \in \{0,1\}$ при условии, что для каждого показателя выбирается ровно один уровень.

В результате для пары показателей $M_{3,1}$ – $M_{3,2}$ получаем четыре комбинации уровней. Для каждой комбинации вычисляются:

– суммарный уровень эффективности стадии (с учётом только первых двух показателей):

$$q_3^{(1,2)} = q_3^d + \Delta q_1 + \Delta q_2, \quad (3.12)$$

– суммарные дополнительные затраты:

$$z_3^{(1,2)} = \Delta z_1 + \Delta z_2. \quad (3.13)$$

Результаты вычислений приведены в таблице 3.5.

Таблица 3.5 – Комбинации уровней по показателям $M_{3,1}$ и $M_{3,2}$

Вариант	$k_{3,1}$	$k_{3,2}$	Δq_1	Δq_2	$q_3^{(1,2)}$	Δz_1 , тыс. руб.	Δz_2 , тыс. руб.	$z_3^{(1,2)}$, тыс. руб.
A1	6	7	0	0	5,55	0	0	0
A2	6	8	0	0,25	5,80	0	100	100
A3	7	7	0,30	0	5,85	80	0	80
A4	7	8	0,30	0,25	6,10	80	100	180

Альтернатива $A2(k_{3,1} = 6, k_{3,2} = 8)$ доминируется альтернативой $A3(k_{3,1} = 7, k_{3,2} = 7)$, поскольку $A3$ обеспечивает более высокую эффективность $q_3^{(1,2)} = 5,85 > 5,80$ при меньших затратах $z_3^{(1,2)} = 80 < 100$. Остальные три альтернативы образуют множество Парето-оптимальных комбинаций по первым двум показателям.

Этап 2. Присоединение третьего показателя. На втором шаге множество Парето-альтернатив по первым двум показателям $\{A1, A3, A4\}$ свёртывается с вариантами по третьему показателю $M_{3,3}$. Для него возможны два уровня: текущий $k_{3,3}^A = 5$ и улучшенный $k_{3,3}^A + 1 = 6$.

Для каждой комбинации $(k_{3,1}, k_{3,2})$ и выбранного уровня $k_{3,3}$ рассчитываются новая интегральная оценка и затраты:

$$q_3^{(1,2,3)} = q_3^{(1,2)} + \Delta q_3, \quad z_3^{(1,2,3)} = z_3^{(1,2)} + \Delta z_3 \quad (3.14)$$

Результаты сведены в таблицу 3.6.

Таблица 3.6 – Комбинации по трём показателям $M_{3,1}$, $M_{3,2}$, $M_{3,3}$

Вариант	$k_{3,1}$	$k_{3,2}$	$k_{3,3}$	Δq_3	$q_3^{(1,2,3)}$	Δz_3 , тыс. руб.	$z_3^{(1,2,3)}$, тыс. руб.
B1	6	7	5	0	5,55	0	0
B2	6	7	6	0,2	5,75	60	60
B3	7	7	5	0	5,85	0	80
B4	7	7	6	0,2	6,05	60	140
B5	7	8	5	0	6,1	0	180
B6	7	8	6	0,2	6,3	60	240

В данном числовом примере все шесть альтернатив оказываются недоминируемыми: при переходе от одной комбинации к другой улучшение $q_3^{(1,2,3)}$ всегда сопровождается ростом затрат, поэтому не возникает вариантов, однозначно лучших по обоим критериям «эффективность–затраты».

Этап 3. Присоединение четвёртого показателя и окончательное множество Парето. На третьем шаге множество альтернатив по трём показателям свёртывается с возможными уровнями четвёртого показателя $M_{3,4}$: текущим $k_{3,4}^D = 4$ и улучшенным $k_{3,4}^D + 1 = 5$. Аналогично вводятся приращения $\Delta q_4 = 0,25, \Delta z_4 = 90$ тыс. руб.

Для каждой альтернативы В1–В6 и двух уровней получаем 12 комбинаций. Для них рассчитываются итоговые критерии, приведенные в таблице 3.7:

$$q_3 = q_3^{(1,2,3)} + \Delta q_4, \quad z_3 = z_3^{(1,2,3)} + \Delta z_4 \quad (3.15)$$

Таблица 3.7 – Комбинации по четырём показателям и отбор Парето-оптимальных альтернатив

Вариант	$k_{3,1}$	$k_{3,2}$	$k_{3,3}$	$k_{3,4}$	q_3	z_3 , тыс. руб.
С1	6	7	5	4	5,55	0
С2	6	7	5	5	5,80	90
С3	6	7	6	4	5,75	60
С4	6	7	6	5	6,00	150
С5	7	7	5	4	5,85	80
С6	7	7	5	5	6,10	170
С7	7	7	6	4	6,05	140
С8	7	7	6	5	6,30	230
С9	7	8	5	4	6,10	180
С10	7	8	5	5	6,35	270
С11	7	8	6	4	6,30	240
С12	7	8	6	5	6,55	330

Примеры доминирования:

– С2 ($q_3 = 5,80, z_3 = 90$) доминируется С3 ($q_3 = 5,75, z_3 = 60$) по затратам, но не по эффективности.

– С9 ($q_3 = 6,10, z_3 = 180$) доминируется С6 ($q_3 = 6,10, z_3 = 170$) обеспечивая тот же уровень эффективности при меньших затратах.

После исключения доминируемых комбинаций множество Парето-оптимальных альтернатив по четырём показателям включает восемь вариантов С1, С3, С5, С6, С7, С8, С10, С12. В соответствии с постановкой задачи в формуле 3.9 требуется, чтобы итоговый уровень эффективности был строго выше текущего, $q_3 > q_3^D$. Поэтому вариант С1 ($q_3 = q_3^D$) исключается.

Итоговое множество Парето-оптимальных альтернатив для стадии формирования и согласования чертежей имеет вид:

$$\{(q_3^\ell, z_3^\ell) | \ell = \overline{1,7}\}, \quad (3.16)$$

где конкретные значения приведены в таблице 3.8.

Таблица 3.8 – Итоговое множество Парето-оптимальных альтернатив для стадии формирования и согласования чертежей

№ альтернативы ℓ	$k_{3,1}$	$k_{3,2}$	$k_{3,3}$	$k_{3,4}$	q_3^ℓ	z_3^ℓ , тыс. руб.	Краткая интерпретация
1	6	7	6	4	5,75	60	Улучшение только количества итераций согласования
2	7	7	5	4	5,85	80	Сокращение времени формирования комплекта
3	7	7	5	5	6,10	170	Сокращение времени + рост доли автогенерации чертежей
4	7	7	6	4	6,05	140	Сокращение времени и числа итераций согласования
5	7	7	6	5	6,30	230	Комплексное улучшение по времени и согласованию, без изменения несоответствий
6	7	8	5	5	6,35	270	Дополнительно снижается доля несоответствий при умеренном росте затрат
7	7	8	6	5	6,55	330	Максимально возможное улучшение по всем показателям стадии

Все альтернативы удовлетворяют условиям задачи подсистемы в формуле 3.9: обеспечивают прирост интегральной оценки $q_3^\ell > q_3^A = 5,55$ при минимальных возможных затратах в смысле Парето.

Сформированное множество альтернатив $\{(q_3^\ell, z_3^\ell)\}$ полностью описывает возможные направления развития подсистемы «Формирование и согласование чертежей» в координатах «эффективность–затраты». Каждая точка этого множества соответствует согласованному набору целевых уровней k_{3j} по локальным показателям и может быть интерпретирована как вариант инвестирования в данную стадию жизненного цикла.

На следующем уровне иерархии пары (q_i^ℓ, z_i^ℓ) для всех стадий $i = \overline{1,5}$ (полученные аналогичным образом) передаются в центр системы управления и используются при решении задачи согласованного распределения инвестиционных ресурсов между подсистемами жизненного цикла проектной документации. Это обеспечивает связь локальных решений подсистем с глобальными целями предприятия и позволяет формировать портфель мероприятий, который в наибольшей степени соответствует ограничениям бюджета и стратегическим приоритетам.

3.3 Распределение ресурсов между подсистемами стадий

В иерархической организационной системе, наряду с оценкой эффективности функционирования отдельных стадий жизненного цикла, существенное значение имеет согласование их развития с глобальными целями предприятия. Даже при сопоставимых уровнях локальной эффективности вклад различных стадий в конечный результат функционирования системы управления может существенно различаться, что обуславливает необходимость централизованного учета при распределении инвестиционных ресурсов.

В рамках принятой иерархической структуры управления каждая стадия жизненного цикла проектной документации рассматривается как локальная управляемая подсистема (агент). Как было показано в предыдущем разделе, каж-

дая i -я подсистема ($i = \overline{1, m}$) самостоятельно решает задачу оптимизации своей деятельности и формирует для центра множество допустимых вариантов развития, оптимальных по Парето с точки зрения соотношения достигаемого уровня эффективности и требуемых затрат.

Каждый ℓ -й вариант развития i -й стадии характеризуется парой показателей:

$$\{(q_i^\ell, z_i^\ell) | \ell = \overline{1, \ell_i}\}, \quad (3.17)$$

где q_i^ℓ – значение комплексного показателя эффективности i -й стадии при выборе ℓ -го варианта реализации; z_i^ℓ – объем инвестиционных затрат, необходимых для реализации данного варианта; ℓ_i – количество предлагаемых подсистемой вариантов развития.

Окончательное решение о выборе конкретного варианта для каждой стадии и распределении инвестиционных ресурсов принимается центром системы управления, исходя из приоритетов развития предприятия в целом. Для формализации управленческих предпочтений со стороны центра вводятся весовые коэффициенты β_i , характеризующие относительную приоритетность i -й стадии жизненного цикла с точки зрения достижения глобальных целей организационной системы. Значения коэффициентов β_i отражают стратегические установки руководства предприятия (влияние стадии на себестоимость продукции, уровень рисков, критичность возможных ошибок, соответствие задачам цифровой трансформации) и удовлетворяют условию нормировки:

$$\sum_{i=1}^m \beta_i = 1. \quad (3.18)$$

С учетом введенных обозначений задача распределения инвестиционных ресурсов между стадиями жизненного цикла формализуется как задача дискретной оптимизации – задача выбора согласованного комплекса взаимосвязанных мероприятий, предлагаемых локальными подсистемами.

Введем булевы переменные управления:

$$x_i^\ell = \begin{cases} 1, & \text{если для стадии } i \text{ выбран вариант } \ell, \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (3.19)$$

Тогда математическая модель задачи, решаемой инвестиционным центром, имеет следующий вид:

$$\begin{cases} Q = \sum_{i=1}^m \sum_{\ell=1}^{\ell_i} q_i^\ell \beta_i x_i^\ell \rightarrow \max, \\ \sum_{i=1}^m \sum_{\ell=1}^{\ell_i} z_i^\ell x_i^\ell \leq Z, \\ \sum_{\ell=1}^{\ell_i} x_i^\ell = 1, \end{cases} \quad (3.20)$$

где Q – обобщенный показатель эффективности системы управления жизненным циклом проектной документации; Z – общий объем инвестиционных ресурсов, доступных для распределения.

Ограничение гарантирует, что суммарные затраты на реализацию выбранных вариантов не превышают доступный инвестиционный бюджет.

Показатель Q имеет управленческий смысл и отражает интегральное качество функционирования системы управления жизненным циклом проектной документации. В отличие от локальных показателей и весов, формируемых на уровне отдельных стадий, коэффициенты β_i задаются исключительно центром, что позволяет реализовать механизм согласования интересов: локальные подсистемы формируют множество допустимых вариантов повышения эффективности $\{(q_i^\ell, z_i^\ell)\}$, а центр осуществляет выбор рационального сочетания этих вариантов $x = \{x_i^\ell\}$ с учетом глобальных приоритетов.

С формальной точки зрения данная постановка сводится к задаче о модифицированном ранце:

- каждая стадия жизненного цикла образует отдельную группу альтернатив;
- из каждой группы выбирается ровно один вариант развития;

- «ценность» варианта определяется вкладом стадии в интегральную эффективность системы управления и выражается величиной $q_i^\ell \beta_i$;
- «вес» варианта определяется требуемыми инвестиционными затратами z_i^ℓ ;
- суммарный «вес» выбранных вариантов не должен превышать бюджет Z .

В альтернативной управленческой постановке задача центра может быть сформулирована как задача минимизации суммарных инвестиционных затрат при достижении заданного уровня обобщенной эффективности системы:

$$\begin{cases} C = \sum_{i=1}^m \sum_{\ell=1}^{\ell_i} z_i^\ell x_i^\ell \rightarrow \min, \\ \sum_{i=1}^m \sum_{\ell=1}^{\ell_i} q_i^\ell \beta_i x_i^\ell \geq Q_{req}, \\ \sum_{\ell=1}^{\ell_i} x_i^\ell = 1, \end{cases} \quad (3.21)$$

где Q_{req} – заданный целевой уровень эффективности системы управления.

Решение задачи распределения инвестиционных ресурсов, формализованной выражениями 3.20 – 3.21, осуществляется в рамках дискретной оптимизации на конечном множестве альтернатив, сформированных локальными подсистемами стадий жизненного цикла.

Особенностью данной задачи является ее иерархическая природа: каждая стадия жизненного цикла предварительно формирует собственное множество Парето-оптимальных вариантов развития, а центр выполняет их согласование с учетом глобальных приоритетов и ресурсных ограничений.

На вход задачи центра поступают множества альтернатив:

$$\{(q_i^\ell, z_i^\ell) | \ell = \overline{1, \ell_i}\}, \quad (3.22)$$

каждое из которых характеризует допустимые варианты развития соответствующей стадии жизненного цикла. Эти множества уже очищены от доминируемых решений на уровне локальных подсистем, что позволяет рассматривать только

рациональные альтернативы, обеспечивающие ненулевой прирост эффективности по сравнению с текущим состоянием.

Процесс решения задачи центра строится как последовательная агрегация альтернатив по стадиям жизненного цикла. На начальном шаге рассматривается первая стадия, для которой множество допустимых решений совпадает с исходным множеством $\{(q_1^\ell, z_1^\ell)\}$. Далее к нему последовательно присоединяются множества альтернатив следующих стадий. Для каждой пары стадий i и $i + 1$ формируются все возможные комбинации вариантов (ℓ_i, ℓ_{i+1}) , удовлетворяющие условию выбора ровно одного варианта для каждой стадии. Для каждой такой комбинации вычисляются агрегированные показатели:

$$\begin{aligned} Q_{i,i+1} &= \beta_i q_i^{\ell_i} + \beta_{i+1} q_{i+1}^{\ell_{i+1}}, \\ Z_{i,i+1} &= z_i^{\ell_i} + z_{i+1}^{\ell_{i+1}}. \end{aligned} \tag{3.23}$$

Полученное множество агрегированных комбинаций анализируется с точки зрения доминирования. Комбинация считается доминируемой и исключается из дальнейшего рассмотрения, если существует другая комбинация, обеспечивающая не меньший уровень обобщенной эффективности при меньших или равных инвестиционных затратах, причем хотя бы одно из этих неравенств является строгим. В результате формируется множество Парето-оптимальных комбинаций для подзадачи, включающей две стадии жизненного цикла.

Аналогичная процедура выполняется последовательно для всех остальных стадий жизненного цикла. На каждом шаге множество Парето-оптимальных комбинаций, сформированное для первых k стадий, свёртывается с множеством альтернатив $(q_{k+1}^\ell, z_{k+1}^\ell)$ следующей стадии. Для каждой новой комбинации пересчитываются значения обобщенного показателя эффективности Q и суммарных инвестиционных затрат, после чего вновь выполняется отсечение доминируемых решений. Такой поэтапный характер решения позволяет сохранять управляемую размерность множества альтернатив и исключает необходимость полного перебора всех возможных сочетаний вариантов развития, число которых экспоненциально возрастает с увеличением количества стадий жизненного цикла.

После завершения процедуры агрегации по всем m стадиям жизненного цикла формируется итоговое множество Парето-оптимальных комбинаций вариантов развития системы управления. В рамках постановки задачи (3.20) из этого множества выбирается решение, обеспечивающее максимальное значение обобщенного показателя эффективности Q при выполнении ограничения на суммарный объем инвестиционных ресурсов Z . Тем самым центр получает рациональное распределение инвестиций между стадиями жизненного цикла, согласованное с заданными приоритетами β_i и ресурсными ограничениями.

В альтернативной постановке задачи (3.21) итоговое множество Парето-оптимальных комбинаций используется для выбора решения, минимизирующего суммарные инвестиционные затраты при условии достижения или превышения заданного уровня обобщенной эффективности Q_{req} . В этом случае процедура решения сводится к отбору из множества допустимых комбинаций тех вариантов, которые удовлетворяют условию $Q \geq Q_{req}$, с последующим выбором комбинации с минимальным значением суммарных затрат.

В результате центр получает формализованный инструмент выбора рационального варианта распределения инвестиционных ресурсов между стадиями жизненного цикла проектной документации, обеспечивающего согласование локальных предложений подсистем с глобальными целями организационной системы и адаптацию механизма управления к условиям реальной производственной среды.

Пример. Рассмотрим пример согласованного распределения инвестиционных ресурсов между стадиями жизненного цикла проектной документации в рамках иерархической системы управления. Для наглядности ограничимся тремя стадиями жизненного цикла ($m = 3$):

1. $i = 1$ – проектирование 3D-моделей;
2. $i = 3$ – формирование и согласование чертежей;
3. $i = 4$ – оцифровка чертежей.

Предположим, что каждая из указанных стадий на нижнем уровне иерархии уже решила собственную задачу оптимизации и передала в центр множество Парето-оптимальных вариантов развития вида $\{(q_i^\ell, z_i^\ell)\}$, где $q_i^\ell > q_i^d$.

Исходные данные от локальных подсистем представлены в таблице 3.9.

Таблица 3.9 – Исходные данные от локальных подсистем

Номер стадии	ℓ_i	$q_i^{\ell_i}$	$z_i^{\ell_i}$, тыс. руб.	Интерпретация
1	1	6,1	120	Частичная автоматизация моделирования
	2	6,4	200	Автоматизация + регламентация
	3	6,7	300	Полная автоматизация и обучение
3	1	5,75	60	Улучшение только количества итераций согласования
	2	5,85	80	Сокращение времени формирования комплекта
	3	6,05	140	Сокращение времени и числа итераций согласования
	4	6,3	230	Комплексное улучшение по времени и согласованию, без изменения несоответствий
4	1	6	50	Базовая автоматизация OCR
	2	6,3	110	OCR + шаблоны
	3	6,6	180	Интеллектуальная оцифровка

Пусть по результатам стратегической оценки центр задал следующие коэффициенты приоритетности стадий:

$$\beta_1 = 0,35, \beta_3 = 0,40, \beta_4 = 0,25, \quad \sum \beta_i = 1 \quad (3.24)$$

Общий объем инвестиционных ресурсов, доступных центру:

$$Z = 450 \text{ тыс. руб.} \quad (3.25)$$

Этап 1. Формирования множества альтернатив для стадий 1 и 3. На первом шаге агрегируются множества альтернатив стадий 1 и 3. Формируются все комбинации (ℓ_1, ℓ_3) , для которых вычисляются агрегированные показатели (таблица 3.10):

$$Q_{(1,3)} = \beta_1 q_1^{\ell_1} + \beta_3 q_3^{\ell_3}, \quad Z_{(1,3)} = z_1^{\ell_1} + z_3^{\ell_3}. \quad (3.26)$$

Таблица 3.10 – Агрегированные альтернативы для стадий 1 и 3

ℓ_1	ℓ_3	$Q_{(1,3)}$	$Z_{(1,3)}$, тыс. руб.	Статус
1	1	4,44	180	Парето
1	2	4,48	200	доминируется
1	3	4,57	260	Парето
1	4	4,7	350	Парето
2	1	4,55	260	доминируется
2	2	4,59	280	Парето
2	3	4,68	340	Парето
2	4	4,81	430	Парето
3	1	4,66	360	Парето
3	2	4,7	380	Парето
3	3	4,79	440	Парето
3	4	4,92	530	исключается по бюджету

После отсеечения доминируемых и недопустимых по бюджету вариантов формируется множество Парето-оптимальных комбинаций для стадий 1 и 3.

Этап 2. Присоединение стадии 4. На следующем шаге каждая из оставшихся комбинаций (ℓ_1, ℓ_3) , свёртывается с вариантами стадии 4. Для каждой тройки (ℓ_1, ℓ_3, ℓ_4) вычисляются (таблица 3.11):

$$Q = Q_{(1,3)} + \beta_4 q_4^{\ell_4}, \quad Z = Z_{(1,3)} + z_4^{\ell_4}. \quad (3.27)$$

Таблица 3.11 – Агрегированные альтернативы по всем стадиям

ℓ_1	ℓ_3	ℓ_4	Q	Z , тыс. руб.	Статус
1	1	1	5,94	230	Парето
1	1	2	6,02	290	Парето
1	1	3	6,09	360	Парето
1	3	1	6,07	310	доминируется
1	3	2	6,15	370	Парето
2	2	1	6,09	330	доминируется
2	2	2	6,17	390	Парето
2	3	1	6,2	390	Парето
3	2	1	6,22	430	Парето
3	3	1	6,32	490	исключается по бюджету

После исключения доминируемых и недопустимых по бюджету вариантов формируется итоговое множество Парето-оптимальных комбинаций.

Выбор решения центром. В рамках постановки задачи (3.20) центр выбирает комбинацию, обеспечивающую максимальное значение обобщенного показателя эффективности Q при выполнении ограничения $Z \leq 450$.

Оптимальным решением является комбинация:

$$(\ell_1 = 3, \ell_3 = 2, \ell_4 = 1), \quad (3.27)$$

для которой:

$$Q = 6,22, \quad Z = 430 \text{ тыс. руб.} \quad (3.28)$$

Полученное решение означает, что при заданных приоритетах и ограничениях бюджету центр считает целесообразным:

- реализовать расширенную автоматизацию проектирования 3D-моделей;
- внедрить мероприятия по повышению эффективности согласования чертежей без максимального усложнения процессов;
- ограничиться базовой автоматизацией оцифровки, не прибегая к наиболее затратным интеллектуальным решениям.

Таким образом, центр формирует согласованный портфель мероприятий, который обеспечивает наибольший вклад в достижение глобальных целей предприятия при допустимом уровне инвестиционных затрат и сохраняет баланс между развитием ключевых стадий жизненного цикла проектной документации.

3.4 Определение затрат на улучшение показателя

В рамках разработанного механизма распределения инвестиционных ресурсов определение затрат на повышение значений локальных показателей эффективности является ключевым элементом, обеспечивающим корректность принимаемых управленческих решений. В отличие от технических параметров, затраты на улучшение организационных, информационных и управленческих процессов

не поддаются прямому измерению и не могут быть получены исключительно на основе статистических данных. Это обуславливает необходимость применения механизмов экспертной оценки.

Экспертная оценка в данном контексте рассматривается как формализованный механизм получения количественных характеристик сложности и ресурсной ёмкости мероприятий по улучшению показателей эффективности на основе знаний и опыта специалистов, непосредственно вовлечённых в функционирование соответствующих стадий жизненного цикла проектной документации. Использование экспертных механизмов позволяет учесть скрытые зависимости, неформализованные процедуры и институциональные ограничения, характерные для реальных организационных систем.

В теории управления организационными системами и принятия решений применяется широкий класс механизмов экспертной оценки, включая методы ранжирования, парных сравнений, балльного оценивания и агрегирования экспертных предпочтений. Выбор конкретного механизма определяется характером оцениваемых величин, доступностью информации и требованиями к интерпретируемости результатов. В настоящем исследовании целесообразно использовать механизм экспертного балльного оценивания с последующим нормированием, поскольку он обеспечивает простоту практической реализации, прозрачность процедуры и возможность согласования оценок между экспертами.

Рассмотрим j -й локальный показатель эффективности M_{ij} i -й стадии жизненного цикла проектной документации. Экспертам предлагается оценить относительные затраты ресурсов, необходимые для повышения значения данного показателя на один дискретный уровень балльной шкалы нормализации. При этом в процессе оценивания учитываются следующие факторы:

- объём требуемых изменений в технологических и организационных процедурах;
- необходимость модификации или внедрения программных средств;
- дополнительная трудоёмкость операций и вовлечённость персонала;
- уровень рисков, связанных с изменением процесса;

– степень зависимости результата от человеческого фактора.

Каждый эксперт формирует балльную оценку сложности улучшения показателя M_{ij} по заранее заданной шкале, отражающей относительную ресурсную ёмкость соответствующих мероприятий. Полученные индивидуальные оценки агрегируются путём усреднения либо с использованием весов, отражающих компетентность экспертов в рамках рассматриваемой стадии жизненного цикла. В результате формируется согласованная экспертная оценка, характеризующая удельные затраты на улучшение показателя.

На основе агрегированной экспертной оценки вводится коэффициент z_{ij} , интерпретируемый как удельные затраты ресурсов, необходимые для повышения нормализованного значения показателя M_{ij} на единицу. Таким образом, коэффициент z_{ij} представляет собой формализованный результат применения механизма экспертной оценки и отражает относительную сложность улучшения соответствующего аспекта функционирования стадии жизненного цикла.

Пусть k_{ij}^D – достигнутое нормализованное значение показателя, а k_{ij} – выбираемое значение в рамках решения задачи повышения эффективности. Тогда приращение показателя определяется как:

$$\Delta k_{ij} = k_{ij} - k_{ij}^D. \quad (3.8)$$

Суммарные затраты ресурсов, необходимые для реализации мероприятий по улучшению j -го показателя эффективности i -й стадии жизненного цикла, определяются выражением

$$z_{ij}(k_{ij} - k_{ij}^D), \quad (3.9)$$

что соответствует линейной аппроксимации зависимости затрат от величины улучшения показателя в пределах дискретной балльной шкалы.

Принятая форма является обоснованной для локальных улучшений и позволяет сохранить простоту модели без введения дополнительных предположений о нелинейности затрат.

С учётом изложенного задача определения затрат на улучшение показателя эффективности формулируется как задача экспертного оценивания коэффициента z_{ij} , обеспечивающего количественное отражение ресурсной ёмкости мероприятий по совершенствованию процессов:

$$z_{ij} = Expert(M_{ij}, i, W), \quad (3.10)$$

где оператор $Expert(\cdot)$ отражает выбранный механизм экспертной оценки и агрегирования мнений специалистов; i – стадия жизненного цикла; а W – условия функционирования.

Полученные значения коэффициентов z_{ij} используются при формировании ограничений в задачах оптимизации, решаемых на уровне отдельных подсистем стадий жизненного цикла и на уровне центра системы управления. Это обеспечивает согласованность локальных и глобальных управленческих решений и позволяет учитывать реальные организационные и ресурсные ограничения при планировании мероприятий по повышению эффективности процессов.

3.5 Выводы по главе 3

1. В третьей главе разработан согласованный механизм инвестирования в совершенствование процессов жизненного цикла проектной документации, основанный на представлении системы управления в виде иерархической организационной системы с инвестиционным центром и совокупностью управляемых подсистем, соответствующих отдельным стадиям жизненного цикла.

2. Предложенный механизм формализует взаимодействие между инвестиционным центром и подсистемами управления стадиями жизненного цикла за счёт введения замкнутого управленческого контура, включающего формирование запросов на ресурсы, централизованное распределение инвестиций, реализацию мероприятий по улучшению процессов и последующую оценку достигнутых результатов.

3. Для каждой стадии жизненного цикла введена система локальных показателей эффективности, отражающих как временные, так и качественные характе-

ристики процессов, что позволяет учитывать специфику отдельных стадий и их неоднородный вклад в достижение глобальных целей системы управления.

4. Обоснована необходимость нормализации локальных показателей и их приведения к единой безразмерной балльной шкале, обеспечивающей сопоставимость разнородных характеристик и возможность их агрегирования в интегральный показатель эффективности стадии жизненного цикла.

5. Разработан формальный аппарат определения потребности в инвестиционных ресурсах на уровне отдельной подсистемы, включающий постановку задачи дискретной многокритериальной оптимизации с противоречивыми критериями «уровень эффективности – затраты на улучшение».

6. Показано, что решение задачи повышения эффективности стадии не сводится к выбору единственного оптимального варианта, а формирует множество Парето-оптимальных альтернатив, отражающих допустимые компромиссы между приростом эффективности и требуемыми инвестициями.

7. Предложен алгоритм поэтапного формирования и свёртки множеств альтернатив с последовательным отсечением доминируемых решений, позволяющий существенно ограничить размерность задачи и обеспечить практическую реализуемость метода при увеличении числа локальных показателей.

8. Полученные на уровне подсистем множества альтернатив формируют информационную основу для принятия решений на вышестоящем уровне и используются инвестиционным центром при согласованном распределении ограниченных ресурсов между стадиями жизненного цикла проектной документации.

9. На числовом примере стадии формирования и согласования чертежей продемонстрирована работоспособность предложенного подхода, наглядно показан процесс формирования альтернатив, расчёта интегральных показателей эффективности и затрат, а также выделения недоминируемых вариантов развития.

10. Разработанный механизм обеспечивает согласование локальных решений подсистем с глобальными целями системы управления, повышает обоснованность инвестиционных решений и создаёт предпосылки для устойчивого и целенаправленного совершенствования процессов.

4 РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ЖИЗНЕННЫМ ЦИКЛОМ ПРОЕКТНОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ И УНИФИКАЦИИ ПРОЕКТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

4.1 Разработка архитектуры учёта и верификации проектной документации

В условиях роста количества заказов, многовариантности проектных решений и изменения их статусов во времени, ручное сопровождение таких данных становится неэффективным. Это требует внедрения единого информационного механизма, обеспечивающего отслеживаемость, целостность и актуальность документации на всех этапах жизненного цикла изделия.

Функционально архитектура учёта чертежей включает в себя четыре ключевых компонента:

- организованное хранение;
- контроль версионности;
- процедуры архивирования;
- механизмы оповещения и мониторинга целостности.

Ниже рассмотрена логика каждого компонента и его интеграция в производственную информационную среду.

Организация хранения чертежей должна быть реализована через централизованную базу данных, в которой каждый документ представлен как структурированный объект, включающий:

- уникальный идентификатор;
- цифровые копии в форматах TIFF, PDF и DWG;
- реквизиты документа (номер заказа, марка, номер листа, тип изделия);
- текущий статус обработки;
- историю всех версий и действий.

Каждому чертежу сопоставляется уникальный идентификатор, сохраняющийся при всех модификациях. Версионность документов реализуется с использованием системы нумерации:

$$V = \{x_0, x_1, \dots, x_n\}, \quad x_{i+1} \neq x_i \Leftrightarrow \Delta_i > 0 \quad (4.1)$$

где x_i – версия чертежа; Δ_i – совокупность изменений, отличающих версию x_{i+1} . Изменения могут включать как геометрические отличия, так и метаданные.

Использование формализованной модели версионности обеспечивает однозначную идентификацию актуальной ревизии документа на любом этапе жизненного цикла [107–109].

При внесении новой версии выполняется автоматическое сравнение параметров. Если выявлены отличия, предшествующая версия переводится в статус «аннулированная», а новая добавляется в журнал с указанием причины обновления и данных об ответственном лице.

Контроль версий и движения документа тесно связан с системой статусов. Каждый переход чертежа от одного этапа к другому инициируется действиями пользователя, что сопровождается записью в базе: фиксируется текущее состояние, выполняемые проверки и привязка к метаданным. Это позволяет реализовать как управляемый контроль обработки, так и автоматическую верификацию соблюдения всех нормативных процедур.

Передача чертежей между этапами проектирования, согласования, архивирования и запуска в производство сопровождается строгим контролем за их статусами. Каждый пользовательский переход инициирует изменения в базе данных, фиксируя текущее состояние документа, его расположение в системе и результаты выполненных проверок.

Такой подход позволяет не только отслеживать движение документа, но и предотвращать несогласованные действия, например, повторное использование устаревшего чертежа [110–112].

Для визуализации механизма перехода чертежей между этапами в системе ниже представлена схема, отражающая взаимодействие пользователей с архитектурой учёта (рисунок 4.1).

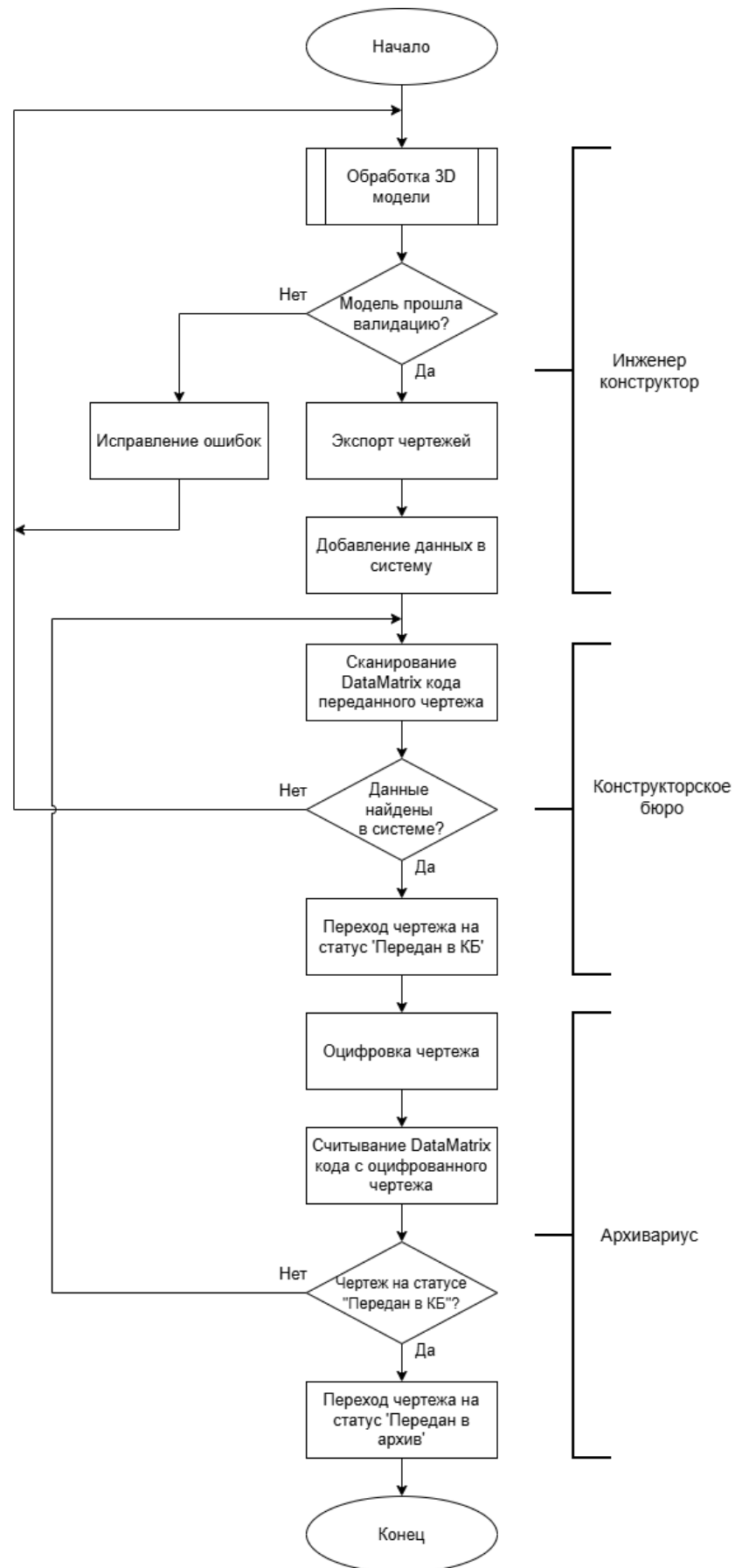


Рисунок 4.1 – Схема добавления и перемещения чертежа пользователями системы

В рамках архитектуры предусмотрен механизм автоматической обработки цифровых изображений чертежей, позволяющий определять и считывать встроенные метки, фиксирующие идентификатор документа и связанные с ним атрибуты. Эта процедура служит основой для автоматизированной привязки отсканированных копий к записям в базе данных, исключая необходимость ручной проверки и ускоряя обработку документации.

Алгоритм обработки изображений встроен в этап архивирования и является обязательным для каждого загруженного чертежа. Его задача – не только найти и расшифровать встроенную метку, но и подтвердить, что отсканированная копия точно соответствует оригиналу, ранее внесённому в систему. Это позволяет реализовать проверку подлинности и контроль версионности на этапе добавления цифрового образа в архив.

Алгоритм включает следующие этапы:

1. Предобработка изображения: применение фильтров шумоподавления, нормализация яркости, бинаризация изображения с пороговой адаптацией.
2. Поиск потенциальных областей кода: анализ контрастных прямоугольных блоков с характерной геометрией, выделение области интереса.
3. Пиксельный проход: построчный обход изображения в границах предполагаемой зоны кода с последующим дешифрованием содержимого по позициям элементов.
4. Верификация содержимого: проверка корректности структуры закодированных данных, контроль контрольной суммы и сопоставление с записями в базе.

Алгоритм устойчив к частичным повреждениям изображения и не зависит от точного положения кода на чертеже, что критически важно при обработке массивов архивной документации.

В случае успешного распознавания система автоматически связывает изображение с существующей записью, проверяет отсутствие изменений в содержимом и присваивает статус архивированного. Если метка повреждена или отсутствует, файл не проходит проверку, а пользователю возвращается подробный отчёт об ошибке.

Для иллюстрации логики выполнения процедуры не рисунке 4.2 представлена схема алгоритма обработки изображения и извлечения идентификатора.

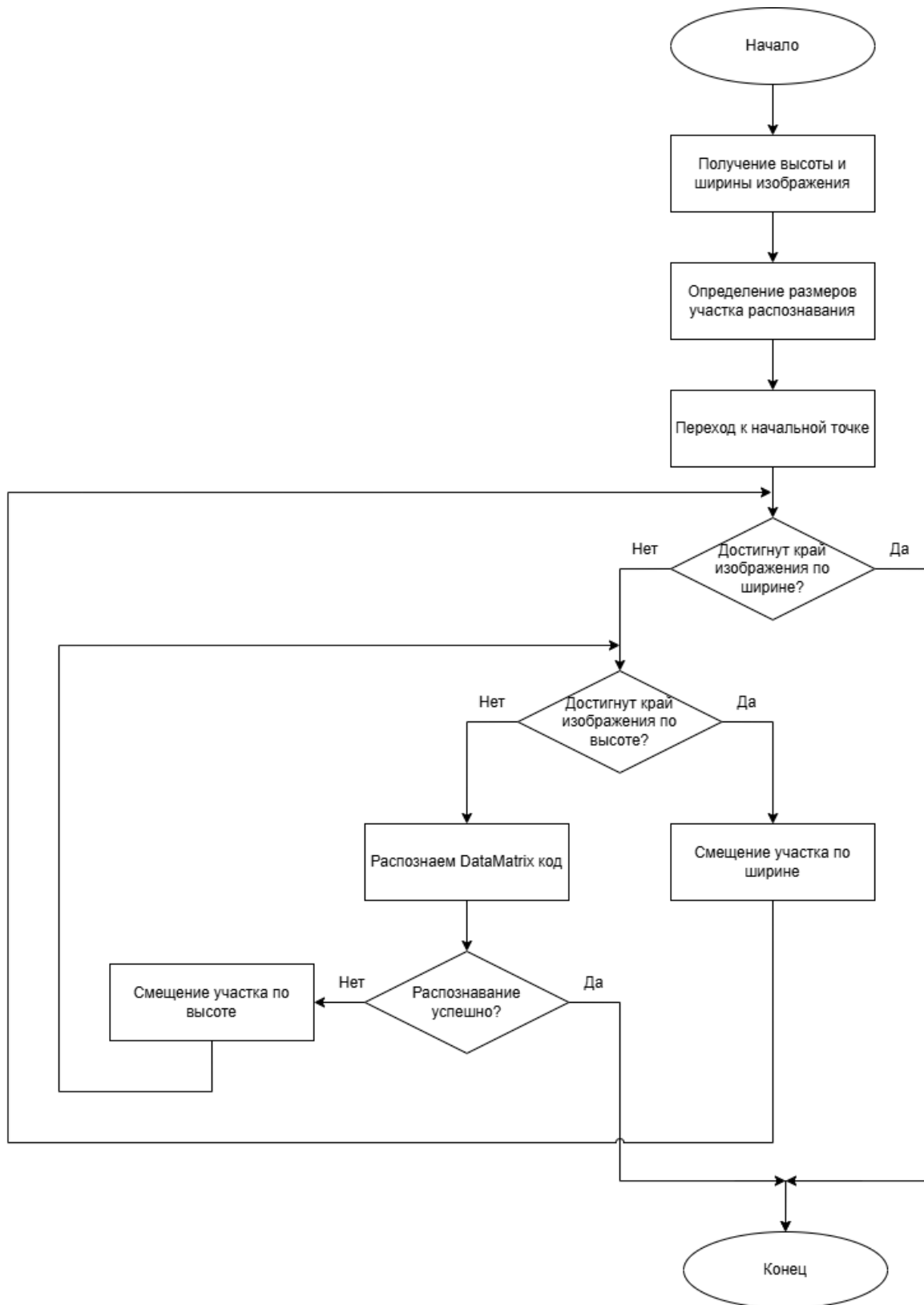


Рисунок 4.2 – Схема алгоритма пиксельного прохода изображения для архивирования чертежей

В процессе перехода от 3D-модели к чертежам формируется первичная цифровая документация, подлежащая контролю и регистрации. Архитектура системы предусматривает механизм извлечения параметров из модели, их сопоставление с эталонными требованиями и автоматическую проверку комплектности проектной документации.

Обработка модели включает:

- извлечение геометрических и технологических признаков элементов;
- формирование чертежей и экспорт в унифицированные форматы;
- проверку корректности заполнения параметров;
- сопоставление экспортированных данных с данными модели;
- выявление дублирующихся или неуникальных элементов;
- проверку соответствия типовым каталогам профилей и шаблонам.

Система поддерживает работу с несколькими структурными уровнями модели, включая сборки, детали и встраиваемые элементы. Все данные приводятся к признаковому представлению, в котором каждая сущность описывается совокупностью измеримых атрибутов. Это создаёт основу для дальнейшей обработки и применения методов интеллектуальной кластеризации.

Механизм сбора данных из модели адаптирован к поддержке различных форматов и структур проектных элементов. Алгоритмы верификации реализованы по принципу пошаговой фильтрации – начиная с проверки наличия обязательных атрибутов и заканчивая геометрическим анализом схожести деталей. Только при успешном завершении всех проверок чертеж допускается к передаче в систему учёта.

Особое внимание уделяется обнаружению типовых нарушений проектной дисциплины: отсутствия маркировки, некорректной нумерации деталей, расхождений между чертежами и моделью, использования устаревших шаблонов и т.д. Выявленные несоответствия фиксируются и становятся основанием для отклонения модели от последующего включения в производственный процесс.

Для отображения последовательности шагов предварительной обработки и проверки модели в системе представлена соответствующая схема на рисунке 4.3.

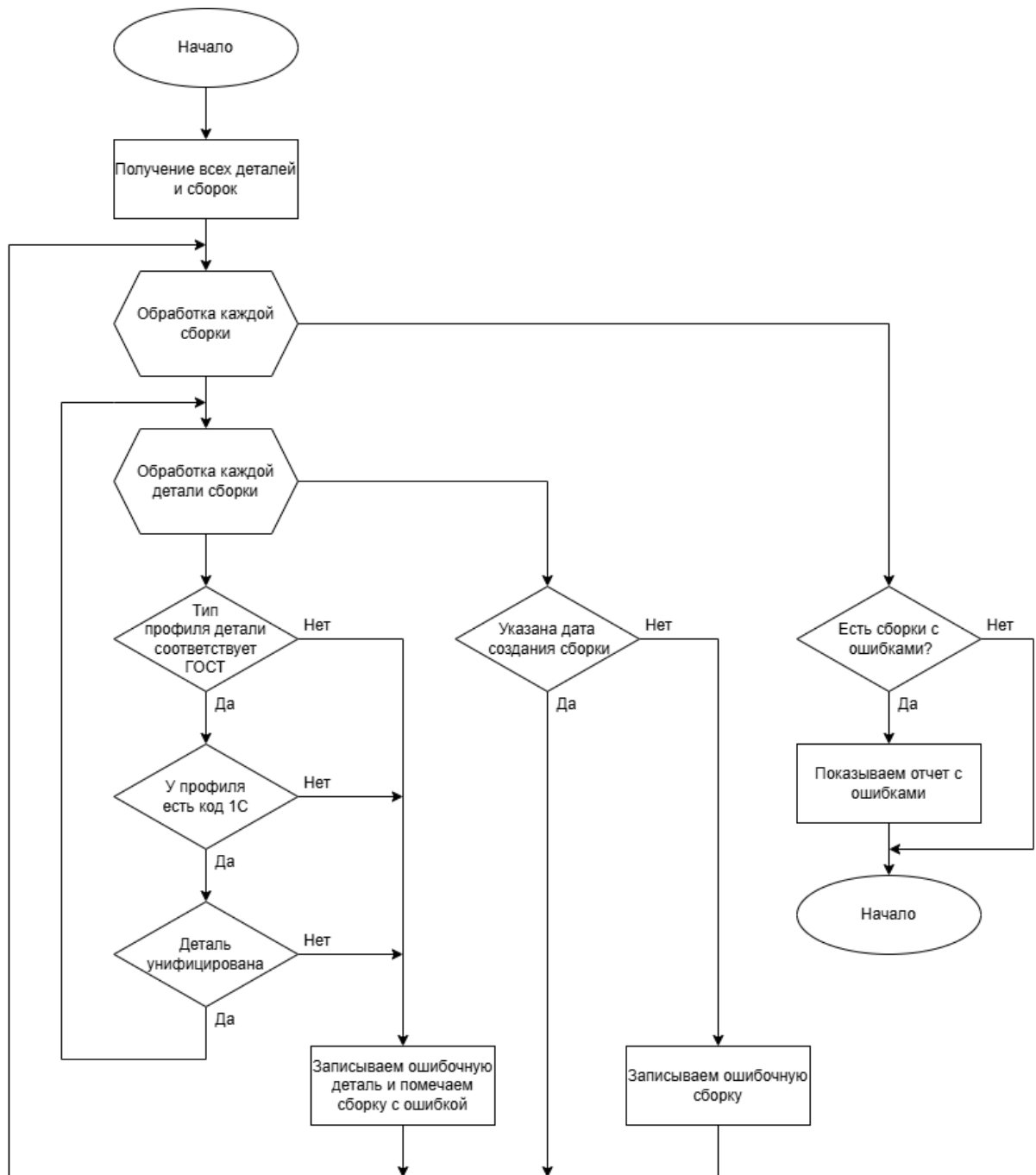


Рисунок 4.3 – Схема алгоритма обработки 3D модели

Для обеспечения непрерывности информационного потока и синхронизации статусов проектной документации с внешней системой управления производством в архитектуре реализован модуль автоматического обмена данными. Его назначение – обеспечить согласованность информации между средой проектирования и средой исполнения, сократив разрывы между этапами подготовки и реализации заказа.

Синхронизация построена на асинхронной модели взаимодействия, в которой каждый экземпляр архитектуры периодически инициирует проверку внешнего источника (например, ERP-системы) на предмет изменений, касающихся ранее зарегистрированных объектов [113–116]. Таким образом достигается независимость процессов, а также устойчивость к временным сбоям в канале связи или задержкам со стороны внешнего сервера.

Обмен выполняется по следующим принципам:

- регулярный опрос внешней системы на предмет обновлений по заказам, чертежам, комплектам или производственным операциям;
- обработка ответов с последующей идентификацией затронутых чертежей;
- сопоставление статусов: если статус в ERP отличается от статуса в архитектуре учёта, выполняется обновление с фиксацией события в журнале;
- уведомление ответственных сотрудников при возникновении несоответствий, пропусков или ошибок связи;
- поддержка версионного соответствия – синхронизация невозможна, если локальный документ не является актуальной версией.

Система дополнительно фиксирует:

- время последнего успешного обмена;
- идентификатор пользователя, ответственного за объект;
- число несопоставленных чертежей и тип расхождений (дубликат, устаревание, удалённый элемент и др.).

Такая реализация позволяет обеспечить точное отображение текущего состояния выполнения заказа в информационной системе предприятия. Своевременное обновление данных о статусе чертежей позволяет корректно планировать производственные ресурсы и предотвращает ситуации, при которых в производство попадают устаревшие или несогласованные документы [117–119].

Интеграция с внешней системой реализуется через специализированный интерфейс взаимодействия, поддерживающий настройку регламентов обмена и фильтрацию данных по типу и назначению.

На рисунке 4.4 приведена схема, отражающая последовательность шагов в процессе автоматической синхронизации статусов с внешней ERP-системой.

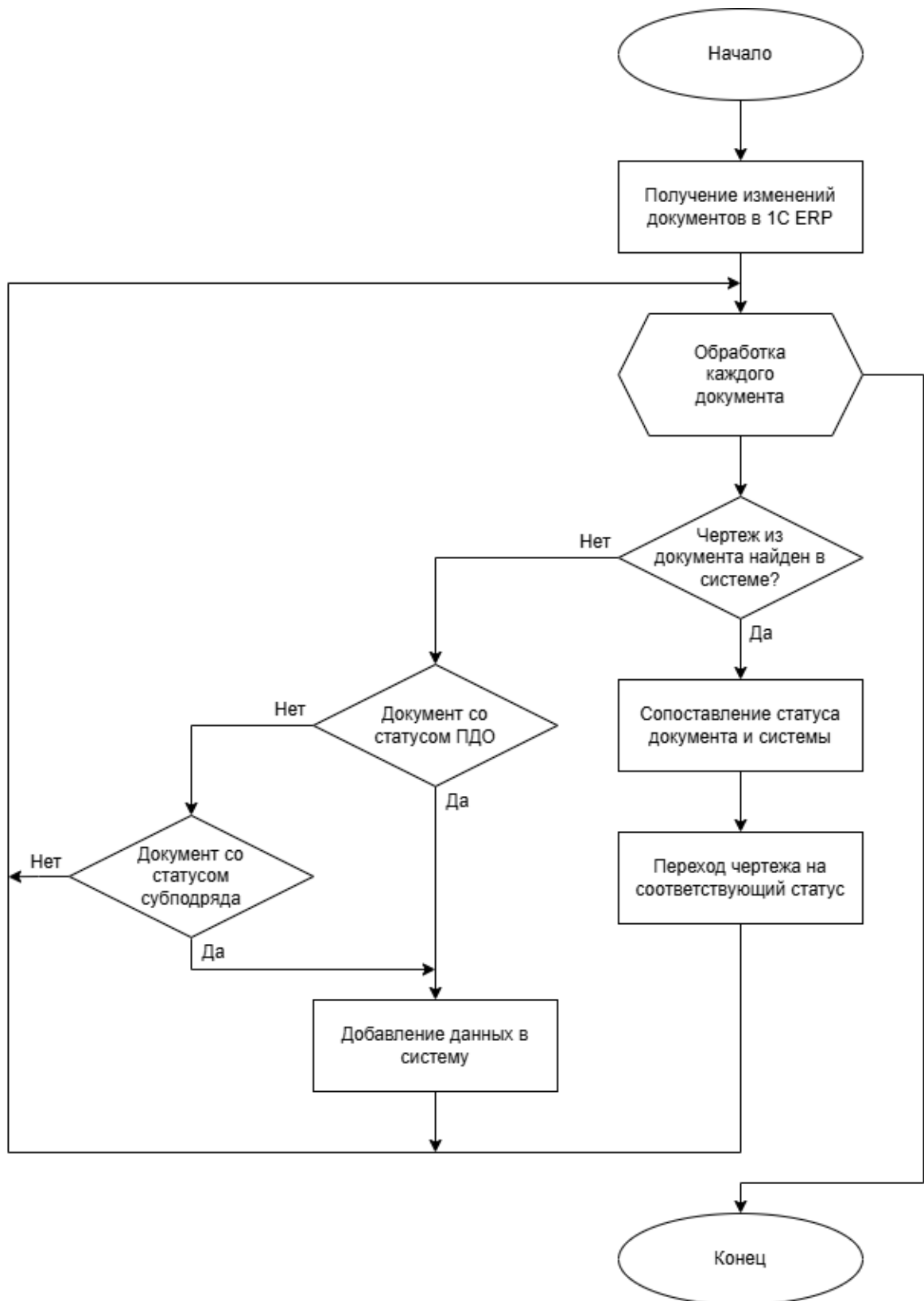


Рисунок 4.4 – Схема автоматической синхронизации с ERP-системой

В рамках архитектуры реализован модуль мониторинга, отслеживающий нарушения в типовом жизненном цикле проектной документации [120–122]. Основная задача данного компонента – выявление чертежей, не завершивших один или несколько обязательных этапов обработки, а также информирование ответственных сотрудников о возникших сбоях.

Обнаружение «потерянных» чертежей осуществляется по следующим правилам:

- анализ разрывов в последовательности статусов: если отсканированный или загруженный чертёж не прошёл через требуемый этап (например, согласование или архивирование), он считается пропущенным;
- поиск отсутствующих версий в хронологическом контексте: например, если присутствует версия v3, но нет зарегистрированных v1 и v2;
- фиксация чертежей с истёкшим временем ожидания на конкретной стадии – например, чертёж добавлен инженером, но не передан в архив в течение установленного периода;
- проверка целостности логических групп, таких как бланки заказов: если среди связанных чертежей один или несколько отсутствуют в базе, создаётся событие несоответствия.

При срабатывании одного из указанных условий система автоматически генерирует уведомление, содержащее идентификатор чертежа, причину отклонения от нормативного сценария и список заинтересованных лиц, подлежащих информированию.

Механизм уведомлений интегрирован в общую логику контроля и работает как в пакетном (по расписанию), так и в событийном режиме (при обращении к данным). Это позволяет оперативно реагировать на отклонения и предотвращать ошибки на ранних стадиях [123–125].

На рисунке 4.5 представлена схема, иллюстрирующая алгоритм определения потерянных чертежей и последовательность действий при генерации уведомлений.

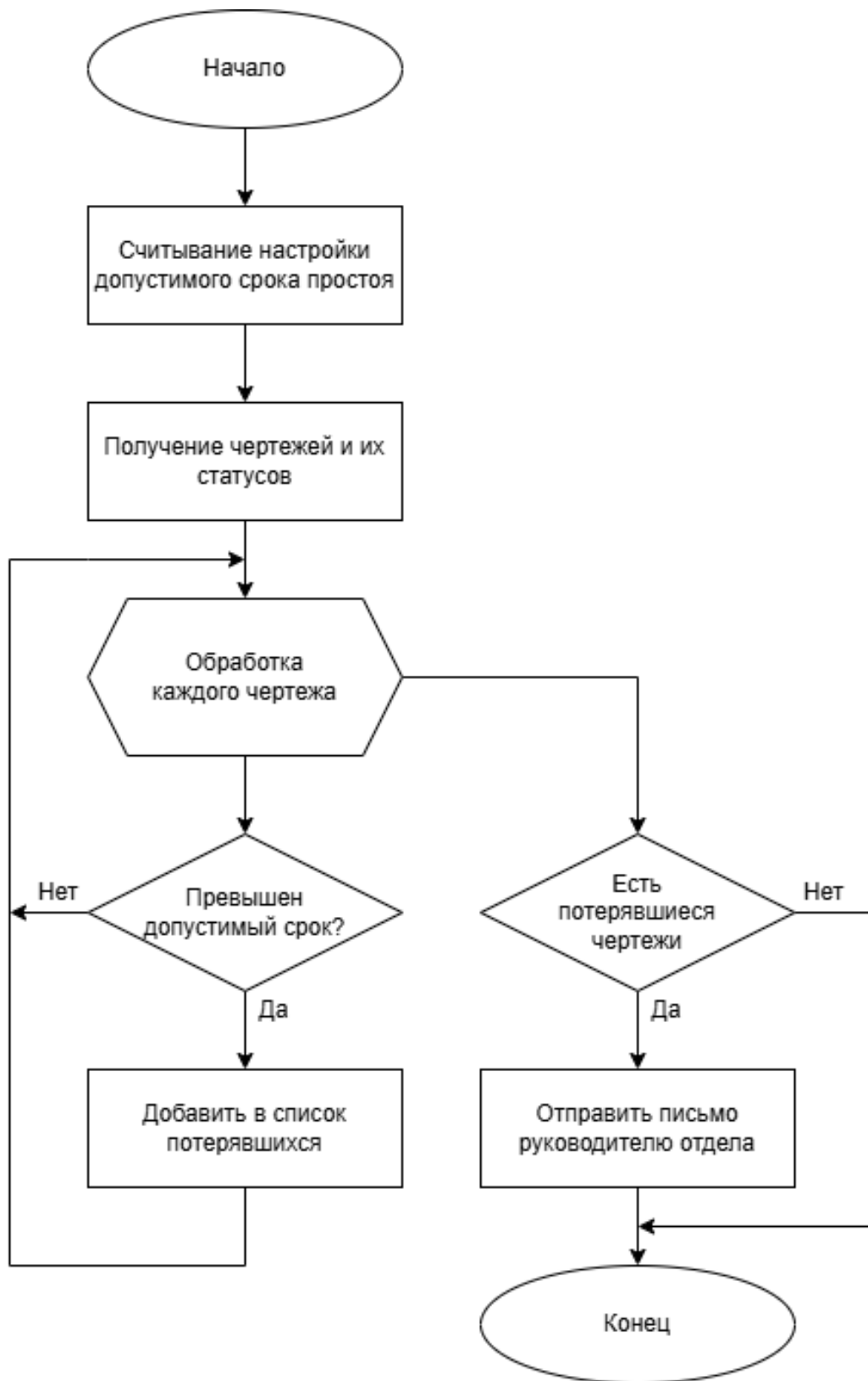


Рисунок 4.5 – Схема уведомлений о потерявшихся чертежах

Таким образом, архитектура учёта чертежей представляет собой связную, модульную систему, охватывающую весь жизненный цикл проектной документа-

ции: от формирования на этапе 3D-моделирования до интеграции с ERP и контроля корректности исполнения. Каждый компонент направлен на минимизацию ошибок, автоматизацию проверок и обеспечение информационной целостности производства.

4.2 Принципы проектирования и интеграции функциональных модулей комплекса

Перед разработкой программного комплекса «SZMK» была проведена комплексная подготовительная работа, направленная на систематическое исследование предметной области, выявление технологических и организационных ограничений существующих решений, а также формализацию требований к архитектуре будущей системы. В первую очередь была выполнена аналитическая оценка функциональных возможностей широко распространённых программных продуктов, таких как Tekla Structures, Tekla EPM, AutoCAD, Revit, SAP ERP, а также 1С:УПП. Установлено, что указанные системы обладают мощными средствами проектирования и расчётов, но не обеспечивают целостного управления жизненным циклом проектной документации на всех этапах производственного процесса. В частности, отсутствует единый механизм централизованного учёта и контроля версий чертежей, интеграция с ERP-средой ограничена, а многие операции по учёту, проверке и унификации выполняются вручную, что повышает вероятность ошибок и снижает эффективность.

Для формализации структуры процесса применялся метод функционального моделирования в нотации IDEF0 [126–128]. Построенная модель позволила выявить ключевые участки информационных разрывов между стадиями проектирования, согласования, архивирования и передачи в производство. Было зафиксировано дублирование действий, отсутствие верификации, несогласованность версий, а также ручной характер перехода документации между этапами. Это определило необходимость в комплексной автоматизации и цифровом сопровождении проектных данных.

На основе результатов анализа были сформулированы требования к будущей системе, охватывающие как функциональные компоненты (унификация деталей, проверка чертежей, учёт статусов, генерация отчётности и уведомлений), так и нефункциональные характеристики (масштабируемость, надёжность, отказоустойчивость, возможность интеграции с CAD/ERP). Ключевым элементом концепции стало включение в систему интеллектуального механизма унификации проектных элементов, способного автоматически выявлять схожие детали и минимизировать избыточную номенклатуру. Для этого была адаптирована методика нечеткой кластеризации на основе алгоритма Fuzzy C-Means, учитывающего геометрические и технологические признаки и допускающего принадлежность к нескольким группам, что соответствует инженерной специфике.

Параллельно с построением логической архитектуры были определены средства реализации. В качестве языка программирования выбран C#, обладающий высокой стабильностью, безопасностью и развитой экосистемой для промышленной разработки. Средой разработки стала Microsoft Visual Studio, а в качестве системы управления базами данных – PostgreSQL, обеспечивающая поддержку транзакций, индексации, полнотекстового поиска и сложных пользовательских запросов. Для реализации межмодульной интеграции применены протоколы TCP/IP и HTTP: первый обеспечивает постоянное соединение между клиентскими и серверными компонентами (например, модулями сканирования и распознавания), второй – поддержку REST-интерфейсов и взаимодействие с внешними системами, в том числе ERP [129–131].

Дополнительно была проведена подготовка исходных данных: собраны и нормализованы архивные чертежи, метаданные, а также параметры деталей и сборок. Эти данные стали основой для предварительного тестирования и построения моделей. На их основе разработаны прототипы отдельных компонентов: модулей распознавания DataMatrix-кодов, извлечения информации из 3D-моделей, построения отчётов, механизмов верификации и версионного контроля. Все прототипы проходили апробацию на реальных рабочих данных и легли в основу последующей интеграции в комплексную архитектуру.

Завершающим подготовительным этапом стало моделирование сценариев взаимодействия между различными подразделениями предприятия: конструкторским бюро, архивом, производственным отделом, службой снабжения и цехами. На основе этих сценариев были определены роли пользователей, условия перехода чертежей между статусами, допустимые операции и структура ответственности. Это обеспечило соответствие архитектуры программного комплекса фактической организационной модели предприятия, минимизируя необходимость последующей адаптации.

Кроме технической и аналитической подготовки, значительное внимание было уделено организационным аспектам, обеспечивающим устойчивость будущей системы к изменениям в производственных условиях. На этапе согласования требований проводились регулярные консультации с ключевыми участниками процесса – инженерами-конструкторами, сотрудниками ПДО, архивариусами, а также представителями IT-отдела. Такой подход позволил не только уточнить специфику работы с документацией на каждом этапе жизненного цикла чертежа, но и учесть практические ограничения, накладываемые существующей инфраструктурой предприятия. Полученные результаты легли в основу проектирования пользовательских сценариев, интерфейсов и логики обработки ошибок, направленной на снижение порога вхождения в систему и исключение критических отказов из-за непредусмотренного поведения операторов.

В целях наглядного представления внутренней структуры программного комплекса и логики взаимодействия между его компонентами была разработана обобщённая схема модулей системы «SZMK» (рисунок 4.6). Схема отражает архитектуру комплекса, включая клиентские и серверные приложения, каналы передачи данных, базу данных и механизмы интеграции с внешними системами, такими как ERP и CAD-среда. Такой подход позволяет визуализировать не только состав программных средств, но и взаимосвязи между ними, а также обеспечить прозрачность архитектурных решений и их обоснование с точки зрения функционального покрытия производственного цикла.

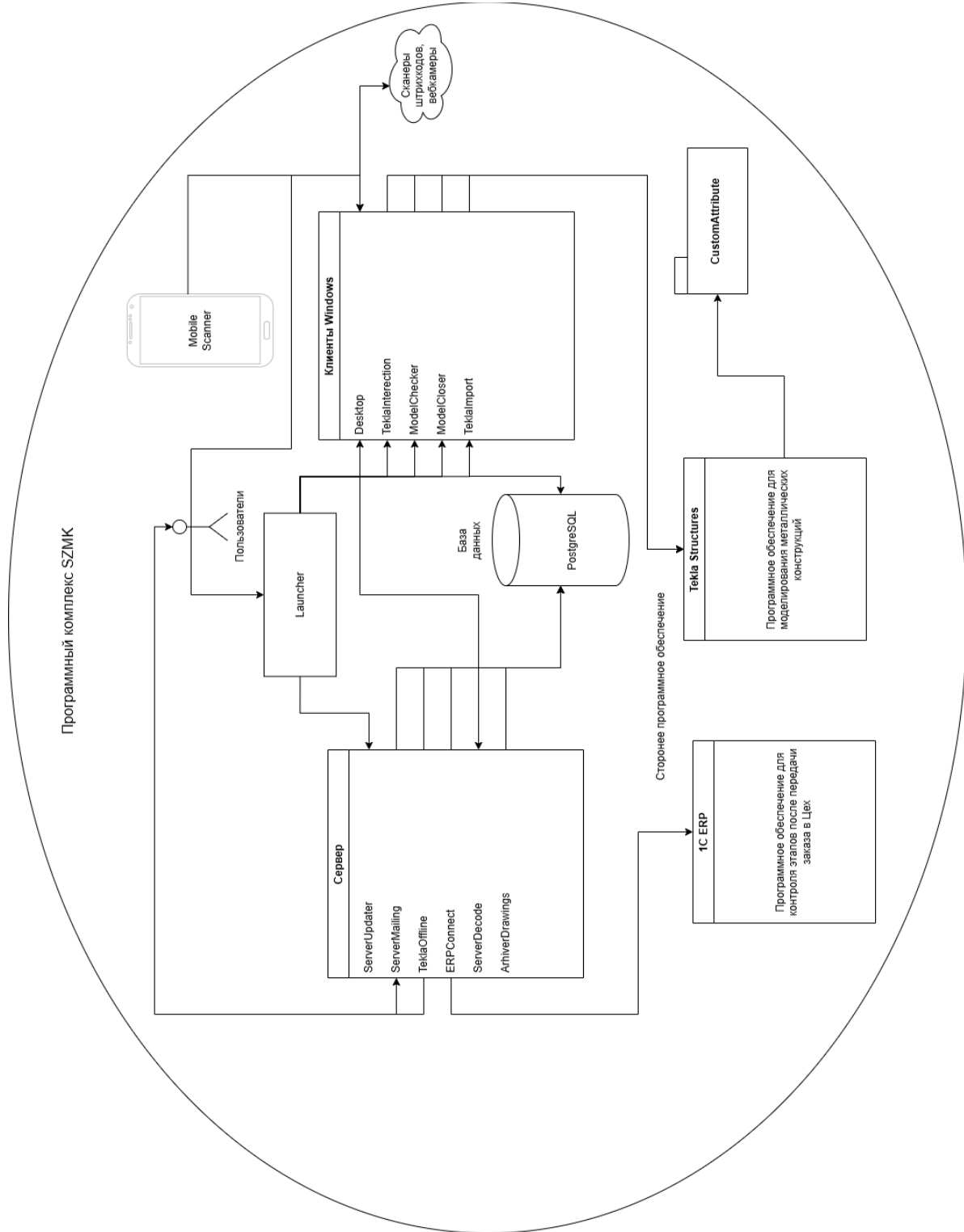


Рисунок 4.6 – Архитектура модулей программного комплекса «SZMK»

Таким образом, разработка программного комплекса «SZMK» основывалась на глубоком понимании специфики предметной области, применении формальных методов анализа и выборе оптимальных средств реализации, включая язык C#, СУБД PostgreSQL и протоколы TCP/IP и HTTP. Такое сочетание технологий позволило обеспечить надёжность, расширяемость и высокую степень автоматизации производственного документооборота.

4.3 Техническая реализация и интеграция комплекса с внешними системами

Реализация программного комплекса «SZMK» осуществлялась с применением языка объектно-ориентированного программирования высокого уровня C# и интеграцией с Tekla Open API – официальным интерфейсом взаимодействия с программным обеспечением Tekla Structures. Использование Tekla Open API стало ключевым фактором при выборе технологического стека, так как позволило получить программный доступ к 3D-моделям металлических конструкций, извлекать данные о чертежах, деталях, сборках и профилях, а также управлять процессами экспорта, верификации и визуализации без участия пользователя.

Язык программирования C# в сочетании с Tekla Open API обеспечил надёжную и стабильную платформу для разработки. Поддержка строгой типизации, событийной модели, многопоточности и автоматического управления ресурсами позволила сократить количество неявных ошибок и ускорить цикл разработки. Все клиентские и серверные компоненты разрабатывались в среде Microsoft Visual Studio Community Edition, предоставляющей мощные средства отладки, профилирования и визуального проектирования пользовательского интерфейса.

Пользовательский интерфейс клиентских приложений построен с учётом специфики работы различных подразделений предприятия. Все действия выполняются в диалоговых окнах, адаптированных под сценарии конкретного пользователя – будь то инженер-конструктор, архивариус или сотрудник производ-

ственно-диспетчерского отдела. При этом реализована система предварительной валидации: перед изменением статуса, отправкой данных или выполнением отчёта происходит автоматическая проверка обязательных параметров, целостности связей и актуальности версий. В случае нарушения правил система блокирует действие и выводит поясняющее сообщение, позволяя избежать ошибок, связанных с человеческим фактором.

Интерфейс также содержит механизм интерактивной обратной связи – всплывающие уведомления, информационные маркеры и цветовые индикаторы текущего состояния документа позволяют быстро сориентироваться в статусе объекта. Это особенно важно для задач, связанных с групповыми чертежами и бланками заказов, где одна ошибка может затронуть всю связанную документацию.

Наличие такой визуальной поддержки требует строгой формализации состояния объектов на уровне программной архитектуры системы.

С программной стороны все сущности описываются типизированными классами C#, организованными в общую библиотеку SZMK.Shared. Она включает модели данных, сервисы взаимодействия с базой, правила сериализации и проверки. Такой подход обеспечил единство структуры данных между модулями, возможность повторного использования логики, а также позволил централизованно вносить изменения в структуру объектов при развитии функциональности. Каждый класс инкапсулирует логику работы со своей сущностью: валидацию, подготовку отчётов, вычисление производных параметров и формирование статусов.

В разработанном программном комплексе «SZMK» применяется чётко структурированная объектная модель, отражающая основные сущности процесса производства металлических конструкций. Всего в комплексе используется двадцать шесть основных классов, которые одновременно выступают в роли программных компонентов и представляют собой прямую реализацию сущностей базы данных. Это обеспечивает полную согласованность между логическим уровнем и системой хранения.

Классы можно условно разделить на несколько функциональных категорий:

- классы идентификации и хранения чертежей: Drawing (основной объект – чертёж), Model (3D модель), Detail (деталь), Schema (схема чертежа), Revision (версия чертежа), PathExport, PathArchive, PathDetails (пути хранения экспортированных файлов в различных форматах) (Приложение А);
- классы маршрутизации и статусов: Status, StatusSubContract, StepSubContract, AddStatus, AddStatusSubContract – представляют статусные переходы как внутри предприятия, так и при взаимодействии с подрядными организациями (Приложение Б);
- классы учёта и группировки: BlankOrder (бланки заказов), AddBlank (связь бланков с чертежами), AddDetail (связь деталей с чертежами), TypeAdd (способ добавления объекта в систему) – реализуют логику групповой обработки и серийной передачи документации между подразделениями (Приложение В);
- классы контроля и проверки: CompareFiles (сравнение версии файла модели с эталонной), AutomaticReport (результаты автоматических отчётов) – обеспечивают механизмы верификации и журналирования;
- классы взаимодействия с пользователями: User, Position, Comment – отражают структуру пользователей, их должности, распределение прав доступа и внутренние комментарии к чертежам;
- классы системы уведомлений: Mail, MailGroup, MailMailGroup – служат для конфигурации адресатов автоматических уведомлений и рассылки отчетных сообщений;
- класс Setting реализует хранение и доступ к глобальным параметрам конфигурации программного комплекса, применимым ко всем модулям.

Для организации взаимодействия между модулями комплекса был реализован гибкий механизм передачи данных, учитывающий особенности конкретных задач. Так, при распознавании DataMatrix-кодов клиентское приложение SZMK.Desktop выделяет только ту часть изображения, где предполагается размещение кода, и передаёт её на серверную компоненту SZMK.ServerDecode по про-

токолу TCP. Это позволяет существенно сократить объём передаваемых данных и ускорить обработку. Обратная передача результатов сопровождается логикой маршрутизации: распознанный идентификатор используется для автоматического перемещения файла скана в нужную директорию и его переименования в соответствии с внутренним шаблоном.

Отдельное внимание было уделено механизму управления версиями программного обеспечения. В условиях распределённой установки и активной доработки системы возникла необходимость в централизованной проверке актуальности и автоматическом обновлении клиентских приложений. Для этой цели были разработаны модули SZMK.ServerUpdater и SZMK.Launcher. Последний запускается перед основным приложением, сверяет локальную и серверную версии исполняемых файлов, при необходимости производит обновление и только после этого инициирует запуск основной программы. Такой механизм позволил гарантировать единое поведение системы на всех рабочих местах без необходимости ручного администрирования.

Значительная часть функциональности комплекса реализована в виде серверных приложений, работающих в фоновом режиме. Это позволило разгрузить клиентскую часть и обеспечить выполнение ресурсоёмких задач в нерабочее время или по расписанию. Все автоматические процессы централизованы через компонент SZMK.TeklaOffline.Scheduler – специализированный планировщик, который управляет запуском консольных утилит для выполнения проверок, сбора отчётов, расчётов и отправки уведомлений. Каждая задача конфигурируется через отдельное административное приложение, где задаются параметры запуска, время выполнения и сценарии обработки результата.

Среди ключевых автоматических функций комплекса – архивация неактуальных данных SZMK.ArhiverDrawings, формирование сводных отчётов по моделям, проверка на дублирование деталей SZMK.TeklaOffline.UnificationDetails, а также система уведомлений о потерявшихся или задержавшихся чертежах SZMK.TeklaOffline.NotificationLost. Благодаря этому удалось существенно сни-

зить нагрузку на операторов, сократить риски пропуска критичных ошибок и обеспечить своевременное реагирование ответственных подразделений.

Для обеспечения визуального контроля за состоянием выполнения заказов в рамках программного комплекса реализованы средства интеграции с Tekla Structures. Приложения SZMK.TeklaImport и SZMK.TeklaOffline.TeklaImport осуществляют раскраску элементов 3D-модели в зависимости от текущего статуса соответствующих чертежей в базе данных. Это позволяет руководителям и инженерам наглядно оценивать степень готовности конструкции, своевременно выявлять отстающие участки и принимать управленческие решения на основе объективной визуализации. Ручной режим работы используется при необходимости оперативной проверки, тогда как автоматический – запускается по расписанию, экспортируя окрашенную модель в формат IFC для дальнейшего анализа.

Помимо основных инструментов, были реализованы вспомогательные программные компоненты, решающие узкоспециализированные задачи. Например, библиотека кастомных атрибутов SZMK.CustomAttribute расширяет возможности Tekla Structures, добавляя в отчёты вычисляемые параметры, такие как площадь поперечного сечения сварного шва и его масса. Эти данные используются для точного расчёта потребностей в материалах и включаются в спецификации. Данная реализация обеспечивает автоматический учёт затрат на сварку, ранее не охватываемый системами контроля, и тем самым повышает точность планирования производственных и закупочных операций.

Объединение всех компонентов в единый программный комплекс позволило сформировать сквозной цифровой контур управления производственным процессом металлических конструкций – от проектирования до выпуска готовых изделий. Архитектура системы не только охватывает ключевые этапы работы с чертежами и 3D-моделями, но и обеспечивает контролируемое взаимодействие между подразделениями, устранение информационных разрывов, автоматизацию критичных операций и прозрачность процессов. Возможность гибкой настройки маршрутов обработки, масштабируемость за счёт модульности и интеграция с ERP делают комплекс адаптивным к развитию предприятия.

Функционирование программного комплекса «SZMK» опирается на тщательно спроектированную систему хранения данных, обеспечивающую согласованность всех компонентов и надёжность процессов. В качестве ядра информационной инфраструктуры выступает реляционная база данных PostgreSQL, структура которой разрабатывалась параллельно с архитектурой клиентских и серверных модулей. Концепция построения базы данных базируется на принципах нормализации, строгой типизации и прямого соответствия между прикладными классами и физическими таблицами. Такой подход позволил сформировать единое логическое пространство, в котором каждая сущность системы – будь то чертёж, модель, статус, пользователь или отчёт – представлена как изолированный, но взаимосвязанный элемент.

Особое внимание при проектировании было уделено вопросам обеспечения целостности данных, масштабируемости и прозрачности структуры. Все связи между таблицами реализованы через внешние ключи, поддерживаются каскадные обновления и ограничения уникальности. Это позволило исключить дублирование информации и гарантировать корректность всех операций вне зависимости от способа их инициирования – вручную пользователем или автоматически в фоновом режиме. Кроме того, благодаря единому набору классов в библиотеке SZMK.Shared, структура БД используется всеми модулями комплекса без необходимости дублирования логики, что упрощает сопровождение и интеграцию новых компонентов.

Результирующая модель данных обеспечивает хранение полной истории обработки чертежей, маршрутов согласования, изменений статусов, версий моделей и сопроводительных файлов. Такая детализация необходима не только для управления текущими производственными процессами, но и для последующего анализа, формирования регламентной отчётности и реконструкции хронологии событий при возникновении ошибок или конфликтов. Использование PostgreSQL позволило реализовать партиционирование архивных данных, тем самым разгрузив основной контур хранения и повысив производительность при работе с актуальными объектами.

Таким образом, реализация программного комплекса «SZMK» представляет собой результат многокомпонентной инженерной работы, сочетающей современные принципы проектирования программного обеспечения, глубокое понимание производственной специфики и стремление к устранению конкретных узких мест процесса. Закладка в архитектуру механизма расширяемости, адаптации и контроля позволила в дальнейшем не только внедрить систему, но и обеспечить её устойчивое развитие и интеграцию в повседневную практику предприятия.

4.4 Описание функциональных возможностей комплекса

Программный комплекс «SZMK» реализует функциональность поэтапной автоматизации производственного процесса, начиная от проектирования 3D-модели и заканчивая архивированием чертежей, синхронизацией с ERP-системой и визуализацией степени готовности изделий. Каждый этап цифрового цикла сопровождается специализированными программными компонентами, включёнными в единую архитектуру. Система построена как распределённый модульный комплекс, включающий клиентские, серверные и мобильные приложения, взаимодействующие между собой через централизованную базу данных, сетевые протоколы TCP/IP и HTTP, а также внутренние механизмы планирования и уведомлений. Ниже представлено последовательное описание всех функциональных возможностей комплекса по этапам производственного цикла.

Создание чертежей и их добавление в базу данных осуществляется с помощью клиентского приложения SZMK.TeklaInteraction, которое напрямую взаимодействует с Tekla Structures через открытое API (рисунок 4.7). После завершения моделирования инженер выделяет нужные чертежи и запускает процедуру выгрузки. Интерфейс программы включает окно предварительного просмотра данных, блок параметров валидации и панель экспорта, что позволяет в интерактивном режиме контролировать корректность информации перед её загрузкой (рисунок 4.8).

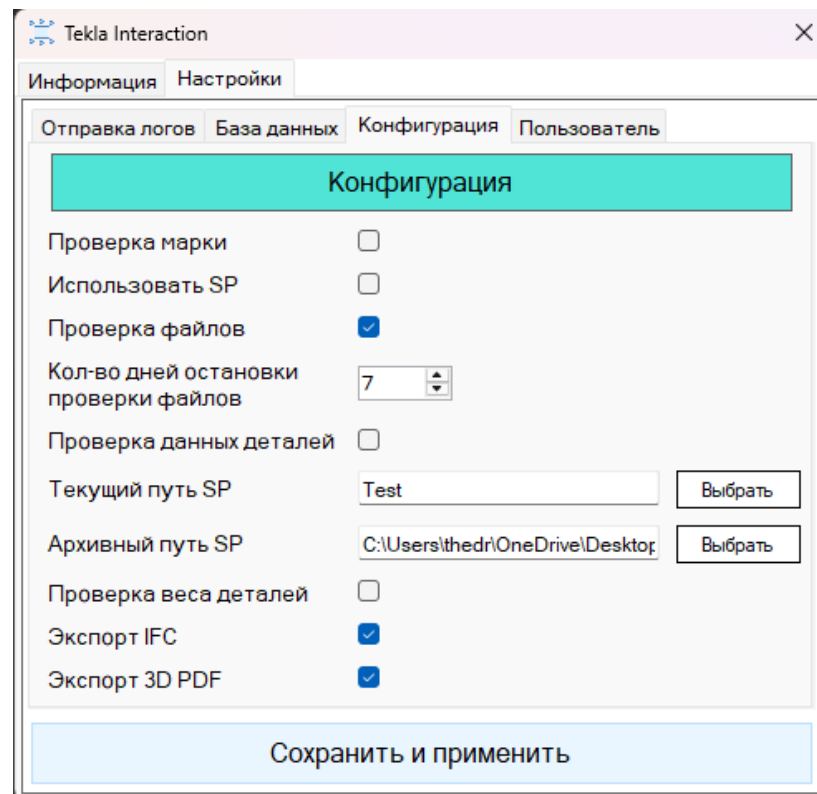


Рисунок 4.7 – Интерфейс настройки SZMK.TeklaInteraction

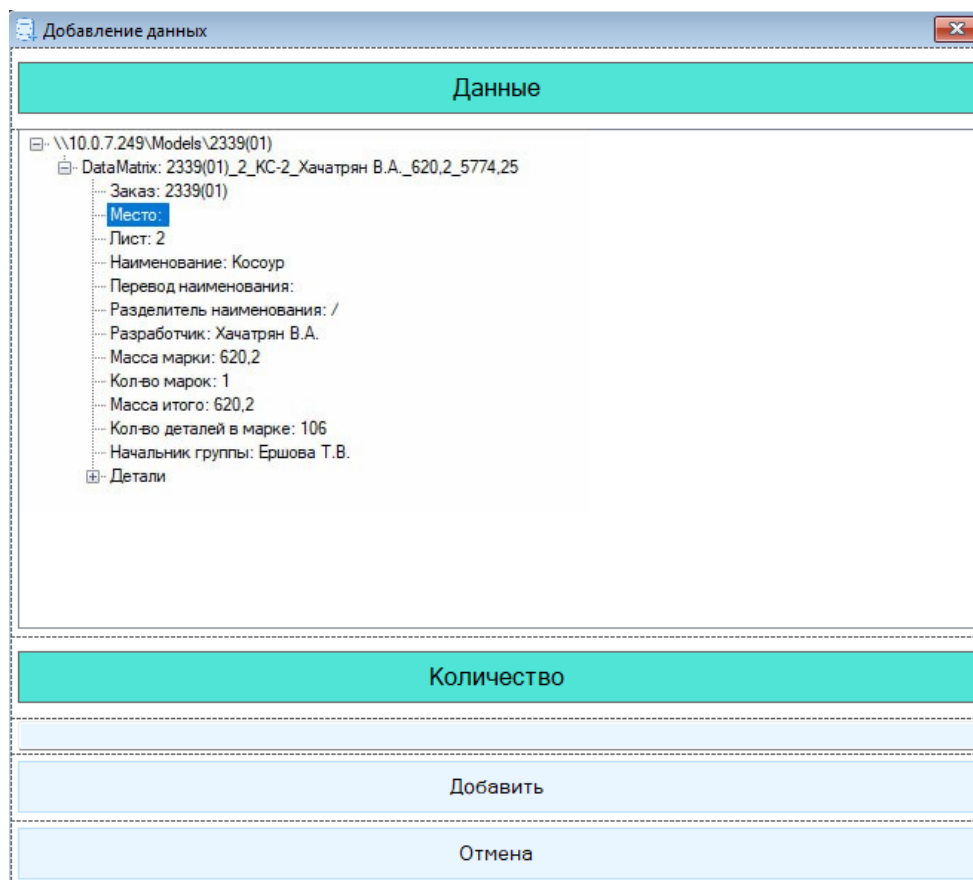


Рисунок 4.8 – Диалог выгрузки и проверки чертежей в SZMK.TeklaInteraction

SZMK.TeklaInteraction выполняет не только экспорт данных из модели, но и полноценную верификацию корректности чертежей до момента их поступления в производственный контур. При загрузке приложение автоматически сверяет содержимое каждого PDF и DWG файла с параметрами, извлечёнными из модели: габаритами, количеством и расположением деталей, номерами листов, наименованиями позиций. Такая многоуровневая сверка позволяет исключить распространённую ошибку – несоответствие между текущей версией чертежа и актуальным состоянием модели. В случаях, когда модель была изменена без повторного экспорта чертежей, система выявляет расхождения и блокирует добавление, сообщая пользователю о необходимости повторной генерации файлов [132].

Особое внимание в TeklaInteraction уделено контролю версионности чертежей. Если номер чертежа содержит индекс «и», программа анализирует наличие предыдущих версий в базе данных. При выявлении совпадений с более ранними экземплярами происходит аннулирование устаревшей версии и автоматическое уведомление ответственных сотрудников. Такой подход позволяет сохранить историческую последовательность изменений, обеспечить работу только с актуальной информацией и исключить дублирование чертежей с различным статусом. Все действия сопровождаются визуальными подсказками, валидацией и возможностью ручной корректировки в случае спорных ситуаций. Благодаря этим функциям SZMK.TeklaInteraction играет ключевую роль в обеспечении качества цифровой проектной документации на ранней стадии производственного цикла (Приложение Г).

Интеграция SZMK.TeklaInteraction в общую информационную архитектуру комплекса обеспечивает непрерывность данных от момента проектирования до передачи в архив и цех. Все добавленные в систему чертежи получают начальный статус «Добавлен инженером-конструктором» и становятся доступными для последующей обработки другими модулями – SZMK.Desktop, SZMK.ServerMailing, а также ERP-интеграцией через SZMK.ERPConnect. Кроме того, информация, переданная из TeklaInteraction, автоматически участвует в формировании отчётов, проверке наличия всех обязательных документов по модели.

После загрузки чертежей в систему они начинают движение по производственной цепочке. Для сопровождения этого процесса используется универсальное клиентское приложение SZMK.Desktop (Приложение Д), играющее роль основного интерфейса взаимодействия с чертежами. В интерфейсе программы реализованы таблица чертежей с расширенным поиском, контекстное меню для управления статусами, окно детальной информации по каждому чертежу и встроенные формы для сканирования DataMatrix-кодов (рисунок 4.9). Благодаря этому сотрудник может быстро найти нужный документ, изменить его статус, сформировать отчёт или направить файл в архив [133].

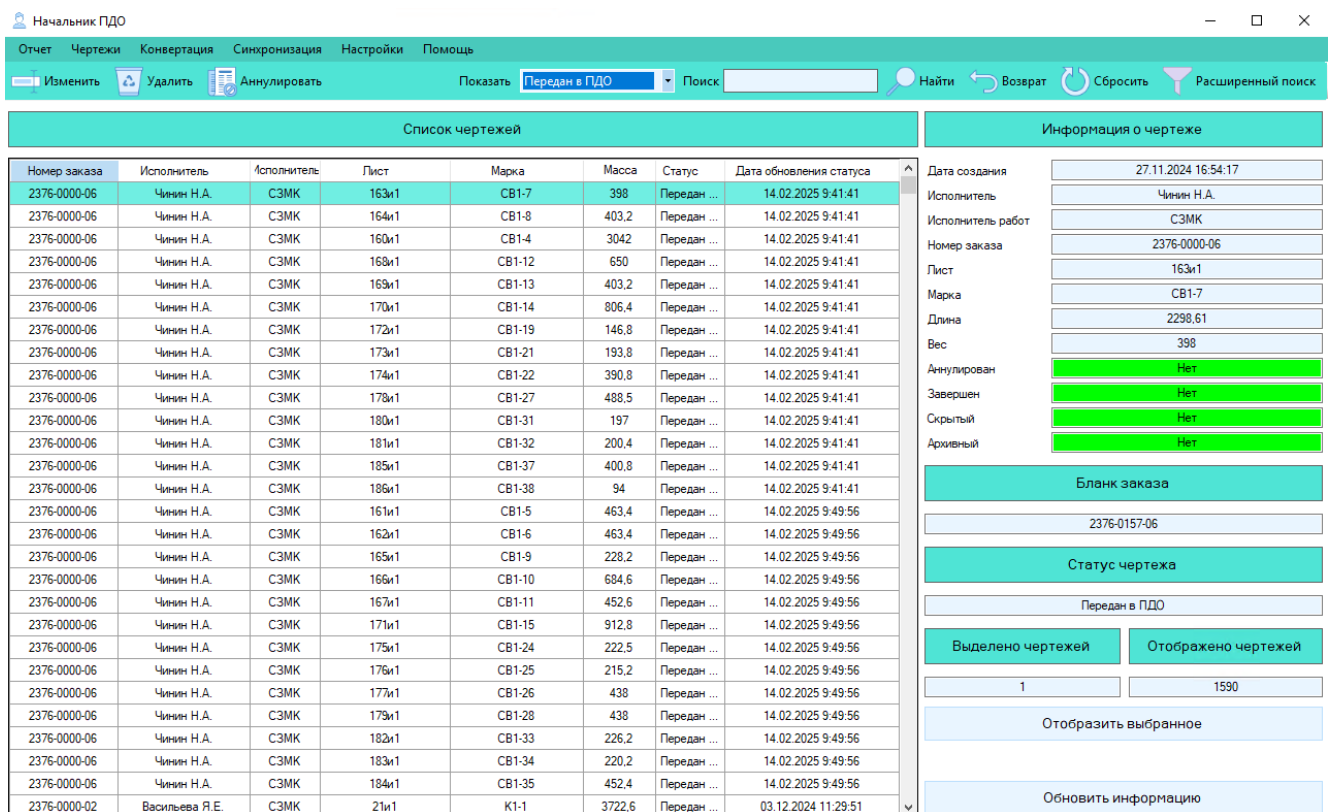


Рисунок 4.9 – Интерфейс взаимодействия с пользователем в SZMK.Desktop

Одной из ключевых функций является сканирование DataMatrix-кодов, нанесённых на печатные чертежи. Для этого используется встроенный модуль распознавания, реализованный в виде серверного компонента SZMK.ServerDecode. Клиентское приложение вырезает фрагмент изображения с предполагаемой областью кода и передаёт его на сервер, где происходит последо-

вательная обработка: устранение шумов, бинаризация, локализация кода и дешифровка. Результаты мгновенно возвращаются клиенту. Такая схема исключает необходимость установки тяжёлых алгоритмов на рабочем месте пользователя и повышает общую стабильность системы (рисунок 4.10).

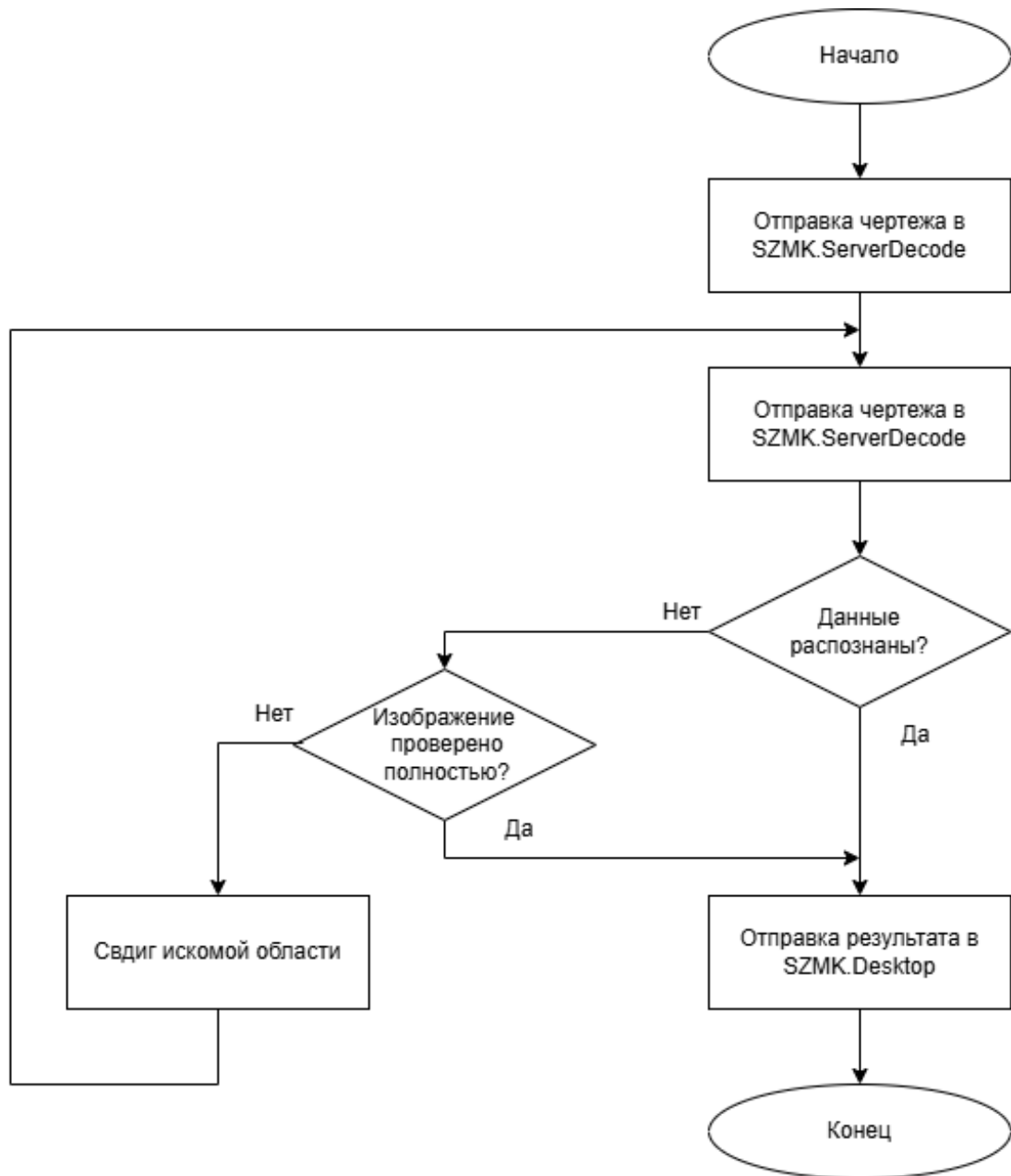


Рисунок 4.10 – Схема взаимодействия SZMK.Desktop и SZMK.ServerDecode

Одним из ключевых инструментов реализации механизма унификации проектных решений на ранней стадии подготовки производства является приложение SZMK.ModelChecker (Приложение Е). Приложение запускается инженером непо-

средственно в среде Tekla Structures и предназначено для автоматизированного анализа 3D-модели с целью формирования групп конструктивно и технологически сходных элементов металлических конструкций. В основе работы приложения лежит процедура кластеризации деталей, ориентированная на выявление повторяющихся и близких по параметрам проектных элементов, для которых возможно применение унифицированных технологических решений.

Кластеризация выполняется на основе совокупности геометрических и конструктивных признаков, описывающих детали модели, включая габаритные размеры, пространственные координаты, количество и диаметр отверстий, тип и расположение фасок, конфигурацию срезов, а также расстояния между болтовыми соединениями. Сопоставление параметров осуществляется с учётом допустимых отклонений, отражающих технологическую допустимость вариаций и настраиваемых пользователем в зависимости от требований конкретного проекта.

Интерфейс приложения предоставляет средства управления процессом кластеризации, позволяя выбирать набор признаков, участвующих в анализе, и задавать чувствительность объединения элементов в кластеры. Результаты обработки представляются в виде таблицы, содержащей сформированные группы сходных деталей с визуальным выделением потенциально избыточных позиционных обозначений (рисунок 4.11). Для каждого элемента обеспечена возможность навигации к соответствующей детали в 3D-модели и последующей корректировки позиционного номера либо параметров детали.

Использование такого подхода позволяет перейти от фрагментарного выявления идентичных элементов к системной унификации проектных решений, обеспечивая сокращение избыточной номенклатуры деталей, формирование устойчивых групп элементов с едиными технологическими маршрутами и снижение вариативности производственных операций. Это создаёт предпосылки для оптимизации закупочной деятельности, сокращения количества перенастроек оборудования и уменьшения трудоёмкости подготовки производства.

Позиция	Колоннаты	Заказ	Пр.ссылка	Марка (станд.)	Вид буртика	Вес буртика	Вес	Ширина	Длина	Высота	Обработка поверхности	Кол-во отверстий	Диаметр отверстий	Расстояние от торца до угла	Кол-во вылетов	Длина вылета	Ширина вылета	Глубина вылета	Фаска угла	Разделение на каналы	Серия изготовления	Комментарий
7771	1	3030-43	SP3310007	20.3298	20.3298	20.3298	20.3298	1000	30	780	2	0			1	120.0	0.5	15.0	15.0	[[Type:"H",	2	1
7772	1	3030-42	SP3310002	20.3379	20.3379	20.3379	20.3379	1000	30	780	2	0			1	120.0	0.5	15.0	15.0	[[Type:"H",	2	1
8475	1	3030-43	PL4*30	SP3310007	0.0629	0.0625	0.0625	66.7523	4	30	2	0			1					[[Type:"H",	2	1
8477	1	3030-42	SP4*30	SP3310002	0.0629	0.0625	0.0625	66.7523	4	30	2	0			1					[[Type:"H",	2	1
8330	3	3030-43	PL30*350	SP3310007	29.3628	29.3621	29.3621	1190	30	950	2	0			1	299.83	15.0	15.0	15.0	[[Type:"H",	2	1
8445	3	3030-43	PL30*350	SP3310007	29.3628	29.3621	29.3621	1190	30	950	2	0			1	299.83	15.0	15.0	15.0	[[Type:"H",	2	1
8290	3	3030-43	PL30*350	SP3310007	29.3628	29.3621	29.3621	1190	30	950	2	0			1	299.83	15.0	15.0	15.0	[[Type:"H",	2	1
8446	3	3030-43	PL30*350	SP3310007	29.3628	29.3621	29.3621	1190	30	950	2	0			1	299.83	15.0	15.0	15.0	[[Type:"H",	2	1
8454	3	3030-43	PL30*350	SP3310007	29.3628	29.3621	29.3621	1190	30	950	2	0			1	299.83	15.0	15.0	15.0	[[Type:"H",	2	1
8626	3	3030-43	PL30*350	SP3310007	29.3628	29.3621	29.3621	1190	30	950	2	0			1	299.83	15.0	15.0	15.0	[[Type:"H",	2	1
9117	3	3030-43	PL30*350	SP3310007	29.3628	29.3621	29.3621	1190	30	950	2	0			1	299.83	15.0	15.0	15.0	[[Type:"H",	2	1
8424	2	3030-43	PL30*465	SP3310007	29.5749	29.5642	29.5642	1190	30	665	2	0			1	299.43	15.0	15.0	15.0	[[Type:"H",	2	1
9105	3	3030-42	PL30*665	SP3310002	29.5749	29.5642	29.5642	1190	30	665	2	0			1	299.43	15.0	15.0	15.0	[[Type:"H",	2	1
7750	3	3030-43	PL30*560	SP3310007	17.3263	17.3155	17.3155	1190	30	500	2	0			1	299.83	15.0	15.0	15.0	[[Type:"H",	2	1
7090	1	3030-43	PL30*560	SP3310007	17.3263	17.3155	17.3155	1190	30	560	2	0			1	299.83	15.0	15.0	15.0	[[Type:"H",	2	1
8282	2	3030-43	PL30*740	SP3310007	29.8714	29.8607	29.8607	1090	30	740	2	0			1	299.83	15.0	15.0	15.0	[[Type:"H",	2	1
8276	2	3030-43	PL30*740	SP3310007	29.8714	29.8607	29.8607	1090	30	740	2	0			1	299.83	15.0	15.0	15.0	[[Type:"H",	2	1
8276	2	3030-43	PL30*740	SP3310007	29.8714	29.8607	29.8607	1090	30	740	2	0			1	299.83	15.0	15.0	15.0	[[Type:"H",	2	1
8275	1	3030-43	PL30*740	SP3310007	29.8714	29.8607	29.8607	1090	30	740	2	0			1	299.83	15.0	15.0	15.0	[[Type:"H",	2	1
8351	1	3030-43	PL30*715	SP3310007	22.1239	22.1112	22.1112	1190	30	715	2	0			1	299.83	15.0	15.0	15.0	[[Type:"H",	2	1
8357	1	3030-43	PL30*715	SP3310007	22.1239	22.1112	22.1112	1190	30	715	2	0			1	299.83	15.0	15.0	15.0	[[Type:"H",	2	1
8289	3	3030-43	PL30*740	SP3310007	29.8714	29.8607	29.8607	1090	30	740	2	0			1	299.83	15.0	15.0	15.0	[[Type:"H",	2	1
8296	3	3030-42	PL30*640	SP3310002	29.7478	29.7371	29.7371	950	30	640	2	0			1	299.43	15.0	15.0	15.0	[[Type:"H",	2	1
8282	2	3030-43	PL30*740	SP3310007	16.1815	16.1508	16.1508	840	30	740	2	0			1	299.83	15.0	15.0	15.0	[[Type:"H",	2	1
8294	1	3030-43	PL30*740	SP3310007	16.1815	16.1508	16.1508	840	30	740	2	0			1	299.83	15.0	15.0	15.0	[[Type:"H",	2	1
8295	1	3030-43	PL30*740	SP3310007	16.1815	16.1508	16.1508	840	30	740	2	0			1	299.83	15.0	15.0	15.0	[[Type:"H",	2	1
8367	1	3030-43	PL30*950	SP3310007	11.3408	11.3408	11.3408	740	30	950	2	0			1	299.83	15.0	15.0	15.0	[[Type:"H",	2	1
8298	1	3030-42	PL30*950	SP3310002	11.3511	11.3408	11.3408	740	30	950	2	0			1	299.43	15.0	15.0	15.0	[[Type:"H",	2	1
8287	1	3030-43	PL30*655	SP3310007	20.2655	20.2548	20.2548	1190	30	655	2	0			1	299.83	15.0	15.0	15.0	[[Type:"H",	2	1
7907	2	3030-43	PL30*655	SP3310007	20.2655	20.2548	20.2548	1190	30	655	2	0			1	299.83	15.0	15.0	15.0	[[Type:"H",	2	1
9118	1	3030-43	PL30*655	SP3310007	20.2655	20.2548	20.2548	1190	30	655	2	0			1	299.83	15.0	15.0	15.0	[[Type:"H",	2	1
8288	2	3030-43	PL30*740	SP3310007	22.8954	22.8847	22.8847	1190	30	740	2	0			1	299.83	15.0	15.0	15.0	[[Type:"H",	2	1
8289	2	3030-43	PL30*740	SP3310007	22.8954	22.8847	22.8847	1190	30	740	2	0			1	299.83	15.0	15.0	15.0	[[Type:"H",	2	1
9100	2	3030-42	PL30*740	SP3310002	22.8954	22.8847	22.8847	1190	30	740	2	0			1	299.43	15.0	15.0	15.0	[[Type:"H",	2	1
7774	12	3030-43	PL30*1000	SP3310007	36.8396	36.8379	36.8379	1000	30	1000	2	0			1	120.0	0.5	15.0	15.0	[[Type:"H",	2	1
7934	2	3030-43	PL30*1000	SP3310007	36.8396	36.8379	36.8379	1190	30	1000	2	0			1	120.0	0.5	15.0	15.0	[[Type:"H",	2	1

Точка изготовления

Сопоставление с оригиналом

Диаг. фото

Рисунок 4.11 – Результаты проверки и выделение ошибок в SZMK.ModelChecker

После прохождения проверки на унификацию и внесения корректировок 3D-модель подвергается финальной верификации с помощью приложения SZMK.ModelCloser. Этот модуль выполняет комплексную проверку модели перед её закрытием и передачей в производственный контур. В рамках проверки анализируются: полнота загрузки чертежей, корректность экспортированных файлов (PDF, DWG), наличие всех обязательных атрибутов, отсутствие утраченных деталей, соответствие версий файлов данным в базе, а также наличие подтверждённого маршрута документации по этапам (рисунок 4.12). Также осуществляется проверка на соответствие состава модели стандартной структуре: марки, листы, подмодели и шаблоны должны быть оформлены согласно внутренним регламентам предприятия [134].

Если все условия соблюдены, модель автоматически переводится в защищённое состояние: возможность внесения изменений блокируется, а пользователям, ответственным за последующие этапы, рассылаются уведомления о готовности модели к производству. При наличии нарушений приложение выдаёт подробный отчёт, в котором перечислены все несоответствия и рекомендации по их устранению (рисунок 4.13). Таким образом, `SZMK.ModelCloser` выполняет роль «точки контроля» между проектной и производственной частью процесса, снижая риск ошибок, дублирования и утери данных на поздних стадиях.

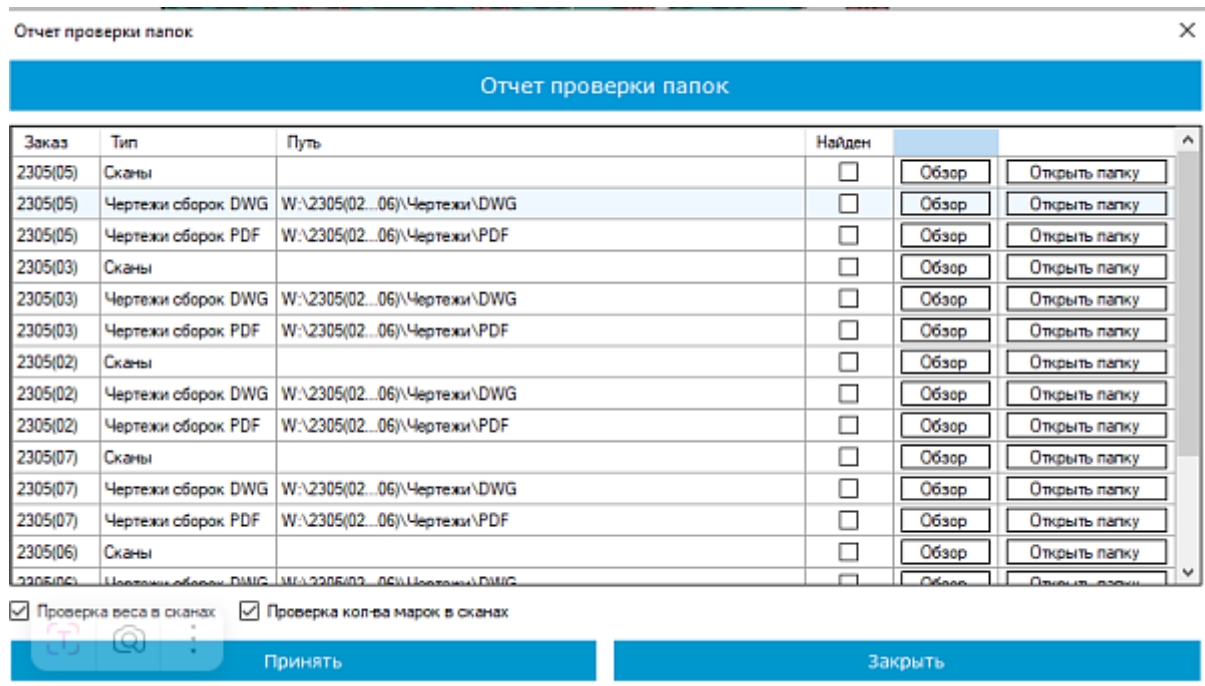


Рисунок 4.12 – Отчет проверки найденных директорий в SZMK.ModelCloser

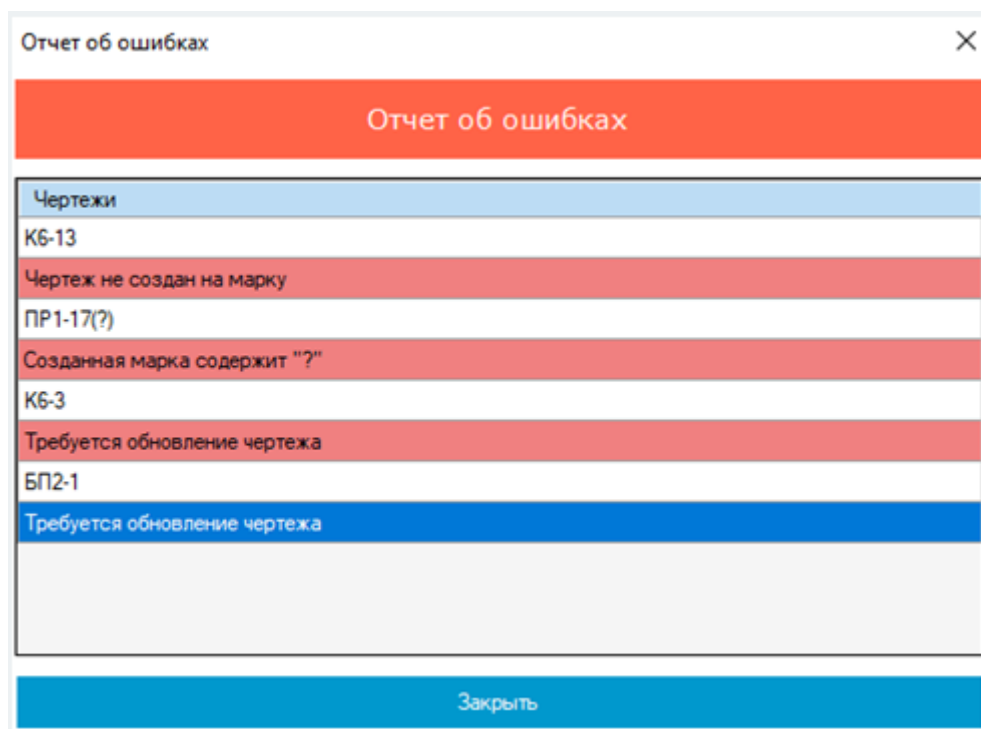


Рисунок 4.13 – Результаты проверки и выделение ошибок в SZMK.ModelCloser

Для оптимизации хранения и повышения производительности системы реализован серверный компонент SZMK.ArhiverDrawings. Он автоматически перемещает неактуальные чертежи в отдельные архивные партии базы данных.

Программа запускается по расписанию и находит записи, не изменявшиеся в течение заданного периода. После анализа метаданных соответствующие объекты выделяются, архивируются и индексируются в отдельной структуре, не участвующей в активной выборке (рисунок 4.14). Это значительно снижает нагрузку на основные таблицы базы данных и ускоряет выполнение операций при работе с актуальными чертежами.

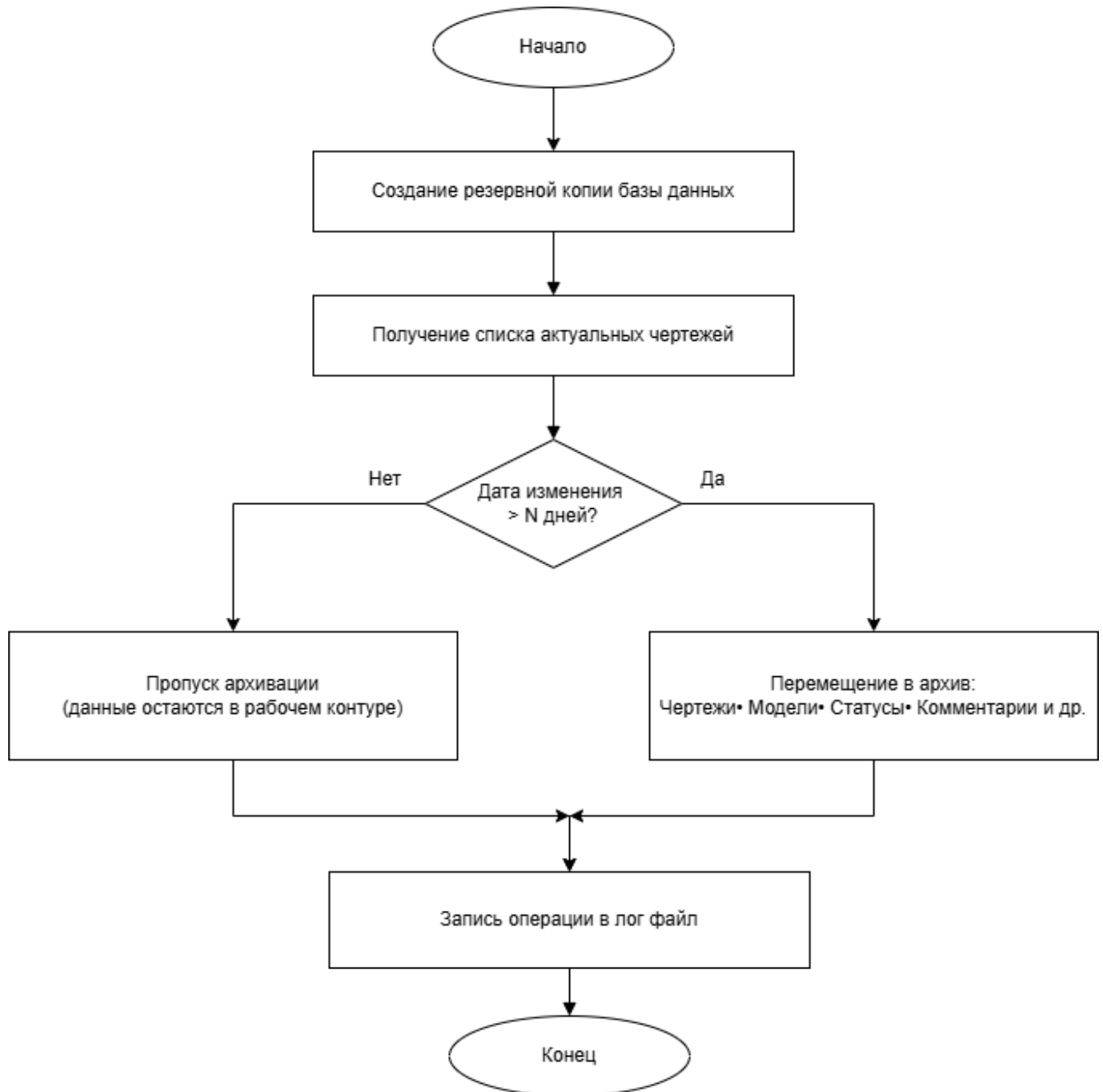


Рисунок 4.14 – Схема архивации данных в SZMK.ArchiverDrawings

С целью автоматизации процесса распространения обновлений был реализован механизм централизованного обновления программных компонентов комплекса. Он состоит из серверного приложения SZMK.ServerUpdater (рисунок 4.15) и клиентского загрузчика SZMK.Launcher, запускаемого перед каждым стартом основной программы. Launcher проверяет версию установленного ПО, сверяет её с серверной, при необходимости загружает только изменённые файлы и выполняет их установку. После обновления автоматически запускается целевой модуль. Такая схема исключает необходимость ручного администрирования на местах, гарантирует согласованность версий и минимизирует простои пользователей.

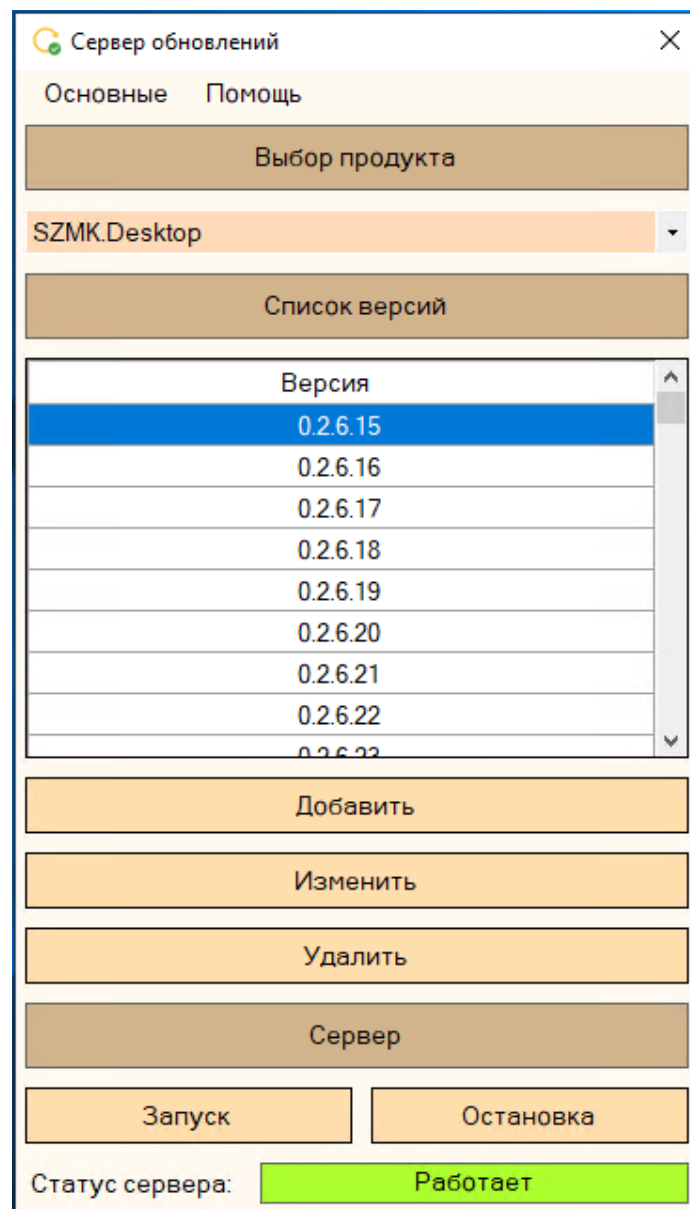
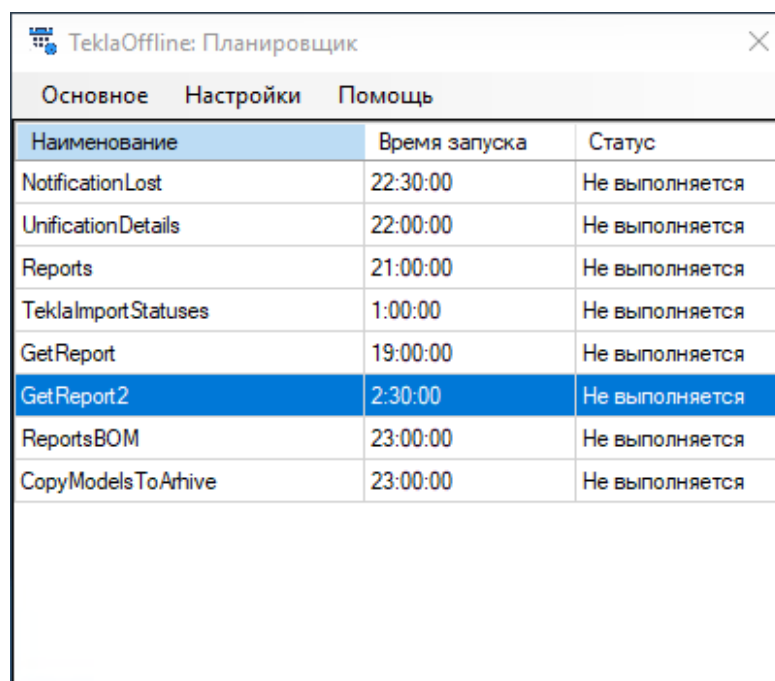


Рисунок 4.15 – Интерфейс системы обновлений комплекса SZMK

Автоматизация фоновых выполняемых задач реализована с помощью компонента SZMK.TeklaOffline.Scheduler – серверного планировщика, управляющего запуском консольных утилит комплекса (Приложение Ж). Через интерфейс программы администратор может задать сценарий выполнения задач по расписанию: ежедневно, по дням недели или в виде одноразового события (рисунок 4.16). Каждая задача конфигурируется с указанием имени исполняемого модуля, параметров запуска и логики обработки результатов. Среди поддерживаемых сценариев – проверка унификации деталей, сбор отчётов, архивирование моделей, уведомления о потерянных чертежах и прямая генерация отчётов по Tekla-моделям. Планировщик интегрирован с логикой обработки ошибок и при необходимости может инициировать повторный запуск задач или формировать уведомление для администратора [135].



Наименование	Время запуска	Статус
NotificationLost	22:30:00	Не выполняется
UnificationDetails	22:00:00	Не выполняется
Reports	21:00:00	Не выполняется
TeklaImportStatuses	1:00:00	Не выполняется
GetReport	19:00:00	Не выполняется
GetReport2	2:30:00	Не выполняется
ReportsBOM	23:00:00	Не выполняется
CopyModelsToArchive	23:00:00	Не выполняется

Рисунок 4.16 – Интерфейс планировщика задач SZMK.TeklaOffline.Scheduler

Для обеспечения мобильности и расширения зон доступности системы был разработан компонент SZMK.MobileScanner – лёгкое клиентское приложение, устанавливаемое на смартфоны сотрудников. С помощью камеры мобильного устройства пользователь может сканировать DataMatrix-коды с бумажных чертежей и автоматически передавать данные в основную систему через

SZMK.Desktop. Это особенно удобно в цехах, на складах или при проведении приёмки, когда нет доступа к стационарному компьютеру. Приложение поддерживает как одиночное сканирование, так и пакетный режим, что значительно ускоряет процессы маркировки и актуализации информации о чертежах вне офиса.

Централизованная система уведомлений реализована в виде серверного приложения SZMK.ServerMailing, отвечающего за рассылку сообщений, оповещений и отчётов всем заинтересованным пользователям (рисунок 4.17). Этот модуль интегрирован во все ключевые компоненты комплекса – как клиентские, так и серверные – и используется для передачи информации о критических событиях: ошибках в моделях, нарушении сроков обработки, задержках в статусах, выявлении неуникальных деталей и других отклонениях. Формирование уведомлений основано на заранее настроенных правилах и шаблонах сообщений, где указывается круг получателей, формулировки, поводы для рассылки и уровень приоритета. Протокол TCP/IP используется для быстрой доставки, а фильтрация осуществляется по должности, отделу и объекту уведомления.

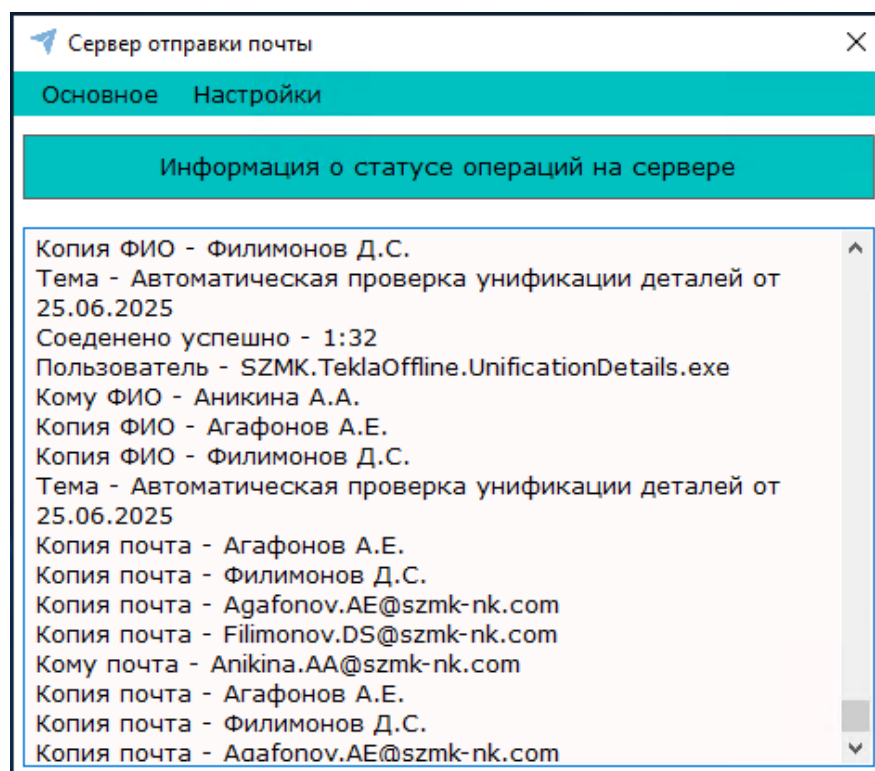


Рисунок 4.17 – Интерфейс настройки сервера рассылки SZMK.ServerMailing

Для обеспечения полной информационной связности программный комплекс «SZMK» интегрирован с системой управления предприятием 1С ERP. Серверный компонент SZMK.ERPConnect осуществляет периодическую синхронизацию документации и статусов, опрашивая ERP-систему через HTTP-интерфейс и обновляя базу данных комплекса в соответствии с полученными изменениями. Это позволяет автоматизированно отслеживать внутренние процессы, происходящие в ERP (например, оформление документации, смену ответственных, выпуск заказов, работу с подрядчиками) и отражать их в логике SZMK. При необходимости синхронизация может быть принудительно инициирована с клиента, а все события регистрации и обновления фиксируются в журнале операций, что упрощает аудит и контроль качества информации.

Визуальный контроль статусов чертежей в составе 3D-модели реализован с помощью клиентского приложения SZMK.TeklaImport (рисунок 4.18). Оно взаимодействует с открытым API Tekla Structures и позволяет инженерам и руководителям окрасить элементы модели в зависимости от текущего состояния соответствующих чертежей в базе данных (рисунок 4.19). Система использует настройки цвета, заданные в конфигурации, для визуального отображения таких состояний, как «Проектируется», «Согласован», «Архивирован», «Передан в цех», «Выпущен» и других. После загрузки модели и анализа статусов пользователь получает на экране интерактивную 3D-картину степени готовности изделия (рисунок 4.20). Это особенно эффективно для оперативного управления большими заказами и распределения ответственности между участниками проекта.

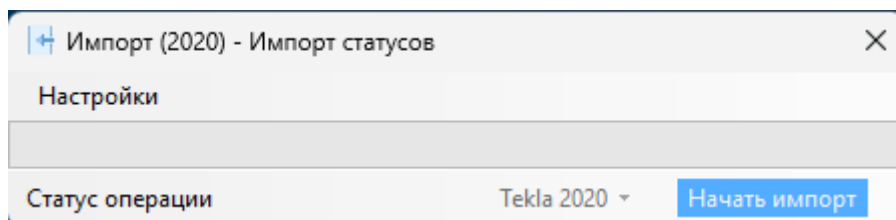


Рисунок 4.18 – Интерфейс взаимодействия с пользователем при импорте статусов в SZMK.TeklaImport

Настройка импорта статусов

Настройки импорта статусов

Тип получения данных	Datamatrix и ERP
Тип получения данных из ERP	По выставленной дате
Кол-во дней	100
Дата	1 июня 2023 г.
Заказ на производство	Да
Номера заказов ERP	Нет
Искать загруженное из Tekla	Да
Период по истории документов	Да

Открыть шаблонный файл Excel Отмена Принять

Рисунок 4.19 – Интерфейс настройки импорта статусов в SZMK.TeklaImport

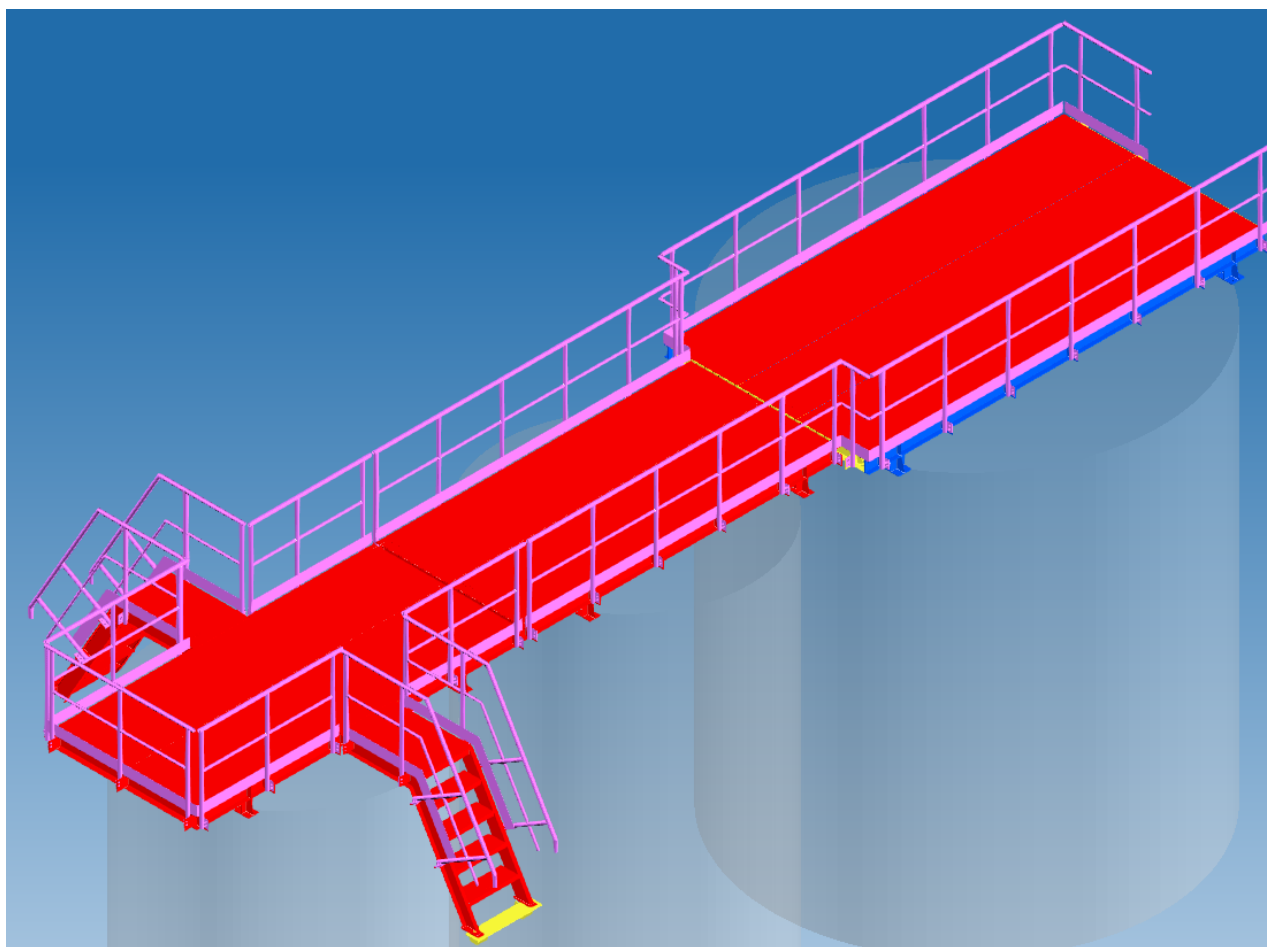


Рисунок 4.20 – Результат импорта статусов в SZMK.TeklaImport

Для автоматической генерации такой визуализации предусмотрен серверный модуль SZMK.TeklaOffline.TeklaImport, который работает без участия пользователя, загружает модель, получает статусы всех компонентов из базы и экспортирует результат в формате IFC. Этот файл может быть просмотрен в любом IFC-визуализаторе, предоставляя возможность удалённого контроля состояния проекта, включая мобильные устройства или внешние системы управления строительством.

Дополнительно комплекс поддерживает формирование расширенной отчётности и вычислений по физическим характеристикам конструктивных элементов. Для этого реализована библиотека SZMK.CustomAttribute, включающая расширенные атрибуты, доступные в Tekla Reports и Tekla API. Среди них – расчёт площади поперечного сечения сварного шва, длины швов, объёма металла, потребного для сварки, и, соответственно, массы сварочного материала. Такие параметры позволяют уточнять спецификации, корректно рассчитывать потребление ресурсов и формировать точную производственную документацию. Это критически важно при серийном производстве и работе с ГОСТ-нормативами.

4.5 Выводы по главе 4

1. Разработана архитектура учёта чертежей, включающая централизованное хранение, контроль версионности, процедуры архивирования и механизмы оповещения/мониторинга целостности. Для каждого документа формализован состав атрибутов (идентификатор, копии в нескольких форматах, реквизиты, статусная информация, история действий), что обеспечивает полноту представления и возможность регламентированного управления.

2. Реализована формальная модель версионности проектной документации на основе системы нумерации версий и автоматизированного сравнения параметров, позволяющая однозначно идентифицировать актуальную ревизию, фиксировать причины обновлений и исключать повторное использование устаревших документов. Связь версионности со статусной моделью обеспечивает управляемость переходов и автоматическую верификацию.

3. Предложен и встроен в контур архивирования алгоритм автоматической обработки цифровых изображений чертежей с извлечением встроенных меток и верификацией соответствия сканов исходным данным. Применение предобработки, локализации области кода, пиксельного прохода и проверки корректности структуры данных позволило повысить устойчивость процедуры к искажениям и исключить ручную привязку архивных копий к записям базы данных.

4. Разработан механизм обработки 3D-модели, включающий извлечение геометрических и технологических параметров, проверку корректности заполнения атрибутов, контроль комплектности документации и сопоставление экспортированных данных с данными модели. Реализована пошаговая фильтрация проверок, позволяющая выявлять типовые нарушения проектной дисциплины (ошибки нумерации, расхождения модель–чертёж, устаревшие шаблоны, отсутствие маркировки) и блокировать передачу некорректной документации в производственный контур.

5. Обоснована и реализована асинхронная модель интеграции с внешней ERP-системой, обеспечивающая синхронизацию статусов и устойчивость к задержкам и сбоям канала связи. Введены правила сопоставления статусов, фиксации событий в журнале, контроль версионного соответствия и уведомление ответственных лиц при выявлении расхождений, что обеспечивает непрерывность информационного потока между средой проектирования и средой исполнения.

6. Реализован модуль мониторинга «потерянных» чертежей, основанный на анализе разрывов в цепочке статусов, проверке отсутствующих версий, контроле превышения времени нахождения на стадии и верификации целостности логических групп. Автоматическая генерация уведомлений в пакетном и событийном режимах обеспечивает раннее выявление отклонений от нормативного сценария и снижает вероятность сбоев на последующих стадиях производства.

7. Сформулированы принципы проектирования и интеграции функциональных модулей комплекса на основе существующих CAD/ERP-решений и функционального моделирования IDEF0, что позволило выявить информационные разрывы и определить требования к целостному цифровому сопровождению проектных

данных. Выбор технологического стека (C#, PostgreSQL, TCP/IP, HTTP, Tekla Open API) и разработка ключевых компонентов обеспечили надёжность, расширяемость и высокую степень автоматизации документооборота.

8. Реализована техническая архитектура комплекса, включающая типизированную объектную модель и централизованную библиотеку сущностей, обеспечивающую согласованность логического уровня и системы хранения. Применение механизмов валидации действий пользователя, централизованного обновления, фонового планирования задач, визуального контроля статусов в 3D-модели и автоматизированных расчётных атрибутов сформировало сквозной цифровой контур управления, направленный на снижение влияния человеческого фактора и повышение прозрачности процессов подготовки и исполнения заказов.

9. Функциональные возможности системы реализованы в виде набора специализированных программных модулей, каждый из которых решает отдельную задачу управления жизненным циклом проектной документации. Модульное построение комплекса обеспечивает разделение ответственности между компонентами, минимизацию пересечений функциональности, повышение отказоустойчивости и упрощение сопровождения и развития системы.

5 АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВНЕДРЕНИЯ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА

5.1 Проверка адекватности алгоритма унификации проектных элементов

Для оценки эффективности и адекватности предложенного механизма формирования унифицированных технологий производства элементов металлоконструкций было проведено экспериментальное моделирование на выборке из 150 проектных деталей, отобранных из архивных 3D-моделей, разработанных в среде автоматизированного проектирования Tekla Structures. Выборка формировалась таким образом, чтобы включать элементы, различающиеся по геометрическим параметрам, материалу и конструктивной конфигурации, но потенциально допускающие технологическую унификацию.

Каждая деталь описывалась совокупностью числовых, категориальных и структурных признаков, отражающих её геометрические, физические и технологические характеристики. К числовым признакам относились параметры, характеризующие размеры и массу изделия, включая линейные габариты, массу, а также метрические характеристики отверстий. Категориальные признаки описывали материал и тип конструктивного исполнения элементов и включали тип профиля, марку стали и способ обработки поверхности. Структурные признаки отражали конфигурацию элементов и их топологические особенности, такие как количество сварных и стыковочных соединений, число вырезов, наличие фасонных элементов и форма контура, определяющая пространственную сложность модели.

Предварительная обработка данных включала нормализацию числовых параметров, формализованное кодирование категориальных признаков методом one-hot, бинаризацию структурных характеристик. В результате была сформирована итоговая матрица данных размерностью 150×18 , обеспечивающая комплексное представление элементов металлоконструкций в многомерном признаковом пространстве.

В рамках экспериментального исследования использовалась модифицированная версия алгоритма нечеткой кластеризации Fuzzy C-Means, ключевой особенностью которой является применение механизма комплексной оценки разнородных признаков с использованием весовых коэффициентов, учитывающих различную значимость геометрических, технологических и структурных характеристик для формирования унифицированных технологий производства.

Для обоснованного определения значений весовых коэффициентов была реализована процедура экспертного оценивания методом прямого ранжирования значимости групп признаков. В экспертную группу вошли 9 специалистов предприятия, представляющих конструкторское, технологическое и производственное направления, непосредственно участвующие в разработке проектной документации и подготовке производства металлических конструкций. Экспертам предлагалось оценить влияние числовых, категориальных и структурных признаков на возможность технологической унификации деталей по 10-балльной шкале. На основе агрегирования и нормализации экспертных оценок были получены весовые коэффициенты, приведённые в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Определение весовых коэффициентов групп признаков на основе экспертных оценок

Группа признаков	Сумма рангов	Весовой коэффициент	Интерпретация значимости
Категориальные	81	0,45	Несовпадение делает унификацию невозможной
Структурные	61	0,34	Определяют сложность переналадки оборудования
Числовые	38	0,21	Допускают вариативность без изменения технологии

Согласованность мнений экспертов была подтверждена коэффициентом конкордации Кендалла, значение которого составило $W = 0,78$. Полученные весовые коэффициенты были интегрированы в целевую функцию модифицированного алгоритма нечеткой кластеризации.

Оптимальное количество кластеров определялось по критерию Fuzzy Partition Coefficient (FPC) максимум которого был достигнут при $c = 7$, что принято за основу.

Характеристики сформированных кластеров приведены в таблице 5.2. Каждый кластер интерпретируется как класс элементов, для которых возможно применение единой унифицированной технологической схемы производства.

Таблица 5.2 – Краткая характеристика кластеров

№ Кластера	Средняя масса (кг)	Тип профиля	Кол-во уникальных позиций	Средняя степень принадлежности
1	12,3	Двутавр	17	0,84
2	4,7	Уголок	15	0,79
3	22,1	Швеллер	13	0,88
4	13,5	Двутавр	12	0,83
5	8,2	Уголок	15	0,81
6	17,4	Швеллер	14	0,80
7	5,9	Уголок	13	0,76

Для подтверждения адекватности полученного разбиения и установления порогового значения степени принадлежности элемента кластеру была проведена процедура экспертной верификации результатов кластеризации.

Экспертам предоставлялись пары «центр кластера – элемент» с различными значениями степени принадлежности для вынесения заключения о возможности использования единой технологической схемы производства. Оценка проводилась на основе анализа геометрических параметров, структуры соединений, материала и особенностей производственного маршрута.

Анализ результатов экспертной верификации показал, что зона уверенного отнесения элемента к кластеру соответствует значениям степени принадлежности $u_{ik} \geq 0,75$. Указанное значение было принято в качестве порогового критерия для автоматического принятия решений о технологической унификации. Элементы со значениями $0,60 \leq u_{ik} < 0,75$ рассматривались как пограничные и направлялись на дополнительный анализ, тогда как элементы с меньшими значениями признавались уникальными.

С учётом установленного порога был проведён сравнительный анализ показателей процесса подготовки производства до и после применения разработанного подхода, результаты которого представлены в таблице 5.3.

Таблица 5.3 – Сравнение показателей до и после применения, модифицированного FCM

Показатель	До кластеризации	После внедрения FCM с МКО
Количество уникальных позиций	150	45
Среднее количество деталей в группе	1,0	3,3
Среднее время на обработку одной позиции	12,4 мин	8,1 мин
Процент вручную скорректированных	100%	8 %

Результаты экспериментального моделирования показали, что применение модифицированного алгоритма Fuzzy C-Means с механизмом комплексной оценки признаков позволило сократить количество уникальных проектных позиций на 70 % и снизить трудоёмкость технологической подготовки производства на 35 %. Средняя степень принадлежности элементов к кластерам составила 0,82, при этом в 92 % случаев значения принадлежности превышали установленный экспертами порог 0,75, что свидетельствует о высокой надёжности и практической применимости полученных результатов.

Внедрение модифицированного алгоритма Fuzzy C-Means с механизмом комплексной оценки признаков в производственную среду создаёт условия для реализации унификации проектных данных, снижения дублирования конструкторских решений и повышения степени стандартизации номенклатуры элементов металлоконструкций. Полученные результаты формируют количественную и методическую основу для дальнейшей интеграции алгоритма в подсистемы верификации моделей и формирования библиотек типовых элементов в составе программного комплекса.

5.2 Оценка эффективности внедрения программного комплекса

В целях формальной верификации достигнутого эффекта от внедрения программного комплекса «SZMK» был проведён структурированный сравнительный анализ производственной активности предприятия ООО «СЗМК». Особое внимание было уделено характеристикам документооборота, операционной производительности и количеству технологических ошибок. Анализ охватывает два трёхмесячных периода: до цифровизации и после её внедрения.

Для анализа были выбраны метрики, отражающие ключевые аспекты производственного процесса. Эти показатели соответствуют критериям оптимизации, обозначенным в задачах диссертационного исследования (таблица 5.4).

Таблица 5.4 – Перечень исследуемых метрик и их интерпретация

№	Наименование метрики	Интерпретация	Тип данных
1	Среднее время от проектирования до передачи в цех	Временной интервал, охватывающий все этапы проектирования, согласования и маршрутизации	Количественная
2	Количество утерянных или повторно напечатанных чертежей	Количество случаев, когда чертеж не был найден или был воспроизведён из-за потери/ошибки	Абсолютная
3	Количество ошибок унификации проектных элементов	Число некорректно унифицированных проектных элементов	Количественная
4	Среднее количество ручных операций на один чертёж	Число ручных действий: сканирование, проверка вручную, перемещение по директориям и статусам	Количественная
5	Доля возвратов на доработку после КБ	Отношение количества возвращённых чертежей к общему числу, в процентах	Относительная
6	Процент просрочек переходов между статусами	Доля случаев, когда интервал между статусами превышает установленное нормативное значение	Относительная

Анализ проводился по принципу сопоставления агрегированных и индивидуальных значений показателей с учётом их динамики, стабильности и повторяемости во времени. Были применены методы описательной статистики и сравнительной оценки, включая вычисление процентных изменений, медианных сдвигов, а также построение перцентильных границ для оценки отклонений. Такой подход позволил не только зафиксировать числовое снижение рисков и трудозатрат, но и выявить устойчивые закономерности в изменении поведения системы после внедрения цифровых инструментов, что является необходимым условием для формальной фиксации эффекта оптимизации в инженерно-управленческой среде.

Сравнение значений производилось по абсолютным и относительным показателям. Дополнительно использовались методы описательной статистики: медиана, дисперсия, 90-й перцентиль, и оценка долей. Изменения интерпретировались как значимые при превышении порога в 15 % при стабильных исходных значениях. Результаты агрегированного анализа приведены в таблице 5.5.

Таблица 5.5 – Сравнительные показатели процесса до и после внедрения

№	Наименование метрики	До внедрения	После внедрения	Изменение, %
1	Среднее время от проектирования до передачи в цех (сутки)	11	7,7	30 %
2	Количество утерянных или повторно напечатанных чертежей (шт.)	20	11	45 %
3	Количество ошибок унификации проектных элементов	36	10	70 %
4	Среднее количество ручных операций на один чертёж	3,2	1,6	50 %
5	Возвраты на доработку после КБ (в % от общего числа)	15%	9,0%	40 %
6	Процент просрочек переходов между статусами	32%	9,6%	70 %

Источником информации послужили структурированные данные производственной базы, включая лог-файлы обработки чертежей, метки времени перехо-

дов между статусами, архив ошибок и записи маршрутов документации. В совокупности обработано 814 чертежей, прошедших полный цикл от проектирования до передачи в цех. Каждый чертёж был сопоставлен с результатами верификации, а также контролем отклонений по срокам и содержанию.

Наибольшее изменение зафиксировано по метрикам, связанным с потерей чертежей и возвратами после КБ. Также существенное влияние оказала автоматизация архивации и контроля версий.

Средняя длительность обработки одного заказа сократилась с 11 до 7,7 суток, что эквивалентно снижению на 30 % (рисунок 5.1). Данное улучшение достигнуто благодаря автоматизации маршрутизации, валидации на этапе экспорта и снижению количества возвратов, вызванных несогласованностью между моделью и чертежами.

Доля чертежей, возвращённых после прохождения КБ на доработку, снизилась с 15 % до 9,0 % (рисунок 5.2).

До внедрения комплекса зафиксировано 20 случаев утраты чертежей (или их повторной печати), после – только 11 (рисунок 5.3). Основным фактором улучшения стало внедрение идентификации по DataMatrix-кодам и контроль архивирования с помощью модуля ServerDecode.

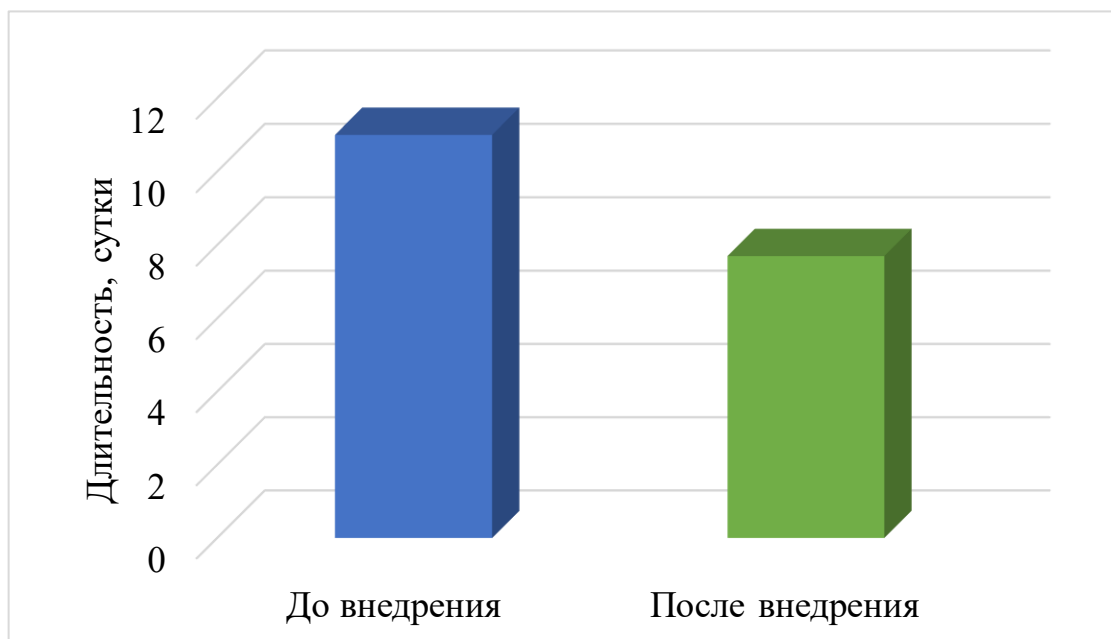


Рисунок 5.1 – Среднее время прохождения заказа

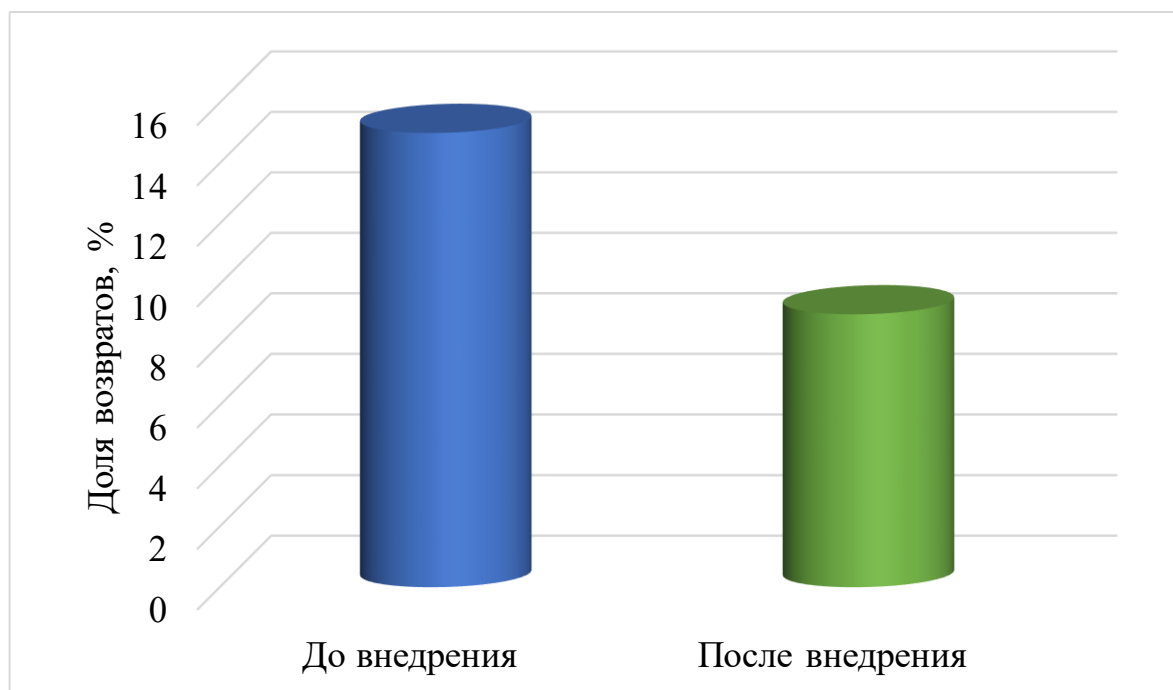


Рисунок 5.2 – Доля возвратов на доработку

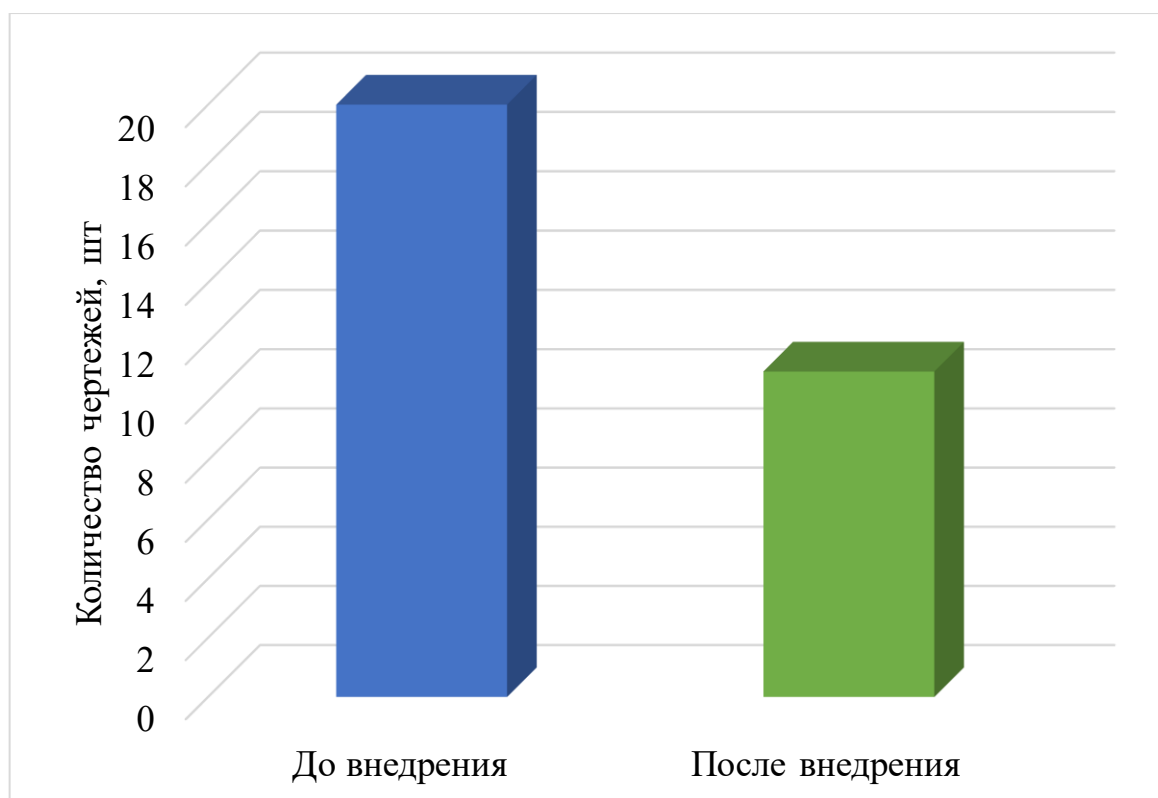


Рисунок 5.3 – Количество утерянных чертежей

Алгоритм нечеткой кластеризации FCM позволил сократить количество ошибок унификации проектных элементов с 36 до 10, что снизило нагрузку на си-

стему подготовки производства и позволило внедрить типовые маршруты. За счёт группировки схожих деталей по признакам геометрии, профиля и технологии обработки удалось устранить дублирование в номенклатуре, ранее возникавшее из-за различий в позиционных номерах при фактической идентичности элементов. Это подтверждается также результатами раздела 5.1, где приведён формализованный анализ кластеров и степень принадлежности элементов, обосновывающая корректность проведённой унификации.

Помимо снижения номинального количества проектных позиций, кластеризация позволила оптимизировать структуру спецификаций и маршрутных карт, за счёт чего уменьшилось количество индивидуальных операций при подготовке к производству. Сформированные унифицированные группы деталей стали основой для создания типовых производственных шаблонов, сокращающих затраты на настройку оборудования и переналадку. Это, в свою очередь, обеспечило повышение повторяемости процессов и упростило контроль качества на сборочных участках, особенно в условиях серийного производства.

Дополнительным эффектом унификации стало упрощение планирования производственных операций и снижение вариативности технологических маршрутов. Это позволило повысить предсказуемость сроков выполнения работ и обеспечить более стабильную загрузку оборудования и персонала.

Среднее количество ручных операций на один чертёж (подписи, сканирование, перемещение между директориями и статусами) снизилось более чем в два раза: с 3,2 до 1,6 (рисунок 5.4). Это обеспечено интеграцией модулей сканирования, автоматического маршрута и механизмов защиты от дублирования.

Снижение ручных операций в структуре процесса сопровождалось качественным изменением характера взаимодействия сотрудников с системой. Ранее большинство действий выполнялось в оффлайн-режиме: сканирование чертежей, ручное перемещение файлов в архивные директории, формирование отчётов и контроль версий осуществлялись с участием оператора. После внедрения программных модулей SZMK.Desktop и ServerDecode данные операции были переведены в автоматизированный режим с минимальным участием пользователя, сво-

дящимся к сканированию кода и подтверждению операции. Это позволило высвободить до 60 % рабочего времени инженеров и архивариусов, ранее задействованных в рутинных задачах.

Кроме того, резкое снижение количества ручных действий позволило существенно уменьшить вероятность ошибок, связанных с человеческим фактором: случайного удаления файлов, пересохранения устаревших версий или неправильной маркировки чертежей. Введённые программно-защищённые статусы и автоматическая проверка корректности данных перед переходом между этапами значительно повысили надёжность всего цикла. Таким образом, снижение числа ручных операций не только облегчило работу персонала, но и повысило структурную устойчивость документооборота предприятия.

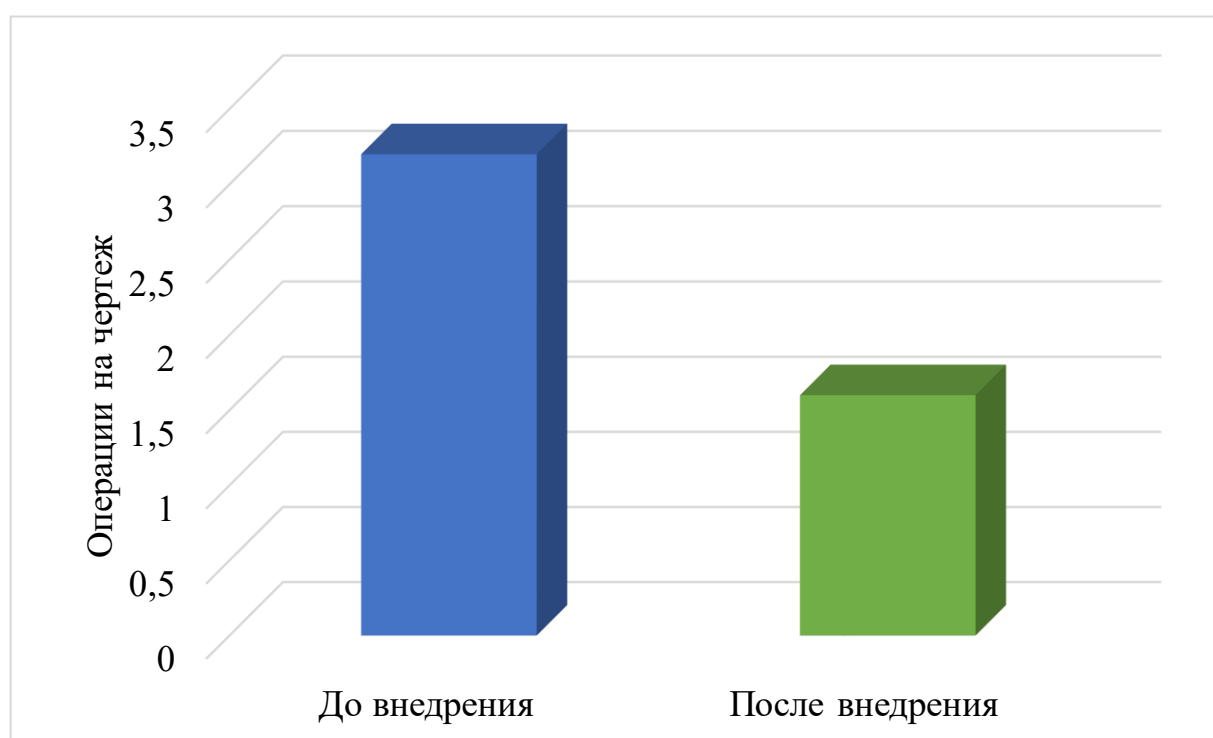


Рисунок 5.4 – Среднее количество ручных операций

Введение контроля времени переходов между статусами и автоматических уведомлений при нарушении регламентов привело к снижению числа просрочек более чем на 70 % (рисунок 5.5). Это критически важно при работе с несколькими цехами и подрядными организациями.

Своевременная фиксация аномалий и оповещение ответственных лиц позволили выстроить более прозрачную и дисциплинированную модель управления производственными документами. Благодаря этому устранены затягивания на этапах согласования и передачи чертежей между подразделениями, что особенно важно при параллельной работе нескольких участников производственного процесса. Автоматизация контроля сроков перешла от пассивного мониторинга к активному вмешательству, формируя у исполнителей устойчивую поведенческую модель соблюдения регламентов. Это создало предпосылки для внедрения KPI по управлению временем документационного цикла и повысило управляемость всего производственного контура.

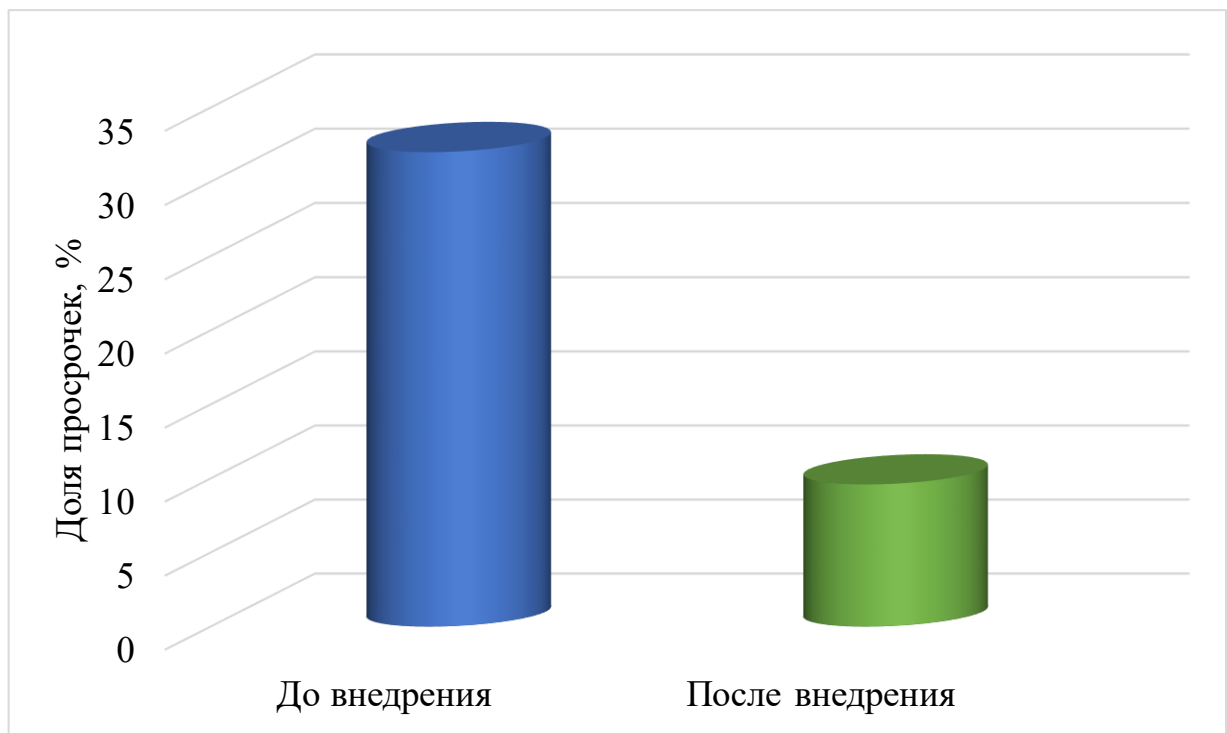


Рисунок 5.5 – Доля просрочек по статусам

Таким образом, внедрение комплекса «SZMK» позволило устранить структурные узкие места в системе обработки чертежей, повысить прозрачность маршрутов документации, и обеспечить согласованность версий без дополнительных операций. Эффект носит устойчивый характер и не зависит от специфики отдельного заказа.

5.3 Выводы по главе 5

1. Выполнена проверка адекватности разработанного механизма унификации проектных элементов, основанного на алгоритме нечеткой кластеризации Fuzzy C-Means с механизмом комплексной оценки разнородных признаков. Экспериментальное моделирование проведено на выборке из 150 деталей, извлечённых из архивных 3D-моделей Tekla Structures, что обеспечило репрезентативность по геометрическим, технологическим и конструктивным характеристикам и позволило оценить применимость метода в условиях реальных производственных данных.

2. Проведена оценка эффективности внедрения программного комплекса «SZMK» на основе структурированного сравнительного анализа двух трёхмесячных периодов до цифровизации и после её внедрения (Приложение И). Для анализа использованы метрики, отражающие ключевые аспекты документооборота, операционной производительности и технологических ошибок, а источником данных выступили структурированные записи производственной базы (логи, метки времени переходов статусов, архив ошибок, маршруты документации). В совокупности обработано 814 чертежей, прошедших полный цикл от проектирования до передачи в цех, что обеспечило статистическую устойчивость выводов.

3. Среднее время от проектирования до передачи документации в цех сократилось с 11 до 7,7 суток (на 30 %), что подтверждает общий эффект ускорения прохождения заказа. Указанное улучшение достигнуто за счёт автоматизации маршрутизации, валидации на этапе экспорта, снижения количества возвратов, а также устранения разрывов между стадиями подготовки и передачи документации, что обеспечило сокращение длительности «ожиданий» между статусами и повышенную согласованность действий участников процесса.

4. Зафиксировано снижение доли возвратов на доработку после прохождения конструкторского бюро с 15 % до 9,0 % (уменьшение на 40 %), что свидетельствует о повышении качества проектной документации и снижении числа несогласованных решений. Данный эффект связан с внедрением механизмов пред-

варительной верификации, контролем соответствия версии чертежа актуальному состоянию модели и формализованными правилами перехода документации между этапами.

5. Количество случаев утраты или повторной печати чертежей снизилось с 20 до 11 (уменьшение на 45 %), что характеризует повышение надёжности учёта и архивирования документации. Основным фактором улучшения явилось внедрение идентификации по DataMatrix-кодам и автоматизированной привязки сканов к записям базы данных, что сократило вероятность ошибок при ручном поиске, перемещении и восстановлении документов.

6. Число ошибок унификации проектных элементов сократилось с 36 до 10 (уменьшение на 70 %), что подтвердило результативность внедрения алгоритма FCM в производственную среду и снижение вариативности номенклатуры, ранее обусловленной человеческим фактором и различиями в позиционных обозначениях при фактической идентичности деталей.

7. Среднее количество ручных операций на один чертёж сократилось с 3,2 до 1,6 (снижение на 50 %), что отражает переход от оффлайн-сопровождения документации к автоматизированным сценариям обработки. Сокращение трудозатрат обеспечено интеграцией механизмов сканирования, автоматической маршрутизации, контроля версий и защиты от дублирования, что минимизировало необходимость ручного перемещения файлов, переименования, проверки и повторной регистрации документов.

8. Снижение доли ручных действий сопровождалось качественным изменением характера взаимодействия сотрудников с системой: операции контроля и обработки документации были переведены в режим формализованных процедур с минимальным участием пользователя, ограниченным сканированием кода и подтверждением операций. За счёт этого было высвобождено до 60 % рабочего времени инженеров и архивариусов, ранее задействованных в повторяющихся задачах, что создало ресурс для усиления функций контроля, анализа и принятия решений.

9. Зафиксировано снижение доли просрочек переходов между статусами с 32 % до 9,6 % (уменьшение более чем на 70 %) за счёт внедрения контроля времени нахождения документа на стадиях и автоматических уведомлений при нарушении регламентов. Своевременная фиксация аномалий и оповещение ответственных лиц обеспечили повышение дисциплины выполнения операций, сократили затягивания на этапах согласования и передачи чертежей и перевели контроль сроков из режима пассивного мониторинга в режим активного управления отклонениями.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является завершённой научно-квалификационной работой, в которой решена актуальная научно-практическая задача повышения эффективности процесса производства металлических конструкций, имеющая значение для развития строительной и машиностроительной отраслей. Цель исследования достигнута за счет формирования структуры жизненного цикла проектной документации и системы управления жизненным циклом, разработки и применения согласованного и эффективного механизма инвестирования в улучшение процесса управления проектной документацией, а также посредством унификации технологии производства металлоконструкций на основе нечеткой кластеризации производимых элементов.

Основные результаты исследования

1. В результате анализа действующей системы управления документацией при производстве металлических конструкций и подходов и способов, применяемых для управления проектной документацией в машиностроительной и строительной отраслях, выявлены их ключевые ограничения, связанные с фрагментарностью информационных потоков, отсутствием формализованной структуры жизненного цикла документации и недостаточной регламентацией операций и контрольных точек. На основе проведённого анализа разработана структура жизненного цикла проектной документации для производства металлических конструкций, рассматриваемая как единый объект управления и обеспечивающая сквозную прослеживаемость состояний, согласованность версий и формализацию взаимодействия между подразделениями.

2. Разработана функциональная структура системы управления жизненным циклом проектной документации, отражающая состав подсистем, их функции и информационные взаимосвязи. С применением методологии функционального моделирования разработаны IDEF0-модели основных процессов стадий жизненного цикла проектной документации, позволившие формализовать последовательность операций, точки контроля и механизмы обратной связи.

3. Разработан и применён механизм формирования классов унифицированных элементов металлических конструкций, основанный на комплексировании алгоритма нечеткой кластеризации Fuzzy C-Means с механизмом комплексной оценки числовых, категориальных и структурных признаков. Предложенный подход обеспечивает корректный учёт геометрических, технологических и конструктивных характеристик элементов, позволяет формировать группы унифицированных элементов без жёсткого задания границ классов и служит основой для унификации технологических схем производства.

4. Разработан согласованный и эффективный механизм управления инвестициями в совершенствование процесса управления проектной документацией, основанный на представлении стадий жизненного цикла в виде управляемых подсистем (агентов), формирующих множества допустимых альтернатив развития. Предложенный механизм предусматривает решение локальных задач оптимизации на уровне подсистем с последующей передачей Парето-оптимальных альтернатив в центр, где задача распределения ресурсов формализуется в виде модифицированной задачи о ранце. Особенностью подхода является отнесение задач подсистем к классу обратных задач управления, а задачи центра к классу прямых задач, что обеспечивает согласование локальных и глобальных целей и позволяет эффективно распределять ограниченные инвестиционные ресурсы.

5. Разработан и внедрён программный комплекс «SZMK», реализующий интеграцию современных программных решений по разработке проектной документации и обеспечивающий автоматизацию ключевых функций усовершенствованных процессов жизненного цикла проектной документации, включая верификацию 3D-моделей, согласование, архивирование, синхронизацию с ERP-системой и систему уведомлений ответственных лиц. Внедрение комплекса позволило сформировать единую информационную среду предприятия и обеспечить актуальность статусов проектной документации в режиме реального времени.

6. Проведена оценка эффективности внедрения программного комплекса, выполненная на основе сравнительного анализа производственных показателей до и после внедрения. Результаты оценки подтвердили сокращение средней длитель-

ности обработки заказов на 30 %, снижение количества утерянных и повторно формируемых чертежей на 45 %, уменьшение числа возвратов на доработку на 40 %, сокращение среднего количества ручных операций на один чертёж на 50 % и снижение доли просрочек переходов между статусами более чем на 70 %, что свидетельствует о повышении управляемости, дисциплины исполнения и прозрачности процессов жизненного цикла проектной документации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Машковцев, И. Б. BIM–технологии в современном строительстве / И. Б. Машковцев // Системные технологии. – 2022. – № 2(43). – С. 48–56. – DOI 10.55287/22275398_2022_2_48.
2. Антонов, А. Использование САПР Tekla Structures различных конфигураций / А. Антонов, А. Емельянов, П. Храпкин // САПР и графика. – 2014. – № 11(217). – С. 10–13.
3. Лебедев, И. В. Системы электронного технического документооборота: три источника, три составные части и масса выгод / И. В. Лебедев // CADmaster. – 2000. – № 3(3). – С. 62–68.
4. Солопова, Е. А. Технологическая подготовка производства : учебное пособие / Е. А. Солопова, С. В. Курынцев. – Москва : Техносфера, 2017. – 256 с.
5. Царев, М. В. Цифровые двойники в промышленности: история развития, классификация, технологии, сценарии использования / М. В. Царев, Ю. С. Андреев // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2021. – Т. 64, № 7. – С. 517–531. – DOI 10.17586/0021–3454–2021–64–7–517–531.
6. Туснин, А. Р. Проектирование и расчет металлических конструкций / А. Р. Туснин, О. А. Туснина. – Москва : НИУ МГСУ, 2020. – 80 с.
7. Ташкенбай, М. Н. Анализ внедрения методологии информационного моделирования зданий (BIM) при проектировании конструкций / М. Н. Ташкенбай // Молодой ученый. – 2021. – № 16(358). – С. 114–116.
8. Талапов, В. В. Технология BIM. Суть и особенности внедрения информационного моделирования зданий / В. В. Талапов. – Москва : Общество с ограниченной ответственностью "ДМК пресс. Электронные книги", 2015. – 410 с. – ISBN 978–5–9706–0291–1.
9. Лебедев, И. В. Системы электронного технического документооборота: три источника, три составные части и масса выгод / И. В. Лебедев // CADmaster. – 2000. – № 3(3). – С. 24–28.

10. Киров, А. В. Методика рассмотрения конструкторской документации представителем заказчика в электронном виде / А. В. Киров // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2019. – № 9. – С. 75–79.
11. Метлицкая, А. С. Особенности организации хранения технической документации в современной организации / А. С. Метлицкая // Молодой ученый. – 2016. – № 8(112). – С. 1278–1281.
12. Новый этап развития цифровизации документооборота – работа с проектной документацией в формате XML / В. И. Денисов, О. Н. Луценко, В. В. Лапковская, Н. М. Тепляков // Известия Томского политехнического университета. Промышленная кибернетика. – 2023. – Т. 1, № 1. – С. 17–23. – DOI 10.18799/29495407/2023/1/5.
13. Buer, S. -. The link between Industry 4.0 and lean manufacturing: mapping current research and establishing a research agenda / S. -. Buer, J. O. Strandhagen, F. Chan. // International Journal of Production Research. – 2018. – № 56. – С. 1-17.
14. Романченко, Е. В. Теоретические и практические аспекты внедрения систем электронного документооборота в холдингах Российской Федерации : специальность 05.25.02 "Документалистика, документоведение, архивоведение" : диссертация на соискание ученой степени кандидата исторических наук / Романченко Елена Валерьевна. – Москва, 2013. – 255 с.
15. Белов, Д. Б. Применение инструментов бережливого производства для повышения качества и эффективности изготовления металлоконструкций / Д. Б. Белов, А. А. Гореликов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2021. – № 10. – С. 490-493. – DOI 10.24412/2071-6168-2021-10-490-494.
16. Пронский, А. В. Технологическая подготовка производства как часть единого информационного пространства / А. В. Пронский, И. В. Матлак, И. С. Додорин // Актуальные проблемы авиации и космонавтики : сборник материалов VIII Международной научно-практической конференции, посвященной Дню космонавтики : в 3 т., Красноярск, 11–15 апреля 2022 года. Том 2. – Красноярск: Фе-

деральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева", 2022. – С. 216–220.

17. Кобченко, С. Н. Методология управления и воздействия при технологической подготовке производства / С. Н. Кобченко, А. И. Ремнев // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. – 2016. – № 4. – С. 74–80.

18. Городецкая, О. Ю. Интеграция CAD/CAM и ERP-систем для мониторинга и управления крупномасштабным мебельным производством / О. Ю. Городецкая, А. Ю. Заложнев // Управление развитием крупномасштабных систем MLSD'2019 : Материалы двенадцатой международной конференции Научное электронное издание, Москва, 01-03 октября 2019 года / под общей ред. С.Н. Васильева, А.Д. Цвиркуна. – Москва: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2019. – С. 1036–1038. – DOI 10.25728/mlsd.2019.1.1036.

19. Иваев, М. И. Внедрение ERP-системы на базе 1С:Предприятие для управления производством / М. И. Иваев, М. В. Журичева, Д. Ф. Кабирова // Индустриальная экономика. – 2025. – № 3. – С. 210–215. – DOI 10.47576/2949–1886.2025.3.3.027.

20. Удальцова, Н. Л. Особенности проектов внедрения ERP-систем как основы автоматизации бизнес-процессов организации / Н. Л. Удальцова, Д. А. Крутских // Креативная экономика. – 2022. – Т. 16, № 6. – С. 2201–2220. – DOI 10.18334/ce.16.6.114816.

21. Маньков, И. А. Цифровая эволюция современного предприятия: анализ процессов автоматизации, цифровизации и цифровой трансформации / И. А. Маньков, Е. С. Гаврилюк // Прогрессивная экономика. – 2024. – № 3. – С. 89–99. – DOI 10.54861/27131211_2024_3_89.

22. Суворова, С. Д. Оптимизация бизнес-процессов: современное состояние исследований и проблемы практической реализации / С. Д. Суворова, А. П. Мозговая // Прогрессивная экономика. – 2023. – № 7. – С. 64–89. – DOI 10.54861/27131211_2023_7_64.

23. Мадера, А. Г. Математическое моделирование и оптимизация бизнес-процессов на основе комплексного критерия "шансы – риски" / А. Г. Мадера // Российский журнал менеджмента. – 2015. – Т. 13, № 4. – С. 51–68.
24. Касаткин, Д. Л. Управление качеством в машиностроении : монография / Д. Л. Касаткин. – Екатеринбург: УрФУ, 2021. – 198 с.
25. Adopting quality management practices in the industry 4.0 era: an investigation into the challenges / Fadilasari, Diska, Ghatak Roy [и др.]. // Total Quality Management & Business Excellence. – 2024. – С. 1-26.
26. Шишигина, И. В. Моделирование бизнес-процессов в ARIS: учебное пособие / И. В. Шишигина. – Москва : ИНФРА-М, 2018. – 214 с.
27. Базаров, Б. О. Цифровая трансформация предприятий / Б. О. Базаров. – Москва : Дашков и К°, 2020. – 304 с.
28. Аракчеев, Д. В. Механизм управления цифровой трансформацией экономической деятельности промышленных предприятий / Д. В. Аракчеев // Наука Красноярья. – 2023. – Т. 12, № 2-1. – С. 127-142. – DOI 10.12731/2070-7568-2023-12-2-127-142.
29. Байорис, А. Р. Autodesk Revit как эффективный инструмент создания информационной модели объекта недвижимости / А. Р. Байорис, М. А. Малиновский // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2020. – Т. 7, № 2. – С. 127–133. – DOI 10.33764/2618–981X–2020–7–2–127–133.
30. Теличенко, В. И. Информационное моделирование технологий и бизнес-процессов в строительстве / В. И. Теличенко, А. А. Лapidус, А. А. Морозенко. – Москва : Издательство АСВ, 2018. – 145 с.
31. Ефремова, Л. И. Выбор системы электронного документооборота для предприятия / Л. И. Ефремова, А. О. Колекина // Вестник Волжского университета им. В.Н. Татищева. – 2019. – Т. 2, № 1. – С. 23–31.
32. Шутова, М. Н. Применение BIM-технологий при разработке архитектурных, конструктивных и организационно-технологических решений промышленного здания / М. Н. Шутова, А. А. Плахутина, В. А. Кужелева // Строительство

и архитектура. – 2021. – Т. 9, № 4. – С. 71–75. – DOI 10.29039/2308–0191–2021–9–4–71–75.

33. Аверченков, А. В. Автоматизация технологической подготовки производства для малых инновационных предприятий в машиностроении : специальность 05.13.06 "Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (по отраслям)" : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Аверченков Андрей Владимирович. – Саратов, 2012. – 280 с.

34. Кожемякина, В. И. Параметрическое изменение значений атрибутов элементов в ПО Tekla Structures средствами программы Grasshopper / В. И. Кожемякина // Тенденции развития науки и образования. – 2022. – № 81–1. – С. 40–44. – DOI 10.18411/trnio–01–2022–13.

35. Кожемякина, В. И. Параметрическое изменение значений атрибутов элементов в ПО Tekla Structures средствами программы Grasshopper / В. И. Кожемякина // Тенденции развития науки и образования. – 2022. – № 81–1. – С. 40–44. – DOI 10.18411/trnio–01–2022–13.

36. Строгалева, В. П. Имитационное моделирование / В. П. Строгалева, И. О. Толкачева. – Москва : МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018. – 295 с. – ISBN 978–5–7038–4825–8.

37. Акопов, А. С. Имитационное моделирование : учебник и практикум / А. С. Акопов. – Москва : Издательство Юрайт, 2019. – 389 с. – ISBN 978–5–534–02528–6.

38. Ревина, И. В. Имитационное моделирование производственного процесса изготовления деталей / И. В. Ревина, Г. Н. Бояркин // Омский научный вестник. – 2018. – № 6(162). – С. 230–234. – DOI 10.25206/1813–8225–2018–162–230–234.

39. Попов, Е. В. Бережливое производство : учебник / Е. В. Попов – Москва : Юрайт, 2021. – 256 с.

40. Туркова, А. А. Бережливое производство как фактор повышения производительности труда / А. А. Туркова, А. Р. Курбанаева // Инновационная наука. – 2019. – № 6. – С. 120–122.
41. Трофимов, О. В. Внедрение бережливого производства для повышения эффективности деятельности оборонных предприятий Нижегородской области / О. В. Трофимов, А. Г. Саакян // Креативная экономика. – 2019. – Т. 13, № 7. – С. 1475–1482. – DOI 10.18334/ce.13.7.40826.
42. Денисенко, В. Ю. Автоматизация производственных бизнес-процессов в условиях Индустрии 4.0 на промышленных предприятиях / В. Ю. Денисенко // Вопросы инновационной экономики. – 2020. – Т. 10, № 2. – С. 1007–1014. – DOI 10.18334/vines.10.2.100878.
43. Бабкин, А. В. Индустрия 4.0: экономика, управление, производство / А. В. Бабкин. – Санкт-Петербург : Политех-пресс, 2017. – 350 с.
44. Баланов, А. Н. Цифровая трансформация бизнеса : учебное пособие для вузов / А. Н. Баланов. – Санкт-Петербург : Лань, 2024. – 528 с. – ISBN 978–5–507–49622–8.
45. Тимофеев, П. Г. Роль и значение PDM-систем при разработке технологического оборудования / П. Г. Тимофеев, А. Г. Ягопольский // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2016. – № 10(679). – С. 73–81.
46. Абрамова, И. Г. Эффективность внедрения PDM – систем на машиностроительных предприятиях / И. Г. Абрамова, Д. А. Абрамов, Р. М. Богомолов // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва. – 2009. – № 3–2(19). – С. 304–310.
47. Смирнова, К. В. Автоматизация склада с применением технологии штрихкодирования / К. В. Смирнова, Е. Д. Мещихина // Современные проблемы и перспективы социально-экономического развития предприятий, отраслей, регионов, Йошкар-Ола, 23–26 мая 2018 года. – Йошкар-Ола: Поволжский государственный технологический университет, 2018. – С. 206–211.
48. Авдеева, И. Л. Использование RFID-технологий в управлении производственными экономическими системами в условиях реализации четвёртой про-

мышленной революции / И. Л. Авдеева, Т. А. Головина, А. В. Полянин // Организатор производства. – 2019. – Т. 27, № 3. – С. 33-45. – DOI 10.25987/VSTU.2019.16.82.003.

49. Бикмурзина, А. И. Преимущества использования DataMatrix-кодов при акцизном регулировании торговли / А. И. Бикмурзина // Вестник науки. – 2023. – Т. 1, № 4(61). – С. 35–44.

50. Кривсунова, М. Д. Переход на юридически значимый документооборот с контрагентами в рамках повышения эффективности производственных процессов / М. Д. Кривсунова, И. А. Губаева // Региональные проблемы преобразования экономики. – 2021. – № 8(130). – С. 148–153. – DOI 10.26726/1812–7096–2021–8–148–153.

51. Синелюбов, М. А. Анализ методов производства и характеристик металлоконструкций / М. А. Синелюбов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2024. – № 3. – С. 129–131. – DOI 10.24412/2071–6168–2024–3–129–130.

52. Аникиенко, Н. Н. Менеджмент качества выпускаемой продукции предприятий по производству металлоконструкций / Н. Н. Аникиенко, И. А. Савченко // Baikal Research Journal. – 2021. – Т. 12, № 4. – DOI 10.17150/2411–6262.2021.12(4).5.

53. Гульпенко, К. В. Эффективное управление бизнес-процессов, снижения рисков и внутреннего контроля / К. В. Гульпенко, Е. В. Попова // Экономика и предпринимательство. – 2023. – № 3(152). – С. 746-751. – DOI 10.34925/EIP.2023.152.3.145.

54. Аникин, Б. А. Аутсорсинг и аутстаффинг: высокие технологии менеджмента / Б. А. Аникин, И. Л. Рудая. – Москва : ИНФРА-М, 2017. – 332 с.

55. Кирилова, Г. А. Промышленный аутсорсинг как способ повышения эффективности предприятия / Г. А. Кирилова // Современные тенденции в экономике и управлении: новый взгляд. – 2013. – № 19. – С. 126–131.

56. Кузнецова, А. С. Этапы перехода предприятия на аутсорсинг / А. С. Кузнецова // Наука и современность. – 2011. – № 9–2. – С. 188–192.

57. Аутсорсинг как инструмент повышения конкурентоспособности промышленного предприятия / П. Г. Рябчук, А. В. Федосеев, Л. С. Мурыгина [и др.] // Вестник Алтайской академии экономики и права. – 2021. – № 10–2. – С. 167–172. – DOI 10.17513/vaael.1883.
58. Юмашева, И. А. Оценка эффективности перехода предприятия на аутсорсинг / И. А. Юмашева, Д. С. Семенова // Экономика и управление. – 2022. – Т. 28, № 2. – С. 159–175. – DOI 10.35854/1998–1627–2022–2–159–175.
59. Ершов, П. А. Субконтрактация как механизм кооперации промышленных предприятий и торговых организаций (на примере Новосибирской области) / П. А. Ершов // Российское предпринимательство. – 2017. – Т. 18, № 9. – С. 1507–1522. – DOI 10.18334/rp.18.9.37864.
60. Янина, Т. Ф. Развитие производственной кооперации в России / Т. Ф. Янина // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. – 2006. – № 4(25). – С. 25–29.
61. Шутова, М. Н. Применение BIM-технологий при разработке архитектурных, конструктивных и организационно-технологических решений промышленного здания / М. Н. Шутова, А. А. Плахутина, В. А. Кужелева // Строительство и архитектура. – 2021. – Т. 9, № 4. – С. 71–75. – DOI 10.29039/2308–0191–2021–9–4–71–75.
62. Хрусталева, И. Н. Автоматизация технологической подготовки единичного и мелкосерийного производства / И. Н. Хрусталева, С. А. Любомудров, П. И. Романов // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. – 2018. – Т. 24, № 1. – С. 113–121. – DOI 10.18721/JEST.240111.
63. Кольцова, М. К. Методы оптимизации производственных процессов / М. К. Кольцова. – Санкт–Петербург : Политех-пресс, 2017. – 180 с.
64. Степанова, Э. В. Мировой опыт производства металлоконструкций / Э. В. Степанова, Я. А. Сотникова // Эпоха науки. – 2015. – № 4. – С. 103.
65. Металлические конструкции. Общий курс. : учебник для вузов / под ред. Е.И. Беленя. – 6-е изд., перераб. и доп. – Москва : Стройиздат, 1986. – 560 с.

66. Проектирование металлических конструкций. Ч. 1. Материалы и основы проектирования : учебник для вузов / под ред. Г. С. Веденикова и др. – Москва : Стальразвитие, 2019. – 520 с.
67. Рачков, М. Ю. Автоматизация производства : учебник для среднего профессионального образования / М. Ю. Рачков. – 2-е изд., испр. и доп. – Москва : Издательство Юрайт, 2021. – 182 с. – ISBN 978–5–534–12973–1.
68. Zhan, Z. Application of BIM Technology in the Construction Phase of Steel Structure Engineering / Z. Zhan. // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2021. – № 783. – С. 1-6.
69. Металлические конструкции. Справочник проектировщика. Т. 3 / под ред. В. В. Кузнецова. – Москва : Стройиздат, 2003. – 752 с.
70. Проектирование металлических конструкций. Ч. 2: Специальный курс : учебник для вузов / под ред. Г. С. Веденикова и др. – Москва : Стальразвитие, 2020. – 540 с.
71. Кузнецов, В. В. Металлические конструкции : учебник / В. В. Кузнецов. – Москва : АСВ, 2012. – 688 с.
72. Егорова, Д. К. Применение нечеткого алгоритма кластеризации с-means для сегментации изображений / Д. К. Егорова, М. К. Гамидова // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. – 2019. – Т. 46, № 4. – С. 34–42.
73. Миниахметов, Р. М. Интеграция алгоритма кластеризации Fuzzy c-Means в PostgreSQL / Р. М. Миниахметов, М. Л. Цымблер // Вычислительные методы и программирование. – 2012. – Т. 13, № 2. – С. 46–52.
74. Жербин, М. М. Металлические конструкции: вопросы и ответы / М. М. Жербин, В. А. Владимирский. – Москва : АСВ, 2015. – 320 с.
75. Рачков, М. Ю. Автоматизация производства : учебник / М. Ю. Рачков. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва : Юрайт, 2025. – 190 с.
76. Tkachenko Impact of Structural Steel Detailing Accuracy on Reducing Errors in The Fabrication and Erection of Steel Structures / Tkachenko, Pavlo. // Interna-

tional Research Journal of Advanced Engineering and Technology. – 2026. – № 04. – С. 19-27.

77. Ведеников, Г. С. Металлические конструкции: задачи и примеры / Г. С. Ведеников [и др.]. – Москва : Высшая школа, 1989. – 320 с.

78. Adoption of building information modeling in Chinese construction industry: The technology-organization-environment framework / Y. Chen, Y. Yin, G. Browne, D. Li. // Engineering, Construction and Architectural Management. – 2019. – № 26. – С. 1878–1898.

79. Воронов, М. В. Автоматическое управление. Управление организационными системами. Цифровые платформы : учебник для вузов / М. В. Воронов, В. И. Пименов, И. А. Небаев. – Москва : Издательство Юрайт, 2025. – 475 с. – ISBN 978–5–534–19845–4.

80. Волкова, В. Н. Управление в открытых системах : учебник для вузов / В. Н. Волкова. – Москва : Издательство Юрайт, 2025. – 566 с. – (Высшее образование). – ISBN 978–5–534–18060–2.

81. Коргова, М. А. Менеджмент. Управление организацией : учебник для среднего профессионального образования / М. А. Коргова. – 3-е изд., испр. и доп. – Москва : Издательство Юрайт, 2025. – 206 с. – (Профессиональное образование). – ISBN 978–5–534–18729–8.

82. Бурков, В. Н. Механизмы функционирования организационных систем / В. Н. Бурков. – Москва : Наука, 1981. – 383 с.

83. Бурков, В. Н. Как управлять организациями / В. Н. Бурков, Д. А. Новиков. – Москва : Синтег, 2004. – 400 с.

84. Бурков, В. Н. Модели и механизмы теории активных систем в управлении качеством подготовки специалистов / В. Н. Бурков, Д. А. Новиков. – Москва : ИЦ, 1998. – 158 с.

85. Волкова, В. Н. Теория систем и системный анализ : учебник для вузов / В. Н. Волкова, А. А. Денисов. – 3-е изд. – Москва : Издательство Юрайт, 2025. – 562 с. – (Высшее образование). – ISBN 978–5–534–14945–6.

86. Прокофьева, Т. А. Системный анализ в менеджменте : учебник для вузов / Т. А. Прокофьева, В. В. Челноков. – Москва : Издательство Юрайт, 2021. – 313 с. – (Высшее образование). – ISBN 978–5–534–10451–6.

87. Кузнецов, Ю. В. Теория организации : учебник и практикум для вузов / Ю. В. Кузнецов, Е. В. Мелякова. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва : Издательство Юрайт, 2021. – 351 с. – (Высшее образование). – ISBN 978–5–534–02949–9.

88. Волкова, В. Н. Теория систем и системный анализ : учебник для академического бакалавриата / В. Н. Волкова, А. А. Денисов. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Издательство Юрайт, 2019. – 462 с. – (Высшее образование). – ISBN 978–5–534–02530–9.

89. Грибов, В. Д. Основы управленческой деятельности : учебник и практикум для среднего профессионального образования / В. Д. Грибов, Г. В. Кисляков. – Москва : Издательство Юрайт, 2018. – 335 с. – (Профессиональное образование). – ISBN 978–5–9916–5904–8.

90. Системный анализ : учебник и практикум для вузов / под общей редакцией В. В. Кузнецова. – Москва : Издательство Юрайт, 2020. – 270 с. – (Высшее образование). – ISBN 978–5–9916–8591–7.

91. Теория менеджмента : учебник и практикум для академического бакалавриата / ответственный редактор В. Я. Афанасьев. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Издательство Юрайт, 2019. – 665 с. – (Бакалавр. Академический курс). – ISBN 978–5–9916–4368–9.

92. Попова, Е. П. Теория организации : учебник и практикум для бакалавриата и магистратуры / Е. П. Попова, К. В. Решетникова. – Москва : Издательство Юрайт, 2018. – 338 с. – (Бакалавр и магистр. Академический курс). – ISBN 978–5–534–00766–4.

93. Digital twin-based designing of the configuration, motion, control, and optimization model of a flow-type smart manufacturing system / Q. Liu, J. Leng, D. Yan [и др.]. // Journal of Manufacturing Systems. – 2020. – № 58. – С. 1–13.

94. Зараменских, Е. П. Информационные системы: управление жизненным циклом : учебник и практикум для среднего профессионального образования

/ Е. П. Зараменских. – Москва : Издательство Юрайт, 2019. – 431 с. – (Профессиональное образование). — ISBN 978–5–534–11624–3.

95. Рыжко, А. Л. Информационные системы управления производственной компанией : учебник для вузов / А. Л. Рыжко, А. И. Рыбников, Н. А. Рыжко. – Москва : Издательство Юрайт, 2024. – 354 с. – (Высшее образование). – ISBN 978–5–534–00623–0.

96. Зараменских, Е. П. Проектирование информационных систем : учебник и практикум для вузов / Е. П. Зараменских. – 2-е изд. – Москва : Издательство Юрайт, 2025. – 119 с. – (Высшее образование). – ISBN 978–5–534–21418–5.

97. Губанов, К. Н. Цифровая трансформация процесса управления проектными элементами / К. Н. Губанов, И. А. Рыбенко // Инженерный вестник Дона. – 2025. – № 11. – С. 624–640.

98. Матвеев, Д. А. BIM-моделирование в задачах строительства: опыт внедрения и интеграции с корпоративными ИС / Д. А. Матвеев, В. А. Гордин // BIM-моделирование в задачах строительства и архитектуры : материалы Всероссийской научно-практической конференции. – Санкт-Петербург : СПбГАСУ, 2019. – С. 112–118.

99. Баранов, П. В. Интеграция BIM-моделей в производственные контуры предприятий: PLM, MES и ERP / П. В. Баранов, А. С. Козлов // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Физико-математические науки. – Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2020. – Т. 13, № 4. – С. 45–58.

100. Егорова, Д. К. Алгоритмы нечёткой кластеризации для анализа производственных данных / Д. К. Егорова, И. Ю. Кожевников // Вестник прикладной информатики. – 2023. – Т. 28, № 5. – С. 60–68.

101. Бобырь, М. В. Нечетко-логические методы в задаче детектирования границ изображений / М. В. Бобырь, М. А. Мякотных, А. Н. Грановский // Программные продукты и системы. – 2022. – Т. 35. – № 1. – С. 117–127.

102. Иванова, О. В. Перспективы применения метода Fuzzy C-Means в производственном анализе / О. В. Иванова, И. Н. Павлов // Журнал вычислительной математики и моделирования. – 2023. – Т. 35, № 4. – С. 123–132.

103. Зуев, А. А. Анализ и применение Fuzzy C-Means в задачах оптимизации производства / А. А. Зуев, М. Ю. Иванова // Журнал системного анализа. – 2020. – Т. 16, № 1. – С. 77–85.

104. Сидоренко, П. М. Применение алгоритма Fuzzy C-Means для кластеризации промышленных данных / П. М. Сидоренко, А. Ю. Кузнецов // Вестник прикладной математики. – 2021. – Т. 29, № 6. – С. 89–98.

105. BIM–моделирование в задачах строительства и архитектуры : материалы II Международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 15–17 мая 2019 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 2019. – 274 с. – ISBN 978–5–9227–0927–9. – DOI 10.23968/BIMAC.2019.

106. Губанов, К. Н. Механизм согласованного распределения инвестиционных ресурсов на совершенствование процессов жизненного цикла проектной документации / К. Н. Губанов // Инженерный вестник Дона. – 2025. – № 4. – С. 246–264.

107. Тюрин, А. В. Интеграция ERP с CAD-системами на металлургическом предприятии / А. В. Тюрин, В. В. Колесников // Автоматизация производства. – 2020. – № 7. – С. 45–53.

108. Кусаков, И. Н. Использование DataMatrix в маркировке продукции: стандарты и практика / И. Н. Кусаков, В. В. Борисов // Маркетинг и логистика. – 2022. – № 3. – С. 60–66.

109. Мартынова, О. С. Data Matrix в маркировке промышленных товаров: стандарты и практика печати / О. С. Мартынова // Упаковка. – 2021. – № 10. – С. 36–41.

110. Губанов, К. Н. Цифровизация бизнес-процесса производства металлических конструкций / К. Н. Губанов, И. А. Рыбенко // Доклады ТУСУРа. – 2025. – № 3. – С. 115–123.

111. Петрова, Е. С. Маркировка лекарственной продукции кодом DataMatrix: нормативные аспекты и практические рекомендации / Е. С. Петрова, А. А. Иванова // Здравоохранение. – 2020. – № 11. – С. 34–39.

112. Орлов, В. В. Подходы к цифровизации производства с использованием технологий Industry 4.0 / В. В. Орлов, Е. Н. Смирнов // Инженерный журнал. – 2021. – № 2. – С. 40–48.

113. Бикмурзина, А. И. Преимущества использования Data Matrix-кодов при акцизном регулировании торговли / А. И. Бикмурзина, Г. Р. Мукминова // Финансовая экономика. – 2023. – № 6. – С. 124–129.

114. Смирнов, В. П. Актуальные вопросы интеграции BIM и ERP систем в металлургии / В. П. Смирнов, М. А. Иванова // Вестник машиностроения. – 2023. – № 3. – С. 55–63.

115. Малявкина, Л. И. Проблемы информационно-технологического обеспечения реализации BIM-концепции / Л. И. Малявкина, А. Г. Савина, Д. А. Савин // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. – 2023. – Т. 50, № 1. – С. 99–113. – DOI 10.21822/2073–6185–2023–50–1–99–113.

116. Павлов, Е. А. Современные методы управления бизнес-процессами в металлостроении / Е. А. Павлов, Р. В. Смирнов // Управление предприятием. – 2022. – № 10. – С. 19–27.

117. Белякова, Т. В. Методология моделирования бизнес-процессов с использованием IDEF0 и ARIS / Т. В. Белякова, А. И. Никонов // Информационные технологии и системы. – 2022. – Т. 16, № 5. – С. 37–45.

118. Игнатьева, А. С. Интеллектуальный анализ данных и применение методов нечёткой кластеризации в производстве / А. С. Игнатьева, Д. В. Ковалев // Вестник вычислительной техники. – 2023. – № 7. – С. 68–76.

119. Лебедев, П. Н. Информационные системы управления бизнес-процессами в металлургии / П. Н. Лебедев, О. С. Петрова // Экономика и управление. – 2022. – Т. 25, № 4. – С. 41–49.

120. Практическое применение методов кластеризации, классификации и аппроксимации на основе нейронных сетей : монография / Д. А. Баяк, О. А. Баяк, Д. В. – Москва : Прометей, 2020. – 448 с.

121. Мингликулов, З. Б. Алгоритм решения задачи нечеткой кластеризации / З. Б. Мингликулов // Проблемы информатики. – 2014. – № 1(22). – С. 10–14.

122. Губанов, К. Н. Оптимизация бизнес-процесса анализа реализации заказа клиента в планово-диспетчерском отделе при производстве металлических конструкций / К. Н. Губанов, И. А. Рыбенко // Системы автоматизации (в образовании, науке и производстве) AS'2024 : Труды Всероссийской научно-практической конференции (с международным участием), Новокузнецк, 10–12 декабря 2024 года. – Новокузнецк: Сибирский государственный индустриальный университет, 2024. – С. 344–346

123. Губанов, К. Н. Оптимизация бизнес процесса проверки 3D модели, реализованной инженером-конструктором при производстве металлических конструкций / К. Н. Губанов, И. А. Рыбенко // Системы автоматизации (в образовании, науке и производстве) AS'2023 : труды Всероссийской научно-практической конференции (с международным участием), Новокузнецк, 12–14 декабря 2023 года. – Новокузнецк: Сибирский государственный индустриальный университет, 2023. – С. 119–121.

124. Губанов, К. Н. Оптимизация бизнес-процесса архивирования чертежей при производстве металлических конструкций / К. Н. Губанов, С. Н. Калашников // Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения: труды Всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Новокузнецк, 16–17 мая 2023 года. – Новокузнецк: Сибирский государственный индустриальный университет, 2023. – С. 158–161.

125. Губанов, К. Н. Основы алгоритмизации для разработки мобильного приложения с целью распознавания кодов Data Matrix / К. Н. Губанов, С. Н. Калашников // Системы автоматизации (в образовании, науке и производстве) AS'2022: труды Всероссийской научно-практической конференции (с междуна-

родным участием), Новокузнецк, 15–16 декабря 2022 года. – Новокузнецк: Сибирский государственный индустриальный университет, 2022. – С. 382–384.

126. Ефимчик, А. А. Программное обеспечение для хранения данных в организациях с высоким уровнем конфиденциальности информации / А. А. Ефимчик, К. Н. Губанов // Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения : Труды Всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Новокузнецк, 19–21 мая 2020 года / Под общей редакцией профессора М.В. Темлянцева. Том Выпуск 24. Часть VI. – Новокузнецк: Сибирский государственный индустриальный университет, 2020. – С. 60–65.

127. Ефимчик, А. А. Перспективы развития микропроцессорных систем в индустрии программного обеспечения / А. А. Ефимчик, К. Н. Губанов // Научно-технический прогресс: актуальные и перспективные направления будущего : сборник материалов XI Международной научно-практической конференции, Кемерово, 16 мая 2019 года. Том 2. – Кемерово: Общество с ограниченной ответственностью "Западно-Сибирский научный центр", 2019. – С. 155–156. – EDN UNUSMA.

128. Дмитриева, С. В. Индустрия 4.0 и цифровая трансформация в промышленном комплексе: внедрение современных технологий и инноваций для повышения эффективности / С. В. Дмитриева // Экономика и предпринимательство. – 2023. – № 7 (156). – С. 781–785.

129. Шевченко, А. И. Современные тенденции в функционировании QR-технологий / А. И. Шевченко, Е. П. Денисова // Цифровая экономика. – 2022. – № 3 (19). – С. 45–52.

130. Автоматизация производства: ключ к эффективному будущему / Ю. Шаньязов, Д. Тагыев, Ш. Есенаманова, Г. Амангулыев // Символ науки: международный научный журнал. – 2025. – Т. 1, № 4–1. – С. 58–59.

131. Тихонова, И. В. Автоматизированная система управления производством / И. В. Тихонова // Молодой ученый. – 2016. – № 28 (132). – С. 214–218.

132. Губанов К. Н. SZMK TeklaInteraction / заявители и патентообладатели: К. Н. Губанов, А. Е. Агафонов, Общество с ограниченной ответственностью "Си-

бирский завод металлических конструкций". – № 2025660832; заявл. 17.04.2025; опубл. 28.04.2025.

133. Губанов К. Н. SZMK Desktop / заявители и патентообладатели: К. Н. Губанов, А. Е. Агафонов, Общество с ограниченной ответственностью "Сибирский завод металлических конструкций". – № 2024681242; заявл. 28.08.2024; опубл. 06.09.2014.

134. Губанов К. Н. SZMK ModelChecker / заявители и патентообладатели: К. Н. Губанов, А. Е. Агафонов, Общество с ограниченной ответственностью "Сибирский завод металлических конструкций". – № 2025619718; заявл. 17.04.2025; опубл. 17.04.2025.

135. Губанов К. Н. SZMK TeklaOffline / заявители и патентообладатели: К. Н. Губанов, А. Е. Агафонов, Общество с ограниченной ответственностью "Сибирский завод металлических конструкций". – № 2025660833; заявл. 17.04.2025; опубл. 28.04.2025.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Классы Drawing, Model, Detail, Sxema, Revision, PathExport, PathArchive и PathDetails служат для обработки и хранения информации о характеристиках чертежа и путей хранения экспортированных файлов в различных форматах

```
using System;
using System.Collections.Generic;

namespace SZMK.Domain.Models
{
    public class Drawing
    {
        public long Id { get; set; }
        public DateTime DateCreate { get; set; }

        public string Assembly { get; set; }
        public string AssemblyTranslated { get; set; }
        public string AssemblySeparator { get; set; }

        public string Order { get; set; }

        public string Place { get; set; }
        public string List { get; set; }
        public string Mark { get; set; }
        public string Executor { get; set; }
        public string ExecutorWork { get; set; }
        public double WeightMark { get; set; }
        public double WeightDifferent { get; set; }
        public int CountMark { get; set; }
        public double SubTotalWeight { get; set; }
        public double SubTotalLenght { get; set; }
        public double SubTotalHeight { get; set; }
        public double SubTotalWidth { get; set; }
        public long CountDetail { get; set; }
        public string HeadGroup { get; set; }
        public double WeightSurfacing { get; set; }
        public double WeightSurfacingTotal { get; set; }
        public double PercentSurfacing { get; set; }
        public double WesteCutting { get; set; }
        public double WesteCuttingTotal { get; set; }
        public double PercentWeste { get; set; }
        public DateTime CancelledAt { get; set; }
    }
}
```

```

    public bool Hide { get; set; }
    public bool Cancelled { get; set; }
    public bool Finished { get; set; }

    public long TypeAddId { get; set; }
    public TypeAdd TypeAdd { get; set; }
    public long ModelId { get; set; }
    public Model Model { get; set; }
    public long PathDetailsId { get; set; }
    public PathDetails PathDetails { get; set; }
    public long PathExportId { get; set; }
    public PathExport PathExport { get; set; }
    public long PathArhiveId { get; set; }
    public PathArhive PathArhive { get; set; }
    public List<Detail> Details { get; set; }
    public long RevisionId { get; set; }
    public Revision Revision { get; set; }
    public long SxemaId { get; set; }
    public Sxema Sxema { get; set; }
    public long SxemaId2 { get; set; }
    public Sxema Sxema2 { get; set; }
    public List<Comment> Comments { get; set; }
}

}

using System;
using System.Collections.Generic;

namespace SZMK.Domain.Models
{
    public class Model
    {
        public long Id { get; set; }
        public DateTime DateCreate { get; set; }

        public string Path { get; set; }
        public int LengthAuto { get; set; }
        public int HeightAuto { get; set; }
        public int WidthAuto { get; set; }
        public int LengthContainer { get; set; }
        public int HeightContainer { get; set; }
        public int WidthContainer { get; set; }
        public int LengthZinc { get; set; }
        public int HeightZinc { get; set; }
    }
}

```

```

        public int WidthZinc { get; set; }
        public string TypeDelivery { get; set; }

        public List<Drawing> Drawings { get; set; }
    }
}

namespace SZMK.Domain.Models
{
    public class Detail
    {
        public long Id { get; set; }
        public string Name { get; set; }
        public int StartNumber { get; set; }
        public string Position { get; set; }
        public long Count { get; set; }
        public string Profile { get; set; }
        public string ProfileReport { get; set; }
        public double Width { get; set; }
        public double Lenght { get; set; }
        public double Weight { get; set; }
        public double WeightReal { get; set; }
        public double ProfileHeight { get; set; }
        public double ProfileWidth { get; set; }
        public string ProfileDiameter { get; set; }
        public double SubtotalWeight { get; set; }
        public string MarkSteel { get; set; }
        public string Discription { get; set; }
        public double GMLenght { get; set; }
        public double GMwidth { get; set; }
        public double GMheight { get; set; }
        public string Machining { get; set; }
        public string MethodOfPaintingRAL { get; set; }
        public double PaintingArea { get; set; }
        public string GostName { get; set; }
        public string FlangeThickness { get; set; }
        public string PlateThickness { get; set; }
        public string Code1C { get; set; }
        public string RevisionNumber { get; set; }
        public string RevisionMark { get; set; }
        public string RevisionTitle { get; set; }
        public bool IsMain { get; set; }
        public string ProfileType { get; set; }
        public string DistanceHoles { get; set; }
        public string DiameterHoles { get; set; }
    }
}

```

```

    }
}

using System;
using System.Collections.Generic;
using System.Text;

namespace SZMK.Domain.Models
{
    public class Sxema
    {
        public long Id { get; set; }
        public DateTime DateCreate { get; set; }
        public int Number { get; set; }
        public string Type { get; set; }
        public string Color { get; set; }
        public string Filter { get; set; }
        public string LayoutName1 { get; set; }
        public string LayoutThickness1 { get; set; }
        public string LayoutName2 { get; set; }
        public string LayoutThickness2 { get; set; }
        public string LayoutName3 { get; set; }
        public string LayoutThickness3 { get; set; }
        public string LayoutName4 { get; set; }
        public string LayoutThickness4 { get; set; }
        public string LayoutName5 { get; set; }
        public string LayoutThickness5 { get; set; }
        public string LayoutName6 { get; set; }
        public string LayoutThickness6 { get; set; }
        public string LayoutName7 { get; set; }
        public string LayoutThickness7 { get; set; }
        public string LayoutName8 { get; set; }
        public string LayoutThickness8 { get; set; }
        public string LayoutName9 { get; set; }
        public string LayoutThickness9 { get; set; }
        public string LayoutName10 { get; set; }
        public string LayoutThickness10 { get; set; }
        public int Copy { get; set; }
        public string Combination { get; set; }
    }
}

using System;
using System.Collections.Generic;

```

```

namespace SZMK.Domain.Models
{
    public class Revision
    {
        public long Id { get; set; }

        public string Label { get; set; }
        public DateTime DateCreate { get; set; }
        public string CreatedBy { get; set; }
        public DateTime DateChecked { get; set; }
        public string CheckedBy { get; set; }
        public DateTime DateLastApproved { get; set; }
        public string LastApprovedBy { get; set; }
        public string Description { get; set; }
        public string CountUsers { get; set; }
        public string List { get; set; }
        public string Information { get; set; }

        public List<Drawing> Drawings { get; set; }
    }
}

```

```
using System;
```

```

namespace SZMK.Domain.Models
{
    public class PathExport
    {
        public long Id { get; set; }
        public DateTime DateCreate { get; set; }

        public string PathXML { get; set; }
    }
}

```

```
using System;
```

```

namespace SZMK.Domain.Models
{
    public class PathArhive
    {
        public long Id { get; set; }
        public DateTime DateCreate { get; set; }

        public string Path { get; set; }
    }
}

```

```
    }  
}  
  
using System;  
  
namespace SZMK.Domain.Models  
{  
    public class PathDetails  
    {  
        public long Id { get; set; }  
        public DateTime DateCreate { get; set; }  
  
        public string PathDWG { get; set; }  
        public string PathPDF { get; set; }  
        public string PathDXF { get; set; }  
    }  
}
```

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Классы Status, StatusSubContract, StepSubContract, AddStatus и AddStatusSubContract служат для представления переходов как внутри предприятия, так и при взаимодействии с подрядными организациями

```
using System.Collections.Generic;

namespace SZMK.Domain.Models
{
    public class Status
    {
        public long Id { get; set; }

        public string Name { get; set; }

        public long PositionId { get; set; }
        public Position Position { get; set; }
        public List<AddStatus> AddStatuses { get; set; }
    }
}

using System;
using System.Collections.Generic;
using System.Text;

namespace SZMK.Domain.Models
{
    public class StatusSubContract
    {
        public long Id { get; set; }

        public string Name { get; set; }

        public List<AddStatusSubContract> AddStatusesSubContract { get; set; }
    }
}

using System;
using System.Collections.Generic;
using System.Text;
```

```

namespace SZMK.Domain.Models
{
    public class StepSubContract
    {
        public long Id { get; set; }

        public string Name { get; set; }

        public List<AddStatusSubContract> AddStatusesSub-
Contract { get; set; }
    }
}

```

```
using System;
```

```

namespace SZMK.Domain.Models
{
    public class AddStatus
    {
        public DateTime DateCreate { get; set; }
        public DateTime DateInsert { get; set; }
        public DateTime DateUpdate { get; set; }

        public int Count { get; set; }

        public bool IsSilent { get; set; }
        public string Comment { get; set; }
        public string DocNum { get; set; }

        public long DrawingId { get; set; }
        public Drawing Drawing { get; set; }
        public long StatusId { get; set; }
        public Status Status { get; set; }
        public long UserId { get; set; }
        public User User { get; set; }
    }
}

```

```

using System;
using System.Collections.Generic;
using System.Text;

```

```

namespace SZMK.Domain.Models
{

```

```
public class AddStatusSubContract
{
    public DateTime DateCreate { get; set; }
    public DateTime DateInsert { get; set; }

    public int Count { get; set; }

    public long DrawingId { get; set; }
    public Drawing Drawing { get; set; }
    public long StatusId { get; set; }
    public StatusSubContract Status { get; set; }
    public long StepId { get; set; }
    public StepSubContract Step { get; set; }
    public long UserId { get; set; }
    public User User { get; set; }
}
}
```

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Классы BlankOrder, AddBlank, AddDetail и TypeAdd служат для реализации логики групповой обработки и серийной передачи документации между подразделениями

```
using System;
using System.Collections.Generic;

namespace SZMK.Domain.Models
{
    public class BlankOrder
    {
        public long Id { get; set; }
        public DateTime DateCreate { get; set; }

        public string QR { get; set; }

        public List<AddBlank> AddBlanks { get; set; }
    }
}
```

```
using System;

namespace SZMK.Domain.Models
{
    public class AddBlank
    {
        public DateTime DateCreate { get; set; }

        public long DrawingId { get; set; }
        public Drawing Drawing { get; set; }
        public long BlankOrderId { get; set; }
        public BlankOrder BlankOrder { get; set; }
    }
}
```

```
using System;

namespace SZMK.Domain.Models
{
    public class AddDetail
    {

```

```
        public DateTime DateCreate { get; set; }

        public long DrawingId { get; set; }
        public Drawing Drawing { get; set; }
        public long DetailId { get; set; }
        public Detail Detail { get; set; }
    }
}

using System;

namespace SZMK.Domain.Models
{
    public class TypeAdd
    {
        public long Id { get; set; }
        public DateTime DateCreate { get; set; }

        public string Discription { get; set; }
    }
}
```

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2025660832

SZMK TeklaInteration

Правообладатель: *Общество с ограниченной
ответственностью «Сибирский завод металлических
конструкций» (RU)*

Авторы: *Губанов Кирилл Николаевич (RU), Агафонов Андрей
Евгеньевич (RU)*

Заявка № 2025618918

Дата поступления 17 апреля 2025 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 28 апреля 2025 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2024681242

SZMK Desktop

Правообладатель: *Общество с ограниченной ответственностью "Сибирский завод металлических конструкций" (RU)*

Авторы: *Губанов Кирилл Николаевич (RU), Агафонов Андрей Евгеньевич (RU)*



Заявка № 2024680187

Дата поступления 28 августа 2024 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 06 сентября 2024 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат 06926761a63300c1542a01670bca2026
Владелец **Зубов Юрий Сергеевич**
Действителен с 10.01.2024 по 03.10.2025

Ю.С. Зубов

ПРИЛОЖЕНИЕ Е

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО
о государственной регистрации программы для ЭВМ
№ 2025619718

SZMK ModelChecker

Правообладатель: *Общество с ограниченной ответственностью "Сибирский завод металлических конструкций" (RU)*

Авторы: *Губанов Кирилл Николаевич (RU), Агафонов Андрей Евгеньевич (RU)*

Заявка № **2025618525**
Дата поступления **17 апреля 2025 г.**
Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ **17 апреля 2025 г.**



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности



Ю.С. Зубов

ПРИЛОЖЕНИЕ Ж

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО
о государственной регистрации программы для ЭВМ
№ 2025660833

SZMK TeklaOffline

Правообладатель: **Общество с ограниченной ответственностью "Сибирский завод металлических конструкций" (RU)**

Авторы: **Губанов Кирилл Николаевич (RU), Агафонов Андрей Евгеньевич (RU)**

Заявка № **2025618982**
Дата поступления **17 апреля 2025 г.**
Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ **28 апреля 2025 г.**



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности



Ю.С. Зубов

ПРИЛОЖЕНИЕ И



СЗМК /

СИБИРСКИЙ ЗАВОД
МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ

ООО «Сибирский завод металлических конструкций»
654034, Россия, Кемеровская область - Кузбасс,
г. Новокузнецк, шоссе Кузнецов, д. 9
ИНН/КПП 4220040912/422001001 ОГРН 1094220003756
р/с 40702810609510000600 к/с 30101810100000000850
Банк «Левобережный» (ПАО) г. Новосибирск БИК 045004850

Коммерческий отдел
+7 (3843) 900-290 / sale@szmk-nk.com
Приемная генерального директора
+7 (3843) 900-243 / office@szmk-nk.com
www.szmk-nk.com

Утверждаю:
Директор ООО «СЗМК»
Е.Г. Сычев
«16» сентября 2025г.

Акт

о внедрении в производство результатов научно-исследовательской работы

В 2023 году на ООО «Сибирский завод металлических конструкций» разработан и внедрен программный комплекс SZMK, направленный на оптимизацию процессов проектирования и производства металлических конструкций.

Оптимизирован процесс отслеживания статусов чертежей и их передачи между подразделениями, обеспечена интеграция с программным комплексом Tekla Structures, автоматизирована проверка 3D-моделей на соответствие требованиям производства.

Разработанный программный комплекс позволил сократить время перехода чертежей между отделами на 30 %, уменьшить поставку некомплектной продукции на монтаж на 45 % и снизить время добавления чертежей в систему на 50 %. Количество ошибок, допущенных инженерами-конструкторами, уменьшилось на 40 %, а проверка 3D-моделей ускорена на 60 %, что позволило снизить число ошибок унификации чертежей на 70 %. Автоматическое архивирование и анализ моделей сократили время анализа текущей работы отделов на 30 % и повысили скорость реагирования на ошибки на 40 %.

Экономический эффект от внедрения программного комплекса складывается из снижения временных затрат сотрудников на выполнение типовых задач и уменьшения расходов, связанных с исправлением брака. Оптимизация процессов позволила сократить суммарное время работы инженеров-конструкторов на 35 %, что привело к снижению затрат на трудовые ресурсы. Автоматизированная проверка и архивирование чертежей уменьшили количество исправлений, необходимых после обнаружения ошибок, что позволило снизить финансовые потери от брака на 50 %. В результате совокупный экономический эффект от внедрения программного комплекса составил около 5 млн руб. в год.

Работа выполнена под руководством Директора по развитию Агафонов А.Е. Теоретические исследования проводились с использованием методики инжиниринга бизнес-процессов, а также методологии управления жизненным циклом изделия (PLM) и концепции «Paperless Manufacturing», направленных на цифровизацию полного жизненного цикла чертежей и отказ от бумажных носителей.

Настоящий акт составлен для подтверждения научной и практической значимости разработок и не является основанием для финансовых претензий.

Директор по развитию

А.Е. Агафонов

ПРИЛОЖЕНИЕ К

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное образовательное учреждение высшего образования
«Сибирский государственный индустриальный университет»

УТВЕРЖДАЮ
Проректор по образовательной
деятельности Приходько О.Г.

«22» ноября 2025 г.



АКТ

Об использовании в учебном процессе результатов научных разработок по
теме диссертации аспиранта кафедры прикладных информационных
технологий и программирования Губанова К.Н.

Результаты: IDEF0-модели стадий жизненного цикла проектной документации предприятия и программное обеспечение, реализующее основные функции усовершенствованных процессов жизненного цикла проектной документации

внедрены в учебный процесс на основании решения кафедры прикладных информационных технологий и программирования (протокол заседания кафедры № 7 от 20.11.2025 г.)

Указанные материалы используются: в дисциплинах «Анализ бизнес-процессов», «Основы технического документирования», «Проектирование информационных систем», «Производственные информационные системы» при подготовке бакалавров по направлениям подготовки 09.03.03 Прикладная информатика, 09.03.01 Информатика и вычислительная техника», в дисциплине «Методология и технология проектирования информационных систем» по направлению подготовки магистров 09.04.03 Прикладная информатика при чтении лекций, проведении практических занятий, курсовом проектировании, а также в дисциплине «Управление в организационных системах» при подготовке кадров высшей квалификации в аспирантуре по научной специальности 2.3.4 «Управление в организационных системах».

Директор института ИТиАС,
д.т.н., доцент

Зав. кафедрой ПИТиП,
д.т.н., доцент

А.В. Зимин

И.А. Рыбенко

