

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования  
«Санкт-Петербургский государственный университет  
аэрокосмического приборостроения»

На правах рукописи



Иванов Максим Викторович

**Модели и методики цифровизации систем менеджмента качества  
научоемкого производства**

Специальность 2.5.22 - «Управление качеством продукции. Стандартизация.  
Организация производства»

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор технических наук, доцент  
Фролова Елена Александровна

Санкт-Петербург

2024

## Оглавление

|  |    |
|--|----|
| Введение.....  | 5  |
| Глава 1 Исследование и разработка подходов к улучшению качества процессов выявления несоответствий технического документооборота с учетом неформализованных связей на основании инструментария всеобщего управления качеством..... | 14 |
| 1.1 Исследование неформализованных связей в межпроцессном пространстве наукоемкого производства в рамках цифровизации системы менеджмента качества .....   | 14 |
| 1.2 Исследование причинно-следственных связей возникновения несоответствий и технических рисков в системе технического документооборота наукоемкого производства .....   | 18 |
| 1.3 Создание инструмента оценки готовности изделия к производству, реализованного на базе автоматизированной системы.....  | 28 |
| 1.4 Разработка методики улучшения качества процессов выявления несоответствий и технических рисков в системе технического документооборота .....   | 33 |
| 1.5 Практическое применение разработанной методики улучшения качества процессов системы технического документооборота для наукоемких производственных предприятий приборостроительной отрасли .....                                | 37 |
| Выводы по главе 1.....   | 43 |
| Глава 2 Разработка имитационной модели для выявления неформализованных связей и обмена информацией между участниками технического документооборота наукоемкого производства .....  | 45 |
| 2.1 Сравнительный анализ и выбор подходов к моделированию процессов технического документооборота наукоемкого производства .....   | 45 |

|       |  |     |
|-------|--|-----|
| 2.2   | Разработка моделей этапов подготовки технической документации организации с применением элементов теории искусственных нейронных сетей для идентификации неформализованных связей .....                          | 53  |
| 2.3   | Реализация и обучение нейросетевых моделей этапов подготовки технической документации.....   | 61  |
| 2.4   | Разработка обобщенной нейросетевой модели технического документооборота организации.....   | 72  |
| 2.4.1 | Метод последовательного объединения нейросетевых подмоделей.....   | 72  |
| 2.4.2 | Построение обобщенной нейросетевой модели методом представления нейросетевых подмоделей в виде нейронных элементов .....   | 78  |
| 2.4.3 | Построение обобщенной нейросетевой модели с межслойным включением нейросетевых подмоделей .....  | 85  |
| 2.4.4 | Построение обобщенной нейросетевой модели с использованием дополнительных входов от нейросетевых подмоделей .....  | 90  |
|       | Выводы по главе 2.....   | 97  |
|       | Глава 3 Методика создания нейросетевой модели и модернизация модели маршрута согласования технической документации для практического применения в рамках цифровой системы менеджмента качества организации ..... | 99  |
| 3.1   | Исследование и структурная декомпозиция маршрута согласования технической документации.....  | 99  |
| 3.2   | Разработка и практическое применение методики создания структурной модели маршрута согласования технической документации на основе теории искусственных нейронных сетей.....                                     | 103 |
| 3.3   | Практическое применение улучшенной модели маршрута согласования технической документации с учетом возможностей цифровой системы менеджмента качества организации.....  | 108 |
|       | Выводы по главе 3.....   | 113 |
|       | Заключение .....   | 114 |

|   |     |
|---|-----|
| Список сокращений и условных обозначений..... | 116 |
| Список литературы .....                       | 118 |
| Приложение А .....                            | 131 |
| Приложение Б.....                             | 134 |
| Приложение В.....                             | 136 |
| Приложение Г .....                            | 139 |
| Приложение Д.....                             | 142 |
| Приложение Е.....                             | 144 |
| Приложение Ж.....                             | 146 |
| Приложение И .....                            | 148 |
| Приложение К.....                             | 149 |
| Приложение Л.....                             | 150 |
| Приложение М.....                             | 153 |
| Приложение Н .....                            | 155 |
| Приложение П .....                            | 157 |

## Введение

**Актуальность исследования:** Развитие информационных технологий и их повсеместное использование во всех отраслях производства вызывает изменение поведения мировой экономики, в которой все большую роль играют результаты интеллектуальной деятельности. В связи с этим возрастает роль наукоемких предприятий, в частности – приборостроительных, поскольку производимая ими продукция находит свое применение во всех остальных отраслях производства.

Согласно концепции “Индустрия 4.0” создание цифровой экономики предполагает внедрение автоматизированных систем, нацеленных на сокращение времени производственных процессов, что является одним из приоритетных направлений технологического развития страны.

Одним из приоритетных объектов цифровизации предприятий наукоемкого приборостроения является система информационной поддержки жизненного цикла изделия, включающая в себя процессы технического документооборота (ТДО) на стадиях проектно-производственного цикла, осуществляющие актуализацию, идентификацию, защиту, восстановление и изъятие технической документации (ТД) в соответствии с требованиями стандартов ГОСТ Р ИСО 9000 и ГОСТ Р ИСО 9001, что делает их частью системы менеджмента качества (СМК) организации.

В процессе производства изделий возникают несоответствия, требующие оперативного устранения путем внесения исправлений в ТД. В условиях постоянного расширения номенклатуры выпускаемых мелкосерийных изделий увеличивается длительность разработки ТД, порождая дополнительные информационные связи между участниками ТДО, образуя несколько источников информации об изделии, что увеличивает вероятность возникновения ошибок в проектируемой ТД и затрудняет

их устранение, негативным образом сказываясь на качестве производимой продукции, а также на результативности процессов ТДО.

Для модернизации структуры производственных процессов организации, традиционно используются методы имитационного и функционального моделирования IDEF0, применение которых не позволяет в полной мере отразить скрытые информационные связи между участниками ТДО в полученных моделях, поэтому актуальным представляется разработка подхода, лишенного данного недостатка.

Следовательно, комплексное развитие наукоемкого производства посредством улучшения структуры системы менеджмента качества организации, в частности изменения и совершенствования процессов ТДО наукоемкого производства, путем повышения их результативности на основе использования положений Всеобщего управления качеством, возможностей информационных технологий является выполнимой и актуальной **научно-практической** задачей.

Исследование проводилось в соответствии с требованиями ряда директивных документов:

- «Прогноз научно-технологического развития РФ: 2030», утвержденный Правительством РФ 3 января 2014 года;
- Указ от 7 мая 2024 года №309 «О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года и на перспективу до 2036 года»;
- Постановление Правительства РФ №377 от 29 марта 2019 года Об утверждении государственной программы РФ «Научно-технологическое развитие Российской Федерации».

**Степень разработанности научной проблемы:** Повышению качества процессов конструкторско-технологического документооборота организации посвящен ряд работ как зарубежных, так и отечественных ученых. Большой вклад в развитие теории и методологии управления качеством и повышения

результативности обработки и обмена данными внесли такие ученые как Азгальдов Г.Г., Варжапетян А.Г., Клячкин В.Н., Окрепилов В.В., Коршунов Г.И., Исикава К., Парето В., Деминг Э., Джуран Д., Кросби Ф., Тагути Г., Шухарт У. и др.

Также в работе использованы труды отечественных и зарубежных ученых и специалистов в области имитационного моделирования и искусственного интеллекта: Ванюшина В.А., Галушкина А.И., Емельянова В.Ю., Толмачева С.Г., Бенжио Й., Вербоса П., Лекуна Я., Мак-Каллока У., Питтса У., Розенблатта Ф., Румельхарта Д.Э., Хинтона Дж. и др.

**Целью работы** является улучшение качества процессов технического документооборота (ТДО) наукоемкого производства в среде автоматизированной системы (АС), путем повышения результативности выявления неформализованных связей в межпроцессном пространстве производственной системы.

При этом необходимо решить следующие **задачи**:

1. провести исследование причинно-следственных связей возникновения несоответствий и технических рисков в системе ТДО, на основании результата разработать методику улучшения качества процессов выявления несоответствий и технических рисков в системе ТДО, учитывая наличие неформализованных связей в межпроцессном пространстве производственной системы;

2. разработать имитационную модель для выявления неформализованных связей и обмена информацией между участниками ТДО наукоемкого производства с применением элементов теории ИНС;

3. разработать методику создания структурной ИНС-модели исследуемого маршрута согласования ТД в среде АС для последующей разработки проекта стандарта для масштабирования полученного опыта;

4. разработать модель маршрута согласования ТД с учетом возможностей среды АС в рамках цифровой СМК организации.

**Объектом исследования** является система технического документооборота приборостроительной организации, изготавливающей наукоемкую продукцию.

**Предметом исследования** является структура процесса цифровизации технического документооборота на этапах проектно-производственного цикла, требующая улучшения по качеству обмена информацией между участниками процесса при реакции на возникающие несоответствия в процессе производства изделий.

В работе использованы методологии функционального моделирования IDEF0, ИНС и их математический аппарат, а также методы объектно-ориентированного программирования (ООП), методы управления качеством.

**Достоверность научных результатов исследования** подтверждена корректным использованием математического аппарата искусственных нейронных сетей, методов функционального и имитационного моделирования, сходимостью теоретических и экспериментальных данных, результатами практического внедрения.

**Область исследования** соответствует паспорту специальности 2.5.22 – «Управление качеством продукции. Стандартизация. Организация производства» по следующим пунктам:

- п. 4. «Инновации при разработке, развитии, цифровизации систем менеджмента качества (СМК) предприятий и организаций»;
- п. 20. «Анализ и синтез организационно-технических решений. Стандартизация, унификация и типизация производственных процессов и их элементов»;
- п. 22. «Разработка методов и средств организации производства в условиях организационно-управленческих, технологических и технических рисков»;
- п. 25. «Разработка моделей описания, методов и алгоритмов решения задач проектирования производственных систем, организации производства и принятия управленческих решений в цифровой экономике».



## **Основные положения, выносимые на защиту**

1. методика улучшения качества процессов выявления несоответствий и технических рисков в системе ТДО, включая использование основных положений и содержания Всеобщего Управления Качеством (TQM), и ЕТА, QFD, FMEA, учитывающая наличие неформализованных связей в межпроцессном пространстве производственной системы;

2. имитационная модель обмена информацией о ТД на изделие, как структурный элемент цифровой СМК организации, обеспечивающий функциональную связь между участниками ТДО приборостроительной организации, позволяющая описать систему ТДО в условиях реакции на возникающие в процессе производства изделий несоответствия с использованием элементов теории ИНС, включая возможность идентификации неформализованных связей путем агрегирования отличительных особенностей входных данных с последующим их объединением и усложнением на каждом последующем слое ИНС;

3. методика создания ИНС-модели исследуемого маршрута согласования ТД в условиях появления несоответствий и оперативной реакции на них в среде АС, позволяющая организовать унифицированные связи между участниками ТДО в рамках цифровой СМК организации;

4. модель маршрута согласования ТД с учетом возможностей цифровой СМК организации, полученная восстановлением статусов ТД в среде АС на основе послойно распределенных элементов маршрута по этапам разработки ТД в условиях появления несоответствий и их группировки по выполняемым функциям.

### **Научная новизна:**

1. разработанная методика улучшения качества процессов выявления несоответствий и технических рисков в системе ТДО отличается от известных учетом множественного возврата ТД на доработку в процессе согласования в условиях отсутствия цифровой связи с производством

и позволяет отразить влияние возникновения несоответствий на процессы ТДО и учитывать неформализованные связи в межпроцессном пространстве производственной системы;

2. предложенная имитационная модель обмена информацией о ТД на изделие отличается от известных агрегированием отличительных особенностей входных данных с последующим их объединением и усложнением на каждом последующем слое ИНС, позволяет обнаруживать функциональные и информационные неформализованные связи в системе ТДО, не предусмотренные СМК организации;

3. разработанная методика создания ИНС-модели исследуемого маршрута согласования ТД в условиях появления несоответствий и оперативной реакции на них в среде АС отличается от известных применением процесса унификации к структурированию элементов маршрута согласования ТД и позволяет сократить количество структурных элементов для реализации процесса ТДО;

4. предложенная модель маршрута согласования ТД с учетом возможностей цифровой СМК организации отличается от известных использованием возможностей среды АС в рамках СМК предприятия, меньшим количеством статусов ТД, учетом скрытых связей между элементами маршрута и позволяет организовать унифицированные связи между участниками ТДО в рамках цифровой СМК организации.

**Практическая значимость** полученных научных результатов состоит:

— в сокращении жизненного цикла технологической документации в среднем на 16% путем повышения эффективности работы пользователей АС и снижении затрат на производство изделий в среднем на 9-11%;

— в обнаружении функциональных и информационных неформализованных связей в системе ТДО, не предусмотренных СМК организации, позволяя повысить результативность конструкторских

и технологических отделов за счет увеличения производительности труда на 4-6%;

— в снижении в среднем на 17% длительности согласования конструкторской документации путем повышения действенности процесса согласования;

— в повышении результативности процесса согласования технологической документации сквозного производства путем сокращения жизненного цикла, реализуемого на нескольких производственных площадках предприятия, в среднем на 22%.

Апробация результатов: Основные результаты работы докладывались и обсуждались на VIII (2016г.) и IX (2017г.) общероссийской молодежной научно-технической конференции "Молодежь. Техника. Космос", на VI международной научно-практической конференции (школа-семинар) молодых ученых «Прикладная математика и информатика: современные исследования в области естественных и технических наук» (2020г.), на международной научно-технической конференции “Автоматизация” (RusAutoCon, 2020г.), на III международном форуме "Метрологическое обеспечение инновационных технологий" (МОИТ-2021), на IV международном форуме «Математические методы и модели в высокотехнологичном производстве» (2024 г.).

Разработанная имитационная модель обмена информацией о ТД на изделие реализована в программном обеспечении, позволяющем проанализировать процессы обработки информации об изделии и поведение подсистем ТДО в условиях возникновения несоответствий (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2020611400, заявка №2020610449 от 21.01.2020, положительное решение от 30.01.2020).

**Личный вклад автора** заключается в непосредственной разработке методики улучшения качества процессов выявления несоответствий и технических рисков в системе ТДО, в разработке имитационной модели

обмена информацией о ТД на изделие между участниками ТДО приборостроительной организации с применением элементов теории ИНС, в разработке методики создания ИНС-модели исследуемого маршрута согласования ТД в условиях появления несоответствий и оперативной реакции на них в среде АС, в разработке модели маршрута согласования ТД с учетом возможностей цифровой СМК организации, в апробации и внедрении результатов исследования, а также публикации результатов диссертационной работы.

**Публикации по теме диссертации:** Основные результаты по теме диссертационной работы Иванова М.В. изложены в 19 печатных изданиях, 7 из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК, из них 5 – без соавторов, 2 работы в изданиях Международных реферативных баз данных и систем цитирования и 9 работ в других изданиях. Получено 1 свидетельство на регистрацию программ для ЭВМ.

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 4 международных и 2 Общероссийских научных конференциях.

**Внедрение результатов исследования:** Результаты основных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертационном исследовании, использованы в ООО «Научно-производственное предприятие Волоконно-Оптического и Лазерного Оборудования», ООО «НИИ «Масштаб», Учреждении науки «Инженерно-конструкторский центр сопровождения эксплуатации космической техники», что подтверждено актами внедрения.

Результаты исследования также внедрены в образовательный процесс ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения».

### **Структура и объем диссертации:**

Работа состоит из содержания, списка обозначений и сокращений, введения, 3 разделов, заключения, библиографического списка, содержащего 106 наименований и 13 приложений. Работа изложена на 157 страницах и содержит 69 рисунков, 16 таблиц.

**В приложениях** приведены результаты анализа исследуемых систем с помощью методов управления качеством, фрагменты данных для обучения моделей, графики зависимостей функции потерь от пройденной эпохи обучения моделей, листинги программного кода реализации математических моделей, свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ реализации имитационной модели, структурная нейросетевая модель традиционного маршрута согласования технической документации с выделенными группами элементов, акты о внедрении результатов работы в организациях и в учебном процессе.

# **Глава 1 Исследование и разработка подходов к улучшению качества процессов выявления несоответствий технического документооборота с учетом неформализованных связей на основании инструментария всеобщего управления качеством**

## **1.1 Исследование неформализованных связей в межпроцессном пространстве наукоемкого производства в рамках цифровизации системы менеджмента качества**

В соответствии с принятыми стратегиями развитие промышленности, в частности - приборостроения, предполагает создание цифровой экономики, что может быть достигнуто с помощью внедрения новых технологий производства и управления. Данное обстоятельство имеет особую актуальность в сфере наукоемких производств, поскольку их специфика также связана с применением новейших научно-технических разработок [1].

С развитием наукоемких предприятий во многом связано решение проблемы модернизации производства. Проникновение наукоемких производств во все отрасли экономики обеспечивает ускоренный рост производительности труда, что, в свою очередь, приводит к существенному уменьшению затрат на высокотехнологичные товары, а также товары, в производстве которых они используются. Деятельность таких отраслей включает проведение обеспечивающих ее научных исследований и разработок, что приводит к дополнительным затратам средств [2].

Отрасли наукоемкого производства занимают особое место в рыночной инфраструктуре, в которой ключевое значение приобретает рынок нововведений. В рамках рынка нововведений происходит смещение основных механизмов, определяющих поведение экономики. Экономические системы развитых стран претерпели трансформацию от производства с ресурсозатратными технологиями – к активной разработке

и применению новых технологий, от обработки ресурсов – к обработке информации, от применения природных ресурсов – к применению идей [3]. В этих условиях механизм функционирования рынка и наукоемких предприятий основан на принципе возрастающей отдачи, суть которого заключается в занятии лидирующих позиций на рынке нововведений вследствие увеличения отрыва от конкурентов путем снижения издержек при производстве высокотехнологичных товаров, которые в большей степени определяются затратами разработки и дизайна [4].

Система менеджмента качества (СМК) наукоемкого производства включает действия, с помощью которых организация устанавливает свои цели и определяет процессы и ресурсы, требуемые для создания технической документации (ТД), необходимые для выполнения требований заказчика.

Наукоемкие производства включают в себя процессы осуществления НИОКР на всех стадиях жизненного цикла продукции [5], существенную роль в которых играют процессы актуализации, обновления, изъятия и передачи в производство ТД. Данные процессы образуют систему технического документооборота (ТДО), являющейся частью СМК организации [6] в соответствии с положениями и требованиями ГОСТ Р ИСО 9000 [7] и ГОСТ Р ИСО 9001 [8] к документированию информации (рис.1).



Рисунок 1 – Система менеджмента качества наукоемкого производства

Современные проблемы в области цифровизации СМК наукоемкого производства связаны с использованием традиционных процессов технического документооборота на бумажном носителе, элементы которых используются на 70% предприятий отечественного приборостроения [9].

В жизненном цикле изделия (рис.2) ТДО реализует управление документированной информацией об изделии и охватывает этапы разработки рабочей ТД с помощью АС управления жизненным циклом изделия, изготовления и испытаний опытных образцов и корректировки ТД по результатам испытаний в соответствии с техническим заданием (согласно ГОСТ 15.016) [10] и техническими условиями (согласно ГОСТ 2.114) [11].

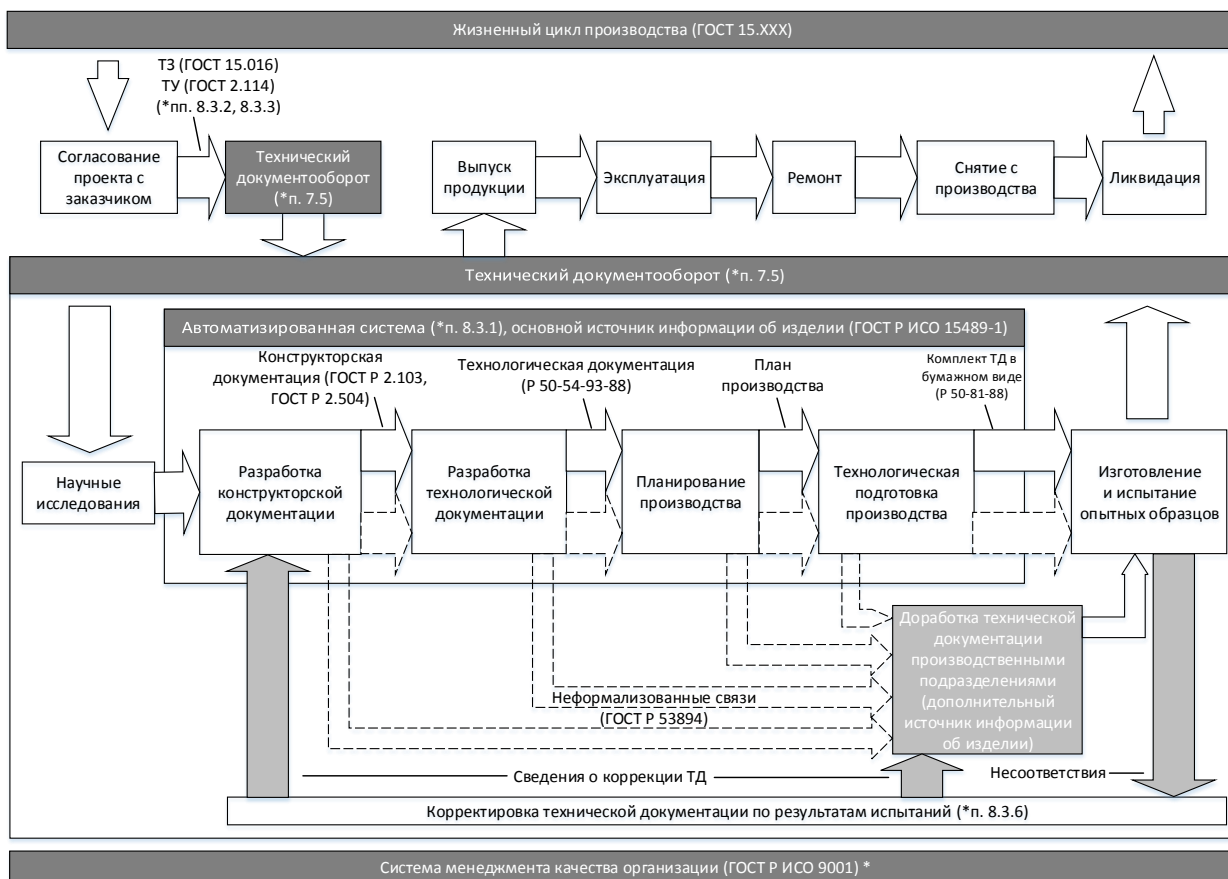


Рисунок 2 – Жизненный цикл изделия наукоемкого производства

Передача ТД в производство осуществляется комплектно на бумажном носителе в соответствии с внутренними требованиями по информационной безопасности и контролю ответственности при производстве продукции



(Р 50-81-88) [12]. Корректировка ТД осуществляется в соответствии с ГОСТ 2.103 [13] и ГОСТ Р 2.504 [14] в электронном виде.

В процессах ТДО могут возникать несоответствия, инициирующие группу рисков технического и управленческого свойства, порождающие необходимость оперативной замены комплекта ТД на обновленную версию, увеличивая длительность производства продукции. Решением данного обстоятельства является использование комплекта ТД предыдущих версий, негативным образом сказываясь на качестве продукции, а также увеличивая вероятность возникновения связанных с конструктивными особенностями изделия несоответствий. При превышении длительности разработки изделия допускаются отступление от требований СМК и корректировка ТД производственными подразделениями организации. При этом создается дополнительный источник информации об изделии [15].

На качество конечных результатов оказывают влияние неформализованные связи в межпроцессном пространстве ТДО, предоставляющие недостающие сведения об изделии между соседними участниками ТДО и формирующие полную информацию об изделии.

Их учет позволяет изменять конфигурацию процессов ТДО и предотвращать возникновение несоответствий, инициирующих технические и управленческие риски, которые, в совокупности с комплектной передачей на бумажном носителе ТД в производство, порождают противоречие в плане обеспечения единого и непрерывного (ГОСТ Р ИСО 15489-1) [16] источника информации об изделии проектным и производственным циклом.

## **1.2 Исследование причинно-следственных связей возникновения несоответствий и технических рисков в системе технического документооборота наукоемкого производства**

В наукоемком приборостроении ТД представлена конструкторской (чертежами на детали и сборочные единицы в соответствии с ГОСТ Р 2.109 [17], спецификациями - основной конструкторский документ в соответствии с ГОСТ Р 2.106 [18]) и технологической (карты эскизов в соответствии с ГОСТ 3.1105 [19], маршрутные карты технологических процессов - основной технологический документ в соответствии с ГОСТ 3.1118 [20]) документацией основного и сквозного (разрабатываемой на нескольких производственных площадках) производства.

Результатом анализа жизненного цикла ТД и ее передачи производство в соответствии с требованиями СМК организации построена контекстная диаграмма IDEF0 (рис.3).

Первичные сведения об изделии обрабатываются разработчиком, результатом обработки становится разработанная ТД на изделие. Далее разработанная ТД проходит стадию проверки при участии разработчика, проверяющего и технологического контролера. Проверенная ТД согласуется при участии разработчика и нормоконтролера. Согласованная ТД утверждается при участии разработчика и утверждающего. После проведения нормоконтролером окончательного нормоконтроля утвержденной ТД становится возможным осуществление завершающего этапа проектного цикла ТДО - принятия ТД на учет в архиве.

На стадиях проверки, согласования, утверждения и окончательного нормоконтроля имеется риск возникновения несоответствий

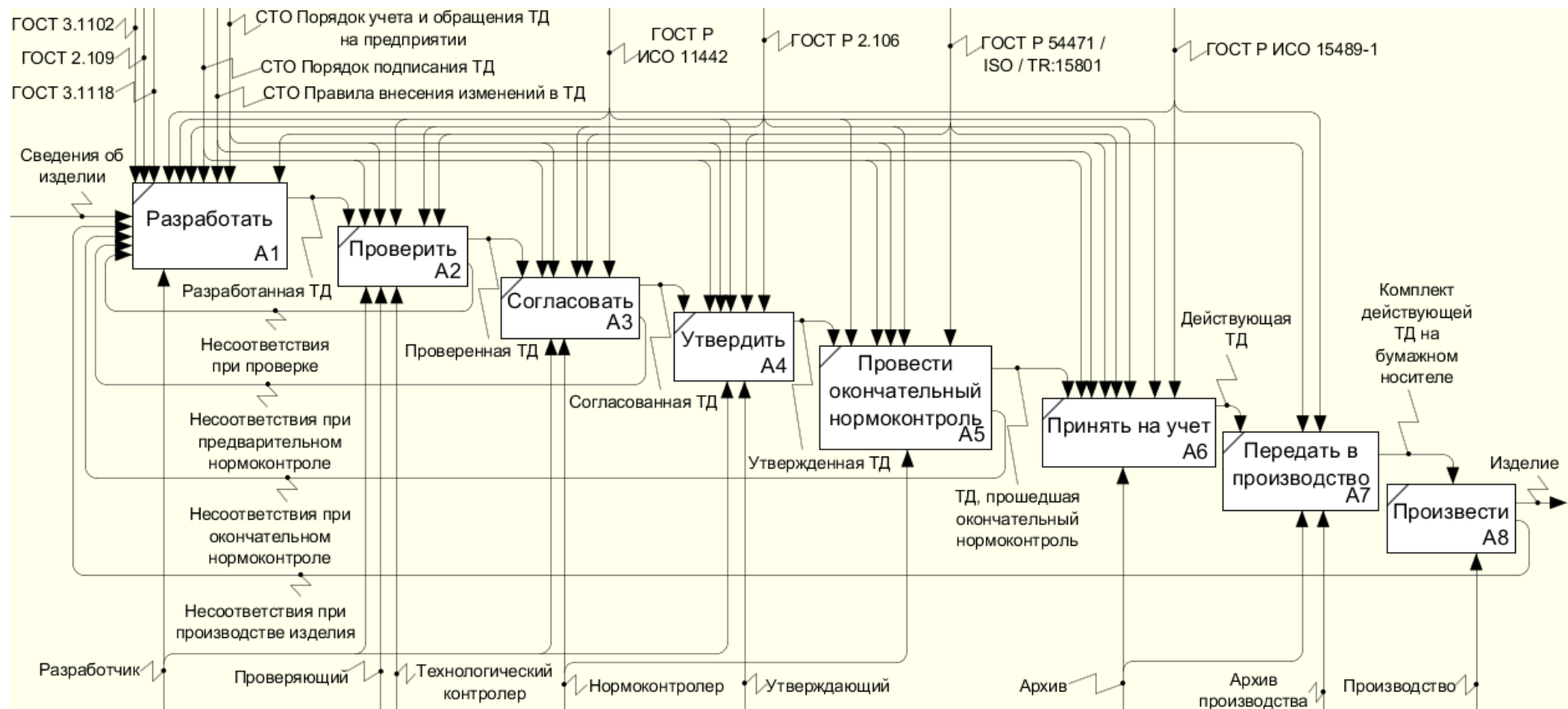


Рисунок 3 – Контекстная диаграмма жизненного цикла технической документации и ее передачи в производство

при согласовании ТД. В случае его возникновения ТД отправляется обратно на доработку на этап разработки.

Переданная на учет в архиве ТД приобретает статус действующей. Информация об изделии распределяется в головном архиве организации в виде подлинников и в архиве производственных подразделений в виде копий ТД соответственно. На основе переданной в производство информации об изделии в виде действующей ТД осуществляется процесс производства изделий, который также сопряжен с риском возникновения несоответствий.

Контекстная диаграмма показывает, что наибольшим риском, связанным с увеличением длительности разработки изделия, является процесс непосредственного производства изделия (блок А8). При возникновении несоответствий требуется исправление обнаруженных ошибок в ТД, что порождает необходимость повторного согласования ТД, занимая продолжительное время. Длительность процесса согласования и ввода в действие ТД в случае возникновения несоответствий также увеличивается.

С целью установления причин возникновения несоответствий на этапе производства изделий проведен FMEA-анализ [21] (приложение А), который показывает, что основой большинства несоответствий, возникающих в процессах ТДО, является отсутствие материалов и покупных комплектующих изделий, указанных в ТД, вследствие недостаточной оперативности передачи информации об изделии, выраженной в ТД, от отделов проектирования в производство. Оценка ПЧР осуществлялась на основе шкалы рангов тяжести последствий, характеристик появления и выявления несоответствий, представленной в таблице 1.

Таблица 1 – шкала рангов тяжести последствий, характеристик появления и выявления несоответствий

| Тяжесть последствий несоответствия (S) | Характеристика появления несоответствий (O) | Характеристика выявления несоответствия (D) | Ранг |
|--|---|---|------|
| Без последствий                        | Очень низкая                                | Гарантированная                             | 1    |
| Очень незначительная                   | Низкая                                      | Очень хорошая                               | 2    |
| Незначительная                         | Не очень низкая                             | Хорошая                                     | 3    |
| Очень низкая                           | Ниже средней                                | Умеренно хорошая                            | 4    |
| Низкая                                 | Средняя                                     | Умеренная                                   | 5    |
| Умеренная                              | Выше средней                                | Слабая                                      | 6    |
| Близка к высокой                       | Близка к высокой                            | Очень слабая                                | 7    |
| Высокая                                | Высокая                                     | Плохая                                      | 8    |
| Очень высокая                          | Очень высокая                               | Очень плохая                                | 9    |
| Крайне высокая                         | Крайне высокая                              | Выявить практически невозможно              | 10   |

Принимая во внимание известные недостатки FMEA-анализа, на основе его результатов (рис.4) проведено их дополнительное ранжирование путем взвешенных оценок методом мозгового штурма с привлечением экспертов (табл.2) [22].

Таблица 2 – Эксперты, участвовавшие в оценке уровня риска несоответствий, возникающих в процессах технического документооборота

| Эксперты |  |
|----------|--|
| 1        | Главный конструктор                              |
| 2        | Начальник серийно-конструкторского отдела        |
| 3        | Начальник проектно-конструкторского отдела       |
| 4        | Начальник технологического отдела                |
| 5        | Начальник удаленной производственной площадки    |
| 6        | Начальник научно-исследовательского отдела       |
| 7        | Начальник головного производства                 |
| 8        | Начальник конструкторского отдела стандартизации |
| 9        | Начальник отдела технической документации        |
| 10       | Начальник службы качества                        |

Ранжирование полученных оценок проводилось в соответствии со шкалой, представленной в таблице 3.

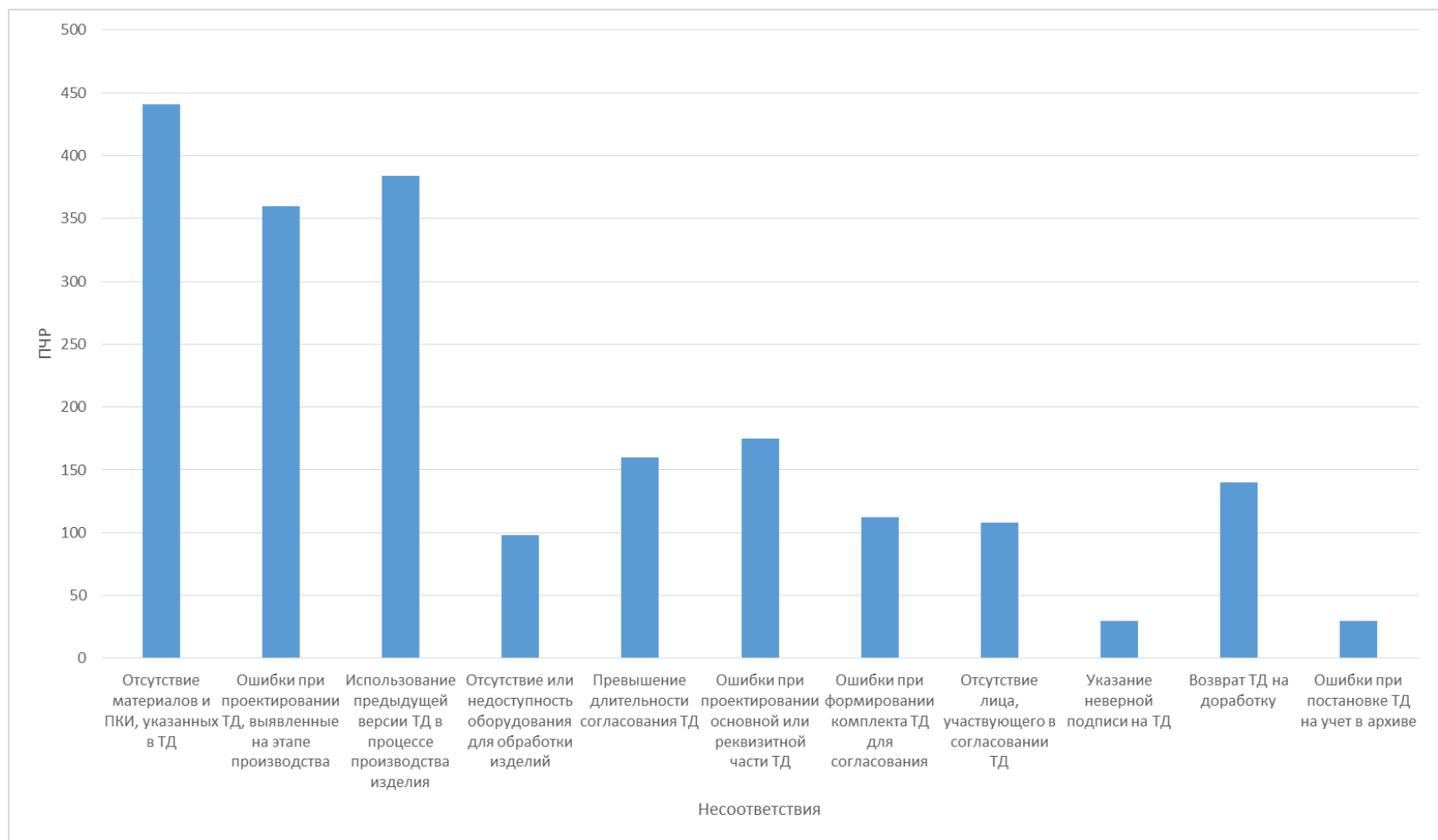


Рисунок 4 – Результаты FMEA-анализа процессов жизненного цикла технической документации и ее передачи производство

Таблица 3 - Шкала ранжирования уровня рисков:

| Уровень риска | Значение суммы оценок $Q_i$ |
|---------------|-----------------------------|
| Низкий        | $1 \leq Q_i \leq 33$        |
| Средний       | $34 \leq Q_i \leq 66$       |
| Высокий       | $67 \leq Q_i \leq 100$      |

Весовые коэффициенты несоответствий определяются методом экспертных оценок, при этом оценки экспертов должны быть согласованными, что проверяется расчетом коэффициента конкордации Кендалла [23]:

$$W = \frac{12S_W}{m^2(n^3 - n)}, \quad (1)$$

где

$$S_W = \sum_{i=1}^n (Q_i - Q)^2, \quad (2)$$

где  $Q$  - суммарный средний вес несоответствия, определяется по формуле:

$$Q = \frac{\sum_{i=1}^n Q_i}{n}, \quad (3)$$

где  $n$  – количество оцениваемых параметров.

При помощи критерия согласия Пирсона ( $\chi^2$ ) проводится проверка гипотезы о несогласованности оценок экспертов [24]. Значение критерия согласия Пирсона определяется по формуле:

$$\chi^2 = m \cdot (n - 1) \cdot W, \quad (4)$$

где  $m$  – количество экспертов,  $n$  – количество оцениваемых параметров,  $W$  – коэффициент конкордации Кендалла.

Результаты оценки экспертным методом уровня рисков несоответствий, связанных с процессами ТДО, представлены в таблице 4.

Таблица 4 - Ранжированные риски возникновения несоответствий процессов технического документооборота экспертным методом

| Уровень риска | Наименование риска   | № эксперта |    |    |    |   |    |    |    |    | $Q_i$ | $q_i$ |
|---------------|--|------------|----|----|----|---|----|----|----|----|-------|-------|
|               |  | 1          | 2  | 3  | 4  | 5 | 6  | 7  | 8  | 9  |       |       |
| Высокий       | Отсутствие материалов и ПКИ, указанных в ТД                        | 10         | 10 | 10 | 10 | 9 | 10 | 9  | 9  | 10 | 87    | 0,147 |
| Высокий       | Превышение длительности согласования ТД                            | 8          | 9  | 9  | 9  | 8 | 9  | 10 | 10 | 8  | 80    | 0,135 |
| Высокий       | Ошибки при проектировании ТД, выявленные на этапе производства     | 10         | 8  | 8  | 10 | 9 | 7  | 9  | 5  | 9  | 75    | 0,126 |
| Высокий       | Использование предыдущей версии ТД в процессе производства изделия | 8          | 7  | 8  | 7  | 8 | 9  | 8  | 9  | 9  | 73    | 0,123 |
| Высокий       | Ошибки при проектировании основной или реквизитной части ТД        | 7          | 8  | 8  | 6  | 9 | 9  | 9  | 8  | 6  | 70    | 0,118 |
| Средний       | Ошибки при формировании комплекта ТД для согласования              | 6          | 7  | 8  | 8  | 7 | 8  | 8  | 7  | 7  | 66    | 0,111 |
| Средний       | Отсутствие лица, участвующего в согласовании ТД                    | 6          | 7  | 8  | 8  | 6 | 6  | 5  | 6  | 4  | 56    | 0,094 |
| Средний       | Отсутствие или недоступность оборудования для обработки изделий    | 3          | 5  | 5  | 4  | 3 | 4  | 3  | 4  | 3  | 34    | 0,057 |
| Низкий        | Указание неверной подписи на ТД                                    | 1          | 3  | 4  | 4  | 3 | 2  | 3  | 4  | 2  | 26    | 0,044 |
| Низкий        | Ошибки при постановке ТД на учет в архиве                          | 1          | 2  | 2  | 2  | 1 | 2  | 1  | 3  | 1  | 15    | 0,025 |
| Низкий        | Возврат ТД на доработку  | 1          | 1  | 1  | 1  | 1 | 1  | 1  | 2  | 2  | 11    | 0,019 |



Расчет коэффициента конкордации Кендалла

$$W = \frac{12 \cdot 7524,909}{81 \cdot (1331 - 11)} = 0,845,$$

показывает, что его значение соответствует высокой согласованности экспертов в соответствии со шкалой Марголина и Харрингтона [25].

Для экспертных оценок значение критерия согласия Пирсона составляет:

$$\chi^2 = 10 \cdot (11 - 1) \cdot 0,845 = 76,05$$

Значение критерия согласия Пирсона, полученное в результате расчетов, больше необходимого значения для уровня значимости 5% (18,31) и числа степеней свободы 10 ( $n-1=10$ ). Гипотеза о несогласованности оценок экспертов отклонена. Полученные результаты ранжирования уровня рисков экспертным методом могут быть использованы для дальнейших расчетов.

Построение дерева событий (ЕТА) [26] на основе несоответствий с наиболее высоким ПЧР позволяет уточнить причинно-следственную связь и частоту их возникновения в процессах ТДО. Его результаты (рис.5) показывают, что наибольшее влияние на процессы жизненного цикла ТД и ее передачи производство влияют ошибки при проектировании ТД, выявленные на этапе производства, в основном вызванные отсутствием в ТД необходимых материалов и покупных комплектующих изделий, а также связанные с использованием ТД предыдущих версий вследствие неоперативного обмена информацией об изделии между производственными цехами и отделами проектировки ТД.

На основе результатов взвешивания ранжированных рисков FMEA-анализа экспертным методом осуществляется построение матрицы корреляции рисков процессов ТДО и выпускаемой организацией ТД (QFD-анализ) [27] с целью определения степени влияния несоответствий

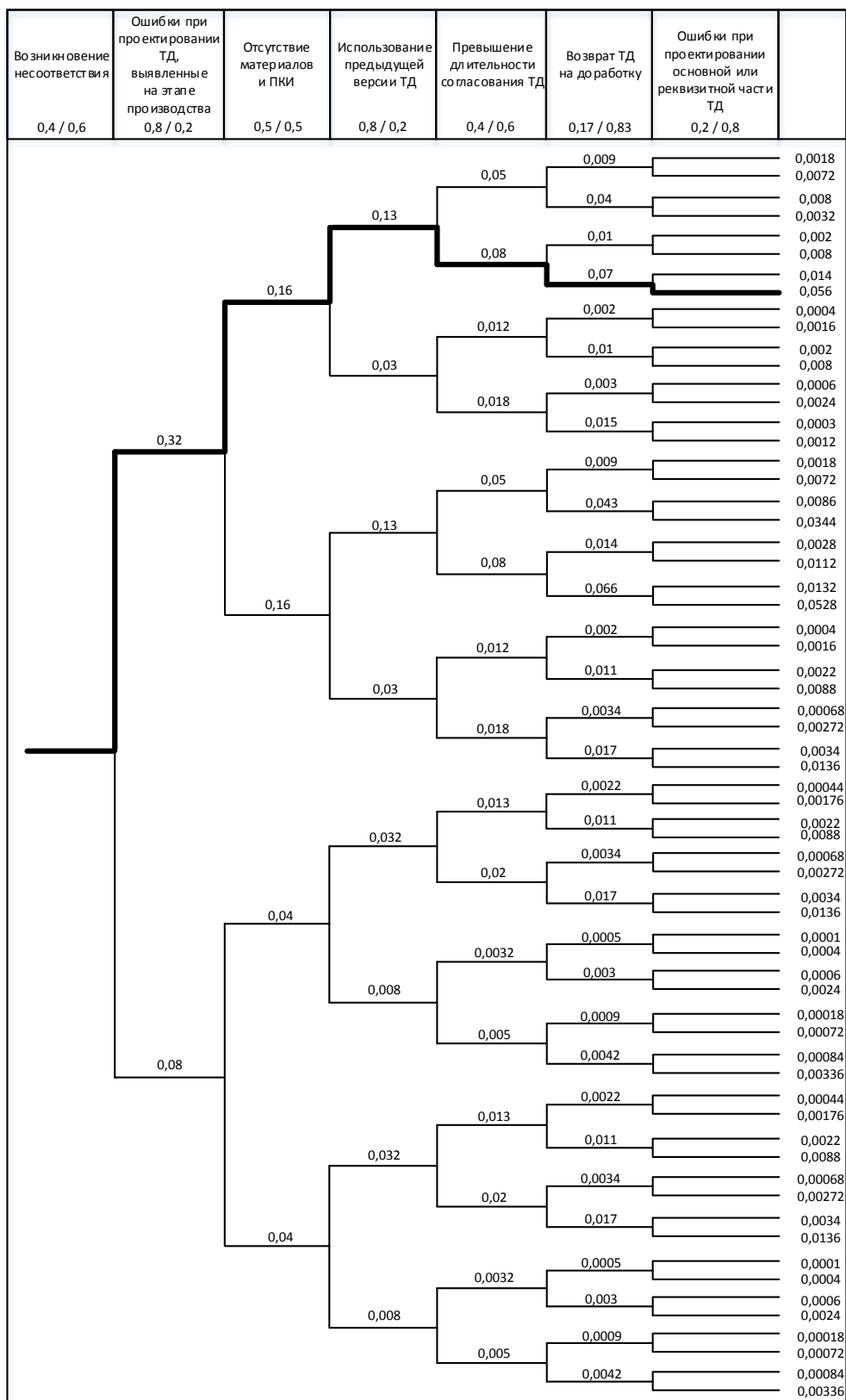


Рисунок 5 – ЕТА-анализ причин возникновения несоответствий в процессах производства изделий

на создание информации об изделии, выраженной в ТД различных видов с использованием весов, полученных экспертным методом (приложение Б).

Результаты QFD-анализа (рис.6) позволили определить наибольшее влияние отсутствия указанных в ТД материалов и покупных комплектующих изделий на ТД этапов проектирования изделия и разработки технологии его изготовления, негативным образом влияя на длительность подготовки комплекта ТД для передачи в производство в регламентированный СМК организации временной такт.



Рисунок 6 – Результаты QFD-анализа степени влияния несоответствий на создание ТД различных видов

\*ЭЗ – схема электрическая принципиальная; ПЭЗ – перечень элементов; ТБ – таблица соединений; ВП – ведомость покупных изделий; ч.ДЕ – чертеж детали; ч.СБ – сборочный чертеж; МЧ – монтажный чертеж; Сп.п.СБ - спецификация на простую сборочную единицу; Сп.с.СБ – спецификация на сложную сборочную единицу; СП.К – спецификация на комплекс; МК – маршрутная карта технологического процесса; КТТП – карта типового технологического процесса; КЭ – карта эскизов; ВУН – ведомость удельных норм; ПСП – производственная спецификация.

Улучшение качества процессов ТДО предполагает:

- обеспечение единого и непрерывного источника информации об изделии;
- возможность обнаружения и управления неформализованными связями в межпроцессном пространстве системы ТДО для изменения конфигурации системы;
- наличие механизма контроля несоответствий, возникающих в процессах ТДО.

Таким образом, для улучшения качества исследуемых процессов ТДО необходимо провести их модернизацию в соответствии с положениями и требованиями СМК организации, в связи с чем необходимо использовать инструмент моделирования систем, позволяющий определить элемент процессов ТДО, подлежащий улучшению.

### **1.3 Создание инструмента оценки готовности изделия к производству, реализованного на базе автоматизированной системы**

Оценка результативности до и после модернизации процессов ТДО требует статистических данных о результатах разработки передаваемой в производство ТД, в связи с чем необходимо разработать соответствующий инструмент.

В среде АС, используемой в организации, конструкторские и технологические данные об изделиях хранятся в электронном виде, а встроенные в АС средства разработки позволяют расширить функционал за счет доработки и настройки соответствующих отчетов [28].

Состав ТД на изделие подвержен постоянным обновлениям и дополнениям на этапе подготовки производства, связанными

с изменениями в спецификациях и чертежах, в материальных и трудовых нормативах, в оснастке и оборудовании, в покупных изделиях и материалах, в технологических процессах и расцеховках. Обновление информации, содержащейся в ТД, осуществляется с помощью извещений об изменении, порождая новую версию каждого измененного документа. Такие изменения могут оказать влияние на другие документы, связанные с основным документом, например по первичной применяемости. Также изделие может иметь множество вариантов собственного исполнения, порождая необходимость ведения ТД на каждое исполнение соответственно. Учетные копии новых версий документов доводятся до абонентов в подразделениях, участвующих в подготовке производства. Количество порождаемых документов увеличивается в геометрической последовательности.

Для запуска изделий в производство необходима своевременная подготовка ТД, не содержащей ошибок и с минимальным количеством отклонений от состава и комплектности документов на изделие, в связи с чем необходим периодический контроль готовности ТД, что занимает значительное время, а также требует дополнительных специалистов при ручном методе. При этом стоит учесть, что в составе разных изделий могут быть применены одни и те же узлы.

АС обрабатывает и собирает информацию о всех имеющихся в составе изделия номенклатурных позициях, о их применяемости, а также содержащихся в них конструкторских и технологических документах, информацию о разработчиках документов, позволяет учитывать связанность различных документов.

Оценка готовности отправки ТД об изделии в производство требует соблюдения следующих правил:

- 1) каждая номенклатурная позиция должна иметь основной ТД: для сборочных единиц - чертеж и спецификация, для деталей - чертеж;

- 2) учитывается только последняя утвержденная версия ТД;
- 3) технологический документ проектируется после утверждения конструкторского документа на одну и ту же позицию;
- 4) номенклатурная позиция, готовая к передаче в производство, содержит в себе спецификации (для сборочных единиц), чертежи и комплекты технологической документации, имеющие статус «Действует»;
- 5) входящие в состав сборочной единицы номенклатурные позиции, содержащие информацию о стандартных и покупных изделиях, не содержат в себе конструкторско-технологической документации, так как данные позиции не требуется производить;
- 6) итоговая спецификация на изделие формируется для получения информации по всем сборочным узлам, входящим в состав изделия;
- 7) при необходимости доработки ТД требуется информация о их разработчиках. Пример отображения реквизитов автора чертежа и конструкторско-технологической документации представлен на рисунке 7;

The screenshot shows a CAD software interface with a parts list and a document table. A red arrow points to a part in the list, and green circles highlight author information in the document table.

| Обозначение    | Наименование   | Баз. ед. изм. | Спец.                               | Техн.                               | Классификатор     |
|----------------|--|---------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------|
| AA81.264.099   | Прибор ЗК14ПВ6   | шт            | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | Приборы           |
| AA57.456.098   | Прибор 2А16ПВ6   | шт            | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | Приборы           |
| Г4.112.911     | Аппаратура А-620 (вариант исполнения 00-381)             | шт            | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | Аппаратура        |
| Г4.112.911-01  | Аппаратура А-620 (вариант исполнения 00-382)             | шт            | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | Аппаратура        |
| Г4.112.911-02  | Аппаратура А-620 (вариант исполнения 00-383)             | шт            | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | Аппаратура        |
| BA2.044.313    | Вспомогательная аппаратура 2К14-03                       | шт            | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | Вспом. аппаратура |
| 67890755345679 | Диод КД661 Д АДБК.432121.034ТУ                           | шт            | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | Прочие            |
| ВП6.677.312    | Вспомогательный прибор 2ПК34                             | шт            | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | Вспом. приборы    |
| 80076536865466 | Модуль электропитания ДММ89-1В71МУВ БКЯЮ.436630.001ТУ ГК | шт            | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | Прочие            |
| 10967444678892 | Кабель Ethernet-витая пара                               | шт            | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | Прочие            |
| БП5.667.665    | Аппаратура ШВ7-541                                       | шт            | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | Аппаратура        |
| Г4.112.911 СБ  | Сборочный чертеж   | шт            | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | Изделия           |

| Глав.                               | Документ     |                         |   |           | эрс              | Версия      |        |  |
|-------------------------------------|--------------|-------------------------|---|-----------|------------------|-------------|--------|--|
|                                     | Вид          | Обозначение             | Наименование  | Статус    |                  | В статусе с | Создал |  |
| <input checked="" type="checkbox"/> | Чертеж       | Г4.112.911 СБ           | Сборочный чертеж  | Действует | 01.11.2016 12:03 | Иванов М.В. |        |  |
| <input checked="" type="checkbox"/> | Спецификация | Г4.112.911              | Аппаратура А-620 (вариант исполнения 00-381)                  | Действует | 01.11.2016 12:03 | Иванов М.В. |        |  |
| <input checked="" type="checkbox"/> | Комплект ТД  | Г4.112.911 - техпроцесс | Г4.34711.95263 - Аппаратура А-620 (вариант исполнения 00-381) | Действует | 01.11.2016 12:04 | Иванов М.В. |        |  |

Рисунок 7 – Номенклатурная позиция, содержащая утвержденные технические документы с реквизитами авторов

8) содержащиеся в номенклатурной позиции конструкторский и технологический документы имеют различные обозначения, что затрудняет оценку готовности изделия (рис.8);

9) важной для разработчика информацией является входимость номенклатурных позиций в другие, отражающая очередность подготовки документов для данной позиции и характер применения данной сборочной единицы или детали.

|               |                |  |    |                                     |                                     |                   |
|---------------|----------------|--|----|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------|
| и. аппаратура | AA57.456.098   | Прибор 2А16ПВ6   | шт | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | Приборы           |
| и. приборы    | Г4.112.911     | Аппаратура А-620 (вариант исполнения 00-381)             | шт | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | Аппаратура        |
| оры           | Г4.112.911-01  | Аппаратура А-620 (вариант исполнения 00-382)             | шт | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | Аппаратура        |
| е             | Г4.112.911-02  | Аппаратура А-620 (вариант исполнения 00-383)             | шт | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | Аппаратура        |
| ИТЬ           | ВА2.044.313    | Вспомогательная аппаратура 2К14-03                       | шт | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | Вспом. аппаратура |
|               | 67890755345679 | Диод КД661Д АДБК.432121.034ТУ                            | шт | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | Прочие            |
|               | ВП6.677.312    | Вспомогательный прибор 2ПК34                             | шт | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | Вспом. приборы    |
|               | 80076536865466 | Модуль электропитания ДММ89-1В71МУВ БКЯЮ.436630.001ТУ ГК | шт | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | Прочие            |
|               | 10967444678892 | Кабель Ethernet-витая пара                               | шт | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | Прочие            |
|               | БП5.667.665    | Аппаратура ШВ7-541                                       | шт | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | Аппаратура        |
|               | Г4.112.911 СБ  | Сборочный чертеж   | шт | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | Изделия           |

| менклатуры: Г4.112.911 - Аппаратура А-620 (вариант исполнения 00-381)\Documents, связанные с номенклатурой |              |                         |   |      |           |                  |             |
|--|--------------|-------------------------|---|------|-----------|------------------|-------------|
| Глав.  | Документ     |                         |   | зрси | Версия    |                  |             |
|  | Вид          | Обозначение             | Наименование  |      | оме       | Статус           | В статусе с |
| <input checked="" type="checkbox"/>  | Чертеж       | Г4.112.911 СБ           | Сборочный чертеж  | 1    | Действует | 01.11.2016 12:03 | Иванов М.В. |
| <input checked="" type="checkbox"/>  | Спецификация | Г4.112.911              | Аппаратура А-620 (вариант исполнения 00-381)                  | 1    | Действует | 01.11.2016 12:03 | Иванов М.В. |
| <input checked="" type="checkbox"/>  | Комплект ТД  | Г4.112.911 - техпроцесс | Г4.34711.95263 - Аппаратура А-620 (вариант исполнения 00-381) | 1    | Действует | 01.11.2016 12:04 | Иванов М.В. |

Рисунок 8 - Номенклатурная позиция, содержащая технические документы с конструкторским и технологическим десятичным номером

Основой для отчета служит итоговая спецификация, содержащая в себе результат разузлования всех элементов изделия в виде номенклатурных позиций (рис.9).

Оценка готовности изделия к передаче в производство предполагает наличие информации об имеющихся в изделии номенклатурных позициях, содержащих в себе утвержденные ТД, а именно: обозначение и реквизиты автора чертежа, спецификации и технологии на деталь и сборочную единицу соответственно, а также о применимости данной номенклатурной позиции.

| Обозначение   | Наименование                                 | Баз. ед. изм. | Спец.                               | Техн.                               | Классификатор     |
|---------------|--|---------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------|
| Г4.112.911    | Аппаратура А-620 (вариант исполнения 00-381) | шт            | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | Сборочные единицы |
| Г4.112.911.01 | Аппаратура А-620 (вариант исполнения 00-382) | шт            | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | Сборочные единицы |
| Г4.112.911.02 | Аппаратура А-620 (вариант исполнения 00-383) | шт            | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | Сборочные единицы |

| Номенклатура    |  | Номенклатура |         | Раздел              |         |
|-----------------|--|--------------|---------|---------------------|---------|
| Обозначение     | Наименование   | Код          | Обоз.   | Наимен.             | Наимен. |
| Г4.112.911      | Аппаратура А-620 (вариант исполнения 00-381)             |              | СБ      | Сборочные единицы   |         |
| 67890755345679  | Диод КД661Д А.ДБК. 432121.034ТУ                          |              | Изделия | Изделия             |         |
| 80076536865466  | Модуль электропитания ДММ89-1В71МУВ БКЯЮ.436630.001ТУ ГК |              | Изделия | Изделия             |         |
| 10967444678932  | Кабель Ethernet-витая пара                               |              | Изделия | Изделия             |         |
| AA81.264.099    | Прибор ЗК14ПВ6   |              | СБ      | Сборочные единицы   |         |
|                 | Втулка 5-5 ГОСТ19421-74/НО-68-1 ТУ38 005 1166-73         |              | СТД     | Стандартные изделия |         |
|                 | Шайба 3.65Г.016 ГОСТ6702-70                              |              | СТД     | Стандартные изделия |         |
|                 | Шуруп 1-2,5*10.016 ГОСТ 1145-80                          |              | СТД     | Стандартные изделия |         |
| ВП6.677.312     | Вспомогательный прибор 2ПК34                             |              | СБ      | Сборочные единицы   |         |
|                 | Кварц ГОСТ 9077-82                                       | 04850701005  | М       | Материалы           |         |
|                 | Изолон ППЗ 3002 ТУ2244-012-00203476-98                   | 05826375020  | М       | Материалы           |         |
|                 | Полиамид ПД1-35-01 ТУ16-50.3208-81                       | 03261320051  | М       | Материалы           |         |
| BA2.044.313     | Вспомогательная аппаратура 2К14-03                       |              | СБ      | Сборочные единицы   |         |
| BA2.044.313 СБ  | Сборочный чертеж   |              | Изделия | Изделия             |         |
| AA81.264.099 СБ | Сборочный чертеж   |              | ДОК     | Документация        |         |
| AA57.456.098    | Прибор 2А16ПВ6   |              | СБ      | Сборочные единицы   |         |
|                 | Вилка СНЦ127-7/12 ВП117-1-В НКЦС.434410.511ТУ            |              | Прочие  | Прочие изделия      |         |
|                 | Розетка СНП347-1ОРВ11-В РЮМК.430420.012 ТУ               |              | Прочие  | Прочие изделия      |         |
|                 | Фильтр Б23А-1000Ф-В О.ЖО.206.021ТУ                       | 6289107055   | Прочие  | Прочие изделия      |         |
| БП5.667.665     | Аппаратура ШВ7-541                                       |              | СБ      | Сборочные единицы   |         |
| БП5.667.665 СБ  | Сборочный чертеж   |              | ДОК     | Документация        |         |
| МД77.554.298    | Модуль ПР-4389-С   |              | СБ      | Сборочные единицы   |         |
| Г4.112.911 СБ   | Сборочный чертеж   |              | ДОК     | Документация        |         |

Рисунок 9 – Итоговая спецификация изделия

Также необходимо получить данные о соотношении количества разработанных ТД к незавершенным, выраженном в абсолютном значении и в процентном отношении. Необходимые данные для формирования отчета выбираются автоматизированным способом с помощью запросов из базы данных MS Access на языке SQL средствами АС.

Фрагмент отчета о ТД для оценки готовности к запуску изделия в производство представлен на рисунке 10.

| Изделие: Г4.112.911 "Аппаратура А-620 (вариант испо |              | Не разработанных чертежей: 4 из 7 ( 43 % )   |                 | Не разработанных Спецификаций: 0 из 4 ( 100 % ) |              | Не разработано ТД: 5 из 7 ( 29 % ) |   |               |              |
|---|--------------|--|-----------------|---|--------------|------------------------------------|---|---------------|--------------|
|   |              | Разработано чертежей: 3                      |                 | Разработано Спецификаций: 4                     |              | Разработано ТД: 2                  |   |               |              |
| №   | Номенклатура | Чертеж                                       |                 | Спецификация                                    |              | Технология                         |   | Применяемость |              |
|   | Обозначение  | Наименование                                 | Обозначение     | Разработчик                                     | Обозначение  | Разработчик                        | Обозначение   | Разработчик   | Обозначение  |
| 1   | AA57.456.098 | Прибор 2А16ПВ6                               |                 |   | AA57.456.098 | Иванов М.В.                        |   | Иванов М.В.   | Г4.112.911   |
| 2   | AA81.264.099 | Прибор ЗК14ПВ6                               | AA81.264.099 СБ | Иванов М.В.                                     | AA81.264.099 | Иванов М.В.                        |   |               | Г4.112.911   |
| 3   | БП5.667.665  | Аппаратура ШВ7-541                           |                 | Иванов М.В.                                     |              |                                    | ПУ.10161.01099 - Аппаратура ШВ7-541                           | Иванов М.В.   | Г4.112.911   |
| 4   | BA2.044.313  | Вспомогательная аппаратура 2К14-03           | BA2.044.313 СБ  | Иванов М.В.                                     |              |                                    |   |               | AA81.264.099 |
| 5   | ВП6.677.312  | Вспомогательный прибор 2ПК34                 |                 |   | ВП6.677.312  | Иванов М.В.                        |   |               | AA81.264.099 |
| 6   | Г4.112.911   | Аппаратура А-620 (вариант исполнения 00-381) | Г4.112.911 СБ   | Иванов М.В.                                     | Г4.112.911   | Иванов М.В.                        | Г4.34711.95263 - Аппаратура А-620 (вариант исполнения 00-381) | Иванов М.В.   | Г4.112.911   |
| 7   | МД77.554.298 | Модуль ПР-4389-С                             |                 |   |              |                                    |   | Иванов М.В.   | Г4.112.911   |

Рисунок 68 - Фрагмент отчета о готовности ТД на изделие



Разработанный отчет предоставляет данные для оценки готовности ТД к запуску изделия в производство вместо оценки состояния документации об изделии вручную, позволяя в реальном масштабе времени контролировать его состояние [29]. Полученные при формировании отчета статистические данные используются для оценки качества процессов ТДО до и после модернизации.

#### **1.4 Разработка методики улучшения качества процессов выявления несоответствий и технических рисков в системе технического документооборота**

Модернизация процессов ТДО влияет на качество рассматриваемой системы, в связи с чем необходима разработка соответствующей методики оценки параметров качества рассматриваемых процессов.

За основу взята модель качества при использовании программных продуктов, согласно ГОСТ Р ИСО/МЭК 25022 [30], в соответствии с которой полная структура методики улучшения качества процессов ТДО [31] представлена на рисунке 11 и включает в себя:

- контроль состояния процессов ТДО на основе значений показателей результативности в соответствии с критериями, регламентируемыми СМК организации (представлены в таблице 5) [32];
- определение характера несоответствий и степени их влияния на процессы ТДО с помощью классических инструментов управления качеством: FMEA, ETA, QFD;
- анализ структуры процессов ТДО и обнаружение проблемной подсистемы с использованием имитационной модели, учитывающей неформализованные связи в межпроцессном пространстве производственной системы;

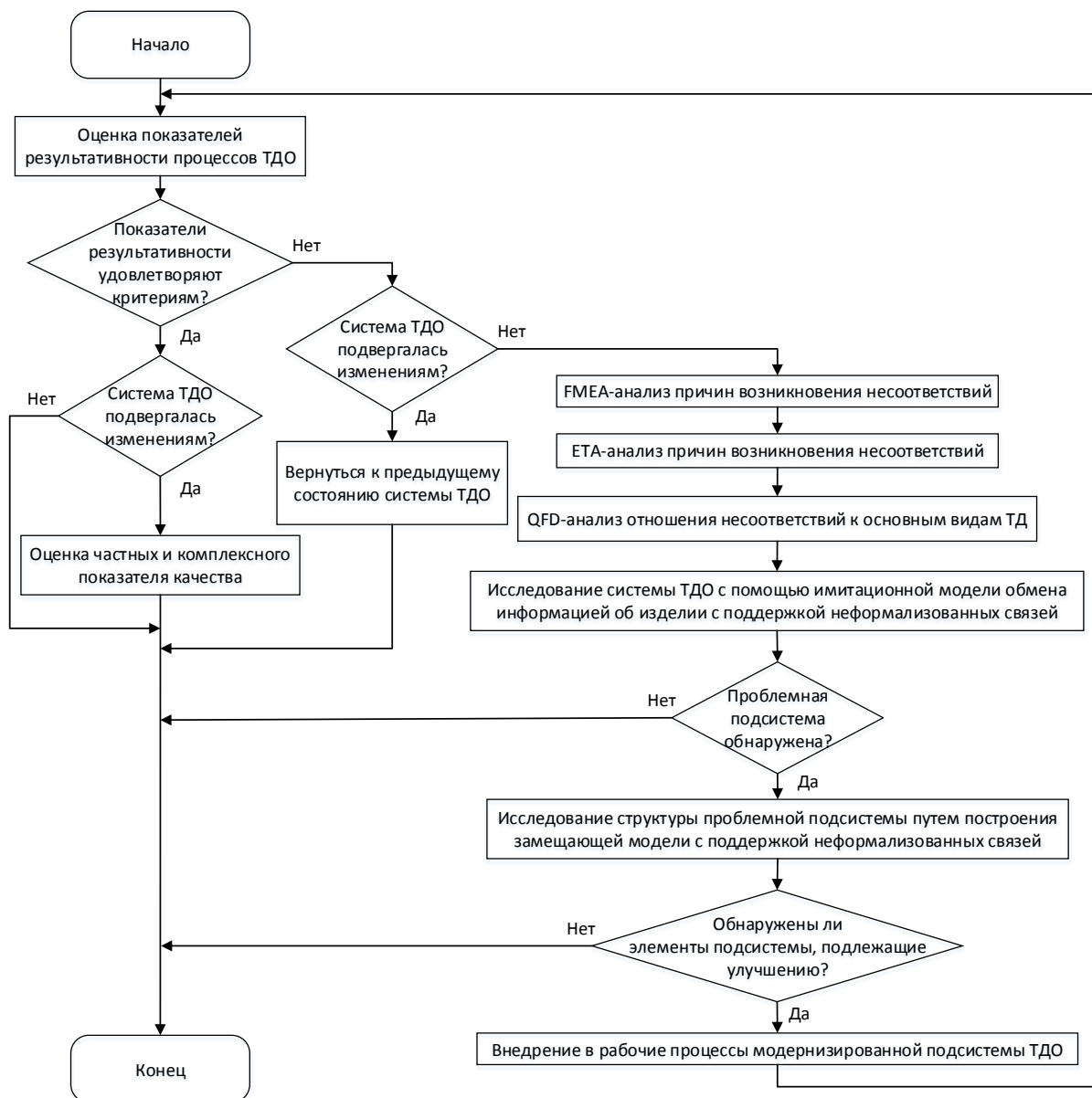


Рисунок 11 – Структура методики улучшения качества процессов выявления несоответствий и технических рисков в системе

- исследование обнаруженной проблемной подсистемы ТДО путем построения ее замещающей структурной модели, учитывающей неформализованные связи между ее элементами с последующей модернизацией в соответствии с требованиями СМК организации;
- оценка частных и интегральных показателей качества процессов ТДО.

Таблица 5 – Показатели результативности процессов ТДО

| Номер | Показатель результативности процессов ТДО  | Выражение                        | Аргументы  | Соответствующий показатель по ГОСТ Р ИСО/МЭК 25022 | Критерии   |
|-------|--|----------------------------------|--|--|--|
| 1     | Средняя длительность согласования по каждому виду ТД (величина, обратная эффективности затраченного времени) | $L = \frac{\sum_{i=1}^n T_i}{n}$ | $T_i$ - длительность согласования $i$ -го ТД;<br>$n$ - количество утвержденных ТД за рассматриваемый период              | Эффективность затраченного времени, Еу-2-S         | $L < 1мес.$ – не требуются улучшения;<br>$1мес. \leq L < 2мес.$ – требуются предупреждающие действия;<br>$L \geq 2мес.$ – требуются корректирующие действия. |
| 2     | Доля утвержденной ТД   | $A = \frac{n}{n_{общ}}$          | $n$ - количество утвержденных ТД за рассматриваемый период;<br>$n_{общ}$ - общее количество ТД за рассматриваемый период | Выполнение задачи, Ef-1-G                          | $A > 90\%$ – не требуются улучшения;<br>$60\% < A \leq 90\%$ – требуются предупреждающие действия;<br>$A < 60\%$ – требуются корректирующие действия         |
| 3     | Доля ошибок при проектировании ТД  | $E = \frac{\sum_{i=1}^n k_i}{n}$ | $k_i$ - количество возвратов $i$ -го ТД на доработку;<br>$n$ - количество утвержденных ТД за рассматриваемый период      | Задачи с ошибками, Ef-4-G                          | $E < 10\%$ – не требуются улучшения;<br>$10\% \leq E < 20\%$ – требуются предупреждающие действия;<br>$E \geq 20\%$ – требуются корректирующие действия      |

Оценка единичных показателей качества при рассмотрении системы до и после ее модернизации производится по формуле:

$$Q_i = \frac{p - p_{\text{баз}}}{p_{\text{баз}}}, \quad (5)$$

где  $p_{\text{баз}}$  и  $p$  - значения показателей результативности до и после внедрения разработки соответственно.

Количество рассмотренных показателей качества – небольшое, они неоднородны и разброс между ними составляет менее 0,5. В данных условиях в среде научной литературы расчет комплексного показателя качества рекомендуется осуществлять по формуле среднего гармонического взвешенного. Поскольку признаком улучшения характеристики рассматриваемой системы является снижение комплексного показателя качества, то значение комплексного показателя качества должно быть отрицательным:

$$Q_{\text{комп}} = -\frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{\alpha_i}{Q_i}}, \quad (6)$$

где  $\alpha_i$  - весовой коэффициент частного показателя качества,  $Q_i$  - частный показатель качества, рассчитанный по формуле (5).

Для оценки результативности процессов ТДО требуется формирование количественных критериев, согласно требованиям СМК организации в области документооборота в бумажном виде (таблица 6). Средняя длительность согласования ТД, равная 1 месяцу (30 дней) представляет собой минимальный такт времени, в течение которого необходимо составить комплект ТД для передачи в производство. ТД представлена конструкторской, технологической и сквозной технологической

документацией (разрабатываемой несколькими производственными площадками организации) [33].

Таблица 6 – Критерии результативности процессов ТДО

| Показатель результативности процессов ТДО                               | Критерий               |                                     |                                    |
|---|------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|
|   | Не требуются улучшения | Необходимы предупреждающие действия | Необходимы корректирующие действия |
| Средняя длительность согласования конструкторской документации          | <1 месяц               | 1-2 месяцев                         | > 2 месяцев                        |
| Средняя длительность согласования технологической документации          | <1 месяц               | 1-2 месяцев                         | > 2 месяцев                        |
| Средняя длительность согласования сквозной технологической документации | <1 месяц               | 1-2 месяцев                         | > 2 месяцев                        |
| Доля утвержденной ТД  | >90%                   | 60-90%                              | < 60%                              |
| Доля ошибок при проектировании ТД                                       | < 10%                  | 10-20%                              | >20%                               |

### **1.5 Практическое применение разработанной методики улучшения качества процессов системы технического документооборота для наукоемких производственных предприятий приборостроительной отрасли**

Согласно разработанной методике, необходим предварительный сбор статистических данных для дальнейшей оценки показателей результативности процессов ТДО до и после модернизации с помощью инструмента оценки готовности ТД на изделие для передачи в производство в среде АС.

Результаты расчета показателей результативности процессов ТДО до и после их модернизации, а также весовых коэффициентов на их основе, представлены в таблице 7.

Таблица 7 – Итоги расчета показателей результативности процессов ТДО до ( $t_1$ ) и после ( $t_2$ ) модернизации, а также весовых коэффициентов  $\alpha_i$  на их основе

| Показатель результативности процессов ТДО, единица измерения                     | $t_1$ | $t_2$ | $\alpha_i$ |
|--|-------|-------|------------|
| 1. Средняя длительность согласования конструкторской документации, дней          | 53    | 44    | 0,24       |
| 2. Средняя длительность согласования технологической документации, дней          | 31    | 26    | 0,2        |
| 3. Средняя длительность согласования сквозной технологической документации, дней | 35    | 27    | 0,16       |
| 4. Доля утвержденной ТД  | 0,87  | 0,92  | 0,15       |
| 5. Доля ошибок при проектировании ТД   | 0,15  | 0,09  | 0,24       |
| Коэффициент конкордации(W)   | 0,845 |       |            |

Оценка результативности процессов ТДО в соответствии с критериями (табл.6) показывает, что:

- средняя длительность согласования конструкторской документации снизилась с 53 до 44 дней, что требует разработки предупреждающих действий по дальнейшему снижению данного показателя;
- средние длительности согласования технологической и сквозной технологической (выполняемых на различных площадках предприятия) документации снизились до приемлемого уровня (с 31 до 26 дней и с 35 до 27 дней соответственно);
- доля введенной в действие ТД увеличилась (с 87% до 92%);
- доля ошибок при проектировании ТД снизилась до приемлемого уровня (с 15% до 9%).

Весовые коэффициенты частных показателей качества определяются с помощью экспертных оценок влияния модернизации процессов ТДО на показатели результативности методом мозгового штурма (табл.8)

в соответствии со шкалой, представленной в таблице 9. В оценке участвовали эксперты, представленные в таблице 2.

Таблица 8 - Значения весовых коэффициентов  $\alpha_i$  показателей результативности модернизированных процессов ТДО

| Показатель результативности процессов ТДО                                      | Эксперты |   |   |   |   |   |   |   |   |    | $\alpha_i$ |
|--|----------|---|---|---|---|---|---|---|---|----|------------|
|  | 1        | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |            |
| Средняя длительность согласования конструкторской документации                 | 7        | 8 | 8 | 9 | 8 | 7 | 9 | 9 | 9 | 7  | 0,24       |
| Средняя длительность согласования технологической документации                 | 9        | 8 | 9 | 7 | 6 | 8 | 6 | 5 | 6 | 5  | 0,2        |
| Средняя длительность согласования сквозной технологической документации        | 6        | 8 | 3 | 2 | 9 | 7 | 5 | 6 | 3 | 4  | 0,16       |
| Общее количество ТД, введенное в действие                                      | 7        | 6 | 3 | 6 | 2 | 5 | 4 | 6 | 7 | 6  | 0,15       |
| Общее количество ошибок в ТД, выявленных в процессе согласования и утверждения | 9        | 8 | 7 | 8 | 9 | 7 | 8 | 9 | 8 | 9  | 0,24       |
| Коэффициент конкордации (W)  | 0,845    |   |   |   |   |   |   |   |   |    |            |

Таблица 9 - Шкала влияния модернизации процессов ТДО на показатели результативности

| <b>Шкала влияния модернизации процессов ТДО на показатели результативности</b> |                    |
|--|--------------------|
| 10   | Огромное           |
| 9  | Существенное       |
| 8  | Очень сильное      |
| 7  | Сильное            |
| 6  | Удовлетворительное |
| 5  | Слабое             |
| 4  | Очень слабое       |
| 3  | Крайне слабое      |
| 2  | Почти нет          |
| 1  | Нет                |

Расчет показателей результативности процессов ТДО осуществляется в соответствии с выражениями, представленными в таблице 5.

Значение коэффициента конкордации Кендалла свидетельствует о высокой согласованности экспертов в соответствии со шкалой Марголина и Харрингтона.

Для экспертных оценок значение критерия согласия Пирсона составляет:

$$\chi^2 = 10 \cdot (5 - 1) \cdot 0,845 = 33,808 ,$$

что больше необходимого значения для уровня значимости 5% (9,49) и числа степеней свободы 4 ( $n-1=4$ ). Гипотеза о несогласованности оценок экспертов отклонена.

Полученные результаты ранжирования экспертным методом могут быть использованы для расчета комплексных показателей качества за рассматриваемые периоды: до ( $p_{баз}$ ) и после ( $p$ ) модернизации процессов ТДО. Значения частных и комплексного показателей качества рассчитываются по формулам (5) и (6) соответственно (табл.10).

Таблица 10 - Значения частных показателей качества  $Q_i$  процессов ТДО на основе показателей результативности до ( $p_{баз}$ ) и после ( $p$ ) модернизации

| Наименование показателя результативности, единица измерения                      | $p_{баз}$ | $p$  | $Q_i$ | $\alpha_i$ |
|--|-----------|------|-------|------------|
| 1. Средняя длительность согласования конструкторской документации, дней          | 53        | 44   | -0,17 | 0,24       |
| 2. Средняя длительность согласования технологической документации, дней          | 31        | 26   | -0,16 | 0,2        |
| 3. Средняя длительность согласования сквозной технологической документации, дней | 35        | 27   | -0,22 | 0,16       |
| 4. Общее количество ТД, введенное в действие                                     | 3032      | 3561 | 0,17  | 0,15       |
| 5. Общее количество ошибок в ТД, выявленных в процессе согласования              | 337       | 292  | -0,13 | 0,24       |
| Комплексный показатель качества ( $Q_{комп}$ )                                   | 0,23      |      |       |            |
| Коэффициент конкордации ( $W$ )  | 0,845     |      |       |            |



Оценка частных и комплексного показателей качества свидетельствует об общем улучшении состояния процессов ТДО по сравнению с исходным.

Применение разработанной методики для модернизации части процессов ТДО позволило уменьшить среднюю длительность согласования ТД (рис.12), позволяя пользователям АС оперативно готовить комплект ТД к передаче в производство, что также позволяет увеличить общее количество вводимой в действие ТД на изделия.

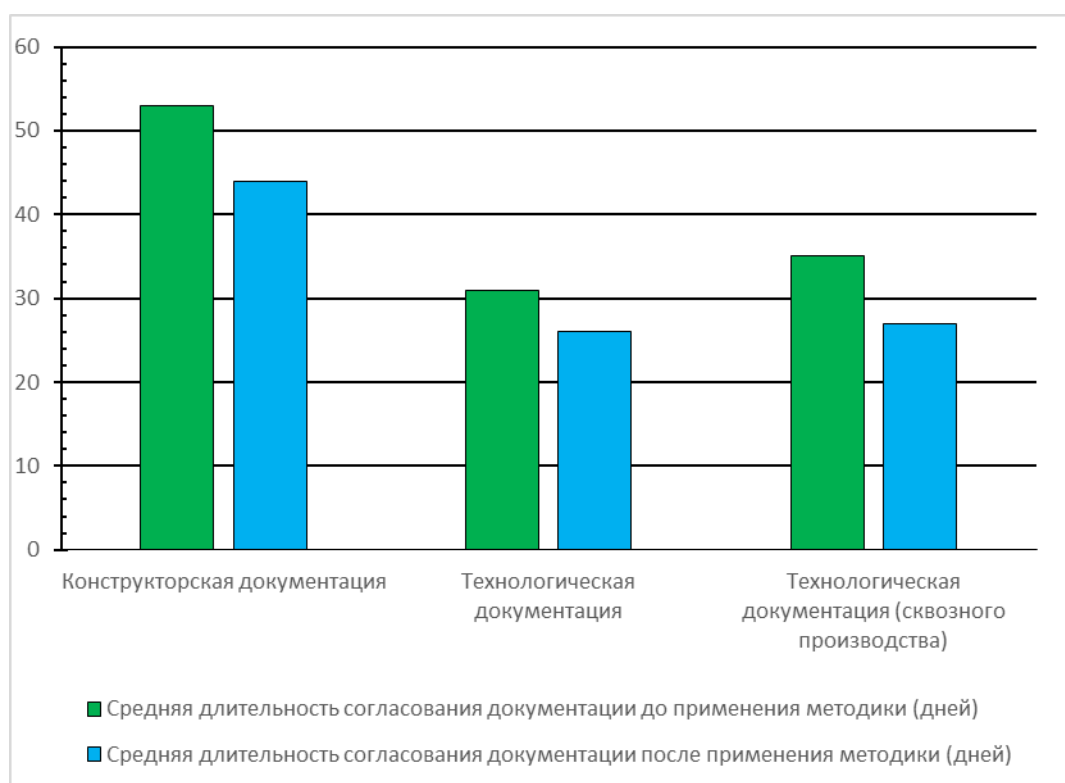


Рисунок 12 – Средняя длительность согласования конструкторской, технологической и сквозной технологической документации до и после модернизации процессов ТДО

Применение разработанной методики изменяет СМК, порождая конкуренцию в использовании традиционных и обновленных процессов ТДО и их влиянию на количество вводимой в действие ТД (рис.13).

Внедрение в ТДО модернизированных процессов также позволяет предупреждать появление несоответствий на стадии производства изделий, снижая общее количество ошибок в ТД (рис.14).

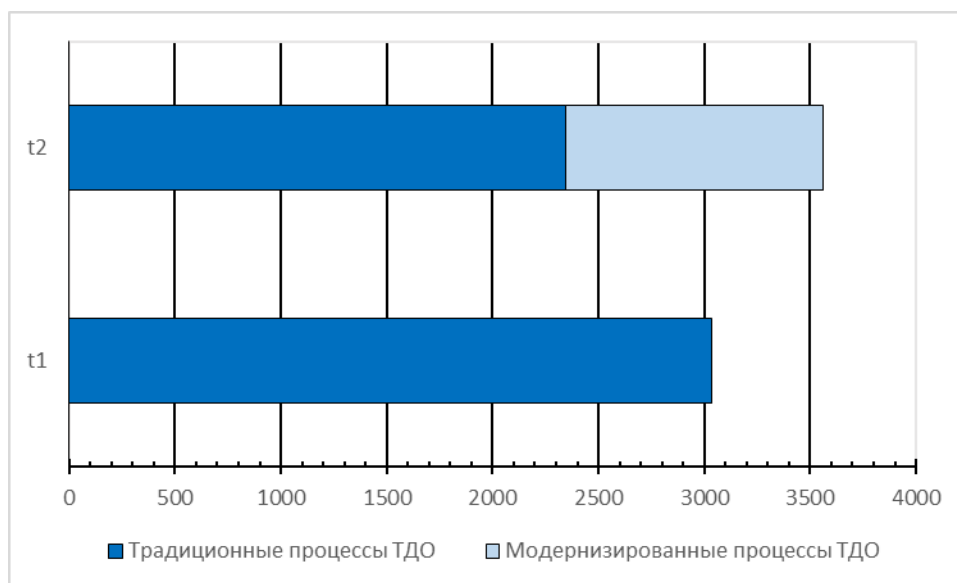


Рисунок 13 – Количество ТД, введенное в действие за периоды до ( $t_1$ ) и после ( $t_2$ ) применения методики

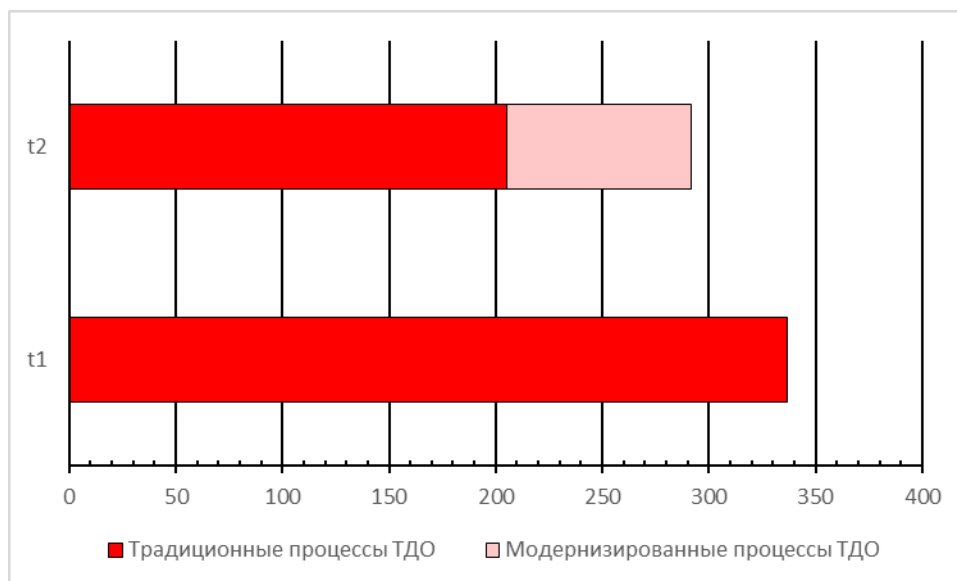


Рисунок 14 – Количество ошибок в ТД, выявленных в процессе производства изделий до ( $t_1$ ) и после применения методики ( $t_2$ )

## Выводы по главе 1

Получена функциональная модель жизненного цикла ТД и ее передачи производство с помощью методологии IDEF0, позволившая выявить информацию о протекающих в системе основных процессах, а также связанными с ними проблемах на стадии производства изделий. Контекстная диаграмма показывает, что при возникновении несоответствий на этапе производства изделий требуется исправление обнаруженных ошибок в ТД путем повторной разработки, согласования и передачи в производство новой ТД, увеличивая длительность разработки изделий.

Исследование причинно-следственных связей рисков, связанных с процессами создания ТД и ее передачи в производство на основе FMEA-анализа показывает, что основной причиной возникновения несоответствий является отсутствие материалов и покупных комплектующих изделий, указанных в ТД, вследствие неоперативного обмена информацией об изделии между участниками процесса ТДО недостаточной оперативности передачи информации об изделии, выраженной в ТД, от отделов проектирования в производство.

Результаты исследования системы ТДО на основе ЕТА-анализа несоответствий с наиболее высоким ПЧР показывают, что наибольшей частотой возникновения обладают ошибки при проектировании ТД, выявленные на этапе производства, вызванные отсутствием в ТД необходимых материалов и покупных комплектующих изделий, а также связанные с использованием ТД предыдущих версий вследствие неоперативного обмена информацией об изделии между проектными и производственными отделами организации.

QFD-анализа позволяет определить наибольшее влияние отсутствия указанных в ТД материалов и покупных комплектующих изделий на ТД этапов проектирования изделия и разработки технологии его изготовления, негативным образом влияя на длительность подготовки комплекта ТД для передачи в производство в регламентированный СМК организации временной такт.

Выбрана модель качества на основе ГОСТ Р ИСО/МЭК 25022, в соответствии с которой определены показатели и критерии результативности рассматриваемой системы ТДО: Средняя длительность согласования по каждому виду ТД, Доля утвержденной ТД, Доля ошибок при проектировании ТД, учитывающая множественный возврат ТД на доработку.

Разработана методика улучшения качества процессов выявления несоответствий и технических рисков в системе ТДО, отличающаяся от известных учетом множественного возврата ТД на доработку в процессе согласования в условиях отсутствия цифровой связи с производством и позволяющая отразить влияние возникновения несоответствий на процессы ТДО, а также учитывать неформализованные связи в межпроцессном пространстве производственной системы.

Применение разработанной методики позволяет сократить жизненный цикл технологической документации в среднем на 16% путем повышения эффективности работы пользователей АС и снизить затраты на производство изделий в среднем на 9-11%.

## **Глава 2 Разработка имитационной модели для выявления неформализованных связей и обмена информацией между участниками технического документооборота наукоемкого производства**

### **2.1 Сравнительный анализ и выбор подходов к моделированию процессов технического документооборота наукоемкого производства**

Для создания действующей модели предприятия необходимо использовать подход к моделированию, максимально отражающий реальные свойства исследуемого объекта [34]. Поскольку наукоемкое производство характеризуется применением новых, еще не освоенных технологий, то структура производства подвергается изменениям в части использования оборудования, оснастки, материалов, покупных и комплектующих изделий, что влечет за собой изменение технологических процессов изготовления изделий [35]. Поэтому для описания производственной системы необходимо использовать подход, учитывающий влияние изменений внешней и внутренней среды.

Наукоемкое производство характеризуется малым объемом выпускаемой продукции [36] и высокой продолжительностью разработки изделия [37], обусловленными сложной организацией процессов производства, архитектура которых напрямую зависит от особенностей процесса разработки изделий при применении новых технологий или материалов. С целью увеличения результативности наукоемкого производства применяют специальные инструменты системного описания и анализа.

Для исследования структуры систем наиболее часто используется методология функционального моделирования IDEF0 [38]. Она позволяет

наглядно отображать структурные элементы и связи между ними [39], проводить декомпозицию структурных элементов, порождая контекстные диаграммы нижних уровней, а существующие контекстные ограничения способствуют четкому представлению предметной области задачи моделирования.

IDEF0 целесообразно применять для разработки процессов крупносерийного и массового производства, характеризующихся высокой степенью унификации операций в процессе производства [40], поскольку наукоемкое производство характеризуется уникальным сложным циклом разработки, что предполагает многократную структурную декомпозицию, затрудняя чтение и понимание полученных моделей.

В основе имитационного моделирования лежит применение абстрактной модели, обладающей свойствами исследуемого реального объекта [41], оно применимо в любой научной отрасли [42]. Оно проводится, как правило, если имеются аналитические методы, но используемые в них математические операции слишком сложны и трудоемки [43], при экономической нецелесообразности или практической невозможности экспериментирования, а также, на реальных объектах и представляет собой варьирование одной части параметров системы при поддержке неизменности другой части ее параметров, с наблюдением результатов эксперимента [44].

Искусственные нейронные сети (ИНС) являются одним из инструментов реализации цифрового производства в рамках концепции “Индустрия 4.0” [45]. Их отличительными особенностями являются механизм адаптации к изменениям внешних и внутренних свойств [46], самоорганизация и способность к обучению [47]. В основе структуры ИНС лежит структура, подобная биологической нервной ткани [48].

Применение нейросетей обычно ограничивается организацией памяти человека, а также ее производных, что позволяет создавать экспертные системы [49], а также модули, реализующие ассоциативную память [50] или машинное зрение [51]. Тем не менее, ИНС успешно применяются [52] как отдельного элемента в системах к решению практических задач [53].

Таким образом, ИНС зарекомендовали себя как надежное средство автоматизации, обладающее свойствами органов восприятия человека и превосходящие по быстродействию большинство алгоритмов распознавания и обработки данных. Область применения ИНС находит их универсальность, а процессы их создания, обучения и функционирования сопряжены со множеством случайных факторов, что представляет интерес с точки зрения имитационного моделирования.

ИНС представляет собой послойное соединение множества компонентов - искусственных нейронов. В IDEF0 простейшим элементом является функция с произвольным количеством входов и выходов [54], в отличие от искусственного нейрона, который имеет произвольное количество входов и один выход [55]. Преобразование контекстной диаграммы IDEF0 в имитационную модель возможно при замене текстового описания функций и межэлементных связей моделируемого объекта на математические преобразования.

В контекстной диаграмме IDEF0 [56] и в имитационной модели [57] возможно произвести структурную декомпозицию поэлементно. Декомпозиция является внутренней подсистемой и обменивается данными с порождающей ее родительской системой в обе стороны.

При наличии обратной связи между элементами, методология IDEF0 позволяет отразить ее при необходимости. В имитационной модели организация обратной связи реализуется при использовании условного оператора или особенностей функции. В ИНС близкий по смыслу механизм

представлен в виде части алгоритмов обучения, например, метод обратного распространения ошибки [58]. Особенностью нейросетевой обратной связи является непосредственное влияние на входящие извне сигналы. Кроме того, нейросеть, в отличие от методологии IDEF0 и имитационного моделирования, использует предыдущий результат работы системы, влияя на последующие процессы моделирования, позволяя им проходить в совершенно других условиях. В связи с этим каждый последующий результат работы системы изменяется в зависимости от предыдущего, таким образом реализуется функция памяти предыдущего результата, что позволяет представлять системы с обратной связью в виде ИНС.

В результате анализа свойств структурных элементов методологии IDEF0, имитационного моделирования и нейронных сетей обнаружены общие функциональные черты (рис.15).

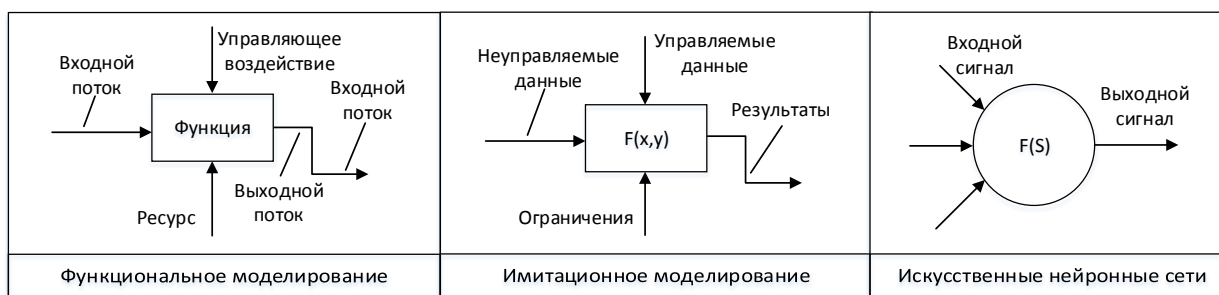


Рисунок 15 – Общие черты подходов функционального, имитационного моделирования и искусственных нейронных сетей

В зависимости от ситуации, входные потоки по методологии IDEF0 сводятся к неуправляемым данным имитационной модели, соответственно управляющее воздействие – к управляемым данным, ресурс – к ограничениям, а выходные потоки – к результатам выполнения математической функции. Управляемые и неуправляемые внешние воздействия имитационной модели в рамках нейросетей являются входными сигналами формального нейрона, математический закон имитационной



модели или текстовое описание IDEF0-диаграмм играет роль функции активации нейрона. Также, в нейронных сетях, как и в IDEF0-подходе и имитационном моделировании, изначально предусмотрен механизм межэлементной обратной связи - алгоритм обратного распространения ошибки.

Сравнение подходов функционального, имитационного моделирования и подхода с использованием элементов теории ИНС к моделированию систем представлено в таблице 11.

Таблица 11 – Сравнение особенностей подходов к моделированию систем

| <b>Особенности подхода к моделированию систем</b>                     | <b>Функциональная модель</b> | <b>Имитационная модель</b> | <b>Искусственная нейронная сеть</b> |
|---|------------------------------|----------------------------|-------------------------------------|
| Возможность вероятностного моделирования                              | -                            | +                          | +                                   |
| Наличие встроенного механизма обратной связи между элементами системы | -                            | -                          | +                                   |
| Возможность структурной декомпозиции модели                           | +                            | +                          | -                                   |
| Ограничения на связи между элементами системы                         | -                            | -                          | +                                   |
| Ограничения на глубину декомпозиции модели                            | -                            | -                          | +                                   |
| Внешние ограничения модели  | -                            | -                          | +                                   |
| Количественный характер связи между элементами                        | -                            | +                          | +                                   |
| Достаточность описания модели   | +                            | -                          | -                                   |
| Адаптируемость модели   | -                            | +                          | +                                   |
| Предназначение для реализации на ЭВМ                                  | -                            | +                          | +                                   |
| Возможность учета неформализованных связей в системе                  | -                            | -                          | +                                   |

Подход к моделированию систем с использованием аппарата ИНС, в отличие от функционального и имитационного моделирования, позволяет определить глубину декомпозиции и ограничения моделируемой системы

с помощью количества обрабатываемых сущностей (в виде нейронных элементов) и входных данных и архитектуры ИНС соответственно вместо субъективного подхода исследователя.

Математическое описание соотношений и количественный характер связей между величинами в нейросетях определены правилами теории ИНС и их архитектурой соответственно в отличие от имитационного моделирования, в котором исследователю необходимо подобрать наиболее подходящее средство описания, максимально достоверно отражающее свойства элементов рассматриваемой системы и связи между ними.

В функциональном моделировании не предусмотрен механизм адаптации рассматриваемой системы к изменениям внешних и внутренних свойств, в связи с чем полученную модель необходимо перепроектировать заново при изменениях реальной системы-прототипа, что приобретает особую актуальность при разработке моделей систем средне- и мелкосерийного производства. При проектировании имитационной модели исследователь может субъективно внести в нее элементы, позволяющие реализовать механизм адаптации. По сравнению с функциональным и имитационным подходом к моделированию систем адаптируемость к изменениям внешних и внутренних свойств исследуемой системы в нейросетях определена логикой работы нейросетей и положениями элементов теории ИНС. Постоянная смена условий работы системы при каждом новом цикле и зависимость последующих результатов работы модели от предыдущих - основное отличие использования нейросетей в рамках имитационного моделирования.

ИНС так же, как и имитационные модели, возможно реализовать в виде программ на ЭВМ, что делает их удобным средством моделирования систем.

Одним из недостатков подхода с использованием ИНС является необходимость в дополнительном описании элементов рассматриваемой

системы для доступности понимания процессов, протекающих в ней, для широкого круга пользователей.

Таким образом, ИНС возможно применять в качестве инструмента имитационного моделирования без существенных ограничений. Аппарат ИНС по совокупности своих свойств является наиболее подходящим инструментом моделирования мелкосерийного производства, характерного для наукоемких предприятий.

Адаптирована математическая модель распространения информации об изделии в системе ТДО, используя элементы теории ИНС, в соответствии с которыми система состоит из множества связанных между собой компонентов – искусственных нейронов [59]. Нейронный элемент преобразует взвешенную сумму входных сигналов:

$$y = F\left(\sum_{i=1}^N w_i x_i\right) = F(WX), \quad (7)$$

где  $X = (x_1, x_2, \dots, x_N)^T$  — числовой массив входных сигналов;  $W = (w_1, w_2, \dots, w_N)$  — массив весов нейрона;  $F$  — нелинейная функция-преобразователь (функция активации нейрона) [60].

Слой ИНС — набор нейронов, принимающих данные от других нейронов [61]. Совокупность связанных между собой слоев образует ИНС, самым простым частным случаем которой является персептрон [62]. Для решения задач, включающих в себя работу с большими объемами данных [63] создается архитектура ИНС, включающей в себя более двух обрабатывающих (промежуточных, скрытых) слоев [64], образуя “глубокую ИНС” или ИНС глубокого обучения [65]. Нейронные элементы на каждом последующем обрабатывающем слое выделяют признаки более высокого уровня абстракции из входных данных предыдущих слоев. Признаки данных

которые на конечном слое отображаются в соответствующие классы [66].

Пусть  $W^{(i)}$  — матрица весовых коэффициентов  $i$ -го слоя. Тогда выходные значения  $Y$  для ИНС с двумя скрытыми слоями определяются как:

$$Y = F(F(F(XW^{(1)})W^{(2)})W^{(3)}), \quad (8)$$

где  $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$  — массив входных данных;  $F$  — нелинейная преобразовательная функция.

Следовательно, математическую модель распространения информации об изделии в системе ТДО возможно представить в следующем виде:

$$Y = F_M(F_{M-1}(\dots(F_1(XW_1)W_2)\dots)W_{M-1})W_M), \quad (9)$$

где  $X = (x_1, x_2, \dots, x_N)^T$  — массив входных данных;  $F_M$  — преобразовательная функция нейронных элементов  $M$ -го слоя ИНС,  $W_M$  — матрица весов  $M$ -го слоя ИНС,  $Y$  — выходные сигналы ИНС.

В качестве входных данных ИНС выступает исходная информация для проектировки ТД. Выходными данными ИНС является ТД в зависимости от обрабатываемых входных данных.

Эффективным средством обучения персептронов является алгоритм обратного распространения ошибки [67], который, несмотря на многочисленные успешные применения, не является абсолютно надежным методом обучения [68].

## **2.2 Разработка моделей этапов подготовки технической документации организации с применением элементов теории искусственных нейронных сетей для идентификации неформализованных связей**

При моделировании производственного предприятия необходимо выделить протекающие в реальной системе информационные потоки – сведения об изделиях, содержащиеся в ТД, и преобразующие их элементы в рамках рассматриваемой задачи, а также неформализованные связи между участниками процесса. Данные сведения также не должны подвергаться искажениям при их обработке от начальной до конечной стадии производственного процесса [69]. Предоставление и сопровождение данных о процессе производства и выпуска продукции является основной задачей документооборота. При проектировании модели документооборота производственной среды необходимо учесть, что информация о производимой продукции и структуре производственных процессов должны быть актуальными как для специалиста-исследователя, так и для всех подразделений производства.

Условно процессы ТДО наукоемкого производства возможно разделить на следующие последовательные этапы подготовки ТД (рис.16) [70]:

- определение компонентов разрабатываемой модели изделия, их свойств и функций (Проектирование);
- определение формы, размеров и взаимного расположения элементов модели изделия (Конструирование);
- разработка и определение методов, процессов и материалов, участвующих в производстве изделия (Разработка технологии);
- определение ресурсных и временных потребностей производства (Планирование производства);

- определение трудоемкости производства изделия и распределение производственных мощностей для организации процесса создания изделий (Технологическая подготовка производства);
- завершающий этап производства, включающий в себя испытания и отгрузку изделия (Выпуск изделия).

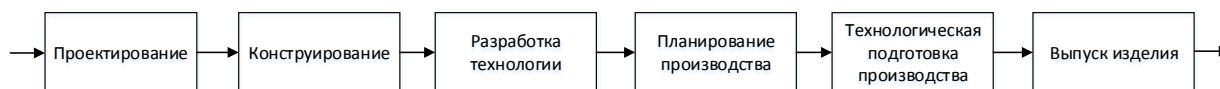


Рисунок 16 – Условные этапы подготовки ТД наукоемкого производства

В условиях одновременного производства нескольких видов изделий этапы процесса "Конструирование" и "Планирование производства" осуществляются параллельно с этапами "Разработка технологии" и "Технологическая подготовка производства" (рис.17).

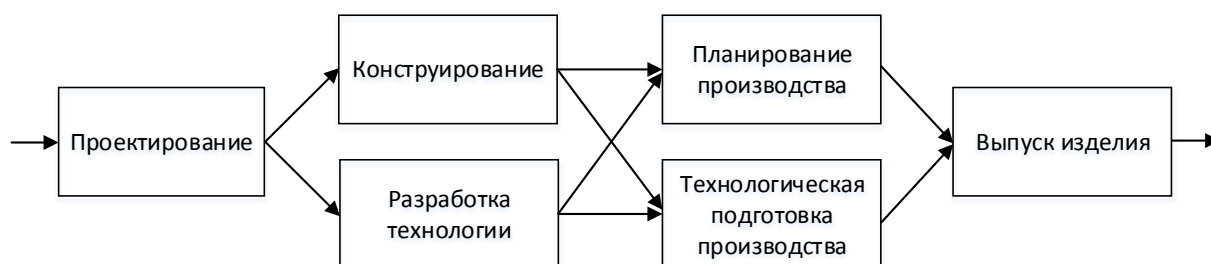


Рисунок 17 – Условные этапы подготовки ТД наукоемкого производства в условиях одновременного производства нескольких видов изделий

На рисунке 18 показан вид системы ТДО в соответствии с методологией IDEF0.

С заключения предприятием контракта на научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы (НИОКР) начинается процесс разработки документации об изделии, ряд основополагающих документов об изделии,

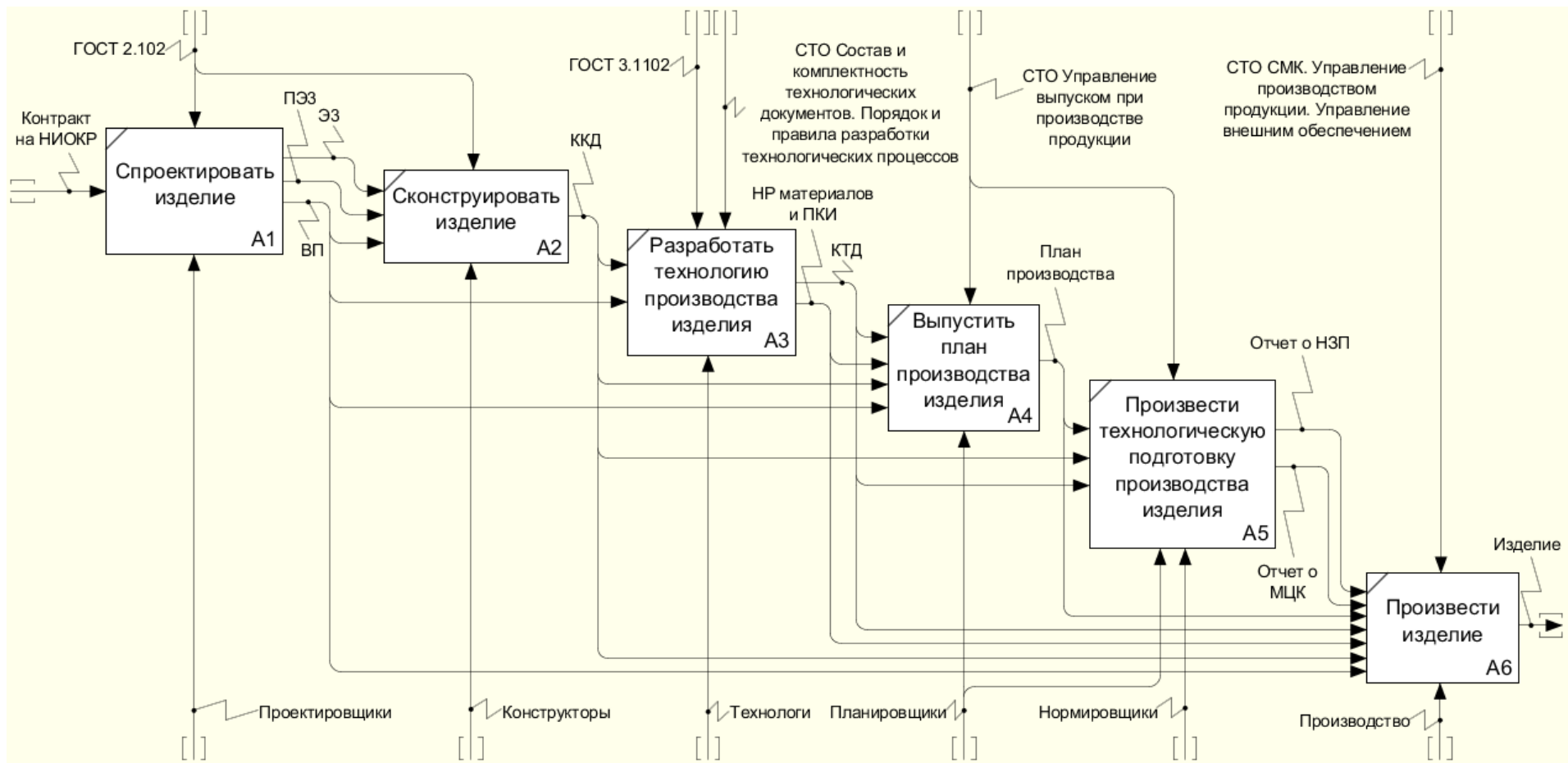


Рисунок 18 – Контекстная диаграмма структуры технического документооборота производственного предприятия

а именно: схема электрическая принципиальная (ЭЗ), Перечень Элементов (ПЭЗ), который может входить в состав ЭЗ, Ведомость Покупных изделий (ВП) - выпускаются специалистами отдела проектирования. В соответствии с ГОСТ 2.102 [71] оформляются все документы, которые, затем, передаются на обработку специалистам-конструкторам по окончанию разработки.

Далее выпускается Комплект Конструкторской Документации (ККД), согласно ГОСТ 2.102, и рассылается всем необходимым участникам.

Расчет норм расхода материалов и покупных комплектующих изделий (НР материалов и ПКИ) и выпуск Комплекта Технологической Документации (КТД) становятся возможными при получении информации из комплекта ККД, руководствуясь требованиями ГОСТ 3.1102 [72] и СТО по составу и комплектности технологических документов, порядку и правилам разработки технологических процессов. Созданная КТД с рассчитанными нормами рассылается остальным производственным подразделениям.

Впоследствии на основе полученной ККД и КТД с необходимыми нормами в соответствии с требованиями СТО по управлению выпуском при производстве продукции отделом планирования производства выпускается план, согласно которому для обработки заготовок изделия создается оснастка, к выпуску новых изделий налаживаются технологические линии.

На основе Плана производства и КТД с НР материалов и ПКИ в соответствии с требованиями СТО по управлению выпуском при производстве продукции производятся расчеты трудоемкости изготовления изделия, производится перераспределение имеющихся производственных мощностей предприятия для организации процесса создания изделия. Результатом произведенных действий являются отчеты о незавершенном производстве (НЗП) и о межцеховой кооперации (МЦК).



Процесс производства изделия осуществляется в соответствии с требованиями СТО “СМК. Управление производством продукции. Управление внешним обеспечением”. В качестве информации об изделии для производства выступают: ККД, ВП, КТД, НР материалов и ПКИ, План производства, Отчет о НЗП и Отчет о МЦК.

В качестве инструмента моделирования системы ТДО выбран аппарат ИНС благодаря обработке ошибочных сигналов, распространяющихся внутри ИНС, имитирующей влияние возникновения несоответствий в процессе производства изделий.

В задачах выбора наилучшего маршрута распространения информации рассматриваемой в системе в соответствии с заданным критерием (маршрутизации) успешно применяются нейронные сети Хопфилда, которые реализуют фильтр входящих данных [73]. В условиях отсутствия цифровой связи между проектным и производственным этапом ТДО невозможно осуществить маршрутизацию информационных потоков вследствие ряда причин:

- в системе ТДО осуществляется не фильтрация входящих данных, а их преобразование из одних видов в другие;
- решение задачи маршрутизации возможно, если допускаются любые манипуляции над узлами маршрута и связями между ними, в системе ТДО маршрут - жесткая последовательность, определенная требованиями СМК организации;
- решение задачи маршрутизации возможна, если узловые точки маршрутов равноценны, в системе ТДО узловые точки - иерархически зависимые.

Задача ТДО заключается в преобразовании информации об изделии, выраженной в ТД, из одних видов в другие. Следовательно, задача обучения ИНС-подмоделей сводится к классификации входных данных [74].

В качестве архитектуры ИНС для этих целей используется многослойный персептрон [75].

Разработчик модели по методологии IDEF0 обладает существенной информацией о функциях и связях между ними, выраженной словесным описанием. В ИНС связи между элементами «обезличены», будучи выраженными абстрактными нейронными связями по определенному алгоритму. Следовательно, существенной для отражения в модели ИНС является информация, содержащаяся в ее структурных элементах - искусственных нейронах. Поскольку данная информация содержит в себе внутренние ассоциативные представления ИНС об обрабатываемой информации извне [76], то следует каждый искусственный нейрон в ИНС именовать именем сущности, выступающей в роли связей в рассматриваемой системе.

Каждый нейронный элемент предыдущего и последующего слоев ИНС имеют связь друг с другом. Смысл данной связи заключается в том, что из полученной информации из предыдущего слоя отбирается наиболее значимая часть, которая участвует в формировании отдельного нейронного элемента последующего слоя, качественно усложняясь [77].

На этапе проектирования изделия возможно отразить следующие существенные элементы:

- схема электрическая принципиальная (ЭЗ);
- перечень элементов (ПЭЗ);
- схема электрическая принципиальная, содержащая в себе перечень элементов (ЭЗ+ПЭЗ);
- ведомость покупных изделий (ВП).

Сущность «Контракт на НИОКР», являющуюся инициатором процесса создания изделия, не требуется включать в модель ИНС, так как все

характеристики изделия, определяемые контрактом на НИОКР, содержатся в ТД на изделие.

Известно, что ЭЗ может содержать в своем составе ПЭЗ, либо ПЭЗ может быть одновременно создан отдельно от ЭЗ. На основе полученных ТД возможно создание ВП. ИНС-модель этапа "Проектирование" представлена на рисунке 19.

При конструировании усложняются данные об изделии: информация из Спецификаций на сборочную единицу (Сп. на простую СБ) и Чертежей деталей (Ч. ДЕ) используется при формировании Спецификаций на сложную сборочную единицу (Сп. на сложную СБ), на комплексы (Сп. на комплекс), а также при формировании Монтажных Чертежей (МЧ) и Таблиц соединений (ТБ). Для дальнейшей организации процесса производства необходимые данные содержатся в Спецификациях на комплекс, Ведомостях спецификаций (Вед. спец.), а также Производственной Спецификации (ПСП), которые входят в состав Комплекта Конструкторской Документации (ККД) и передаются на обработку в последующие подразделения.

Данные в ПСП подвержены постоянным изменениям вплоть до момента выпуска ККД. Нейросетевая модель «Конструирование» приведена на рисунке 19.

Агрегирование отличительных особенностей входных данных с последующим их объединением и усложнением на каждом последующем слое является отличительной особенностью ИНС. Данное обстоятельство допускает повторение сущностей с изменением их качественных признаков, что позволяет расценивать их как отдельный элемент системы.

Карты Типовых Технологических Процессов (КТТП), Карты Эскизов (КЭ) и Маршрутные Карты технологических процессов (МК) являются результатом проектирования технологии изготовления изделия. Полученная информация об изделии на этапе "Технология" объединяется в Комплект

Технологической Документации (КТД) и используется в формировании производственной спецификации (ПСп) и Ведомости Удельных Норм расхода комплектующих изделий и материалов (ВУН) (рис.19, “Разработка технологии”).

На этапе Планирования производства на основе конструкторско-технологической информации из ПСп происходит подготовка Плана производства (ППр), затем в цехах предприятия выпускаются документы по организации процесса производства - Производственная программа (ПРп) и План запуска-выпуска изделия по цехам (рис.19, “Планирование производства”).

Технологическая подготовка производства предполагает оценку теоретической (теор. тр.) и фактической трудоемкости производства изделия (факт. тр.) на основе полученной КТД. Информация на основе ККД позволяет подготовить свод по деталям (свод по ДЕ). Получив необходимые сведения, становится возможной оценка незавершенности производства, отраженная соответствующем отчете (НЗП) и отчете о межцеховой кооперации (отчет о МЦК). Данные документы необходимы для перераспределения имеющихся производственных мощностей предприятия для запуска производственных процессов нового изделия (рис.19, “Технологическая подготовка производства”).

Производственный процесс заканчивается серией типовых испытаний изделий, по окончании которых готовятся соответствующие акты и протоколы-заключения (пр.-закл.) с привлечением служб ОТК. По успешному окончанию испытаний составляется отгрузочная накладная (отгр. накл.) на соответствующее изделие (рис.19, “Выпуск изделия”).

В результате, выполнено нейросетевое представление систем различных этапов подготовки ТД в виде набора независимых друг от друга ИМ, выраженных в виде ИНС (рис.19).

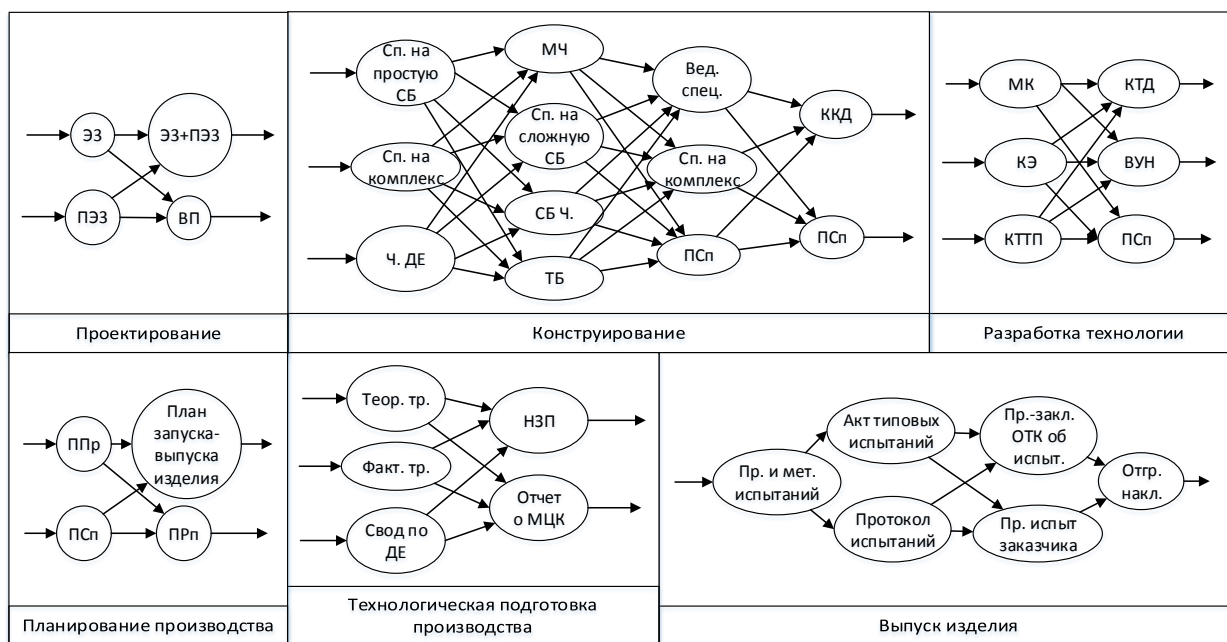


Рисунок 19 – Нейросетевые модели этапов подготовки ТД

Таким образом, нейросетевое представление информационных потоков позволило идентифицировать неформализованные связи между элементами системы ТДО, не отраженные в СМК организации.

### 2.3 Реализация и обучение нейросетевых моделей этапов подготовки технической документации

ИМ реального объекта или процесса в широком смысле представляет собой «черный ящик», принимающий входные воздействия и выдающий результат. В зависимости от назначения модели исследователь анализирует полученные данные любым доступным методом и принимает соответствующие решения. Результаты работы модели, расходящиеся с теоретическими, требуют правильной интерпретации.

Если результаты работы ИМ играют важную роль только для исследователя, то в ИНС они также являются неотъемлемым элементом для организации повторяющегося цикла обучения вследствие использования

алгоритма обучения, являющегося обратной связью между выходными и входными данными. Также по результатам работы ИНС, исследователь проверяет качество ее обучения. Следовательно, необходимо сформировать набор данных для обучения ИНС, представляющих собой набор документации о производимых на предприятии изделиях, каждый элемент которого является парой "Входной сигнал - Выходной сигнал". Рассматриваемая система представляет собой набор ИНС-моделей, объединенных в общую систему. Поэтому, прежде всего, необходимо осуществить процесс обучения каждой ИНС-модели в отдельности.

Отберем шесть различных изделий и выразим их наименования в десятичных номерах (рис.20).

|             |             |
|-------------|-------------|
| КД1.375.050 | КД1.375.064 |
| КД1.375.053 | КД2.280.048 |
| КД1.375.055 | КД3.490.033 |

Рисунок 20 – Шесть отобранных изделий

Для реализации модели в виде программы для ЭВМ необходимо подготовить файлы, содержащие набор данных для обучения каждой ИНС-модели. Рассмотрим подмодель этапа "Проектирование". Она имеет два входа и два выхода. Для простоты реализации моделей в виде программ будем подавать на вход каждой ИНС один сигнал. Тогда формат подаваемых в ИНС примет вид, представленный на рисунке 21.

В общем случае для любой ИНС-модель формат данных примет конфигурацию, представленную на рисунке 22.

Приведем набор данных для ИНС-модели этапа «Проектирование» к виду, согласно общему формату и поместим его в текстовый файл формата \*.txt. В качестве входов выступают документы, представленные схемами

электрическими принципиальными (ЭЗ), а также перечнями элементов (ПЭЗ). В качестве выходов выступают схемы электрические принципиальные, содержащие в своем составе перечни элементов (ЭЗ) и ведомости покупных изделий (ВП) (рис.23).

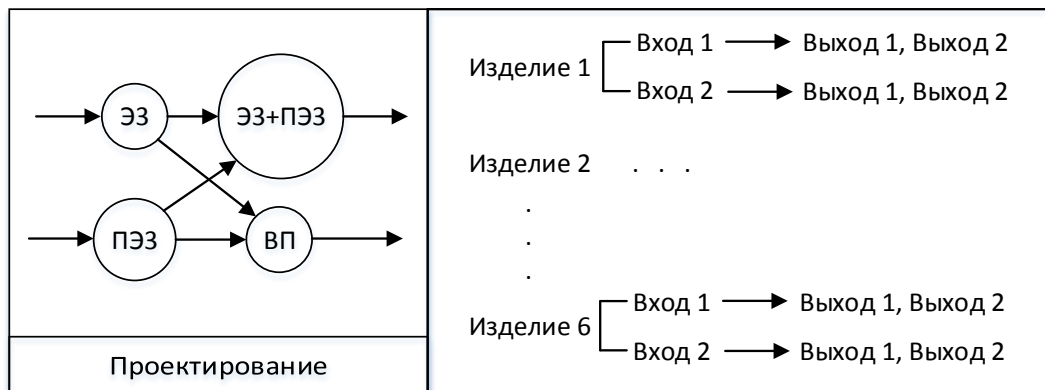


Рисунок 21 – Формат данных, подаваемых в нейросетевую модель этапа "Проектирование"

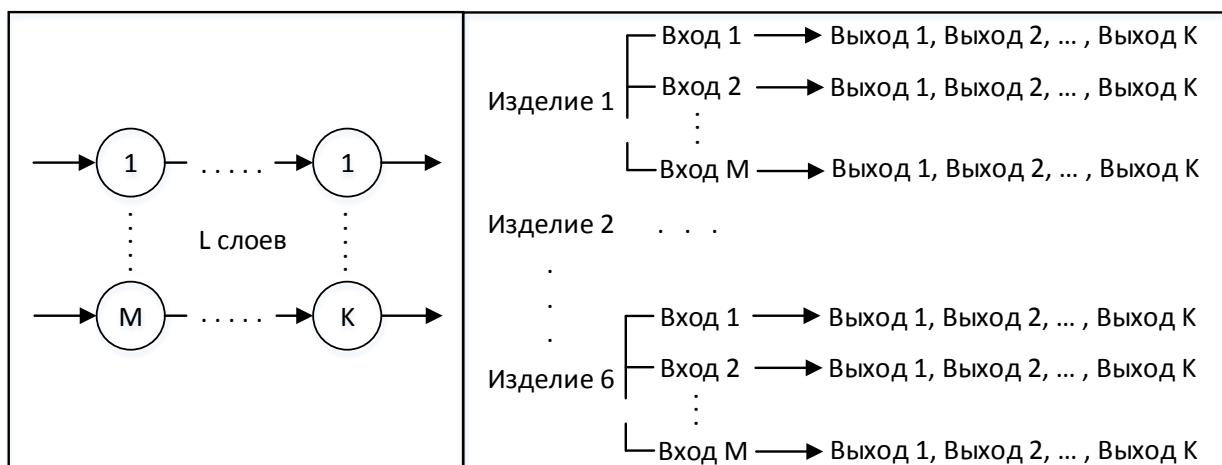


Рисунок 22 – Общий формат данных для обучения нейросетевых моделей

Обрабатываемой ИНС информацией являются численные данные [78]. Присвоим порядковые номера элементам данных для обучения ИНС-модели этапа «Проектирование» так, как показано на рисунке 24. Аналогичным способом готовятся данные для обучения ИНС-моделей всех остальных этапов документооборота в виде текстовых файлов. Их фрагменты представлены в приложении В.

```

кд1.375.050_эз кд1.375.050_эз кд1.375.050_вп
кд1.375.050_пэз кд1.375.050_эз кд1.375.050_вп
кд1.375.053_эз кд1.375.053_эз кд1.375.053_вп
кд1.375.053_пэз кд1.375.053_эз кд1.375.053_вп
кд1.375.055_эз кд1.375.055_эз кд1.375.055_вп
кд1.375.055_пэз кд1.375.055_эз кд1.375.055_вп
кд1.375.064_эз кд1.375.064_эз кд1.375.064_вп
кд1.375.064_пэз кд1.375.064_эз кд1.375.064_вп
кд2.280.048_эз кд2.280.048_эз кд2.280.048_вп
кд2.280.048_пэз кд2.280.048_эз кд2.280.048_вп
кд3.490.033_эз кд3.490.033_эз кд3.490.033_вп
кд3.490.033_пэз кд3.490.033_эз кд3.490.033_вп

```

Рисунок 23 – Данные для обучения нейросетевой модели этапа

«Проектирование»

```

кд1.375.050_эз кд1.375.050_эз кд1.375.050_вп 1 13 14
кд1.375.050_пэз кд1.375.050_эз кд1.375.050_вп 2 13 14
кд1.375.053_эз кд1.375.053_эз кд1.375.053_вп 3 15 16
кд1.375.053_пэз кд1.375.053_эз кд1.375.053_вп 4 15 16
кд1.375.055_эз кд1.375.055_эз кд1.375.055_вп 5 17 18
кд1.375.055_пэз кд1.375.055_эз кд1.375.055_вп 6 17 18
кд1.375.064_эз кд1.375.064_эз кд1.375.064_вп 7 19 20
кд1.375.064_пэз кд1.375.064_эз кд1.375.064_вп 8 19 20
кд2.280.048_эз кд2.280.048_эз кд2.280.048_вп 9 21 22
кд2.280.048_пэз кд2.280.048_эз кд2.280.048_вп 10 21 22
кд3.490.033_эз кд3.490.033_эз кд3.490.033_вп 11 23 24
кд3.490.033_пэз кд3.490.033_эз кд3.490.033_вп 12 23 24

```

Рисунок 24 – Данные для обучения нейросетевой модели этапа

«Проектирование» с численным выражением в виде порядковых номеров

Из языков программирования для реализации ИНС в виде программ для ЭВМ является наиболее часто используется Python [79] с пакетами NumPy (библиотека, предоставляющая возможности работы с многомерными массивами и осуществляющая поддержку высокоуровневых математических функций, предназначенных для работы с ними) [80] и Matplotlib (библиотека для визуализации данных в виде 2D и 3D графиков, получаемые изображения используются в качестве иллюстраций в публикациях) [81] как универсальная среда для научных расчётов. Наиболее популярной открытой библиотекой для высокоуровневой реализации ИНС в виде программы для ЭВМ используется Keras [82]. В качестве среды для запуска разработанных программ на языке Python используем PyCharm [83].



Все слои ИНС в программном коде объединяются в блок «модель». Поскольку реализация ИНС-подмоделей не предполагает специфических действий над преобразованием слоев, то целесообразно использовать метод последовательного построения ИНС (`model = Sequential()`). Все слои являются полносвязными (`Dense`). Одним из параметров каждого слоя является количество нейронов (`units`). Создание слоев ИНС предполагает определение всех необходимых параметров обучения и функций активаций. Традиционной функцией активации, применяемой при проектировании ИНС считается сигмоидная (`activation = 'sigmoid'`). Чтобы ее использовать, необходимо нормализовать данные - каждый элемент массива разделить на максимальный элемент в массиве, чтобы получить числа в пределах от 0 до 1. Тогда результатом обработки ИНС также будут являться числа в пределах от 0 до 1. Чтобы получить исходные целочисленные значения, необходимо провести процедуру денормализации – умножить каждое результирующее число на максимальный элемент ненормализованного массива. Если в качестве данных для обучения используются целые числа, а задача обучения также заключается в выводе целых чисел, то в качестве функции активации используется линейная (`activation = 'linear'`) (рис.25).

```
143  
144     model = Sequential()  
145     model.add(Dense(units=2, activation='linear', input_shape=(1,)))  
146     model.add(Dense(units=2, activation='linear'))  
147     model.compile(loss = Loss, optimizer = Opt, metrics=['accuracy'])  
...
```

Рисунок 25 – Программная структура искусственной нейронной сети, состоящая из полносвязных слоев, содержащие по два нейрона каждый

Как правило, обучение ИНС происходит со случайно заданными весами нейронов. Для контроля состояния обучения ИНС-моделей этапов разработки ТД в качестве начальных весов нейронов используются значения

степени приоритета обработки ТД, полученные из матрицы корреляции рисков процессов ТДО с выпускаемой организацией ТД.

В качестве алгоритма обучения ИНС наиболее часто используется метод обратного распространения ошибки. Его применение позволит имитировать эффект воздействия постоянного возникновения несоответствий в процессе производства изделий на распространяемую в моделируемой системе информацию об изделии.

Метод обратного распространения ошибки заключается в минимизации ошибки обучения, являющейся разницей между желаемым и реальным результатом обработки входного сигнала [84]. В качестве инструмента оптимизации ошибки обучения часто используется алгоритм адаптивной оценки моментов (Adam, Adaptive moment estimator) (рис.26) [85].

```
141  
142 | Opt = keras.optimizers.Adam(learning_rate=0.095)  
143
```

Рисунок 26 – Использование алгоритма адаптивной оценки моментов в качестве инструмента оптимизации ошибки обучения

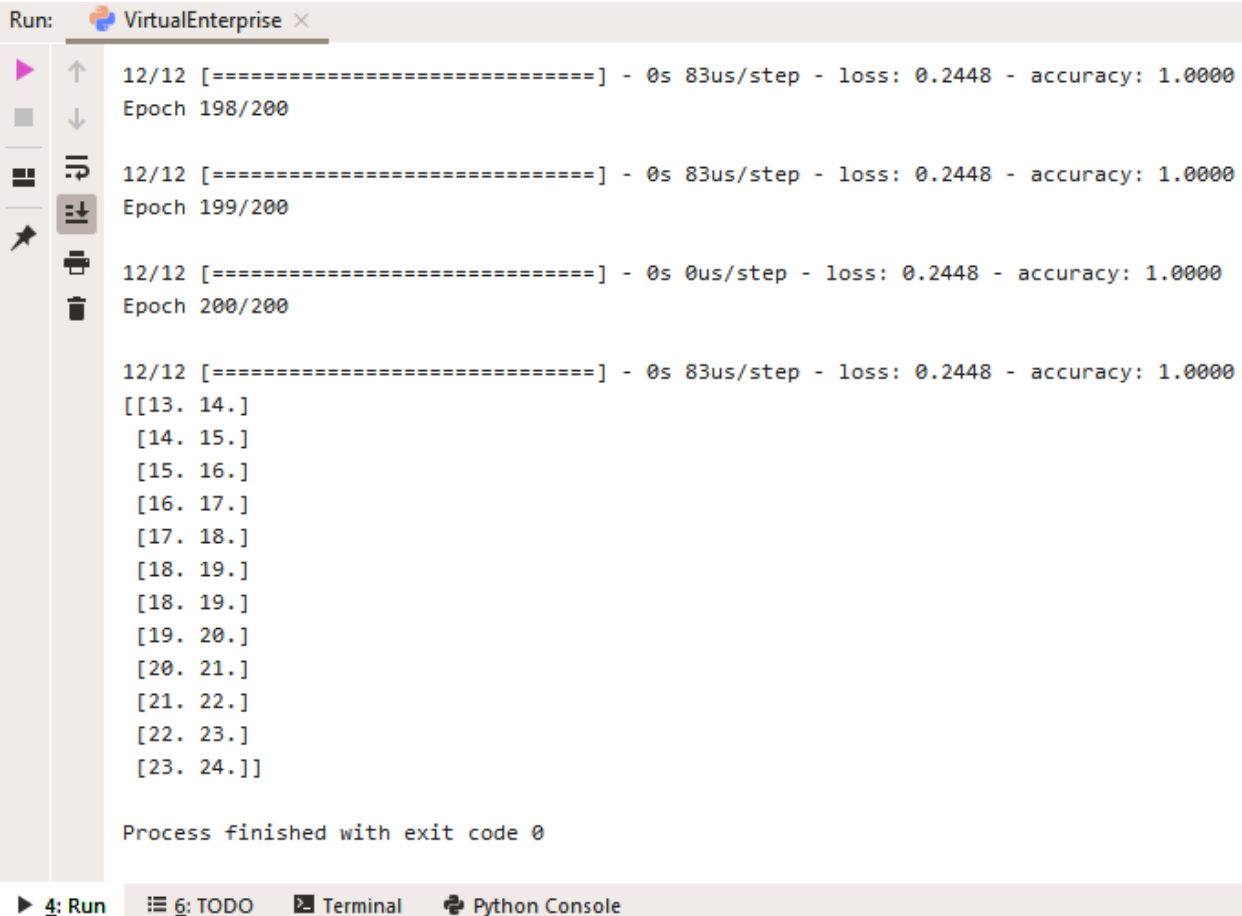
Функция потерь или функция ошибки обучения является критерием остановки обучения [86], в качестве которой, как правило, используется функция среднеквадратического отклонения (Loss = "mean\_squared\_error") (рис.27) [87].

```
143  
144 | Loss = 'mean_squared_error'  
145
```

Рисунок 27 – Активация функции ошибки обучения "среднеквадратическое отклонение"

Если полученные результаты обработки данных полностью совпадают с теоретическими значениями из обучающей выборки при

удовлетворительном значении функции потерь, то ИНС-модель считается успешно обученной (рис.28).



```
Run: VirtualEnterprise x
12/12 [=====] - 0s 83us/step - loss: 0.2448 - accuracy: 1.0000
Epoch 198/200
12/12 [=====] - 0s 83us/step - loss: 0.2448 - accuracy: 1.0000
Epoch 199/200
12/12 [=====] - 0s 0us/step - loss: 0.2448 - accuracy: 1.0000
Epoch 200/200

12/12 [=====] - 0s 83us/step - loss: 0.2448 - accuracy: 1.0000
[[13. 14.]
 [14. 15.]
 [15. 16.]
 [16. 17.]
 [17. 18.]
 [18. 19.]
 [18. 19.]
 [19. 20.]
 [20. 21.]
 [21. 22.]
 [22. 23.]
 [23. 24.]]

Process finished with exit code 0
4: Run 6: TODO Terminal Python Console
```

Рисунок 28 – Заключительный этап обучения искусственной нейронной сети и ее результаты распознавания входного массива данных

График зависимости значения функции потерь (Loss) от пройденной эпохи обучения (Epoch) позволяет оценить качество процесса обучения (рис.29). Графики зависимостей значений функции потерь от пройденной эпохи обучения ИНС-моделей различных этапов ТДО представлены в приложении Г.

Также инструментом оценки качества обученных моделей служит F-мера, зависящая от двух параметров: точности и полноты [88]. Точность оценки в пределах распознаваемого класса представляет собой долю

результатов обработки, действительно принадлежащих данному классу относительно всех результатов, которые система отнесла к этому классу.

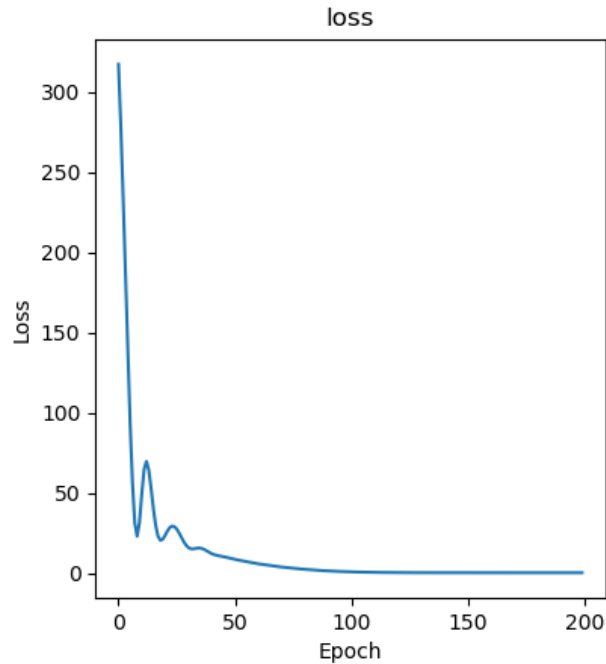


Рисунок 29 – Пример графика зависимости значения функции потерь от пройденной эпохи обучения

Точность вычисляется по следующей формуле:

$$A = \frac{TP}{TP + FP}, \quad (10)$$

где TP — число истинно-положительных решений, FP — число ложно-положительных решений.

Полнота системы — это доля найденных результатов, принадлежащих классу относительно всех изображений этого класса в тестовой выборке. Полнота рассчитывается по следующей формуле:

$$R = \frac{TP}{TP + FN}, \quad (11)$$

где TP — число истинно-положительных решений, FN — число ложно-отрицательных решений.

Часть обученных ИНС-моделей имеют несколько выходных результатов, возьмем среднее арифметическое значений точности и полноты на всех выходах ИНС-модели соответственно:

$$A_{\theta} = \frac{\sum_{i=1}^e A_i}{e}, R_{\theta} = \frac{\sum_{i=1}^e R_i}{e}, \quad (12)$$

где,  $A_i$  и  $R_i$  – значение точности и полноты на  $i$ -том выходе ИНС-модели соответственно,  $e$  – количество выходов ИНС-модели.

Тогда среднее значение точности и полноты по всем распознаваемым классам вычисляется соответственно следующим образом:

$$A_{\kappa} = \frac{\sum_{i=1}^c A_{\theta_i}}{c}, R_{\kappa} = \frac{\sum_{i=1}^c R_{\theta_i}}{c}, \quad (13)$$

где,  $A_{\theta_i}$  и  $R_{\theta_i}$  - среднее значение точности и полноты на всех выходах ИНС-модели соответственно,  $c$  – количество распознаваемых классов ИНС-моделью.

F-мера вычисляется, как среднее гармоническое точности и полноты ИНС-моделей:

$$F = 2 \frac{A_{\kappa} R_{\kappa}}{A_{\kappa} + R_{\kappa}}, \quad (14)$$

где  $A_{\kappa}$  и  $R_{\kappa}$  - среднее значение точности и полноты по всем распознаваемым классам соответственно.

В таблице 12 приведены критерии оценки F-меры, выражающие степень адекватности разработанных ИНС-моделей.

На практике разработчики моделей ИНС стремятся получить значения точности и полноты, близких к 1, но не равных 1. В большинстве задач с практическим применением нейросетей приемлемыми значениями их точности и полноты считаются 0,5-0,75. В условиях постоянного

возникновения несоответствий в процессе производства изделий приемлемыми значениями F-меры 0,25-0,5, соответствующих низкой степени адекватности модели, но все еще приемлемой ввиду специфики разработки ТД.

Таблица 12 - критерии оценки F-меры:

| Степень адекватности<br>ИНС-модели | $F$                  |
|------------------------------------|----------------------|
| Высокая                            | $0,75 < F < 1$       |
| Средняя                            | $0,5 < F \leq 0,75$  |
| Низкая                             | $0,25 < F \leq 0,5$  |
| Модель неадекватна                 | $0 \leq F \leq 0,25$ |

В таблице 13 представлены параметры обучения, позволившие достичь наилучшие значения средней точности ( $A_k$ ) и полноты ( $R_k$ ) по всем распознаваемым классам всех ИНС-моделей.

Под обычной нормализацией принимаем значения входных данных, разделенных на максимальный элемент входной выборки. Под двойной нормализацией принимаем разность между входным и соответствующим ему выходным значением, разделенную на максимальный элемент входной выборки.

Результаты оценки F-меры свидетельствуют о проблемах обработки данных об изделии на этапе технологической подготовки производства (модель ANN-5, в среде научной литературы значение F-меры менее 0,25 считается недостаточным показателем адекватности разработанной модели).

Перспективным решением является изменение потоков обмена информацией об изделии между проектным и производственным циклом путем их цифровизации, что также увеличит их оперативность. В условиях отсутствия цифровой связи невозможно изменение информационных

потоков, поэтому альтернативным решением является модернизация процессов согласования технической документации [89].

Таблица 13 – Параметры обучения нейросетевых моделей, их значения точности, полноты и F-меры

| ИНС-модель                                      | Функция активации | Нормализация входных данных | Скорость обучения | Количество эпох обучения | $A_k$ | $R_k$ | $F$  |
|---|-------------------|-----------------------------|-------------------|--------------------------|-------|-------|------|
| Проектирование (ANN-1)                          | Сигмоидная        | Обычная                     | 0,5               | 10000                    | 0,74  | 0,39  | 0,51 |
| Конструирование (ANN-2)                         | Сигмоидная        | Обычная                     | 0,05              | 100000                   | 0,85  | 0,45  | 0,59 |
| Разработка технологии (ANN-3)                   | Сигмоидная        | Двойная                     | 0,035             | 3000                     | 0,49  | 0,3   | 0,37 |
| Планирование производства (ANN-4)               | Линейная          | Нет                         | 0,045             | 200                      | 0,58  | 0,58  | 0,58 |
| Технологическая подготовка производства (ANN-5) | Линейная          | Нет                         | 0,01              | 400                      | 0,25  | 0,11  | 0,15 |
| Выпуск изделия (ANN-6)                          | Линейная          | Нет                         | 0,03              | 200                      | 0,99  | 0,99  | 0,99 |

Полученную конфигурацию ИНС-модели после обучения необходимо сохранить для дальнейшего использования в специализированном формате обмена научными данными (рис.30).

```

158
159     model.save(Path + '\ANN-1.h5')
160

```

Рисунок 30 – Сохранение конфигурации нейросетевой модели, полученной после обучения

Фрагменты программных кодов, реализующих ИНС-модели различных этапов, представлены в приложении Д.

## **2.4 Разработка обобщенной нейросетевой модели технического документооборота организации**

### **2.4.1 Метод последовательного объединения нейросетевых подмоделей**

Каждая модель этапа создания ТД представляет собой отдельную изолированную подсистему, решающую задачу распознавания конкретных входных сигналов и выдающую соответствующие результаты [90]. Данное обстоятельство делает принципиально невозможным создание общей системы путем последовательного соединения ее подсистем. Необходим механизм, обеспечивающий передачу корректных данных из предыдущей подсистемы в последующую, расширяющий возможности построения нейросетевой системы.

По методологии IDEF0 моделируемая система представляет собой совокупность подмоделей, представленных структурными декомпозициями функциональных блоков. Связи между функциональными блоками верхнего и нижнего уровней при проведении структурной декомпозиции остаются неизменными. В ИНС неизменность передачи сигнала от одной модели к другой не предусмотрена, что значительно ограничивает спектр решаемых искусственной нейросетью задач. Имитация функций мозга человека - основное назначение искусственных нейронных сетей [91], а именно: памяти, распознавания информации и ее предсказывание.

Для того, чтобы объединить совокупность ИНС в одну систему, представляющую собой обобщенную искусственную нейронную сеть



(ОИНС), необходимо, чтобы имелся аппарат, поддерживающий связь подмоделей с внешней средой без потери свойств распространяемых сигналов. При этом, данная связь также должна подчиняться принципам обработки информации в ИНС.

Рассмотрим набор обученных, независимых друг от друга нейросетевых моделей этапов ТДО. Их конфигурации в упрощенном виде представлены на рисунке 31.

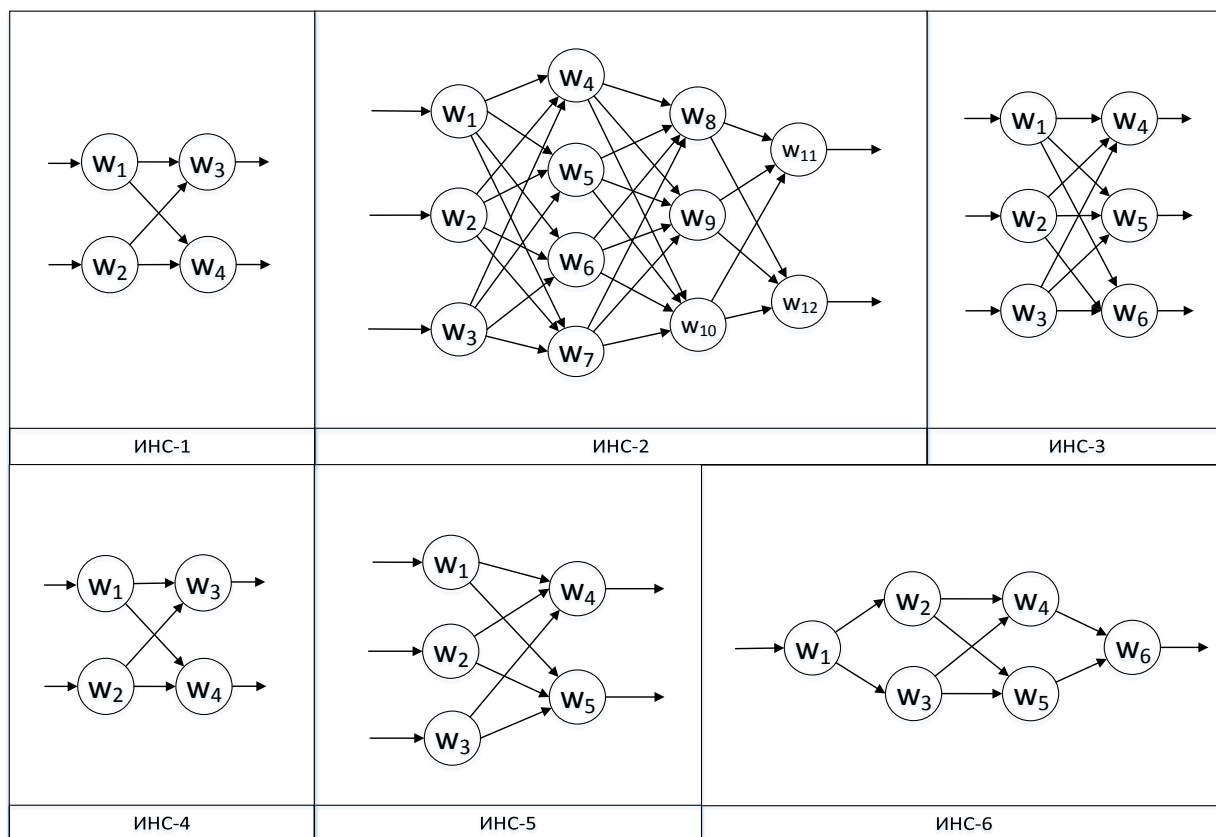


Рисунок 31 – Набор обученных, независимых друг от друга ИНС-моделей

Каждая из предложенных ИНС обрабатывает и возвращает определенный набор числовых характеристик в заданных диапазонах. На практике очень часто возникает проблема создания такой ИНС, которая бы могла быть решать определенное количество задач, обрабатывая несколько видов входящих в нее данных. Реализация подобной ИНС представляет собой модель, потоки данных внутри которой подразделяются

на несколько подмоделей, чьи выходные потоки данных, затем, вновь объединяются в одной заключительной подмодели. Таким образом, решение нескольких задач требует разработки сложной монолитной нейросетевой модели.

Самым простым способом получения ОИНС-модели является последовательное соединение ее подмоделей. Полученная система будет иметь конфигурацию, представленную на рисунке 32.

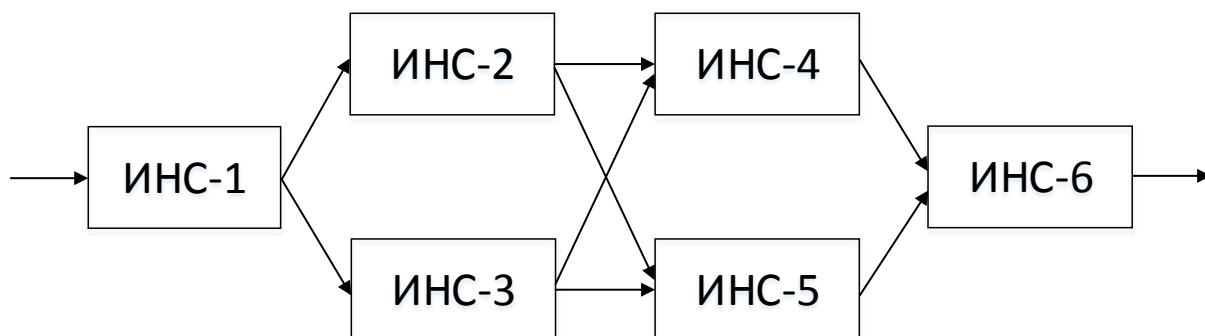


Рисунок 32 – Обобщенная нейросетевая модель, полученная последовательным соединением набора нейросетей

В общем случае ОИНС-модель представляет собой «черный ящик», принимающий входные значения и с выхода которого принимаются выходные значения. Входными значениями для ОИНС-модели являются данные, подаваемые на вход ИНС-1 (рис.33).

```

кд1.375.050_эз кд1.375.050_эз кд1.375.050_вп 1 13 14
кд1.375.050_пэз кд1.375.050_эз кд1.375.050_вп 2 13 14
кд1.375.053_эз кд1.375.053_эз кд1.375.053_вп 3 15 16
кд1.375.053_пэз кд1.375.053_эз кд1.375.053_вп 4 15 16
кд1.375.055_эз кд1.375.055_эз кд1.375.055_вп 5 17 18
кд1.375.055_пэз кд1.375.055_эз кд1.375.055_вп 6 17 18
кд1.375.064_эз кд1.375.064_эз кд1.375.064_вп 7 19 20
кд1.375.064_пэз кд1.375.064_эз кд1.375.064_вп 8 19 20
кд2.280.048_эз кд2.280.048_эз кд2.280.048_вп 9 21 22
кд2.280.048_пэз кд2.280.048_эз кд2.280.048_вп 10 21 22
кд3.490.033_эз кд3.490.033_эз кд3.490.033_вп 11 23 24
кд3.490.033_пэз кд3.490.033_эз кд3.490.033_вп 12 23 24

```

Рисунок 33 – Входные данные модели обобщенной нейросети и подмодели ИНС-1

Выходными значениями ОИНС становятся результаты обработки подмодели ИНС-6 (рис.34).

```

кд1.375.050_пими кд1.375.050 5444 5450
кд1.375.053_пими кд1.375.053 5445 5451
кд1.375.055_пими кд1.375.055 5446 5452
кд1.375.064_пими кд1.375.064 5447 5453
кд2.280.048_пими кд2.280.048 5448 5454
кд3.490.033_пими кд3.490.033 5449 5455

```

Рисунок 34 – Выходные значения обобщенной нейросетевой модели и подмодели ИНС-6

Подавая на вход числовые значения от 1 до 12 на выходе необходимо получить значения от 5450 до 5455. Таким образом, конфигурация "черного ящика" ОИНС принимает вид, представленный на рисунке 35.

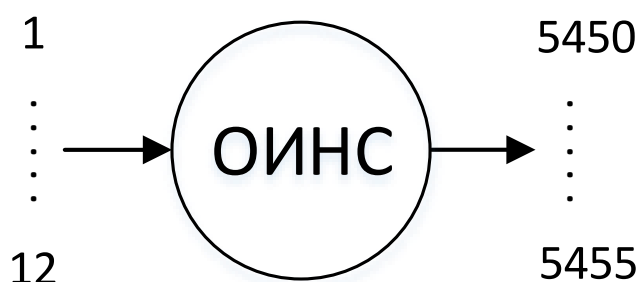


Рисунок 35 – Общий вид обобщенной нейросетевой модели

Целесообразно объединить обрабатываемую информацию в один файл для удобства использования (рис.36).

```

кд1.375.050_эз кд1.375.050 1 5450
кд1.375.050_пэз кд1.375.050 2 5450
кд1.375.053_эз кд1.375.053 3 5451
кд1.375.053_пэз кд1.375.053 4 5451
кд1.375.055_эз кд1.375.055 5 5452
кд1.375.055_пэз кд1.375.055 6 5452
кд1.375.064_эз кд1.375.064 7 5453
кд1.375.064_пэз кд1.375.064 8 5453
кд2.280.048_эз кд2.280.048 9 5454
кд2.280.048_пэз кд2.280.048 10 5454
кд3.490.033_эз кд3.490.033 11 5455
кд3.490.033_пэз кд3.490.033 12 5455

```

Рисунок 36 – Объединенные данные для обучения обобщенной нейросети

Для программной реализации ОИНС используем ранее подготовленный набор обученных ИНС-подмоделей (рис.37).

```
457 ANN1 = keras.models.load_model(Path + '\\ANNs\\ANN-1.h5')
458 ANN2 = keras.models.load_model(Path + '\\ANNs\\ANN-2.h5')
459 ANN3 = keras.models.load_model(Path + '\\ANNs\\ANN-3.h5')
460 ANN4 = keras.models.load_model(Path + '\\ANNs\\ANN-4.h5')
461 ANN5 = keras.models.load_model(Path + '\\ANNs\\ANN-5.h5')
462 ANN6 = keras.models.load_model(Path + '\\ANNs\\ANN-6.h5')
463
```

Рисунок 37 – Загрузка конфигураций готовых нейросетевых подмоделей в программный код

Значения, передаваемые из одной ИНС в другую, необходимо приводить к соответствующему формату - одномерному числовому массиву (.flatten() ). Значения нескольких ИНС-подмоделей, образующих слой ОИНС, также необходимо объединять в один числовой массив (np.concatenate() ) (рис.38).

```
590 ANN1_PREDICTED = ANN1.predict(NP_X); #print('ANN1 = ', ANN1_PREDICTED)
591 ANN1_FLAT = ANN1_PREDICTED.flatten(); #print(ANN1_FLAT)
592
593 ANN2_PREDICTED = ANN2.predict(ANN1_FLAT); #print('ANN2 = ', ANN2_PREDICTED)
594 ANN2_FLAT = ANN2_PREDICTED.flatten()
595
596 ANN3_PREDICTED = ANN3.predict(ANN1_FLAT); #print('ANN3 = ', ANN3_PREDICTED)
597 ANN3_FLAT = ANN3_PREDICTED.flatten()
598
599 ANN2_3 = np.concatenate((ANN2_FLAT, ANN3_FLAT)); #print(ANN2_3)
600
601 ANN4_PREDICTED = ANN4.predict(ANN2_3); #print('ANN4 = ', ANN4_PREDICTED)
602 ANN4_FLAT = ANN4_PREDICTED.flatten()
603
604 ANN5_PREDICTED = ANN5.predict(ANN2_3); #print('ANN5 = ', ANN5_PREDICTED)
605 ANN5_FLAT = ANN5_PREDICTED.flatten()
606
607 ANN4_5 = np.concatenate((ANN4_FLAT, ANN5_FLAT)); #print(ANN4_5)
608
609 ANN6_PREDICTED = ANN6.predict(ANN4_5); print('ANN6 RESULT = ', ANN6_PREDICTED)
```

Рисунок 38 – Реализация программного кода обобщенной нейросетевой модели методом последовательного объединения

Результаты работы ОИНС, полученной методом последовательного соединения ИНС-подмоделей, значительно расходятся с теоретическими и являются неудовлетворительными. Фрагменты начала, середины и конца списка результатов обработки данных ОИНС представлены на рисунке 39.

```

ANN6 RESULT = [[2690.7395] [2692.3635] [5372.1216]
[2691.3186] [5369.095 ] [5373.0967]
[2691.7427] [5370.111 ] [5373.094 ]
[2692.3223] [5370.0664] [5374.069 ]
[2690.743 ] [5371.083 ] [5374.094 ]
[2691.3225] [5371.0654] [5375.07 ]
[2691.7468] [5372.0815] [5372.1294]
[2692.3264] [5369.102 ] [5373.1045]
[2690.743 ] [5370.118 ] [5373.1006]
[2691.3225] [5370.073 ] [5374.0767]
[2691.7468] [5371.0894] [5374.101 ]
[2692.326 ] [5371.073 ] [5375.0767]]
[2690.7466] [5372.09 ]
[2691.3257] [5369.102 ]
[2691.7502] [5370.118 ]
Process finished with exit code 0

```

Рисунок 39 – Фрагменты начала, середины и конца списка результатов обработки данных обобщенной нейросетевой моделью

Поскольку непересекающиеся множества значений входов обрабатываются во всех используемых в ОИНС подмоделях, то воспринимаемый последующей подмоделью ошибочный выходной сигнал порождается каждой предыдущей подмоделью. С каждой пройденной ИНС-подмоделью растет цена ошибки, приводя в конечном итоге к получению ошибочного результата работы ОИНС. Построенная подобным образом нейросетевая модель не в состоянии обучаться правильной обработке входящих сигналов, так как в ней отсутствуют элементы, способные к обучению. Необходима внешняя ИНС, корректирующая ошибочные сигналы, распространяющиеся внутри рассматриваемой системы.

#### **2.4.2 Построение обобщенной нейросетевой модели методом представления нейросетевых подмоделей в виде нейронных элементов**

Каждая модель этапа создания документации об изделии представляет собой отдельную изолированную подсистему, решающую задачу распознавания конкретных входных сигналов и выдачу соответствующих результатов. Данное обстоятельство делает принципиально невозможным создание общей системы путем последовательного соединения ее подсистем. Необходим механизм, обеспечивающий передачу корректных данных из предыдущей подсистемы в последующую, расширяющий возможности построения нейросетевой системы.

По методологии IDEF0 моделируемая система представляет собой совокупность подмоделей, представленных структурными декомпозициями функциональных блоков. Связи между функциональными блоками верхнего и нижнего уровней при проведении структурной декомпозиции остаются неизменными. В ИНС неизменность передачи сигнала от одной модели к другой не предусмотрена, что значительно ограничивает спектр решаемых искусственной нейросетью задач.

Для того, чтобы объединить совокупность ИНС в одну систему, представляющую собой обобщенную искусственную нейронную сеть (ОИНС), необходимо, чтобы имелся аппарат, поддерживающий связь подмоделей с внешней средой без потери свойств распространяемых сигналов, подобный механизму структурной декомпозиции по методологии IDEF0. При этом, данная связь также должна подчиняться принципам обработки информации в ИНС. Тогда ИНС-подсистема должна представлять собой отдельный "нейрон" в системе ИНС верхнего уровня и функционировать соответственно, как искусственный нейрон [92].

Настройка весов нейронов ИНС служит ее обучением с целью получения желаемого результата при прохождении входных сигналов. С точки зрения алгоритмов обучения нейронный элемент - основа структуры ИНС, несущая в себе значения весов [93].

ИНС не обладает собственными весами. Следовательно, необходимо, чтобы результаты, выдаваемые ИНС, представляли собой значения весов нейронного элемента в среде ОИНС (рис.40).

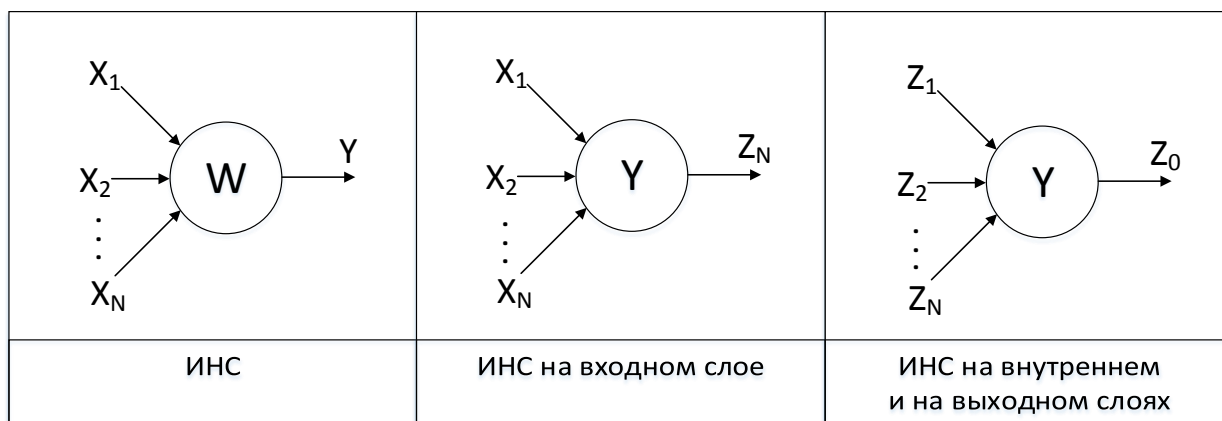


Рисунок 40 – Представление выходного сигнала нейросети как веса в масштабе обобщенной нейросети

Для получения выходного сигнала нейронного элемента ОИНС, необходимо обработать соответствующим образом входные сигналы с помощью внутренней ИНС с последующей повторной их обработкой по алгоритму функционирования искусственного нейрона совместно с результатом внутренней ИНС (рис.41).

Соответственно, вычисление результирующего сигнала нейронного элемента ОИНС производится по следующему закону:

$$Z_0 = F\left(Y \sum_{i=1}^N Z_i\right), \quad (15)$$

где  $Y$  - результат обработки входных сигналов  $Z_i$  внутренней ИНС,  $F$  - функция активации нейронного элемента ОИНС.

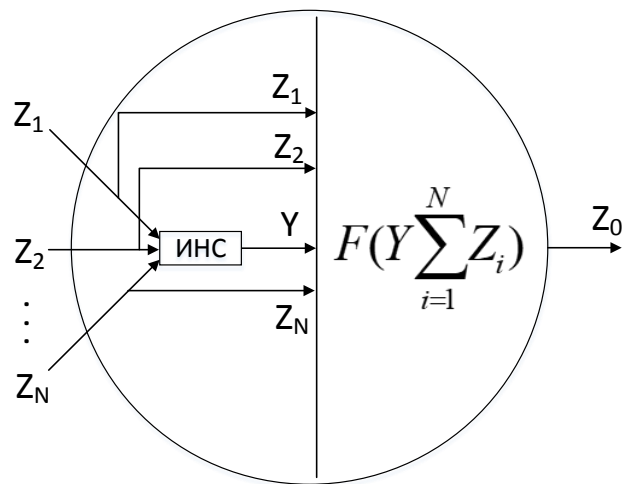


Рисунок 41 – Обработка сигналов нейронным элементом обобщенной нейросети

Следуя сформулированным правилам, представим производственный процесс одновременного изготовления нескольких изделий в виде системы ИНС-подмоделей (рис.42).

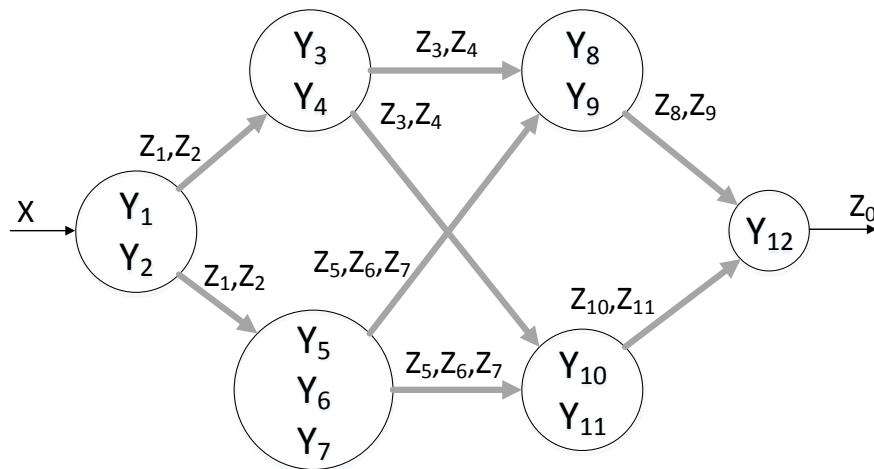


Рисунок 42 – Обобщенная нейросеть, содержащая несколько весов в каждом структурном элементе

Вследствие наличия двух и более выходных сигналов в рассматриваемых моделях ИНС, то в полученной ОИНС присутствуют элементы с несколькими весами. Целесообразно привести ОИНС к виду,



в котором каждый нейронный элемент содержит в себе один из весов, полученный из внутренней ИНС (рис.43).

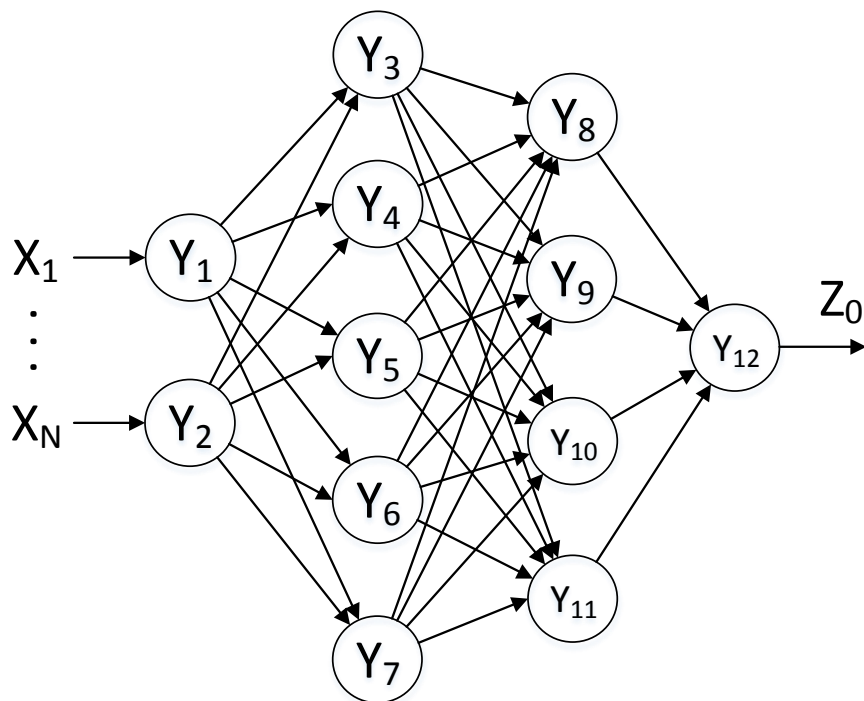


Рисунок 43 – Обобщенная нейросеть, приведенная к стандартному виду

Таким образом, получена двухуровневая нейронная сеть, способная к структурной декомпозиции, подобно методологии IDEF0.

Одним из возможных вариантов корректировки сигналов, поступающих на каждый элемент ИНС является изменение веса каждого нейрона на специфический. Рассмотрим конфигурацию ОИНС, в которой вес каждого нейрона меняется на значение выходного сигнала соответствующей ИНС-подмодели (рис.44).

Реализация концепции ИНС-подмодели в виде отдельного нейрона ОИНС в виде программного кода предполагает представление каждого нейронного элемента в виде отдельной модели с принудительной подстройкой весов, согласно конфигурации используемой ИНС-подмодели. Фактическая конфигурация ОИНС представлена на рисунке 45.

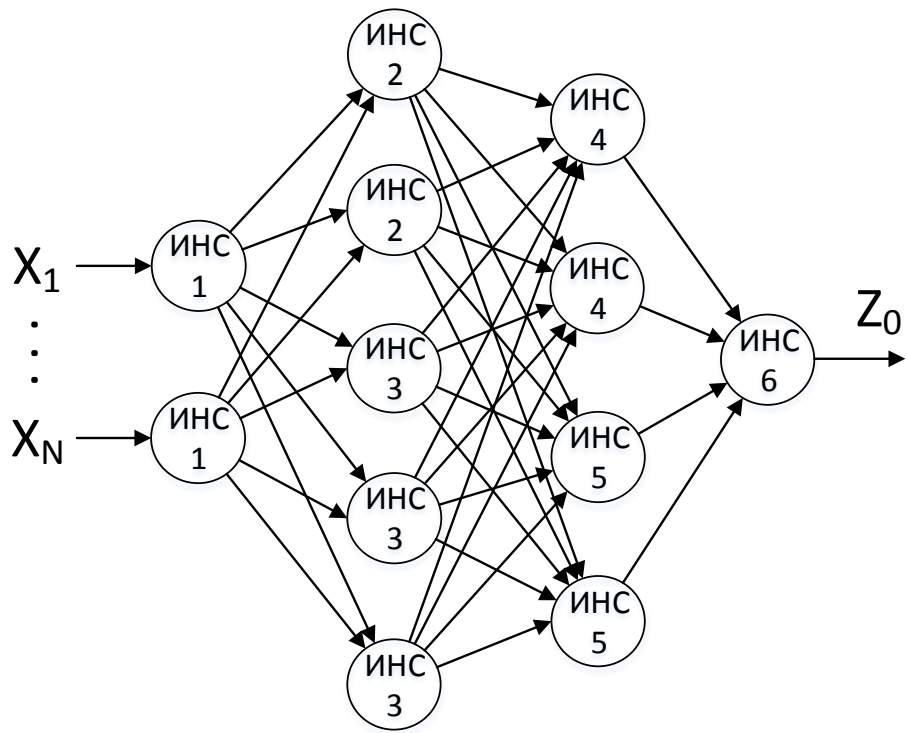


Рисунок 44 – Обобщенная нейросеть с корректировкой весов нейронов с помощью отдельных нейросетевых подмоделей

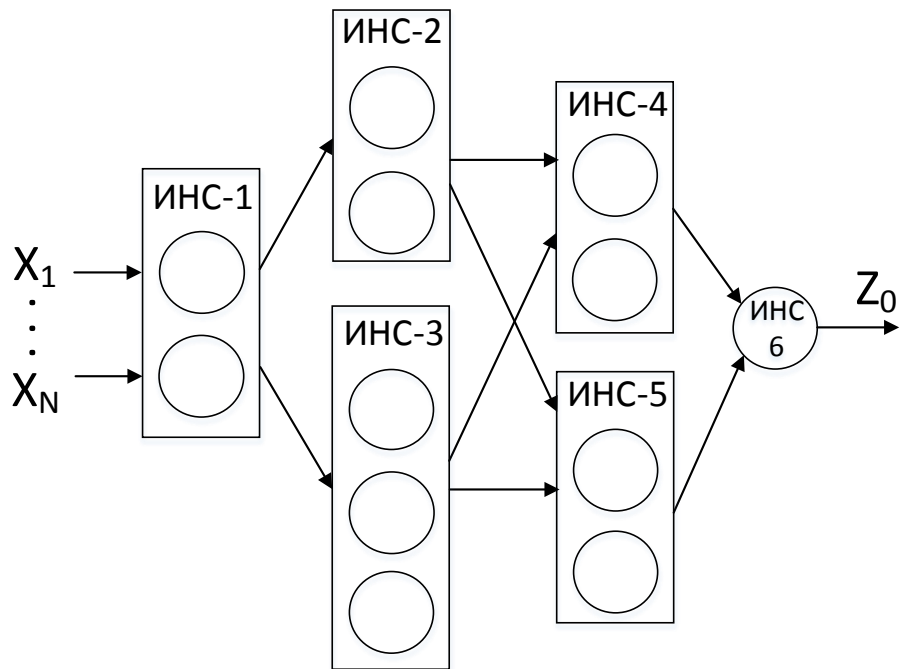


Рисунок 45 – Фактическая конфигурация обобщенной нейросети

Программная реализация нейронного элемента ОИНС этапа "Проектирование" в виде отдельной модели представлена на рисунке 46.

```
479  
480 ANN_in = Input(shape=(1,), name='ANN_IN')  
481 L1 = Dense(1, activation='linear', name='L1_Dense')(ANN_in)  
482 L1_M = Model(inputs=ANN_in, outputs=L1)  
483 ANN1_PREDICTED = ANN1.predict(NP_X); #print(ANN1_PREDICTED)  
484 L1_W = L1_M.get_weights()  
485 L1_W[1][0] = ANN1_PREDICTED[0][0]  
486 L1_M.set_weights(L1_W);  
487 #print(L1_M.get_weights())  
488 L1_M_out = L1_M.predict(NP_X)  
499
```

Рисунок 46 – Реализация нейронного элемента обобщенной нейросети в виде программной подмодели, содержащую нейросетевую подмодель этапа «Проектирование»

Все остальные ИНС-подмодели формируются аналогичным способом. Их реализации, включенные в общую структуру ОИНС-модели, представлены в приложении Е.

Результаты обработки слоев, содержащих более чем один нейрон ОИНС, необходимо представить в виде объединения одномерных числовых массивов для передачи данных следующему слою (рис.47).

Результат, выдаваемый данной ОИНС, имеет интересную особенность в том, что каждому значению из диапазона входных сигналов соответствует противоположное значение из диапазона выходных сигналов (рис.48).

Процесс обучения нейронных сетей основан на свободном изменении значений весов нейронов на величину ошибки, оцениваемую на основе разницы между теоретическим и полученным значениями результатов обработки данных с учетом параметров обучения. Принудительная подстройка весов нейронов существенно ограничивает свободу их изменения, вызывая эффект паралича в процессе обучения [94], что приводит к неверному результату работы ОИНС.

```

490
491 L2_1 = Dense(2, activation='linear', name='L2_Dense_1')(L1)
492 L2_1_M = Model(inputs=ANN_in, outputs=L2_1)
493 ANN2_PREDICTED = ANN2.predict(L1_M_out); #print(ANN2_PREDICTED)
494 L2_1_W = L2_1_M.get_weights()
495 L2_1_W[3][0] = ANN2_PREDICTED[0][0]
496 L2_1_W[3][1] = ANN2_PREDICTED[0][0]
497 L2_1_M.set_weights(L2_1_W)
498 #print(L2_1_M.get_weights())
499 L2_1_M_out = L2_1_M.predict(NP_X)
500
501
502 L2_2 = Dense(3, activation='linear', name='L2_Dense_2')(L1)
503 L2_2_M = Model(inputs=ANN_in, outputs=L2_2)
504 ANN3_PREDICTED = ANN3.predict(L1_M_out); #print(ANN3_PREDICTED)
505 L2_2_W = L2_2_M.get_weights()
506 L2_2_W[3][0] = ANN3_PREDICTED[0][0]
507 L2_2_W[3][1] = ANN3_PREDICTED[0][0]
508 L2_2_W[3][2] = ANN3_PREDICTED[0][0]
509 L2_2_M.set_weights(L2_2_W)
510 #print(L2_2_M.get_weights())
511 L2_2_M_out = L2_2_M.predict(NP_X)
512
513
514 combined_L2 = Concatenate()([L2_1, L2_2])
515 combined_L2_out = np.concatenate((ANN2_PREDICTED.flatten(), ANN3_PREDICTED.flatten()))
516 #print(combined_L2_out)

```

Рисунок 47 – Объединение результатов обработки информации нейронов обобщенной нейросети этапов «Конструирование» и «Технология» в один числовой массив

```

[[5455.]
 [5455.]
 [5454.]
 [5454.]
 [5453.]
 [5453.]
 [5452.]
 [5452.]
 [5451.]
 [5451.]
 [5450.]
 [5449.]]

Process finished with exit code 0

```

Рисунок 48 – Результат работы обобщенной нейросети, использующей нейросетевые подмодели в качестве нейронных элементов

### **2.4.3 Построение обобщенной нейросетевой модели с межслойным включением нейросетевых подмоделей**

Изменение весов искусственных нейронов на специфические всегда сопряжено с риском возникновения эффекта паралича во время обучения. Одновременно, последовательное соединение ИНС-подмоделей в одну систему возможно лишь тогда, когда множество выходных значений ИНС и принимаемых ею входных совпадают. Соединение в общую систему абсолютно разных по своим функциям и свойствам ИНС не имеет смысла.

Основой любой производственной системы предприятия являются его сотрудники. Человек, с точки зрения когнитивных наук, представляет собой чрезвычайно мощный биологический нейрокомпьютер, способный решать нетривиальные задачи [95], с которыми современные вычислительные системы справляются с трудом, также с помощью человека.

Совокупность подсистем, занимающихся решением интеллектуальных задач, в том числе и смежного характера, образуют сложную интеллектуальную систему. Поскольку человек является ее главным элементом, то, фактически, интеллектуальная система становится одной общей нейронной сетью. При этом, человек, являясь ее элементом, легко решает различные задачи нетривиального характера, в том числе и те, которые далеки от его области деятельности [96].

Известно, что ИНС - это инструмент, не обладающий абсолютной точностью. Человеческий фактор при решении задач также имеет место в деятельности человека. Но при возникновении ошибки, распространяющейся внутри системы, она оперативно отслеживается и устраняется, позволяя системе функционировать дальше и получать ожидаемый результат.

Следовательно, человек представляет собой либо нейронную сеть, обученную широкому диапазону задач, в том числе и задачам, выходящим за рамки его сферы деятельности, либо существует внешняя контролирующая среда, оперативно устраняющая ошибки, возникающие в результате интеллектуальной деятельности, реальным аналогом которой выступает единая интегрированная электронная среда АС [97].

Поскольку существует набор обученных, независимых друг от друга ИНС-подмоделей, решающих узкий спектр собственных задач, которые требуется объединить в единую систему, то необходимо рассмотреть концепцию, при которой существует внешняя ОИНС, корректирующая ошибки при обработке данных каждой ИНС-подмодели.

Рассмотрим концепцию, при которой существует внешняя корректирующая внутренние ошибки ОИНС, построенная по принципу чередования слоев со свободными для обучения нейронными элементами и обученных ИНС-подмоделей, также образующих слои (рис.49).

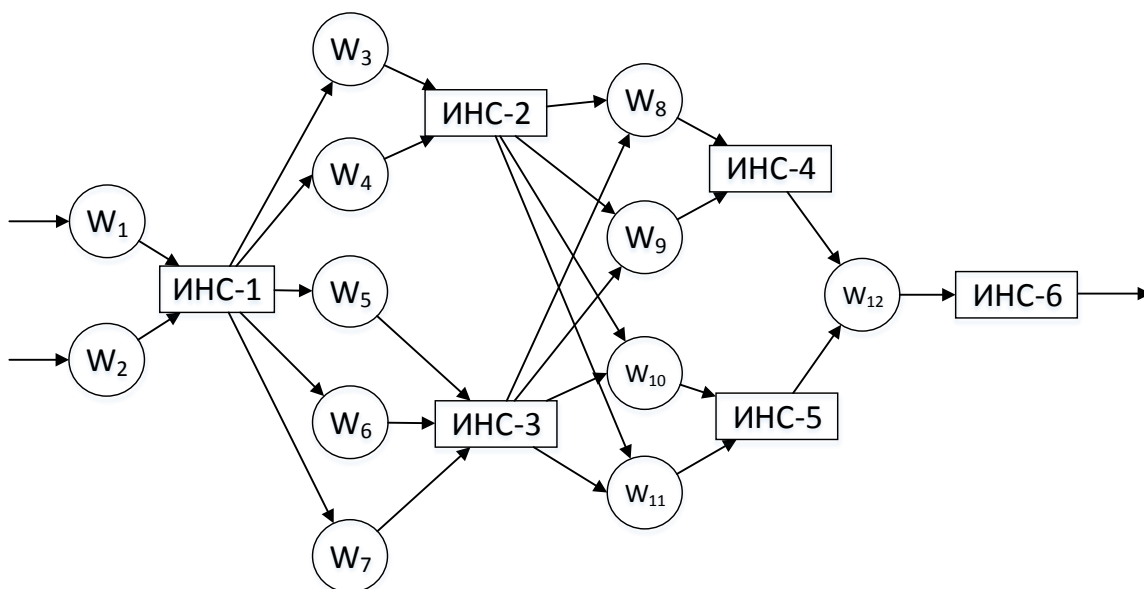


Рисунок 49 – Обобщенная нейросеть с чередованием слоев со свободными для обучения нейронными элементами и слоев, содержащих нейросетевые подмодели

Поскольку чередование слоев подразумевает изменение стандартного подхода к построению структуры ИНС, необходимо представлять каждый слой в виде отдельной модели. Обобщающая способность промежуточных моделей также должна быть достаточной, для чего в них необходимо установить количество нейронных элементов, совпадающее с количеством нейронных элементов на входных слоях обученных ИНС-подмоделей (рис.50).

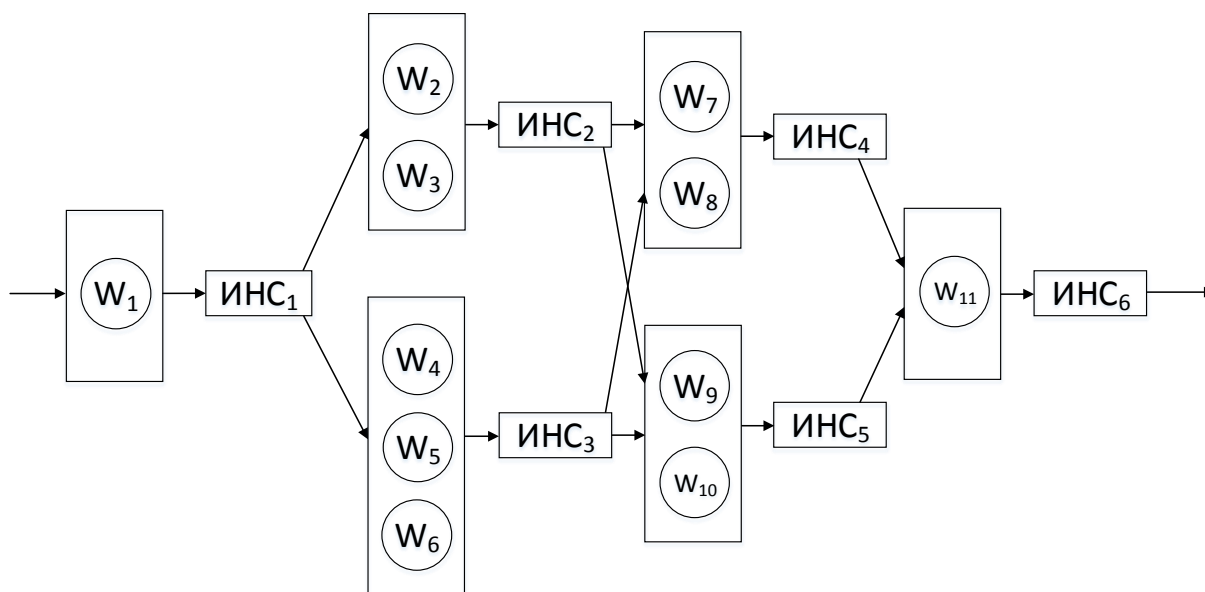


Рисунок 50 – Фактическое представление обобщенной нейросети с чередующимися слоями и нейросетевыми подмоделями

Следуя данной концепции, становится возможной программная реализация ОИНС-модели (рис.51).

Результаты обработки данных ИНС-подмоделей непосредственно участвуют в процессе вычисления ОИНС, для чего их необходимо объединять в один числовой массив для дальнейшей обработки последующими слоями (рис.52).

```

633
634 L2_1_in = Input(shape=(2,), name='L2_1_IN')
635 L2_1 = Dense(2, activation='linear', name='L2_Dense_1')(L2_1_in)
636 L2_1_M = Model(inputs=L2_1_in, outputs=L2_1)
637
638 L2_1_out = L2_1_M.predict(ANN1_PREDICTED); #print(L2_1_out)
639 L2_1_out_1 = L2_1_out[:,0]; #print(L2_1_out_1)
640 L2_1_out_2 = L2_1_out[:,1]; #print(L2_1_out_2)
641 #L2_1_FLAT = L2_1_M.predict(ANN1_PREDICTED).flatten()
642 #ANN2_PREDICTED = ANN2.predict(L2_1_FLAT); #print(ANN2_PREDICTED)
643 #ANN2_FLAT = ANN2_PREDICTED.flatten()
644 ANN2_PREDICTED_1 = ANN2.predict(L2_1_out_1); #print(ANN2_PREDICTED_1)
645 ANN2_PREDICTED_2 = ANN2.predict(L2_1_out_2); #print(ANN2_PREDICTED_2)
646
647 #-----
648
649 L2_2_in = Input(shape=(2,), name='L2_2_IN')
650 L2_2 = Dense(3, activation='linear', name='L2_Dense_2')(L2_2_in)
651 L2_2_M = Model(inputs=L2_2_in, outputs=L2_2)
652
653 L2_2_out = L2_2_M.predict(ANN1_PREDICTED); #print(L2_1_out)
654 L2_2_out_1 = L2_2_out[:,0]; #print(L2_2_out_1)
655 L2_2_out_2 = L2_2_out[:,1]; #print(L2_2_out_2)
656 #L2_2_FLAT = L2_2_M.predict(ANN1_PREDICTED).flatten()
657 #ANN3_PREDICTED = ANN3.predict(L2_2_FLAT); #print(ANN3_PREDICTED)
658 #ANN3_FLAT = ANN3_PREDICTED.flatten()
659 ANN3_PREDICTED_1 = ANN3.predict(L2_2_out_1); #print(ANN3_PREDICTED_1)
660 ANN3_PREDICTED_2 = ANN3.predict(L2_2_out_2); #print(ANN3_PREDICTED_2)
661

```

Рисунок 51 – Программная реализация моделей второго слоя и слоев нейросетевых подмоделей этапов "Конструирование" и "Технология"

```

663
664 combined_L2 = Concatenate()([L2_1, L2_2])
665 combined_L2_NP_1 = np.concatenate((ANN2_PREDICTED_1, ANN3_PREDICTED_1), axis=1); #print(combined_L2_NP_1)
666 combined_L2_NP_2 = np.concatenate((ANN2_PREDICTED_2, ANN3_PREDICTED_2), axis=1); #print(combined_L2_NP_2)
667 combined_L2_NP = np.concatenate((combined_L2_NP_1, combined_L2_NP_2), axis=1); #print(combined_L2_NP)
668

```

Рисунок 52 – Промежуточное объединение результатов обработки данных нейросетевыми подмоделями этапов «Конструирование» и «Технология»

Входные данные для проверки результатов обучения ОИНС имеют сложную структуру, выражающуюся в различной размерности подаваемых



на вход числовых массивов. Необходимо разработать соответствующий тест, удовлетворяющий условиям размерностей. В отдельные переменные запишем специфические данные, например, в переменную T\_1 запишем документ с номером 10 (соответствует КД2.280.048 ПЭЗ). Все остальные переменные T\_2, T\_3 и T\_4 соответственно содержат в себе последовательные результаты обработки данных каждой предыдущей ИНС-подмодели. Если размерность числового массива слишком большая для ее восприятия последующей ИНС-подмоделью, то часть значений отсекается для достижения требуемой размерности (рис.53).

```
750     T_1 = np.array([10])
751     T_2 = np.array([[21.4272, 22.42643]])
752     T_3 = np.array([[2681.7856, 2682.786, 5371.3843, 5372.368, 5373.3735,
753         2681.789, 2682.7893, 5371.3916, 5372.3755, 5373.381]])
754     T_4 = np.array([[2687.658, 2688.2366, 2689.242, 2689.2515,
755         5384.7974, 5385.815, 5387.753, 5388.735]])
756
757
758     classes = MainModel.predict([T_1, T_2, T_2, T_3, T_3, T_4])
759     #print(classes)
760     print('RESULT:\n',classes.round())
```

Рисунок 53 – Реализация теста для проверки правильности обучения обобщенной нейросетевой модели

Далее все переменные последовательно подаются на вход ОИНС-модели. Результат работы ОИНС, созданной чередованием слоев и обученных ИНС-подмоделей представлен на рисунке 54.

Данная концепция приводит к ошибочным результатам обработки данных, так как ИНС-подмодели выступают как "нейроны" без возможности обучения, что приводит к местным параличам в процессе обучения и, следовательно, к снижению точности результатов работы ОИНС [98].

```
12/12 [=====] - 0s 83us/step - loss: 3.0623 - accuracy: 0.1667
Epoch 499/500

12/12 [=====] - 0s 83us/step - loss: 3.0535 - accuracy: 0.1667
Epoch 500/500

12/12 [=====] - 0s 83us/step - loss: 3.0465 - accuracy: 0.1667
RESULT:
[[-2742.]]

Process finished with exit code 0
```

Рисунок 54 – Результат работы обобщенной нейросетевой модели, созданной чередованием слоев и обученных нейросетевых подмоделей

Кроме того, внутренние свободные нейроны обучаются восприятию только ошибочных данных, генерируемых ИНС-подмоделями, что в совокупности с "паралитической" составляющей также порождает ошибку в формировании результатов.

#### **2.4.4 Построение обобщенной нейросетевой модели с использованием дополнительных входов от нейросетевых подмоделей**

Включение в общую систему отдельных элементов контроля ошибок данных не обеспечивает ее корректную работу. ОИНС должна непрерывно охватывать все этапы подготовки производственной документации, оставаясь при этом внешней структурой. Следовательно, необходимо рассмотреть такую ИНС-структуру, при которой общая нейросетевая модель могла бы адаптироваться к входным сигналам с шумовой составляющей, генерируемой ИНС-подмоделями. Данное обстоятельство означает, что на каждом слое ОИНС располагается дополнительный вход для шумовых данных [99].

Следуя данным принципам, построена ОИНС модель, особенностью которой является использование одних и тех же входных данных для каждой ИНС-подмодели для гарантированной генерации шума на дополнительных входах ИНС [100] (рис.55).

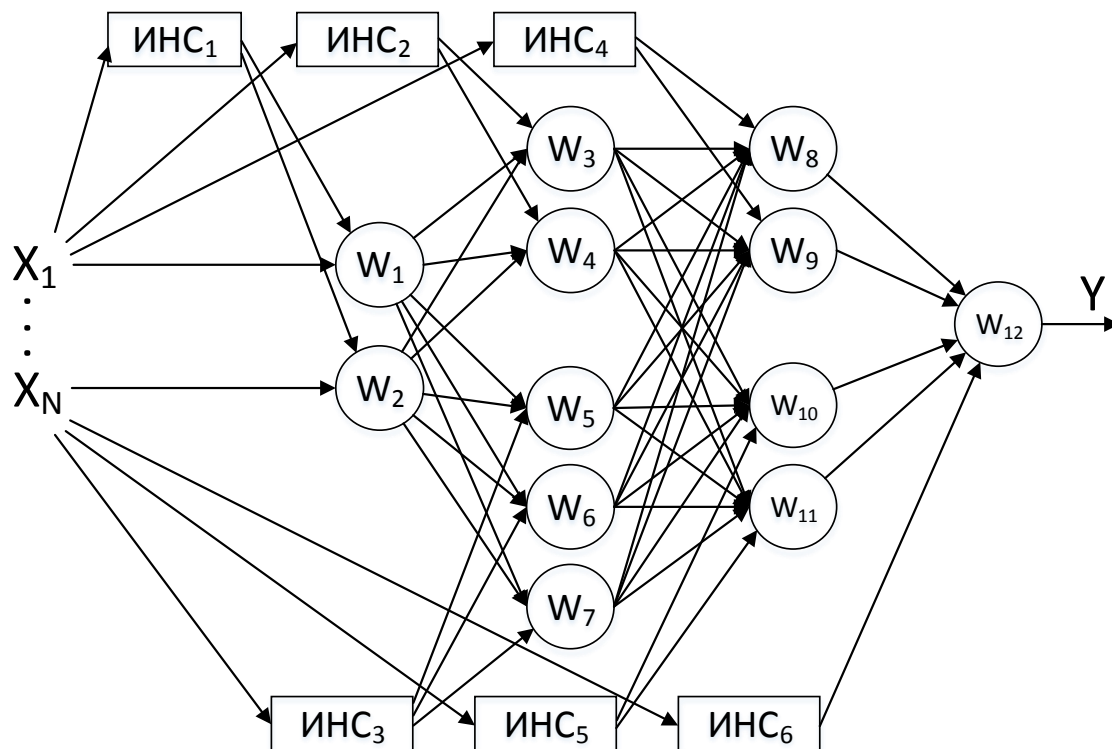


Рисунок 55 – Обобщенная нейронная сеть с дополнительными шумовыми входами на каждом слое

Реализация входного слоя с несколькими входами требует создания нескольких входных слоев и формирования дополнительного слоя, объединяющего входные (рис.56).

Данными для обучения являются ОИНС являются подготовленный текстовый файл и результаты обработки данных каждой из шести обученных ИНС-подмоделей различных этапов. Подадим на вход каждой ИНС-подмодели один и тот же набор данных, который они обрабатывают, согласно своим внутренним ассоциациям.

```

781
782 ANN_in_1 = Input(shape=(1,), name='ANN_IN_1')
783 ANN_in_2 = Input(shape=(1,), name='ANN_IN_2')
784 merge_IN = Concatenate()([ANN_in_1, ANN_in_2])
785
786 L1 = Dense(2, activation='linear', name='L1_Dense')(merge_IN)
787
788 L2_1_in = Input(shape=(1,), name='L2_1_IN')
789 merge_L2_1 = Concatenate()([L1, L2_1_in])
790 L2_1 = Dense(2, activation='linear', name='L2_Dense_1')(merge_L2_1)
791
792 L2_2_in = Input(shape=(1,), name='L2_2_IN')
793 merge_L2_2 = Concatenate()([L1, L2_2_in])
794 L2_2 = Dense(3, activation='linear', name='L2_Dense_2')(merge_L2_2)
795
796 combined_L2 = Concatenate()([L2_1, L2_2])
797

```

Рисунок 56 – Программная реализация входных слоев для нейросетевых моделей этапов «Проектирование», «Конструирование» и "Технология"

Поскольку результаты обработок различных ИНС-подмоделей имеют разную размерность, но одинаковый входной формат в виде одномерного числового массива, то имеет смысл каждую полученную матрицу значений привести в числовой массив средних значений по каждой строке (рис.57).

Результат распознавания данных полученной ОИНС из текстового файла представлен на рисунке 58.

График зависимости значения функции потерь (Loss) ОИНС-модели с использованием дополнительных входов от ИНС-подмоделей от пройденной эпохи обучения (Epoch) представлены на рисунке 59.

Полученная ОИНС является работоспособной и позволяет получить верные результаты обработки входных сигналов благодаря непрерывной нейросетевой структуре, не препятствующей корректному обучению, позволяющей подавлять ошибки в распространяющихся сигналах между ИНС-подмоделями. При значении скорости обучения 0,07 и количестве эпох обучения 500 точность ОИНС модели составляет 99%, полнота – 99%.

```

821
822 ANN1_PREDICTED = ANN1.predict(NP_X); #print('ANN1:\n', ANN1_PREDICTED)
823 ANN1_MEAN = np.array(np.mean(ANN1_PREDICTED, axis=1)); #print('ANN1_MEAN:\n', ANN1_MEAN)
824
825 ANN2_PREDICTED = ANN2.predict(NP_X); #print('ANN2:\n', ANN2_PREDICTED)
826 ANN2_MEAN = np.array(np.mean(ANN2_PREDICTED, axis=1)); #print('ANN2_MEAN:\n', ANN2_MEAN)
827
828 ANN3_PREDICTED = ANN3.predict(NP_X); #print('ANN3:\n', ANN3_PREDICTED)
829 ANN3_MEAN = np.array(np.mean(ANN3_PREDICTED, axis=1)); #print('ANN3_MEAN:\n', ANN3_MEAN)
830
831 ANN4_PREDICTED = ANN4.predict(NP_X); #print('ANN4:\n', ANN4_PREDICTED)
832 ANN4_MEAN = np.array(np.mean(ANN4_PREDICTED, axis=1)); #print('ANN4_MEAN:\n', ANN4_MEAN)
833
834 ANN5_PREDICTED = ANN5.predict(NP_X); #print('ANN5:\n', ANN5_PREDICTED)
835 ANN5_MEAN = np.array(np.mean(ANN5_PREDICTED, axis=1)); #print('ANN5_MEAN:\n', ANN5_MEAN)
836
837 ANN6_PREDICTED = np.array(ANN6.predict(NP_X)); #print('ANN6 RESULT:\n', ANN6_PREDICTED)
838

```

Рисунок 57 – Вычисление выходных матриц каждой нейросетевой подмодели на основе одинакового набора входных данных и получение одномерного массива средних значений

```

RESULTS:
[[5450.]
 [5450.]
 [5451.]
 [5451.]
 [5452.]
 [5452.]
 [5453.]
 [5453.]
 [5454.]
 [5454.]
 [5455.]
 [5455.]]

```

Рисунок 58 – Результат распознавания данных внешней обобщенной нейронной сети с дополнительными шумовыми входами

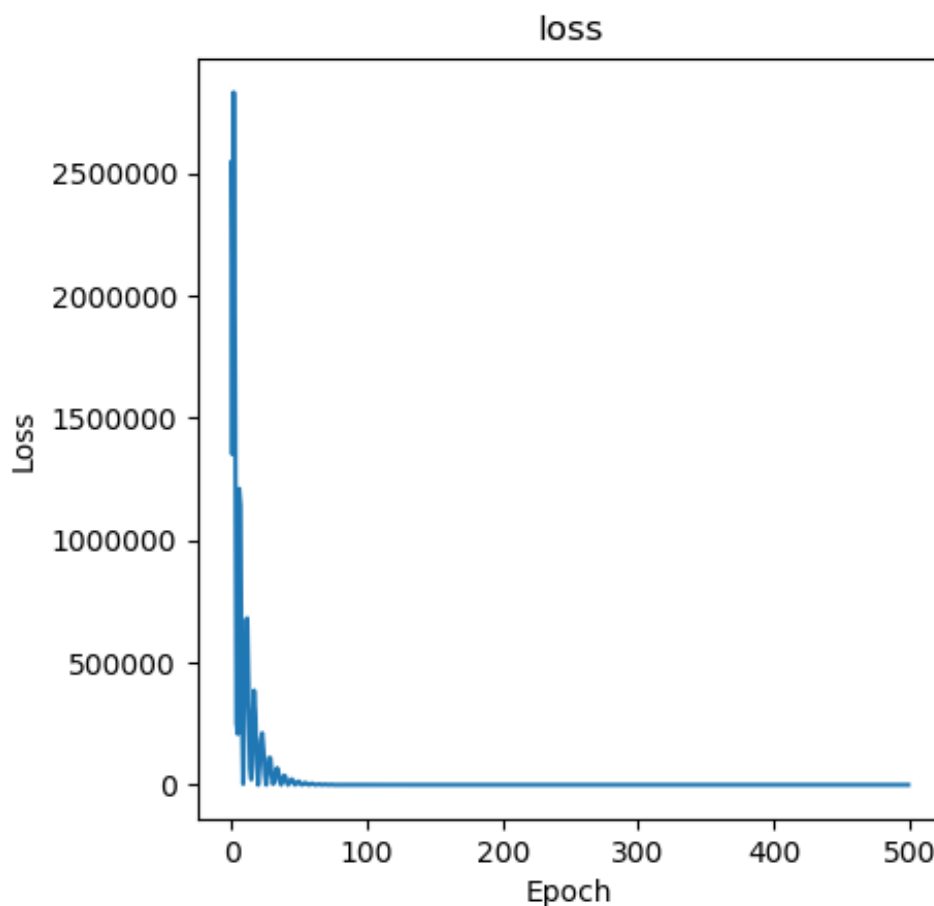


Рисунок 59 – График зависимости значений функции потерь обобщенной нейросетевой модели с использованием дополнительных входов от нейросетевых подмоделей от пройденной эпохи обучения

Фрагменты программного кода реализации имитационной модели обмена информацией о ТД на изделие в виде ОИНС представлены в приложении Ж.

Имитационная модель позволяет обнаружить функциональные и информационные неформализованные связи обработки ТД в системе ТДО путем агрегирования отличительных особенностей входных данных с последующим их объединением и усложнением на каждом последующем слое ИНС, согласно правилам обработки информации в ИНС.

Изменение процессов обработки информации об изделии влияет на общую производительность процессов ТДО, которую возможно вычислить по следующей формуле:

$$P = \frac{K_{КД} + K_{ТД} + K_{ТДскв.}}{T}, \quad (16)$$

где  $K_{КД}$ ,  $K_{ТД}$ ,  $K_{ТДскв.}$  — количество конструкторских, технологических документов и технологических документов сквозного производства соответственно, принятых за период времени  $T$ .

Относительное изменение производительности ТДО рассчитывается по формуле:

$$P_{\%} = \frac{P_{t_2} - P_{t_1}}{P_{t_1}} * 100\%, \quad (17)$$

где  $P_{t_2}$  и  $P_{t_1}$  — производительность ТДО за периоды времени  $t_2$  и  $t_1$  соответственно.

Изменение конфигурации процессов ТДО согласно структуре предложенной имитационной модели учитывает влияние неформализованных связей между участниками ТДО, устраняя потерю части информации об изделии между соседними участниками разработки ТД на изделие, что позволяет увеличить их производительность труда.

В результате изменения процессов разработки конструкторско-технологической информации об изделии с учетом неформализованных связей между отделами разработки достигнуто увеличение общего количества вводимой в действие ТД (рис.60).

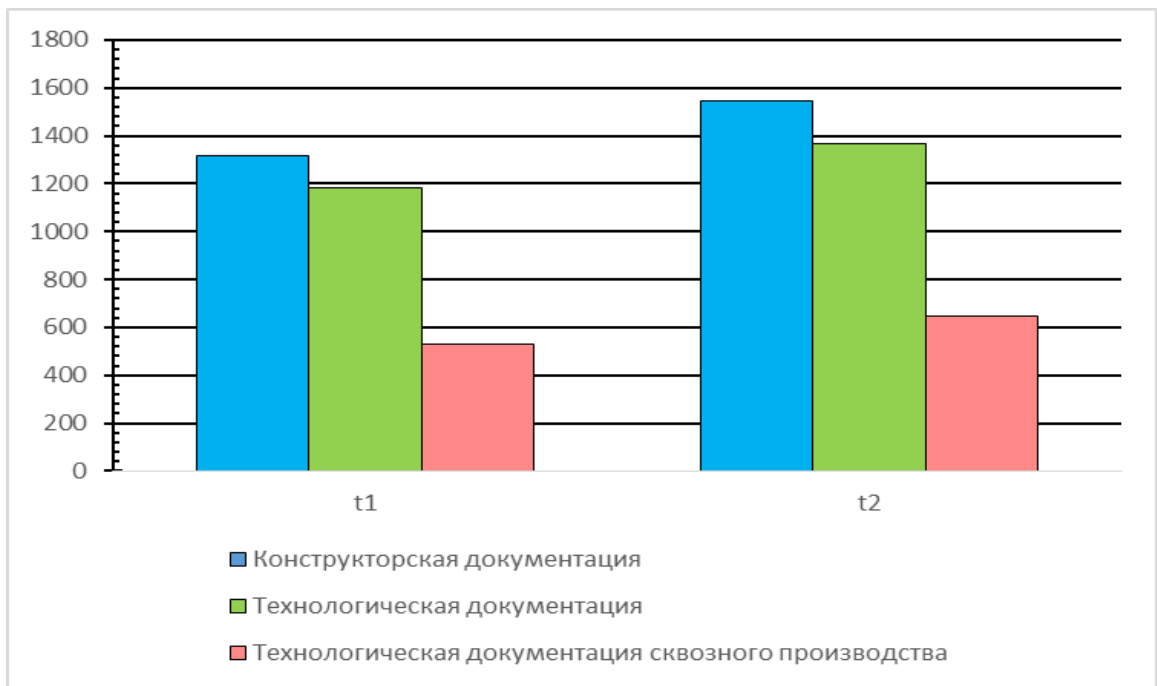


Рисунок 60 - Количество технической документации, введенное в действие за периоды до ( $t_1$ ) и после ( $t_2$ ) применения имитационной модели

Согласно формулам (16) и (17), относительное изменение производительности процессов ТДО увеличилось на 6% по сравнению с предыдущим состоянием системы:

$$P_{\%} = \frac{P_{t2} - P_{t1}}{P_{t1}} * 100\% = 6\%$$



## Выводы по главе 2

Рассмотрены подходы к моделированию систем: методология функционального моделирования IDEF0 и имитационное моделирование, а также элементы теории ИНС как основного инструмента реализации цифрового производства. Для моделирования процессов ТДО выбраны элементы ИНС как перспективный инструмент моделирования систем, обладающий рядом достоинств по сравнению с традиционными подходами функционального и имитационного моделирования: организация межэлементной обратной связи, адаптируемость к изменениям внешней и внутренней среды, обучаемость, наличие естественных ограничений внешней и внутренней среды, на количество межэлементных связей и глубину декомпозиции системы, обусловленные особенностями аппарата ИНС, возможность учета межэлементных неформализованных связей путем агрегирования отличительных особенностей входных данных с последующим их объединением и усложнением на каждом последующем слое ИНС.

На основе полученной из функциональной модели жизненного цикла ТД и ее передачи в производство информации сформированы нейросетевые модели отдельных этапов подготовки ТД.

Разработана имитационная модель обмена информацией о ТД на изделие на основе внешней управляющей нейросетевой структуры, корректирующей ошибки распространяемых внутри системы ТДО сигналов, соединяющей независимые ИНС-подмодели различных этапов подготовки ТД. Предложенная имитационная модель обмена информацией о ТД на изделие отличается от известных агрегированием отличительных особенностей входных данных с последующим их объединением и усложнением на каждом последующем слое ИНС, позволяет обнаруживать

функциональные и информационные неформализованные связи в системе ТДО, не предусмотренные СМК организации, а также выявлять проблемы процессов обработки информации об изделии на различных стадиях проектно-производственного цикла и обосновать необходимость их дальнейшей цифровизации, а также модернизации процессов согласования технической документации.

Разработанная имитационная модель обмена информацией о ТД на изделие реализована в программном обеспечении, позволяющем проанализировать процессы обработки информации об изделии и поведение подсистем ТДО в условиях возникновения несоответствий (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2020611400, заявка №2020610449 от 21.01.2020, положительное решение от 30.01.2020, представлено в приложении И).

Изменение конфигурации процессов ТДО согласно структуре предложенной имитационной модели позволяет повысить результативность конструкторских и технологических отделов за счет увеличения производительности труда на 4-6%.

## **Глава 3 Методика создания нейросетевой модели и модернизация модели маршрута согласования технической документации для практического применения в рамках цифровой системы менеджмента качества организации**

### **3.1 Исследование и структурная декомпозиция маршрута согласования технической документации**

В среде используемой на предприятии АС реализован маршрут согласования ТД в соответствии с СМК организации, регламентирующими требования к согласованию, утверждению и передаче в производство ТД на бумажном носителе (традиционный маршрут).

Согласованием в среде АС является процедура установления степени готовности ТД к передаче в производство лицами, участвующими в ее разработке, с помощью простой электронно-цифровой подписи на различных статусах, которые определяют свойства ТД и доступные над ней действия.

Маршрут согласования ТД в среде АС организации является частью цифровой СМК организации и представляет собой цепь последовательно соединенных между собой статусов ТД от разработки до учета в архиве. Связями между статусами являются переходы из одного статуса в другой. Продвижение ТД по маршруту осуществляется с помощью протокола электронного согласования, допускающего смену статуса ТД, согласно маршруту. Переход между статусами возможен при наличии всех необходимых электронных цифровых подписей лиц, согласующих ТД на каждом конкретном переходе. Структура статусов ТД, включающая в себя переходы, доступные на каждом статусе и необходимые для осуществления перехода подписи лиц, приведена в таблице 14.

Таблица 14 – Структура статусов технической документации

| Статус ТД  | Доступные переходы           | Требуемые подписи        |
|--|------------------------------|--------------------------|
| Разработка   | На проверку                  | Разработчик              |
| Проверка   | На согласование              | Проверяющий              |
|  |                              | Технологический контроль |
|  | На доработку                 |                          |
| Согласование<br>(предварительный<br>нормоконтроль) | На утверждение               | Нормоконтроль            |
|  | На доработку                 |                          |
| Утверждение  | На нормоконтроль             | Утверждающий             |
|  | На доработку                 |                          |
| Нормоконтроль<br>(окончательный<br>нормоконтроль)  | В архив                      | Нормоконтроль            |
|  | На доработку                 |                          |
| В архиве   | Принять документ на учет     |                          |
|  | Аннулирование действующего   |                          |
| Действует  | Аннулирование действующего   | Архив                    |
| Аннулирован  | Восстановление в действующие | Архив                    |

При создании ТД всегда присваивается начальный статус «Разработка». Окончательным статусом ТД, допускающим его свободное использование в производстве, является «Действует». Действующий ТД также может получить статус «Аннулирован», если он заменяется другим действующим ТД.

Традиционный маршрут согласования в среде АС организации представлен на рисунке 61.

Согласно требованиям ГОСТ 14.206 [101], ГОСТ 2.111 (для конструкторской документации) [102] и ГОСТ 3.1116 (для технологической документации основного и сквозного производства) [103],

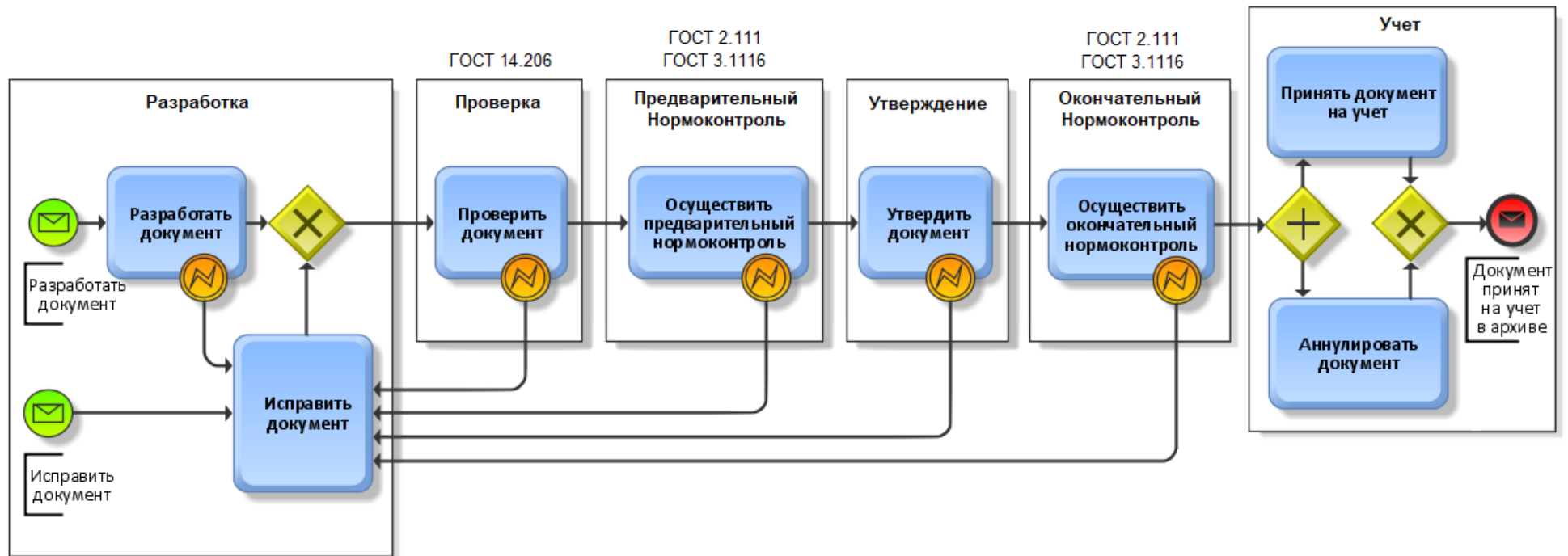


Рисунок 61 – Структурная декомпозиция традиционного маршрута согласования технической документации в среде автоматизированной системы организации

процессы проверки, согласования, предварительного и окончательного нормоконтроля, отправки на учет в архив происходят в определенной последовательности. Доработка ТД происходит при возникновении несоответствий в процессе согласования ТД или в процессе производства изделий. Возврат ТД на доработку или выпуск новой версии ТД с соответствующими исправлениями отражены в маршруте согласования ТД обратной связью.

С учетом постоянного возникновения несоответствий в процессе производства изделий суммарная средняя длительность согласования ТД по статусам превышает время такта, равное 30 дням, определенное критериями результативности процессов согласования ТД согласно требованиям стандартов организации (рис.62).

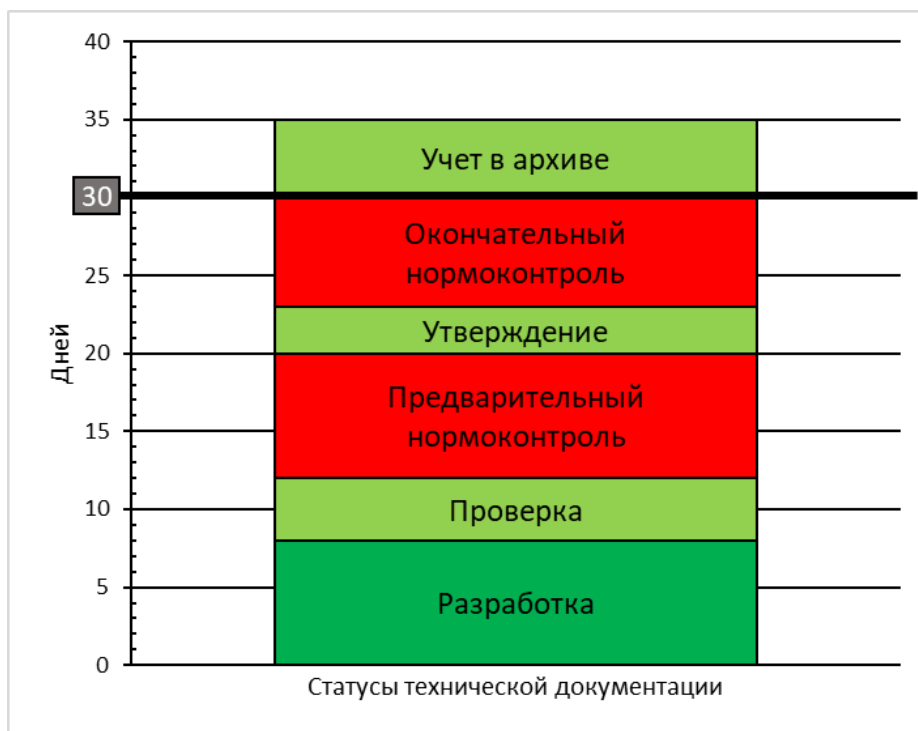


Рисунок 62 – Длительность согласования технической документации по статусам традиционного маршрута

### **3.2 Разработка и практическое применение методики создания структурной модели маршрута согласования технической документации на основе теории искусственных нейронных сетей**

С целью улучшения процессов согласования ТД в рамках СМК предприятия необходимо разработать подход, позволяющий получить нейросетевое представление анализируемой системы на основе результатов анализа предложенной имитационной модели процессов ТДО.

При создании ИНС-модели традиционного маршрута согласования ТД [104] необходимо учитывать, что распространение данных в ИНС возможно только в одном направлении, роль обратной связи играет механизм обратного распространения ошибки. Структуру маршрута согласования ТД следует читать справа налево, сверху вниз, выделяя необходимые структурные элементы для будущей ИНС-модели, а именно: в качестве искусственных нейронов выступают возможные в статусе переходы. Обратные переходы также преобразуются в нейронные элементы, так как обратная связь в той или иной мере всегда присутствует при прямом распространении информации о ТД в рассматриваемой системе, последующие статусы ТД всегда достижимы вне зависимости от того, сколько процедур доработок претерпевает ТД в процессе согласования [105].

Совокупность полученных при анализе статуса ТД нейронных элементов составляет слой ИНС. Слои нейронных элементов составляются таким образом, чтобы обеспечивались связи между всеми нейронами соседних слоев (рис.63).

Таким образом, становится возможным получить ИНС-модель традиционного маршрута согласования ТД, в которой выделяются группы однотипных элементов:

- элементы, возвращающие ТД в начало маршрута (группа 1);

- элементы промежуточной обработки ТД (группа 2);
- элементы окончательной обработки ТД (группа 3).

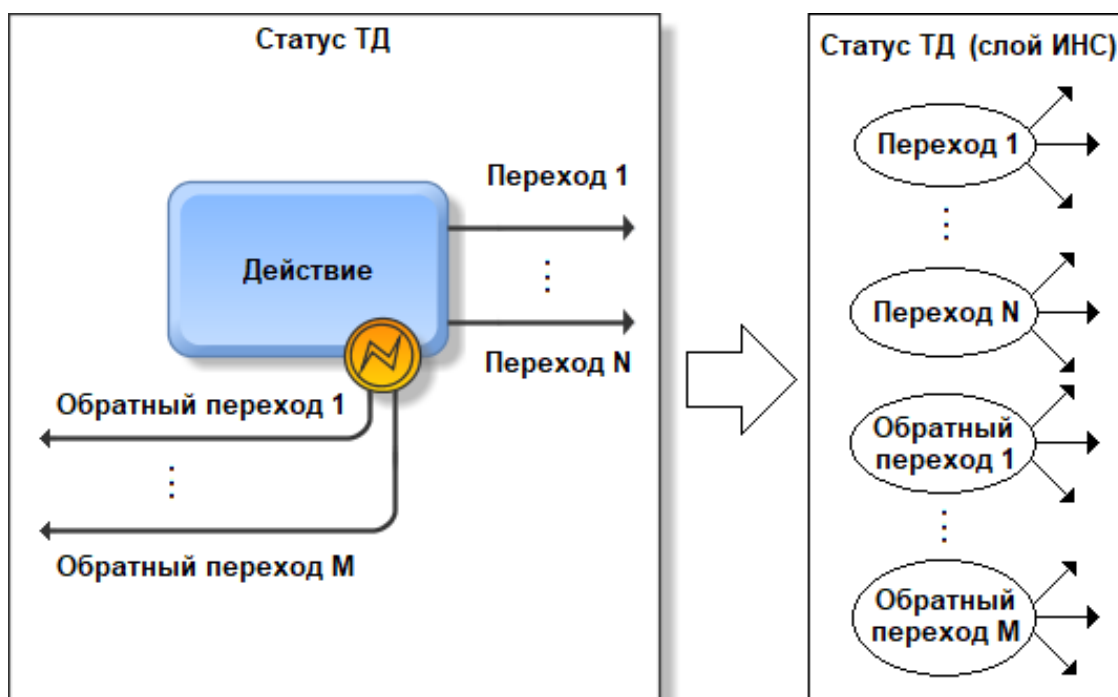


Рисунок 63 – Преобразование статуса технической документации в слой структурной нейросетевой модели маршрута согласования

ИНС-модель традиционного маршрута согласования ТД с выделенными группами элементов представлена в приложении К.

В среде АС часть процессов возможно осуществлять параллельно, что позволяет распределить группы элементов в слои ИНС. В полученных слоях ИНС-модели повторяющиеся в функциональном назначении нейронные элементы объединяются в подгруппы (рис.64).

Функционально повторяющиеся элементы в подгруппах возможно заменить одним нейронным элементом с аналогичной функцией. Четыре элемента отправки ТД на доработку заменяются одним элементом.



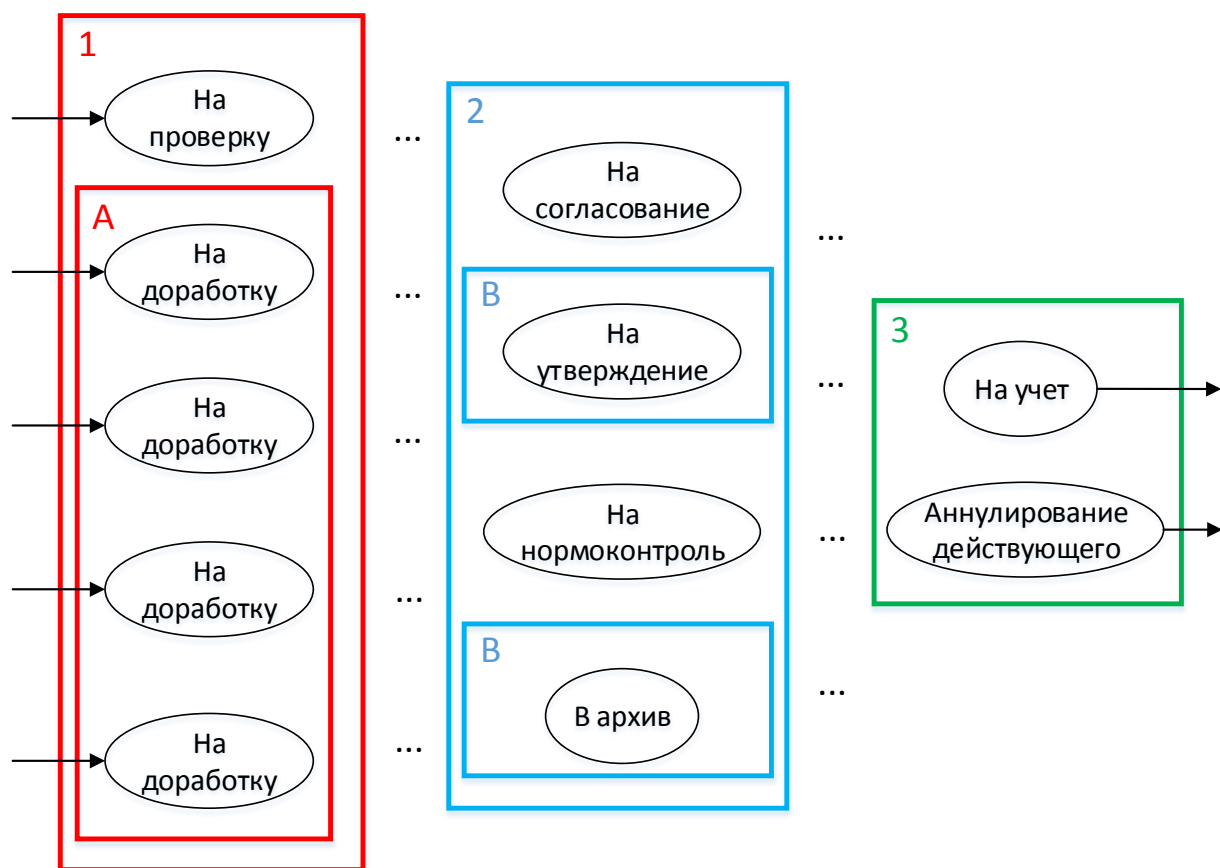


Рисунок 64 – Структурная нейросетевая модель традиционного маршрута согласования технической документации с учетом возможностей автоматизированной системы с выделением подгрупп функционально повторяющихся нейронных элементов

Согласно СМК организации конечным результатом операций предварительного (согласование) и окончательного нормоконтроля становится отправка ТД на окончательное решение о приеме ТД или его аннулировании.

В соответствии с требованиями ГОСТ 2.111 (для конструкторской документации), и ГОСТ 3.1116 (для технологической документации основного и сквозного производства) нормоконтроль ТД осуществляется в два этапа: проверка ТД на соответствие нормам при проектировании и окончательная проверка наличия подписей Разработчика и Проверяющего.

В среде АС переход ТД на следующий статус невозможен без наличия всех обязательных электронно-цифровых подписей на определенном статусе ТД, что избавляет разработчиков ТД от необходимости проведения Окончательного Нормоконтроля. Также в среде АС возможно осуществлять процедуру согласования между Проверяющим, Утверждающим и Нормоконтролером параллельно. Таким образом, возможно объединение процедуры Предварительного и Окончательного Нормоконтроля в одну общую с осуществлением параллельного согласования между разработчиками ТД, что не противоречит требованиям ГОСТ 2.111 и ГОСТ 3.1116. Модернизированная ИНС-модель маршрута согласования ТД с замененными подгруппами на соответствующие нейронные элементы представлена на рисунке 65.

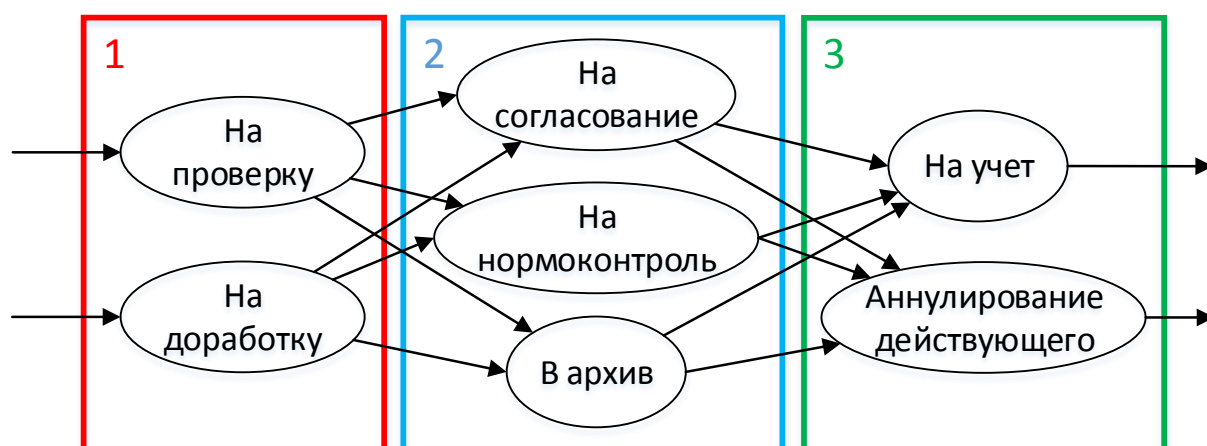


Рисунок 65 – Модернизированная структурная нейросетевая модель маршрута согласования технической документации

Результативность изменения замещающей структурной ИНС-модели возможно оценить по показателям, представленным в таблице 15. Разработанная методика создания ИНС-модели исследуемого маршрута согласования ТД реализует процесс унификации структуры маршрута согласования ТД на основе группировки и замены однотипных

по выполняемым функциям элементов одним, выполняющим аналогичную функцию.

Таблица 15 – Показатели результативности изменения замещающей структурной ИНС-модели

| Показатель                                     | Выражение                                      | Результативность традиционной структурной модели маршрута согласования ТД | Результативность улучшенной структурной модели маршрута согласования ТД |
|--|--|---|---|
| Коэффициент применяемости                      | $K = \frac{n}{N} \times 100\%$                 | $\frac{8}{11} \times 100\% = 73\%$  | $\frac{7}{7} \times 100\% = 100\%$                                      |
| Коэффициент повторяемости                      | $K = (1 - \frac{n-1}{N-1}) \times 100\%$       | $(1 - \frac{8-1}{11-1}) \times 100\% = 30\%$                              | $(1 - \frac{7-1}{7-1}) \times 100\% = 0\%$                              |
| Коэффициент неформализованности связей системы | $K = \frac{K_{н.ф.с.}}{K_{ф.с.}} \times 100\%$ | $\frac{9}{28} \times 100\% = 32\%$  | $\frac{7}{12} \times 100\% = 58\%$                                      |

\* где:  $n$  – количество уникальных элементов;  $N$  – общее количество элементов;  $K_{н.ф.с.}$  – количество неформализованных связей;  $K_{ф.с.}$  – количество формализованных связей.

В результате применения разработанной методики получена структурная ИНС-модель маршрута согласования ТД, состоящая из уникальных по выполняемым функциям примененных элементов, что позволило сократить количество структурных элементов для реализации процесса ТДО. Использование аппарата ИНС также позволило обнаружить и использовать межэлементные неформализованные связи для организации передачи информации об изделии в модернизированной конфигурации процессов согласования ТД.

### 3.3 Практическое применение улучшенной модели маршрута согласования технической документации с учетом возможностей цифровой системы менеджмента качества организации

Каждый слой полученной структурной ИНС-модели возможно восстановить в виде отдельного статуса согласования ТД в среде АС с указанием лиц, участвующих в подписании ТД в соответствии с требованиями действующей цифровой СМК организации, что позволяет создать модернизированный маршрут согласования ТД (рис.66).

Результативность изменения модели маршрута согласования ТД в среде АС оценивается по показателям, представленным в таблице 16.

Таблица 16 – Показатели результативности изменения маршрута согласования ТД

| Показатель                                 | Выражение                              | Результативность                      |
|--|--|---------------------------------------|
| Коэффициент изменения количества статусов  | $K = \frac{k_0 - k}{k_0} \times 100\%$ | $\frac{6-3}{6} \times 100\% = 50\%$   |
| Коэффициент изменения межэлементных связей | $K = \frac{l_0 - l}{l_0} \times 100\%$ | $\frac{10-6}{10} \times 100\% = 40\%$ |
| Коэффициент изменения количества элементов | $K = \frac{n_0 - n}{n_0} \times 100\%$ | $\frac{8-7}{8} \times 100\% = 13\%$   |

\* где:  $k$  – количество статусов измененного маршрута;  $k_0$  – количество статусов исходного маршрута;  $l$  – количество межэлементных связей измененного маршрута;  $l_0$  – количество межэлементных связей исходного маршрута;  $n$  – количество элементов измененного маршрута;  $n_0$  – количество элементов исходного маршрута.

На основе ИНС-модели маршрута согласования ТД, полученной путем группировки и замены однотипных по выполняемым функциям элементов

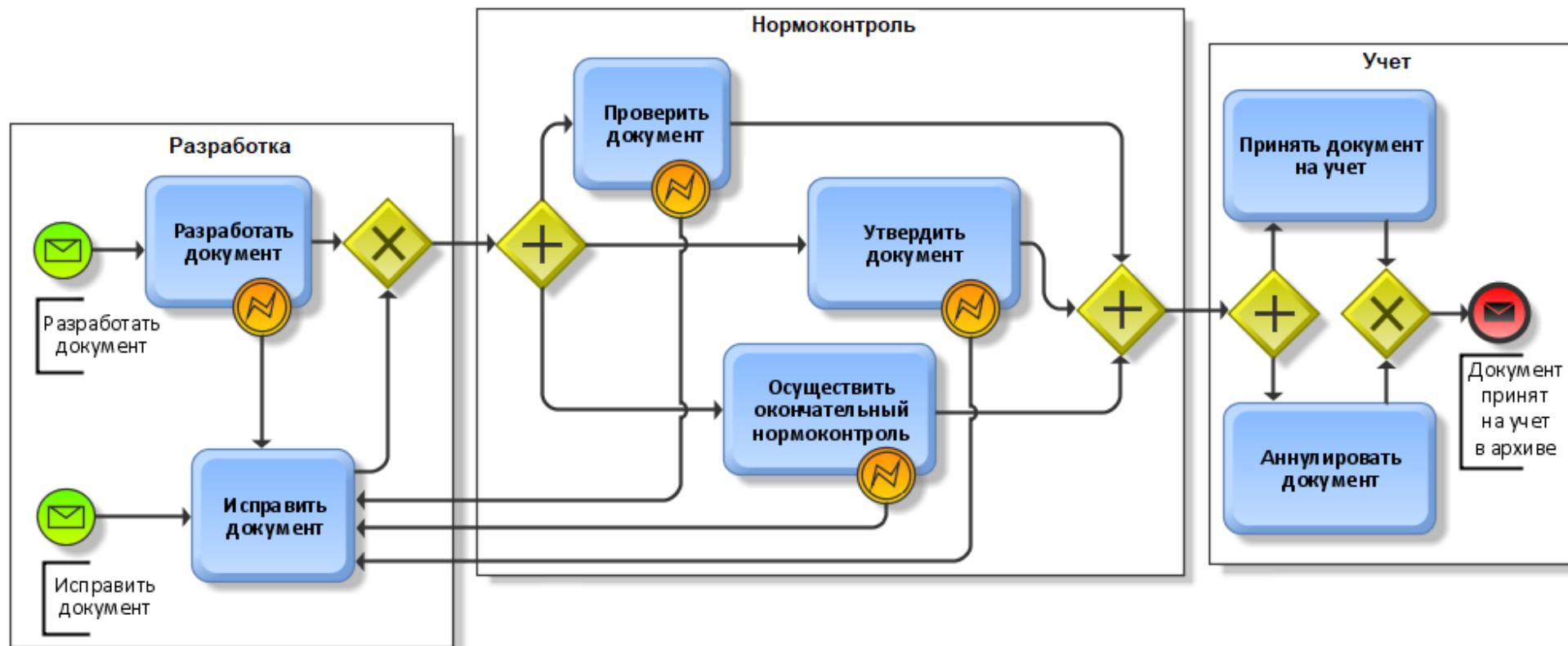


Рисунок 66 – Модернизированный маршрут согласования технической документации

одним, выполняющим аналогичную функцию, восстановлена улучшенная модель маршрута согласования ТД в среде АС, отличающаяся от исходной на 50% меньшим количеством статусов и на 13% меньшим количеством элементов системы. Учет неформализованных связей в улучшенной замещающей структурной ИНС-модели позволяет изменить межэлементные связи рассматриваемой системы на 40%, а послыное распределение элементов системы также предоставляет возможность осуществления параллельной процедуры согласования путем осуществления веерной рассылки ТД абонентам, участвующим в разработке, на основе использования возможностей среды АС.

Суммарная длительность согласования ТД по статусам улучшенного маршрута показывает, что процессы согласования ТД могут быть завершены в требуемый нормативно-справочной документацией организации такт (рис.67).

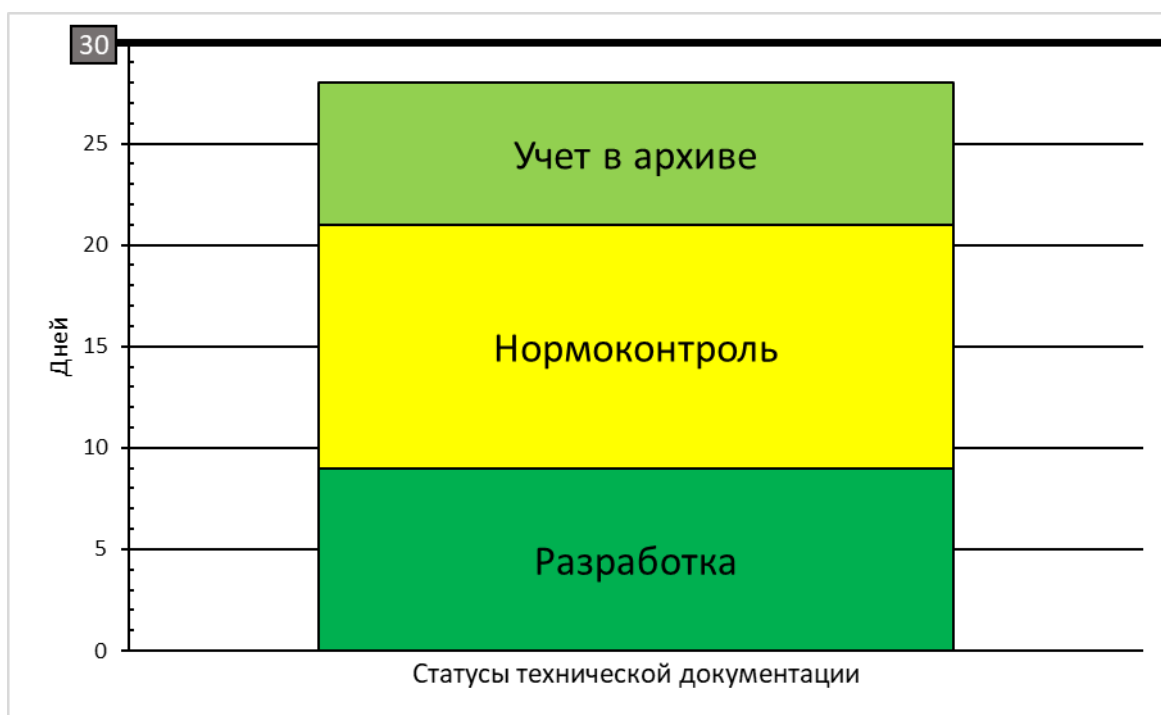


Рисунок 67 – Длительность согласования технической документации по статусам улучшенного маршрута

Внедрение в рабочие процессы ТДО обновленного маршрута также позволило добиться повышения действенности процесса согласования конструкторской документации (рис.68).

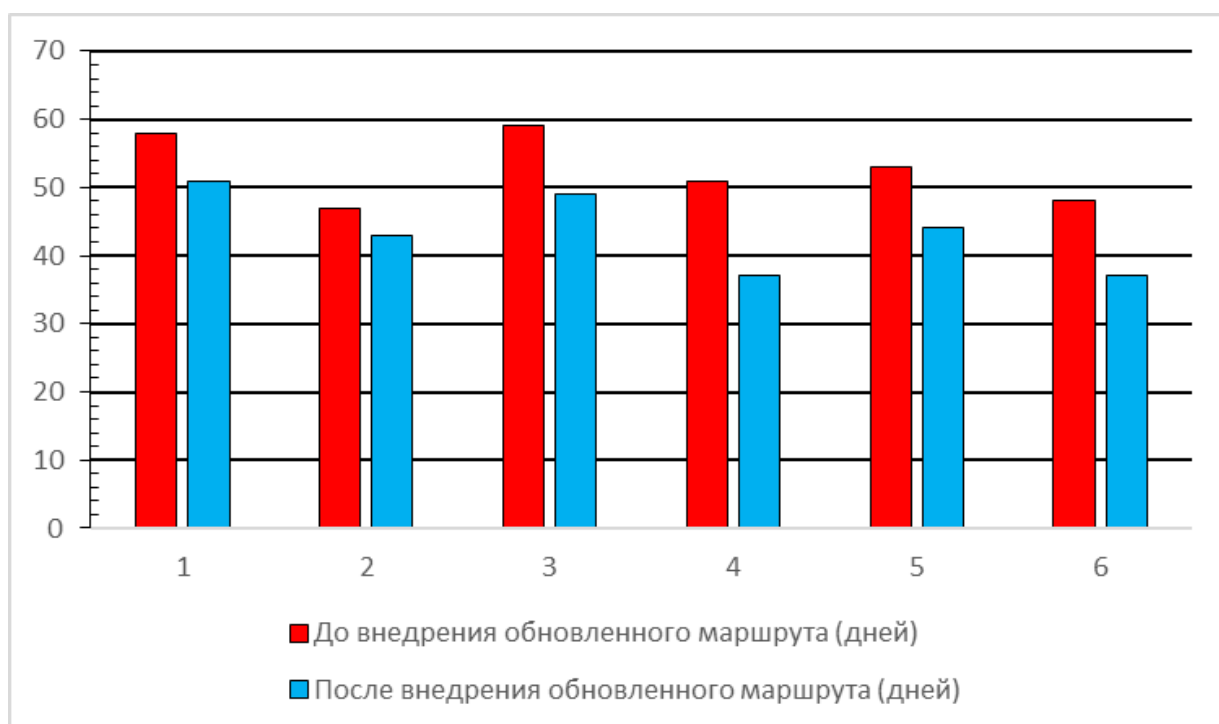


Рисунок 68 – Длительность согласования конструкторской документации по изготавливаемым в организации изделиям до и после внедрения улучшенного маршрута

Внедрение в рабочие процессы документооборота улучшенного маршрута позволило сократить длительность согласования сквозной технологической документации (разрабатываемой на нескольких производственных площадках организации) (рис.69) [106]. Разработанный маршрут согласования ТД на основе улучшенной структуры ИНС-модели стандартизован и введен в действие СТО, актуализированы смежные СТО.

Для предупреждения рисков, связанных с использованием обновленного маршрута, для пользователя АС предусмотрен выбор между традиционным и модернизированным маршрутами согласования ТД средствами АС.

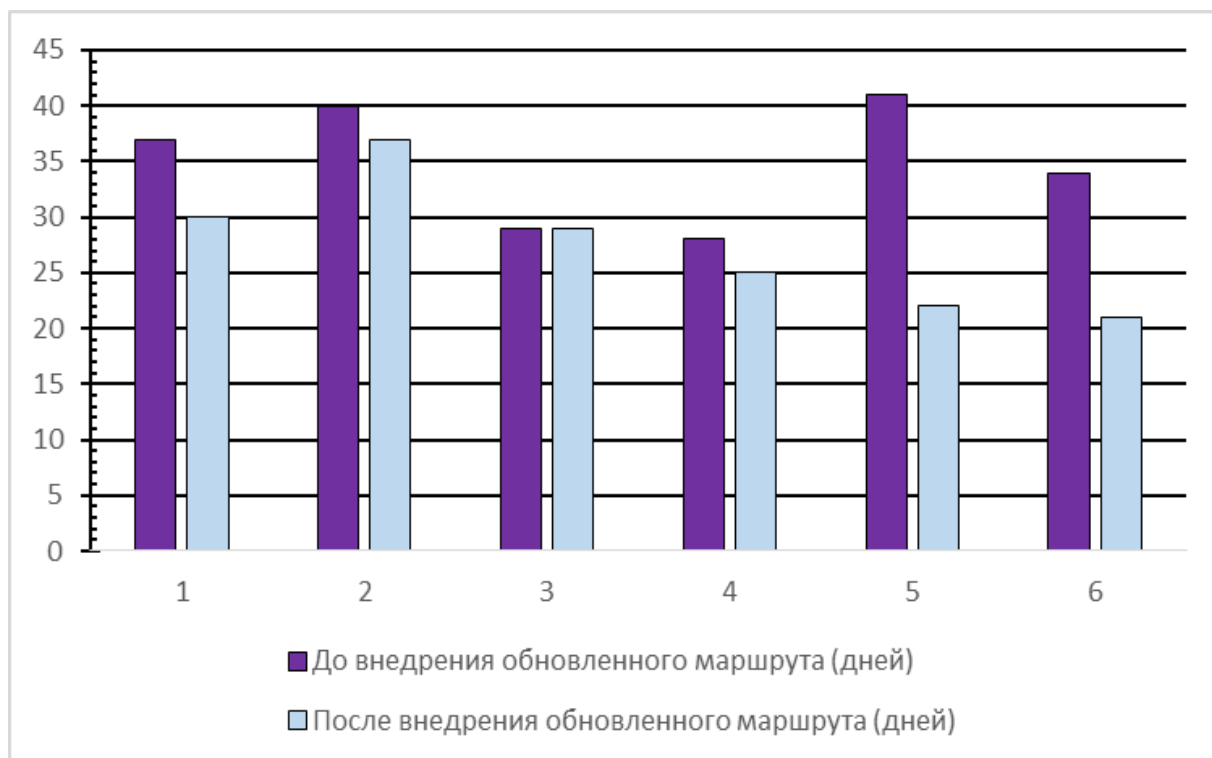


Рисунок 69 – Длительность согласования технологической документации сквозного производства по изготавливаемым в организации изделиям до и после внедрения улучшенного маршрута



### **Выводы по главе 3**

Рассмотрена система ТДО в части маршрута согласования ТД, используемого в среде АС организации. Разработана методика создания ИНС-модели исследуемого маршрута согласования ТД в условиях появления несоответствий и оперативной реакции на них в среде АС, отличающаяся от известных применением процесса унификации к структурированию элементов маршрута согласования ТД и позволяющая сократить количество структурных элементов для реализации процесса ТДО. Применение разработанной методики позволяет снизить в среднем на 17% длительность согласования конструкторской документации путем повышения действенности процесса согласования. Разработанная методика включена в проект стандарта организации для масштабирования полученного опыта.

На основе структурной ИНС-модели маршрута согласования ТД выполнено восстановление статусов улучшенной модели маршрута согласования ТД в соответствии с требованиями цифровой СМК организации. Предложенная модель маршрута согласования ТД с учетом возможностей цифровой СМК организации отличается от известных использованием возможностей среды АС в рамках СМК предприятия, меньшим количеством статусов ТД, учетом скрытых связей между элементами маршрута и позволяет организовать унифицированные связи между участниками ТДО в рамках цифровой СМК организации. Применение модели позволило повысить результативность процесса согласования технологической документации сквозного производства путем сокращения жизненного цикла, реализуемого на нескольких производственных площадках предприятия, в среднем на 22%.

## Заключение

В результате диссертационного исследования решена важная научно-практическая задача, направленная на улучшение структуры системы менеджмента качества организации в части улучшения качества процессов технического документооборота наукоемкого производства в среде автоматизированной системы путем повышения результативности выявления неформализованных связей в межпроцессном пространстве производственной системы.

В рамках выполнения поставленных задач получены следующие научные результаты:

- разработана методика улучшения качества процессов выявления несоответствий и технических рисков в системе ТДО, отличающаяся от известных учетом множественного возврата ТД на доработку в процессе согласования в условиях отсутствия цифровой связи с производством и позволяющая отразить влияние возникновения несоответствий на процессы ТДО и учитывать неформализованные связи в межпроцессном пространстве производственной системы. Применение разработанной методики позволяет сократить жизненный цикл технологической документации в среднем на 16% путем повышения эффективности работы пользователей АС и снизить затраты на производство изделий в среднем на 9-11%;
- предложена имитационная модель обмена информацией о ТД на изделие, отличающаяся от известных агрегированием отличительных особенностей входных данных с последующим их объединением и усложнением на каждом последующем слое ИНС, позволяющая обнаруживать функциональные и информационные неформализованные связи в системе ТДО, не предусмотренные СМК организации. Применение модели позволяет повысить результативность конструкторских

и технологических отделов за счет увеличения производительности труда на 4-6%;

– разработана методика создания ИНС-модели исследуемого маршрута согласования ТД в условиях появления несоответствий и оперативной реакции на них в среде АС, отличающаяся от известных применением процесса унификации к структурированию элементов маршрута согласования ТД и позволяющая сократить количество структурных элементов для реализации процесса ТДО. Применение разработанной методики позволяет снизить в среднем на 17% длительность согласования конструкторской документации путем повышения действенности процесса согласования;

– предложена модель маршрута согласования ТД с учетом возможностей цифровой СМК организации, отличающаяся от известных использованием возможностей среды АС в рамках СМК предприятия, меньшим количеством статусов ТД, учетом скрытых связей между элементами маршрута и позволяющая организовать унифицированные связи между участниками ТДО в рамках цифровой СМК организации. Применение модели позволило повысить результативность процесса согласования технологической документации сквозного производства путем сокращения жизненного цикла, реализуемого на нескольких производственных площадках предприятия, в среднем на 22%.

## Список сокращений и условных обозначений

|       |  |
|-------|--|
| ETA   | – анализ дерева событий (Event Tree Analysis)                            |
| FMEA  | – анализ видов и последствий отказов (Failure Mode and Effects Analysis) |
| IDEF  | – семейство методологий моделирования (Integrated DEFinition)            |
| IDEF0 | – методология функционального моделирования                              |
| QFD   | – структурирование функции качества (Quality Function Deployment)        |
| TQM   | – концепция Всеобщего Управления Качеством (Total Quality Management)    |
| АС    | – автоматизированная система   |
| ВП    | – ведомость покупных изделий   |
| ВУН   | – ведомость удельных норм  |
| ДЕ    | – деталь   |
| ИМ    | – имитационная модель, имитационное моделирование                        |
| ИНС   | – искусственная нейронная сеть   |
| ККД   | – комплект конструкторской документации                                  |
| КТД   | – комплект технологической документации                                  |
| КТТП  | – карта типовых технологических процессов                                |
| КЭ    | – карта эскизов  |
| МК    | – маршрутные карты технологических процессов                             |
| МЦК   | – межцеховая кооперация  |
| МЧ    | – монтажный чертеж   |
| НЗП   | – незавершенное производство   |
| НИОКР | – научно-исследовательские<br>и опытно-конструкторские работы            |
| ПКИ   | – покупные комплектующие изделия   |
| НР    | – нормы расхода  |

|      |  |
|------|--|
| ОИНС | – обобщенная искусственная нейронная сеть        |
| ООП  | – объектно-ориентированное программирование      |
| ОТК  | – отдел технического контроля                    |
| ППр  | – план производства                              |
| ПРп  | – производственная программа                     |
| ПСП  | – производственная спецификация                  |
| ПЧР  | – приоритетное число риска                       |
| ПЭЗ  | – перечень элементов                             |
| СБ   | – сборочная единица                              |
| СМК  | – система менеджмента качества                   |
| Сп   | – спецификация                                   |
| СТО  | – стандарт организации                           |
| ТБ   | – таблица соединений                             |
| ТД   | – техническая документация, технический документ |
| ТДО  | – технический документооборот                    |
| Ч    | – чертеж   |
| ЭЗ   | – схема электрическая принципиальная             |

## Список литературы

1. Главатских О.Б. Проблемы и тенденции инновационного развития высокотехнологичных предприятий в условиях цифровой экономики / О.Б. Главатских, И.Н. Соколова // Актуальные вопросы экономики и финансов: Сборник статей II международной научно-практической конференции – Ижевск: Удмуртский государственный университет, 2022. – С. 140-153.
2. Анисимов Ю.П. Особенности управления наукоемкими предприятиями при освоении новой продукции в рыночных условиях / Ю.П. Анисимов, С.А. Повеквечных // Организатор производства. – 2010. – № 2(45). – С. 69-73.
3. Глотова В.Г. Информационные технологии: техническое и технологическое перевооружение и цифровизация экономики / В.Г. Глотова // Актуальные вопросы современной экономики. – 2022. – № 3. – С. 387-394.
4. Авдеев А.В. Развитие наукоемкого производства в современной России / А.В. Авдеев, Г.И. Юрковская // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2015. Т. 2. № 11. С. 197-199.
5. Моргунов Ю.А. Наукоемкость машиностроительного производства и его элементов / Ю.А. Моргунов, Б.П. Саушкин, Б.В. Шандров // Наукоемкие технологии в машиностроении. 2019. № 6 (96). С. 37-44.
6. Иванов М.В. Методика улучшения системы менеджмента качества наукоемкого производства на основе управления неформализованными связями в межпроцессном пространстве технического документооборота / М.В. Иванов, Е.А. Фролова // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2024. Т. 26. №6. С. 14-19.

7. ГОСТ Р ИСО 9000-2015 Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь // М.: Стандартиформ, 2020, 54 с.
8. ГОСТ Р ИСО 9001-2015 Системы менеджмента качества. Требования // М.: Стандартиформ, 2015, 32 с.
9. Афанасьев А.А. Оценка цифровой зрелости промышленного производства в контексте его цифровой трансформации / А.А. Афанасьев // Экономика, предпринимательство и право. 2024. Т. 14. №7. С. 3595-3612.
10. ГОСТ 15.016-2016 Система разработки и постановки продукции на производство. Техническое задание. Требование к содержанию и оформлению // М.: Стандартиформ, 2020, 30 с.
11. ГОСТ 2.114-2016 ЕСКД. Технические условия // М.: Стандартиформ, 2019, 15 с.
12. Р 50-81-88 Рекомендации. Порядок передачи документации // М.: Государственный комитет СССР по стандартам, 1989, 14 с.
13. ГОСТ 2.103-2013 ЕСКД. Стадии разработки // М.: Стандартиформ, 2019, 10 с.
14. ГОСТ Р 2.504-2021 ЕСКД. Электронная конструкторская документация. Правила внесения изменений // М.: Российский институт стандартизации, 2021, 12 с.
15. Иванов М.В. Управление неформализованными связями системы менеджмента качества наукоемкого производства на основе искусственных нейронных сетей / М.В. Иванов, Е.А. Фролова // Материалы IV Международного форума «Математические методы и модели в высокотехнологичном производстве». 2024. В 2 ч. Ч. 2. С. 124-126;
16. ГОСТ Р ИСО 15489-1-2019 Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Информация и документация. Управление документами. Часть 1. Понятия и принципы // М.: Стандартиформ, 2019, 23 с.

17. ГОСТ Р 2.109-2023 ЕСКД. Основные требования к чертежам, М.: Российский институт стандартизации, 2023, 44 с.
18. ГОСТ Р 2.106-2019 ЕСКД. Текстовые документы, М.: Стандартинформ, 2019, 39 с.
19. ГОСТ 3.1105-2011 ЕСТД. Формы и правила оформления документов общего назначения, М.: Стандартинформ, 2020, 30 с.
20. ГОСТ 3.1118-82 ЕСТД. Формы и правила оформления маршрутных карт, М.: Стандартинформ, 2012, 23 с.
21. ГОСТ Р 27.303-2021 Надежность в технике. Анализ видов и последствий отказов, М.: Российский институт стандартизации, 2021, 70 с.
22. ГОСТ Р 58771-2019 Менеджмент риска. Технологии оценки риска, М.: Стандартинформ, 2020, 90 с.
23. Постников В.М. Подход к расчету весовых коэффициентов ранговых оценок экспертов при выборе варианта развития информационной системы / В.М. Постников, С.Б. Спиридонов // Наука и образование. 2013. № 8. С. 395-412.
24. Постников В.М. Подход к увеличению уровня согласованности мнений экспертов при выборе варианта развития системы обработки информации / В.М. Постников, С.Б. Спиридонов // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2013. – № 6. – С. 333-350.
25. Постников В.М. Выбор варианта реорганизации системы обработки информации на основе экспертного анализа с коррекцией результатов / В.М. Постников // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. – 2012. – № 3(3). – С. 20.
26. ГОСТ Р МЭК 62502-2014 Менеджмент риска. Анализ дерева событий // М.: Стандартинформ, 2015, 35 с.



27. ГОСТ Р ИСО 13053-2-2015 Статистические методы. Количественные методы улучшения процессов “Шесть Сигм”. Часть 2. Методы, М.: Стандартиформ, 2016, 47 с.
28. Иванов М.В. Управление данными о средствах вычислительной техники промышленного предприятия в среде системы TechnologiCS / М.В. Иванов, И.Л. Юнаков // Материалы VIII Общероссийской молодежной научно-технической конференции «Молодежь. Техника. Космос». 2016. С.45.
29. Иванов М.В. Разработка инструмента контроля готовности конструкторско-технологической документации к запуску изделия в производство на платформе IT-технологии / С.А. Бабаев, М.В. Иванов, Г.В. Невокшенов // Радиопромышленность. 2017. №4 С.110-115.
30. ГОСТ Р ИСО/МЭК 25022-2021 Системная и программная инженерия. Требования и оценка качества систем и программного обеспечения (SQuaRE). Измерение качества при использовании, М: Российский институт стандартизации, 2021, 44 с.
31. Иванов М.В. Методика улучшения качества маршрута технического документооборота / М.В. Иванов // Компетентность. 2023. № 6. С. 37-40.
32. Иванов М.В. Улучшение системы менеджмента качества наукоемкого производства на основе управления неформализованными связями / М.В. Иванов, Е.А. Фролова // Материалы IV Международного форума «Математические методы и модели в высокотехнологичном производстве». 2024. В 2 ч. Ч. 2. С. 121-123;
33. Иванов М.В. Исследование особенностей цифровизации организаций, выпускающих изделия приборостроения, с использованием импортозамещающего программного обеспечения / С.А. Афанасенков, М.В. Иванов // Наука и бизнес: пути развития. 2021. №4(118). С. 72-77.

34. Иванов М.В. Применение искусственных нейронных сетей в задачах имитационного математического моделирования систем / М.В. Иванов // Наука и бизнес: пути развития. 2019. №8(98). С. 57–60.
35. Кривякин К.С. Особенности производства наукоемкой продукции / К.С. Кривякин // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2012. Т. 8. № 8. С. 74-76.
36. Стрижанов И.А. Понятие и особенности производства сложной наукоемкой продукции / И.А. Стрижанов // Организатор производства. 2012. №3. С.19-22.
37. Зуев С.Ю. К проблеме качественной идентификации наукоемкого производства / С.Ю. Зуев // Вестник Томского государственного университета. 2008. № 310. С. 122-127.
38. Р 50.1.028-2001 Информационные технологии поддержки жизненного цикла продукции. Методология функционального моделирования, М.: ИПК Издательство стандартов, 2003, 54 с.
39. Integration Definition for Function Modeling (IDEF0) // Draft Federal Information Processing Standards Publication 183, p.128.
40. ГОСТ 3.1121-84 ЕСТД. Общие требования к комплектности и оформлению комплектов документов на типовые и групповые технологические процессы (операции), М.: Стандартиформ, 2012, 48 с.
41. Кукарцева О.И. Имитационное моделирование производственных процессов на предприятии / О.И. Кукарцева, О.В. Куимова // Молодежь. Общество. Современная наука, техника и инновации. 2022. № 21. С. 277-278.
42. Сидоренко В.Н. Имитационное моделирование в науке и бизнесе: подходы, инструменты, применение / В.Н. Сидоренко, А.В. Красносельский // Бизнес-информатика. 2009. № 2 (8). С. 52-57.
43. Докучаева А.Н. Исследование методов поиска приближенного решения в задаче сокращения трудоемкости статистического моделирования /

- В.Ю. Емельянов, А.Н. Докучаева // Информационно-управляющие системы. 2015. №1(74). С. 43-49.
44. Лихолет Н.О. Адаптивный алгоритм статистического моделирования / В.Ю. Емельянов, Н.О. Лихолет // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. 2008. №2(58). С. 54-57.
45. Баринов В.Р. Цифровая экономика, Индустрия 4.0 и искусственный интеллект / Н.В. Барина, В.Р. Баринов // Вестник Российского экономического университета имени Г. В. Плеханова. 2021. №3. С. 82-91.
46. Мелихова О.А. Методы поддержки принятия решений на основе нейронных сетей / О.А. Мелихова, А.Б. Гайдуков, С.В. Джамбинов, В.С. Чумичев // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. – 2015. – № 9-1. – С. 52-59.
47. Rosenblatt F., Principles of neurodynamics. perceptrons and the theory of brain mechanisms // Cornell Aeronautical Lab Inc Buffalo NY, 1961. – №. VG-1196-G-8.
48. Богославский С.Н. Область применения искусственных нейронных сетей и перспективы их развития / С.Н. Богославский // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2007. № 27. С. 228-238.
49. Васильков Д.В. Повышение надежности и оперативности производственной технологической системы за счет интеллектуальной оценки запросов с применением механизмов искусственных нейронных сетей / Д.В. Васильков, И.Я. Тариков, А.С. Миллер // Металлообработка. 2017. №3(99). С. 58-64.
50. Берёза Я.А. Примеры задач ассоциативной памяти с применением искусственных нейронных сетей / Я.А. Берёза // В сборнике: Информационно-телекоммуникационные системы и технологии. Материалы Всероссийской научно-практической конференции. 2014. С. 227-228.

51. Манукян Р.Л. Машинное зрение. Основные компоненты машинного зрения / Р.Л. Манукян, И.В. Петрашин // В сборнике: Современная наука: актуальные вопросы, достижения и инновации. Сборник статей VII Международной научно-практической конференции: в 4 ч. 2019. С. 295-297.
52. Ледянкина О.А. Методология применения искусственных нейронных сетей в задаче имитации нагружения одновинтового вертолета / А.М. Гирфанов, О.А. Ледянкина // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2015. № 4. С. 26-30.
53. Ледянкина О.А. Имитационная модель нагружения бесшарнирного несущего винта вертолета / А.М. Гирфанов, О.А. Ледянкина // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2015. № 2. С. 29-33.
54. Приходько Н.А. Моделирование в нотации IDEF0 / Н.А. Приходько, А.К. Кулаченко, А.В. Свищев // Моя профессиональная карьера. 2022. Т. 1. № 36. С. 137-141.
55. Загинайло М.В. Влияние количества нейронов искусственной нейронной сети на эффективность ее работы / М.В. Загинайло // E-Scio. 2019. № 6 (33). С. 867-871.
56. Waissi G.R., Demir M., Humble J.E., Lev B. Automation of strategy using IDEF0 - A proof of concept // Operations Research Perspectives, vol.2, 2015, pp. 106-113.
57. Пушкина Н.Б. Подходы к имитационному моделированию при моделировании дорожного движения / Н.Б. Пушкина, А.В. Горбатов // Научный вестник Московского государственного горного университета. 2011. № 6. С. 56-68.
58. Rumelhart D.E., Hinton G.E., Williams R.J. Learning Internal Representations by Error Propagation // Parallel Distributed Processing, vol. 1, 1986, pp. 318—362.

59. McCulloch W.S., Pitts W. A logical Calculus of Ideas Immanent in Nervous Activity // *Bulletin of Mathematical Biology*, vol.52, issue 1-2, 1990, pp. 99-115.
60. Sharma V., Rai S., Dev A. A comprehensive study of artificial neural networks // *International Journal of Advanced research in computer science and software engineering*. – 2012. – vol. 2. – №. 10.
61. Новиков А.С. Многослойная нейронная сеть Розенблатта и ее применение для решения задачи распознавания подписей / А.С. Новиков, А.А. Ежов // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2016. № 2. С. 188-197.
62. Rosenblatt F. The perceptron: a probabilistic model for information storage and organization in the brain // *Psychological review*. – 1958. – vol. 65. – №. 6. – pp. 386.
63. Каюмова А.Г. Искусственный интеллект в сфере технических наук / А.Г. Каюмова // *Моя профессиональная карьера*. 2023. Т. 2. № 54. С. 21-26.
64. Lapedes A.S., Farber R.M. How neural nets work // *Neural information processing systems*. – 1988. – pp. 442-456.
65. LeCun Y, Bengio Y., Hinton G.E. Deep learning // *Nature*, vol.521, 2015, pp. 436–444.
66. Kohonen T. A principle of neural associative memory // *Neuroscience*. – 1977. – vol. 2. – №. 6. – pp. 1065-1076.
67. Романов Д.Е. Нейронные сети обратного распространения ошибки / Д.Е. Романов // *Инженерный вестник Дона*. 2009. № 3 (9). С. 19-24.
68. Паникарчик М.В. Исследование алгоритма обучения многослойного перцептрона / М.В. Паникарчик, А.И. Токарев // В сборнике: *Российская наука в современном мире. сборник статей X международной научно-практической конференции*. 2017. С. 80-81.
69. Иванов М.В. Исследование структуры документооборота предприятия с помощью искусственных нейронных сетей / М.В. Иванов // *Известия*

- Самарского научного центра Российской академии наук. 2019. Т. 21. №3(89). С. 41–46.
70. ГОСТ Р 15.000-2016 Система разработки и постановки продукции на производство. Основные положения, М: Стандартинформ, 2019, 19 с.
71. ГОСТ 2.102-2013 ЕСКД. Виды и комплектность конструкторских документов, М.: Стандартинформ, 2020, 21 с.
72. ГОСТ 3.1102-2011 ЕСТД. Стадии разработки и виды документов. Общие положения, М.: Стандартинформ, 2020, 13 с.
73. Кононов А.А. Использование метода нейронных сетей Хопфилда для решения задачи маршрутизации в сети / А.А. Кононов // Энигма. 2019. № 10-1. С. 536-542.
74. Иванов М.В. Применение искусственных нейронных сетей в управлении результативностью технического документооборота / М.В. Иванов, В.А. Тушавин // Инновационное приборостроение. 2024. Т. 3, № 2. С. 11–17.
75. Иваев Д.З. Исследование возможностей многослойного персептрона в решении задачи классификации данных / Д.З. Иваев, О.П. Солдатова // XIII Королёвские чтения: международная молодёжная научная конференция, сборник трудов, Самара, Том 2. – Самара: Самарский государственный аэрокосмический университет им. академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет), 2015. – С. 110-111.
76. Kumar K., Thakur G.S.M. Advanced applications of neural networks and artificial intelligence: A review // International journal of information technology and computer science, 2012, 4(6):57-68.
77. Hinton G.E. Learning multiple layers of representation. // Trends Cogn Sci. 2007 Oct; 11(10):428-34.
78. Benna M.K. Computational principles of biological memory / Benna M.K., Fusi S. // arXiv preprint arXiv:1507.07580. – 2015.

79. The Python Language Reference [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://docs.python.org/3.6/reference/index.html#reference-index> (Дата доступа: 03.12.2024).
80. NumPy Reference [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://numpy.org/doc/stable/reference/index.html#reference> (Дата доступа: 03.12.2024).
81. Matplotlib Pyplot tutorial [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://matplotlib.org/stable/tutorials/introductory/ pyplot.html> (Дата доступа: 03.12.2024).
82. About Keras [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://keras.io/about/> (Дата доступа: 03.12.2024).
83. Возможности PyCharm [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.jetbrains.com/ru-ru/pycharm/features/> (Дата доступа: 03.12.2024).
84. Wythoff B. J. Backpropagation neural networks: a tutorial // *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*. – 1993. –vol. 18. – №. 2. – pp. 115-155.
85. Diederik P.K. Adam: A method for stochastic optimization / Diederik P.K., Jimmy L.B. // *3rd International Conference for Learning Representations, San Diego, 2015. – 2014.*
86. Бутина Т.А. Моделирование диагностики сложной технической системы на основе многослойной нейронной сети / Т.А. Бутина, В.М. Дубровин, К.С. Семенов // *Дневник науки*. – 2021. – № 4(52).
87. Botchkarev A. Performance Metrics (Error Measures) in Machine Learning Regression, Forecasting and Prognostics: Properties and Typology // *Interdisciplinary Journal of Information, Knowledge, and Management*, 2019, 14, pp. 45-79.
88. Fawcett T. An introduction to ROC analysis // *Pattern Recognition Letters*, vol.27, issue 8, 2006, pp.861-874.

89. Иванов М.В. Улучшение процессов согласования технической документации в рамках системы менеджмента качества наукоемкого производства / М.В. Иванов // Инновационное приборостроение. 2023. Т. 2. №6. С. 17–24.
90. Widrow B., Hoff M.E. Adaptive switching circuits // 1960 IRE WESCON Conferencion Record, New York, 1960, pp.96-104.
91. Grossberg D. Nonlinear neural networks: Principles, mechanisms, and architectures // Neural Networks, vol. 1, issue 1, 1988, pp. 17-61.
92. Иванов М.В. Разработка концепции обобщенной нейронносетевой модели / М.В. Иванов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2019. Т. 21. №. 5(91). С. 11–15.
93. Lin J.W. Artificial neural network related to biological neuron network: a review // Advanced Studies in Medical Sciences, Vol. 5, 2017, no. 1, pp. 55 – 62.
94. Back A., Tsoi A.C. On the backpropagation algorithm: Paralysis in multilayer perceptrons // Proceedings of the fifth Australian conference on neural networks. – 1994. – pp. 102-104.
95. Torres-Huitzil C., Girau B. Fault and Error Tolerance in Neural Networks: A Review // IEEE Access, vol. 5, 2017, pp. 17322-17341.
96. Иванов М.В. Современное состояние аппаратно-программных тренажерных комплексов промышленного предприятия / М.В. Иванов, А.Г. Федоров // Материалы IX Общероссийской молодежной научно-технической конференции «Молодежь. Техника. Космос», 19-21 апр. 2017г., Санкт-Петербург; Молодежь. Техника. Космос. 2017. С.222-223.
97. Иванов М.В. Разработка нейронносетевой модели документооборота для организации тренажерного комплекса производственного предприятия / М.В. Иванов // В сборнике: Прикладная математика и информатика: современные исследования в области естественных и технических



наук. Материалы VI Международной научно-практической конференции (школы-семинара) молодых ученых. 2020. С. 261-265.

98. Zeng X., Yeung D. S. Sensitivity analysis of multilayer perceptron to input and weight perturbations // IEEE Transactions on Neural Networks. – 2001. – vol. 12. – №6. – pp. 1358-1366.

99. Murray A. F., Edwards P. J. Synaptic weight noise during multilayer perceptron training: fault tolerance and training improvements // IEEE Transactions on Neural Networks. – 1993. – vol. 4. – №. 4. – pp. 722-725.

100. Ivanov M.V. Development of an Approach to Implementation of a Model Based on a Generalized Artificial Neural Network Concept / M.V. Ivanov // В сборнике: Proceedings - 2020 International Russian Automation Conference, RusAutoCon 2020. 2020. pp. 352 – 356.

101. ГОСТ 14.206-73 Технологический контроль конструкторской документации // М.: Стандартиформ, 2009, 6 с.

102. ГОСТ 2.111-2013 ЕСКД. Нормоконтроль // М.: Стандартиформ, 2014, 12 с.

103. ГОСТ 3.1116- 2011 ЕСТД. Нормоконтроль // М.: Стандартиформ, 2019, 14 с.

104. Иванов М.В. Использование аппарата нейросетевых технологий для улучшения качества электронного документооборота жизненного цикла создания изделия / М.В. Иванов, С.А. Афанасенков, Е.А. Скорнякова // В сборнике: Метрологическое обеспечение инновационных технологий. Материалы III Международного форума в рамках празднования 80-летия Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения, 300-летия Российской академии наук. Под редакцией В.В. Окрепилова. Санкт-Петербург. 2021. С. 75-76.

105. Иванов М.В. Разработка методики модернизации маршрута технического документооборота наукоемкого производства / М.В. Иванов //

Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2023.  
Т. 25. №2(112). С. 22-26.

106. Ivanov M.V. Improvement of electronic design and technological documentation approval procedure quality by using the apparatus of artificial neural networks, / M.V. Ivanov, S.A. Afanasenkov, E.A. Skorniakova // Journal of Physics: Conference Series 2021, 1889(2), 022070.

## Приложение А

**Таблица А.1 - Анализ видов и последствий отказов процессов технического документооборота**

| Этап процесса ТДО    | Вид несоответствия   | Причины несоответствий  | Последствия несоответствий   | S | O | D | ПЧР |
|----------------------|--|---|--|---|---|---|-----|
| Производство изделий | Отсутствие материалов и ПКИ, указанных в ТД                        | Конструктивные особенности изделия;<br>Отсутствие или недоступность оборудования для обработки изделия;<br>Ошибки при проектировании ТД, выявленные на этапе производства                           | Снижение качества изделий вследствие использования альтернативных решений в производстве, ПКИ и материалов-заменителей   | 7 | 7 | 9 | 441 |
|                      | Ошибки при проектировании ТД, выявленные на этапе производства     | Конструктивные особенности изделия;<br>Неоперативный обмен информацией об изделии между производственными цехами и отделами проектировки ТД   | Задержки при производстве изделий;<br>Снижение качества изделий вследствие использования альтернативных решений в производстве;<br>Использование предыдущей версии ТД в процессе производства изделия с увеличением риска возникновения несоответствий, связанных с конструктивными особенностями изделия;<br>Повторная разработка и согласование ТД | 8 | 5 | 9 | 360 |
|                      | Использование предыдущей версии ТД в процессе производства изделия | Неоперативный обмен информацией об изделии между производственными цехами и отделами проектировки ТД;<br>Ошибки при проектировании ТД, выявленные на этапе производства;<br>Превышение длительности | Увеличение вероятности возникновения рисков, связанных с конструктивными особенностями изделия   | 6 | 8 | 8 | 384 |

|                 |   |   |  |   |   |   |     |
|-----------------|---|---|--|---|---|---|-----|
|                 |   | согласования ТД   |  |   |   |   |     |
|                 | Отсутствие или недоступность оборудования для обработки изделий | Недостаточная развитость технико-технологической базы предприятия, загруженность оборудования, поломка, обслуживание или ремонт оборудования  | Задержки при проектировании ТД под возможности имеющегося оборудования;<br>Задержки при производстве изделий;<br>Снижение качества изделий вследствие использования альтернативных решений в производстве;<br>Повторная разработка и согласование ТД | 7 | 2 | 7 | 98  |
| Согласование ТД | Превышение длительности согласования ТД                         | Ошибки при проектировании основной или реквизитной части ТД;<br>Ошибки при формировании комплекта ТД для согласования;<br>Отсутствие лица, участвующего в согласовании ТД;<br>Указание неверной подписи на ТД;<br>Ошибки при постановке ТД на учет в архиве;<br>Возврат ТД на доработку | Задержки при производстве изделий;<br>Использование ТД предыдущих версий с увеличением вероятности возникновения несоответствий при производстве изделий   | 8 | 4 | 5 | 160 |
|                 | Ошибки при проектировании основной или реквизитной части ТД     | Конструктивные особенности изделия;<br>Отсутствие материалов и ПКИ, указанных в ТД;<br>Отсутствие или недоступность оборудования для обработки изделия;<br>Ошибки при проектировании ТД, выявленные на этапе производства;<br>Указание неверной подписи на ТД                           | Повторная разработка и согласование ТД;<br>Задержки при производстве изделий;<br>Увеличение длительности согласования ТД   | 7 | 5 | 5 | 175 |

|                              |   |  |  |   |   |   |     |
|------------------------------|---|--|--|---|---|---|-----|
|                              | Ошибки при формировании комплекта ТД для согласования | Конструктивные особенности изделия; Перераспределение ответственности и полномочий лиц, участвующих в разработке ТД                                | Снабжение производства частичной информацией об изделии, увеличивающее риск использования ТД предыдущих версий в качестве недостающей информации об изделии; Возникновение дальнейших трудностей отслеживания комплектности ТД при выпуске последующих версий, увеличивающих время разработки и согласования | 4 | 4 | 7 | 112 |
|                              | Отсутствие лица, участвующего в согласовании ТД       | Человеческий фактор; Перераспределение ответственности и полномочий лиц, участвующих в разработке ТД   | Задержки при согласовании ТД; Возникновение риска необходимости переформирования комплекта ТД для согласования   | 4 | 3 | 9 | 108 |
|                              | Указание неверной подписи на ТД                       | Перераспределение ответственности и полномочий лиц, участвующих в разработке ТД  | Повторное согласование ТД; Возникновение риска необходимости переформирования комплекта ТД для согласования  | 3 | 2 | 5 | 30  |
| Принятие ТД на учет в архиве | Возврат ТД на доработку                               | Ошибки при формировании комплекта ТД для согласования; Ошибки при проектировании основной или реквизитной части ТД; Ложный возврат ТД на доработку | Повторное согласование ТД; Увеличение длительности согласования ТД   | 5 | 4 | 7 | 140 |
|                              | Ошибки при постановке ТД на учет в архиве             | Ошибки при формировании комплекта ТД для согласования; Перераспределение ответственности и полномочий лиц, участвующих в разработке ТД             | Повторное согласование ТД  | 5 | 3 | 2 | 30  |

## Приложение Б

### Матрица корреляции рисков процессов ТДО с выпускаемой организацией ТД

**Таблица Б. 1 - Стадия проектирования изделия**

| Наименование риска   | ТД          |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             | $q_i$ |
|--|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------|
|  | ЭЗ          | ПЭЗ         | ТБ          | ВП          | Ч.ДЕ        | Ч.СБ        | МЧ          | Сп.п.СБ     | Сп.с.СБ     | СП.К        | МК          | КТТП        | КЭ          | ВУН         | ПСп         |       |
| Отсутствие материалов и ПКИ, указанных в ТД                        | 9/<br>1,323 | 9/<br>1,323 | 1/<br>0,147 | 9/<br>1,323 | 3/<br>0,441 | 3/<br>0,441 | 3/<br>0,441 | 9/<br>1,323 | 9/<br>1,323 | 3/<br>0,441 | 9/<br>1,323 | 9/<br>1,323 | 3/<br>0,441 | 9/<br>1,323 | 3/<br>0,441 | 0,147 |
| Превышение длительности согласования ТД                            | 1/<br>0,135 | 1/<br>0,135 | 1/<br>0,135 | 3/<br>0,405 | 1/<br>0,135 | 3/<br>0,405 | 1/<br>0,135 | 3/<br>0,405 | 3/<br>0,405 | 3/<br>0,405 | 9/<br>1,215 | 3/<br>0,405 | 3/<br>0,405 | 9/<br>1,215 | 9/<br>1,215 | 0,135 |
| Ошибки при проектировании ТД, выявленные на этапе производства     | 9/<br>1,134 | 9/<br>1,134 | 3/<br>0,378 | 9/<br>1,134 | 3/<br>0,378 | 3/<br>0,378 | 3/<br>0,378 | 3/<br>0,378 | 3/<br>0,378 | 3/<br>0,378 | 3/<br>0,378 | 1/<br>0,126 | 1/<br>0,126 | 3/<br>0,378 | 3/<br>0,378 | 0,126 |
| Использование предыдущей версии ТД в процессе производства изделия | 9/<br>1,107 | 3/<br>0,369 | 1/<br>0,123 | 9/<br>1,107 | 9/<br>1,107 | 3/<br>0,369 | 3/<br>0,369 | 3/<br>0,369 | 3/<br>0,369 | 3/<br>0,369 | 9/<br>1,107 | 1/<br>0,123 | 1/<br>0,123 | 9/<br>1,107 | 9/<br>1,107 | 0,123 |
| Ошибки при проектировании основной или реквизитной части ТД        | 9/<br>1,062 | 9/<br>1,062 | 3/<br>0,354 | 3/<br>0,354 | 3/<br>0,354 | 3/<br>0,354 | 3/<br>0,354 | 3/<br>0,354 | 3/<br>0,354 | 3/<br>0,354 | 9/<br>1,062 | 9/<br>1,062 | 3/<br>0,354 | 9/<br>1,062 | 9/<br>1,062 | 0,118 |
| Ошибки при формировании комплекта ТД для согласования              | 1/<br>0,111 | 1/<br>0,111 | 1/<br>0,111 | 1/<br>0,111 | 3/<br>0,333 | 3/<br>0,333 | 3/<br>0,333 | 3/<br>0,333 | 3/<br>0,333 | 3/<br>0,333 | 3/<br>0,333 | 3/<br>0,333 | 3/<br>0,333 | 3/<br>0,333 | 3/<br>0,333 | 0,111 |
| Отсутствие лица, участвующего в согласовании ТД                    | 9/<br>0,846 | 9/<br>0,846 | 9/<br>0,846 | 9/<br>0,846 | 9/<br>0,846 | 9/<br>0,846 | 3/<br>0,282 | 9/<br>0,846 | 3/<br>0,282 | 3/<br>0,282 | 3/<br>0,282 | 1/<br>0,094 | 1/<br>0,094 | 3/<br>0,282 | 9/<br>0,846 | 0,094 |
| Отсутствие или недоступность оборудования для обработки изделий    | 1/<br>0,057 | 1/<br>0,057 | 1/<br>0,057 | 1/<br>0,057 | 3/<br>0,171 | 3/<br>0,171 | 3/<br>0,171 | 3/<br>0,171 | 3/<br>0,171 | 3/<br>0,171 | 9/<br>0,513 | 3/<br>0,171 | 9/<br>0,513 | 9/<br>0,513 | 9/<br>0,513 | 0,057 |
| Указание неверной подписи на ТД                                    | 1/<br>0,044 | 1/<br>0,044 | 1/<br>0,044 | 1/<br>0,044 | 3/<br>0,132 | 3/<br>0,132 | 3/<br>0,132 | 3/<br>0,132 | 3/<br>0,132 | 3/<br>0,132 | 9/<br>0,396 | 3/<br>0,132 | 3/<br>0,132 | 3/<br>0,132 | 3/<br>0,132 | 0,044 |
| Ошибки при постановке ТД на учет в архив                           | 1/<br>0,025 | 1/<br>0,025 | 1/<br>0,025 | 1/<br>0,025 | 1/<br>0,025 | 1/<br>0,025 | 1/<br>0,025 | 1/<br>0,025 | 1/<br>0,025 | 1/<br>0,025 | 1/<br>0,025 | 1/<br>0,025 | 1/<br>0,025 | 1/<br>0,025 | 1/<br>0,025 | 0,025 |
| Ложный возврат ТД на доработку                                     | 9/<br>0,171 | 9/<br>0,171 | 3/<br>0,057 | 9/<br>0,171 | 3/<br>0,057 | 3/<br>0,057 | 1/<br>0,019 | 3/<br>0,057 | 3/<br>0,057 | 3/<br>0,057 | 1/<br>0,019 | 1/<br>0,019 | 1/<br>0,019 | 1/<br>0,019 | 3/<br>0,057 | 0,019 |
| Степень приоритета обработки ТД                                    | 6,015       | 5,277       | 2,277       | 5,577       | 3,979       | 3,511       | 2,639       | 4,393       | 3,829       | 2,947       | 6,653       | 3,813       | 2,565       | 6,389       | 6,109       |       |

\*ЭЗ – схема электрическая принципиальная; ПЭЗ – перечень элементов; ТБ – таблица соединений; ВП – ведомость покупных изделий; ч.ДЕ – чертеж детали; ч.СБ – сборочный чертеж; МЧ – монтажный чертеж; Сп.п.СБ - спецификация на простую сборочную единицу; Сп.с.СБ – спецификация на сложную сборочную единицу; СП.К – спецификация на комплекс; МК – маршрутная карта технологического процесса; КТТП – карта типового технологического процесса; КЭ – карта эскизов; ВУН – ведомость удельных норм; ПСп – производственная спецификация.

**Таблица Б. 2 - Стадия производства изделия**

| Наименование риска   | ТД        |           |           |           |           |            |           |             |                 |               |           |                       |               |             | q <sub>i</sub> |
|--|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|-----------|-------------|-----------------|---------------|-----------|-----------------------|---------------|-------------|----------------|
|  | ППр       | ПРп       | ПЗВИ      | Теор. тр. | Факт. тр. | Свод по ДЕ | НЗП       | Отчет о МЦК | Пр. и мет. исп. | Акт тип. исп. | Пр. исп.  | Пр.-закл. ОТК об исп. | Пр. исп. зак. | Отгр. накл. |                |
| Отсутствие материалов и ПККИ, указанных в ТД                       | 1 / 0,147 | 1 / 0,147 | 1 / 0,147 | 1 / 0,147 | 3 / 0,441 | 1 / 0,147  | 9 / 1,323 | 3 / 0,441   | 1 / 0,147       | 1 / 0,147     | 1 / 0,147 | 1 / 0,147             | 1 / 0,147     | 1 / 0,147   | 0,147          |
| Превышение длительности согласования ТД                            | 1 / 0,135 | 1 / 0,135 | 1 / 0,135 | 9 / 1,215 | 3 / 0,405 | 3 / 0,405  | 1 / 0,135 | 1 / 0,135   | 1 / 0,135       | 1 / 0,135     | 1 / 0,135 | 1 / 0,135             | 1 / 0,135     | 1 / 0,135   | 0,135          |
| Ошибки при проектировании ТД, выявленные на этапе производства     | 9 / 1,134 | 9 / 1,134 | 3 / 0,378 | 1 / 0,126 | 3 / 0,378 | 3 / 0,378  | 9 / 1,134 | 9 / 1,134   | 1 / 0,126       | 1 / 0,126     | 1 / 0,126 | 1 / 0,126             | 1 / 0,126     | 1 / 0,126   | 0,126          |
| Использование предыдущей версии ТД в процессе производства изделия | 1 / 0,123 | 1 / 0,123 | 1 / 0,123 | 9 / 1,107 | 9 / 1,107 | 3 / 0,369  | 3 / 0,369 | 3 / 0,369   | 1 / 0,123       | 1 / 0,123     | 1 / 0,123 | 1 / 0,123             | 1 / 0,123     | 1 / 0,123   | 0,123          |
| Ошибки при проектировании основной или реквизитной части ТД        | 1 / 0,118 | 1 / 0,118 | 1 / 0,118 | 1 / 0,118 | 1 / 0,118 | 1 / 0,118  | 1 / 0,118 | 1 / 0,118   | 1 / 0,118       | 1 / 0,118     | 1 / 0,118 | 1 / 0,118             | 1 / 0,118     | 1 / 0,118   | 0,118          |
| Ошибки при формировании комплекта ТД для согласования              | 1 / 0,111 | 1 / 0,111 | 1 / 0,111 | 1 / 0,111 | 1 / 0,111 | 3 / 0,333  | 1 / 0,111 | 1 / 0,111   | 1 / 0,111       | 1 / 0,111     | 1 / 0,111 | 1 / 0,111             | 1 / 0,111     | 1 / 0,111   | 0,111          |
| Отсутствие лица, участвующего в согласовании ТД                    | 1 / 0,094 | 1 / 0,094 | 1 / 0,094 | 1 / 0,094 | 1 / 0,094 | 1 / 0,094  | 1 / 0,094 | 1 / 0,094   | 1 / 0,094       | 1 / 0,094     | 1 / 0,094 | 1 / 0,094             | 1 / 0,094     | 1 / 0,094   | 0,094          |
| Отсутствие или недоступность оборудования для обработки изделий    | 3 / 0,171 | 3 / 0,171 | 3 / 0,171 | 9 / 0,513 | 9 / 0,513 | 3 / 0,171  | 9 / 0,513 | 3 / 0,171   | 1 / 0,057       | 1 / 0,057     | 1 / 0,057 | 1 / 0,057             | 1 / 0,057     | 1 / 0,057   | 0,057          |
| Указание неверной подписи на ТД                                    | 1 / 0,044 | 1 / 0,044 | 1 / 0,044 | 1 / 0,044 | 1 / 0,044 | 1 / 0,044  | 1 / 0,044 | 1 / 0,044   | 1 / 0,044       | 1 / 0,044     | 1 / 0,044 | 1 / 0,044             | 1 / 0,044     | 1 / 0,044   | 0,044          |
| Ошибки при постановке ТД на учет в архив                           | 1 / 0,025 | 1 / 0,025 | 1 / 0,025 | 1 / 0,025 | 1 / 0,025 | 1 / 0,025  | 1 / 0,025 | 1 / 0,025   | 1 / 0,025       | 1 / 0,025     | 1 / 0,025 | 1 / 0,025             | 1 / 0,025     | 1 / 0,025   | 0,025          |
| Ложный возврат ТД на доработку                                     | 1 / 0,019 | 1 / 0,019 | 1 / 0,019 | 1 / 0,019 | 1 / 0,019 | 1 / 0,019  | 1 / 0,019 | 1 / 0,019   | 1 / 0,019       | 1 / 0,019     | 1 / 0,019 | 1 / 0,019             | 1 / 0,019     | 1 / 0,019   | 0,019          |
| Степень приоритета обработки ТД                                    | 2,121     | 2,121     | 1,365     | 3,519     | 3,255     | 2,103      | 3,885     | 2,661       | 0,999           | 0,999         | 0,999     | 0,999                 | 0,999         | 0,999       |                |

\*ППр – план производства; ПРп – производственная программа; ПЗВИ – запуска-выпуска изделия; Теор.тр. – теоретическая трудоемкость изготовления изделий; Факт.тр. – фактическая трудоемкость изготовления изделий; Свод по ДЕ – свод по деталям; НЗП – отчет о незавершенном производстве; Отчет о МЦК – отчет о межцеховой кооперации; Пр. и мет. исп. – программа и методика испытаний; Акт тип. исп. – акт типовых испытаний; Пр. исп. – протокол испытаний; Пр.-закл. ОТК об исп. – протокол-заключение ОТК об испытаниях; Пр. исп. зак. – протокол испытаний заказчика; Отгр. накл. – отгрузочная накладная.

## Приложение В

### Фрагменты данных для обучения ИНС-моделей различных этапов ТДО

Содержание наименований технической документации для этапа

#### «Проектирование»

кд1.375.050\_э3 кд1.375.050\_э3 кд1.375.050\_вп 1 13 14  
кд1.375.050\_пэ3 кд1.375.050\_э3 кд1.375.050\_вп 2 13 14  
кд1.375.053\_э3 кд1.375.053\_э3 кд1.375.053\_вп 3 15 16  
кд1.375.053\_пэ3 кд1.375.053\_э3 кд1.375.053\_вп 4 15 16  
кд1.375.055\_э3 кд1.375.055\_э3 кд1.375.055\_вп 5 17 18  
кд1.375.055\_пэ3 кд1.375.055\_э3 кд1.375.055\_вп 6 17 18  
кд1.375.064\_э3 кд1.375.064\_э3 кд1.375.064\_вп 7 19 20  
кд1.375.064\_пэ3 кд1.375.064\_э3 кд1.375.064\_вп 8 19 20  
кд2.280.048\_э3 кд2.280.048\_э3 кд2.280.048\_вп 9 21 22  
кд2.280.048\_пэ3 кд2.280.048\_э3 кд2.280.048\_вп 10 21 22  
кд3.490.033\_э3 кд3.490.033\_э3 кд3.490.033\_вп 11 23 24  
кд3.490.033\_пэ3 кд3.490.033\_э3 кд3.490.033\_вп 12 23 24

Содержание наименований технической документации для этапа

#### «Конструирование»

2а7.732.127 кд1.375.050\_ккд кд1.375.050\_псп 25 2684 2685  
2а7.732.129 кд1.375.050\_ккд кд1.375.050\_псп 26 2684 2685  
2а8.220.415 кд1.375.050\_ккд кд1.375.050\_псп 27 2684 2685  
2а8.667.972 кд1.375.050\_ккд кд1.375.050\_псп 28 2684 2685  
и1.8356.01 кд1.375.050\_ккд кд1.375.050\_псп 29 2684 2685  
и1.8356.02 кд1.375.050\_ккд кд1.375.050\_псп 30 2684 2685  
и1.8356.03 кд1.375.050\_ккд кд1.375.050\_псп 31 2684 2685  
и1.8356.04 кд1.375.050\_ккд кд1.375.050\_псп 32 2684 2685  
и1.8356.06 кд1.375.050\_ккд кд1.375.050\_псп 33 2684 2685  
к8.135.627 кд1.375.050\_ккд кд1.375.050\_псп 34 2684 2685  
к8.210.099 кд1.375.050\_ккд кд1.375.050\_псп 35 2684 2685  
к8.278.420 кд1.375.050\_ккд кд1.375.050\_псп 36 2684 2685  
к8.539.009 кд1.375.050\_ккд кд1.375.050\_псп 37 2684 2685  
к8.563.059 кд1.375.050\_ккд кд1.375.050\_псп 38 2684 2685  
к8.563.060 кд1.375.050\_ккд кд1.375.050\_псп 39 2684 2685  
к8.564.097 кд1.375.050\_ккд кд1.375.050\_псп 40 2684 2685  
к8.605.057 кд1.375.050\_ккд кд1.375.050\_псп 41 2684 2685  
к8.701.711 кд1.375.050\_ккд кд1.375.050\_псп 42 2684 2685  
к8.757.021 кд1.375.050\_ккд кд1.375.050\_псп 43 2684 2685  
к8.757.022 кд1.375.050\_ккд кд1.375.050\_псп 44 2684 2685  
к8.772.438 кд1.375.050\_ккд кд1.375.050\_псп 45 2684 2685  
к8.772.439 кд1.375.050\_ккд кд1.375.050\_псп 46 2684 2685  
  
кк7.773.331 кд1.375.050\_ккд кд1.375.050\_псп 51 2684 2685  
кк7.774.303 кд1.375.050\_ккд кд1.375.050\_псп 52 2684 2685  
кк7.774.327 кд1.375.050\_ккд кд1.375.050\_псп 53 2684 2685  
кк7.804.311 кд1.375.050\_ккд кд1.375.050\_псп 54 2684 2685  
кк8.131.324 кд1.375.050\_ккд кд1.375.050\_псп 55 2684 2685  
кк8.206.279 кд1.375.050\_ккд кд1.375.050\_псп 56 2684 2685  
кк8.224.363-02 кд1.375.050\_ккд кд1.375.050\_псп 57 2684 2685  
кк8.228.077 кд1.375.050\_ккд кд1.375.050\_псп 58 2684 2685  
кк8.315.476 кд1.375.050\_ккд кд1.375.050\_псп 59 2684 2685  
кк8.352.493 кд1.375.050\_ккд кд1.375.050\_псп 60 2684 2685  
кк8.366.769 кд1.375.050\_ккд кд1.375.050\_псп 61 2684 2685  
кк8.683.342 кд1.375.050\_ккд кд1.375.050\_псп 62 2684 2685  
кк8.934.315 кд1.375.050\_ккд кд1.375.050\_псп 63 2684 2685  
кк8.935.901 кд1.375.050\_ккд кд1.375.050\_псп 64 2684 2685  
кк8.942.062 кд1.375.050\_ккд кд1.375.050\_псп 65 2684 2685  
кк8.942.154-1 кд1.375.050\_ккд кд1.375.050\_псп 66 2684 2685  
кк8.942.190-1/Т кд1.375.050\_ккд кд1.375.050\_псп 67 2684 2685  
кк8.942.190-2/Т кд1.375.050\_ккд кд1.375.050\_псп 68 2684 2685  
кк8.942.190-3/Т кд1.375.050\_ккд кд1.375.050\_псп 69 2684 2685  
кк8.942.412 кд1.375.050\_ккд кд1.375.050\_псп 70 2684 2685  
кк8.942.488 кд1.375.050\_ккд кд1.375.050\_псп 71 2684 2685  
кк8.942.534-03 кд1.375.050\_ккд кд1.375.050\_псп 72 2684 2685





|                |                    |                    |                    |      |      |      |      |
|----------------|--------------------|--------------------|--------------------|------|------|------|------|
| ТД.10160.00841 | КД1.375.064-02_КТД | КД1.375.064-02_ВУН | КД1.375.064-02_ПСН | 4728 | 5381 | 5382 | 5383 |
| ТД.10160.00842 | КД1.375.064-02_КТД | КД1.375.064-02_ВУН | КД1.375.064-02_ПСН | 4729 | 5381 | 5382 | 5383 |
| ТД.10160.00843 | КД1.375.064-02_КТД | КД1.375.064-02_ВУН | КД1.375.064-02_ПСН | 4730 | 5381 | 5382 | 5383 |
| ТД.10160.00846 | КД1.375.064-02_КТД | КД1.375.064-02_ВУН | КД1.375.064-02_ПСН | 4731 | 5381 | 5382 | 5383 |
| ТД.10160.00854 | КД1.375.064-02_КТД | КД1.375.064-02_ВУН | КД1.375.064-02_ПСН | 4732 | 5381 | 5382 | 5383 |
| ТД.10161.00135 | КД1.375.064-02_КТД | КД1.375.064-02_ВУН | КД1.375.064-02_ПСН | 4733 | 5381 | 5382 | 5383 |
| ТД.10161.00139 | КД1.375.064-02_КТД | КД1.375.064-02_ВУН | КД1.375.064-02_ПСН | 4734 | 5381 | 5382 | 5383 |
| ТД.10162.00460 | КД1.375.064-02_КТД | КД1.375.064-02_ВУН | КД1.375.064-02_ПСН | 4735 | 5381 | 5382 | 5383 |
| ТД.10162.00539 | КД1.375.064-02_КТД | КД1.375.064-02_ВУН | КД1.375.064-02_ПСН | 4736 | 5381 | 5382 | 5383 |
| ТД.10162.00610 | КД1.375.064-02_КТД | КД1.375.064-02_ВУН | КД1.375.064-02_ПСН | 4737 | 5381 | 5382 | 5383 |
| ТД.10162.00619 | КД1.375.064-02_КТД | КД1.375.064-02_ВУН | КД1.375.064-02_ПСН | 4738 | 5381 | 5382 | 5383 |
| ТД.10162.00636 | КД1.375.064-02_КТД | КД1.375.064-02_ВУН | КД1.375.064-02_ПСН | 4739 | 5381 | 5382 | 5383 |
| ТД.10162.00640 | КД1.375.064-02_КТД | КД1.375.064-02_ВУН | КД1.375.064-02_ПСН | 4740 | 5381 | 5382 | 5383 |
| ТД.10162.00641 | КД1.375.064-02_КТД | КД1.375.064-02_ВУН | КД1.375.064-02_ПСН | 4741 | 5381 | 5382 | 5383 |
| ТД.10162.00651 | КД1.375.064-02_КТД | КД1.375.064-02_ВУН | КД1.375.064-02_ПСН | 4742 | 5381 | 5382 | 5383 |
| ТД.10162.00664 | КД1.375.064-02_КТД | КД1.375.064-02_ВУН | КД1.375.064-02_ПСН | 4743 | 5381 | 5382 | 5383 |
| ТД.10162.00666 | КД1.375.064-02_КТД | КД1.375.064-02_ВУН | КД1.375.064-02_ПСН | 4744 | 5381 | 5382 | 5383 |
| ТД.10162.00680 | КД1.375.064-02_КТД | КД1.375.064-02_ВУН | КД1.375.064-02_ПСН | 4745 | 5381 | 5382 | 5383 |
| ТД.10167.00040 | КД1.375.064-02_КТД | КД1.375.064-02_ВУН | КД1.375.064-02_ПСН | 4746 | 5381 | 5382 | 5383 |
| ТД.10167.00046 | КД1.375.064-02_КТД | КД1.375.064-02_ВУН | КД1.375.064-02_ПСН | 4747 | 5381 | 5382 | 5383 |
| ТД.10167.00228 | КД1.375.064-02_КТД | КД1.375.064-02_ВУН | КД1.375.064-02_ПСН | 4748 | 5381 | 5382 | 5383 |
| ТД.10167.00330 | КД1.375.064-02_КТД | КД1.375.064-02_ВУН | КД1.375.064-02_ПСН | 4749 | 5381 | 5382 | 5383 |

Содержание наименований технической документации для этапа  
«Планирование производства»

|                 |                  |                 |      |      |      |
|-----------------|------------------|-----------------|------|------|------|
| КД1.375.050_ППр | КД1.375.050_ПЗВИ | КД1.375.050_ПРП | 5390 | 5402 | 5403 |
| КД1.375.050_ПСН | КД1.375.050_ПЗВИ | КД1.375.050_ПРП | 5391 | 5402 | 5403 |
| КД1.375.053_ППр | КД1.375.053_ПЗВИ | КД1.375.053_ПРП | 5392 | 5404 | 5405 |
| КД1.375.053_ПСН | КД1.375.053_ПЗВИ | КД1.375.053_ПРП | 5393 | 5404 | 5405 |
| КД1.375.055_ППр | КД1.375.055_ПЗВИ | КД1.375.055_ПРП | 5394 | 5406 | 5407 |
| КД1.375.055_ПСН | КД1.375.055_ПЗВИ | КД1.375.055_ПРП | 5395 | 5406 | 5407 |
| КД1.375.064_ППр | КД1.375.064_ПЗВИ | КД1.375.064_ПРП | 5396 | 5408 | 5409 |
| КД1.375.064_ПСН | КД1.375.064_ПЗВИ | КД1.375.064_ПРП | 5397 | 5408 | 5409 |
| КД2.280.048_ППр | КД2.280.048_ПЗВИ | КД2.280.048_ПРП | 5398 | 5410 | 5411 |
| КД2.280.048_ПСН | КД2.280.048_ПЗВИ | КД2.280.048_ПРП | 5399 | 5410 | 5411 |
| КД3.490.033_ППр | КД3.490.033_ПЗВИ | КД3.490.033_ПРП | 5400 | 5412 | 5413 |
| КД3.490.033_ПСН | КД3.490.033_ПЗВИ | КД3.490.033_ПРП | 5401 | 5412 | 5413 |

Содержание наименований технической документации для этапа  
«Технологическая подготовка производства»

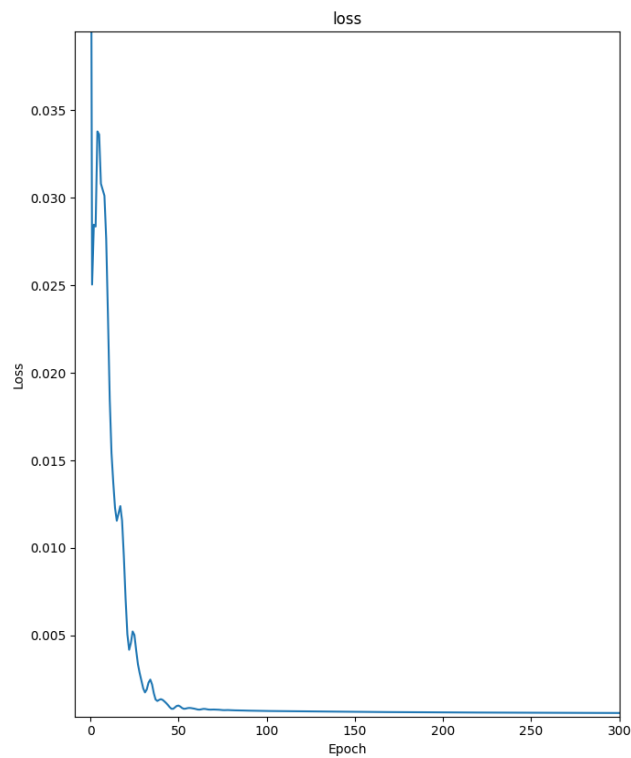
|                  |                 |                 |      |      |      |
|------------------|-----------------|-----------------|------|------|------|
| КД1.375.050_ТТр  | КД1.375.050_НЗП | КД1.375.050_МЦК | 5414 | 5432 | 5433 |
| КД1.375.050_ФТр  | КД1.375.050_НЗП | КД1.375.050_МЦК | 5415 | 5432 | 5433 |
| КД1.375.050_СвДЕ | КД1.375.050_НЗП | КД1.375.050_МЦК | 5416 | 5432 | 5433 |
| КД1.375.053_ТТр  | КД1.375.053_НЗП | КД1.375.053_МЦК | 5417 | 5434 | 5435 |
| КД1.375.053_ФТр  | КД1.375.053_НЗП | КД1.375.053_МЦК | 5418 | 5434 | 5435 |
| КД1.375.053_СвДЕ | КД1.375.053_НЗП | КД1.375.053_МЦК | 5419 | 5434 | 5435 |
| КД1.375.055_ТТр  | КД1.375.055_НЗП | КД1.375.055_МЦК | 5420 | 5436 | 5437 |
| КД1.375.055_ФТр  | КД1.375.055_НЗП | КД1.375.055_МЦК | 5421 | 5436 | 5437 |
| КД1.375.055_СвДЕ | КД1.375.055_НЗП | КД1.375.055_МЦК | 5422 | 5436 | 5437 |
| КД1.375.064_ТТр  | КД1.375.064_НЗП | КД1.375.064_МЦК | 5423 | 5438 | 5439 |
| КД1.375.064_ФТр  | КД1.375.064_НЗП | КД1.375.064_МЦК | 5424 | 5438 | 5439 |
| КД1.375.064_СвДЕ | КД1.375.064_НЗП | КД1.375.064_МЦК | 5425 | 5438 | 5439 |
| КД2.280.048_ТТр  | КД2.280.048_НЗП | КД2.280.048_МЦК | 5426 | 5440 | 5441 |
| КД2.280.048_ФТр  | КД2.280.048_НЗП | КД2.280.048_МЦК | 5427 | 5440 | 5441 |
| КД2.280.048_СвДЕ | КД2.280.048_НЗП | КД2.280.048_МЦК | 5428 | 5440 | 5441 |
| КД3.490.033_ТТр  | КД3.490.033_НЗП | КД3.490.033_МЦК | 5429 | 5442 | 5443 |
| КД3.490.033_ФТр  | КД3.490.033_НЗП | КД3.490.033_МЦК | 5430 | 5442 | 5443 |
| КД3.490.033_СвДЕ | КД3.490.033_НЗП | КД3.490.033_МЦК | 5431 | 5442 | 5443 |

Содержание наименований технической документации для этапа  
«Выпуск изделия»

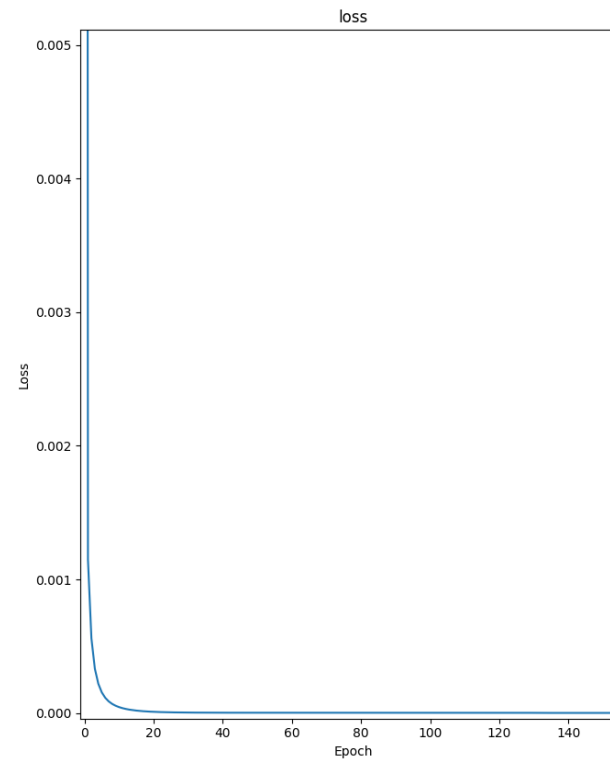
|                  |             |      |      |
|------------------|-------------|------|------|
| КД1.375.050_Пими | КД1.375.050 | 5444 | 5450 |
| КД1.375.053_Пими | КД1.375.053 | 5445 | 5451 |
| КД1.375.055_Пими | КД1.375.055 | 5446 | 5452 |
| КД1.375.064_Пими | КД1.375.064 | 5447 | 5453 |
| КД2.280.048_Пими | КД2.280.048 | 5448 | 5454 |
| КД3.490.033_Пими | КД3.490.033 | 5449 | 5455 |

## Приложение Г

### Графики зависимости функции потерь (Loss) от пройденной эпохи обучения (Epoch) различных ИНС-моделей этапов ТДО

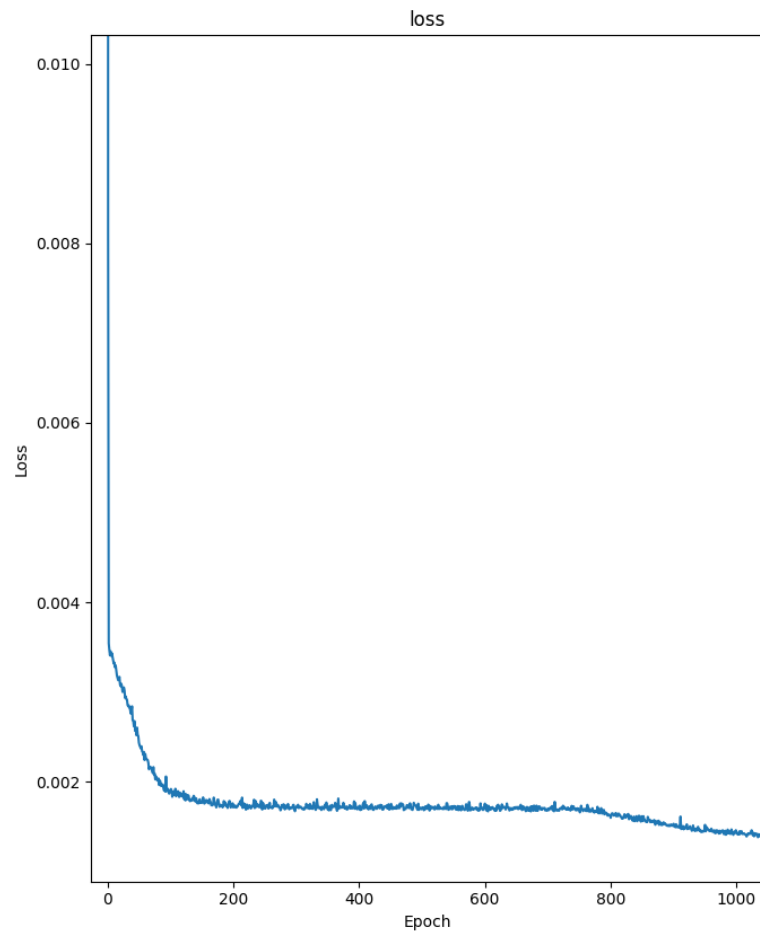


а) «Проектирование»

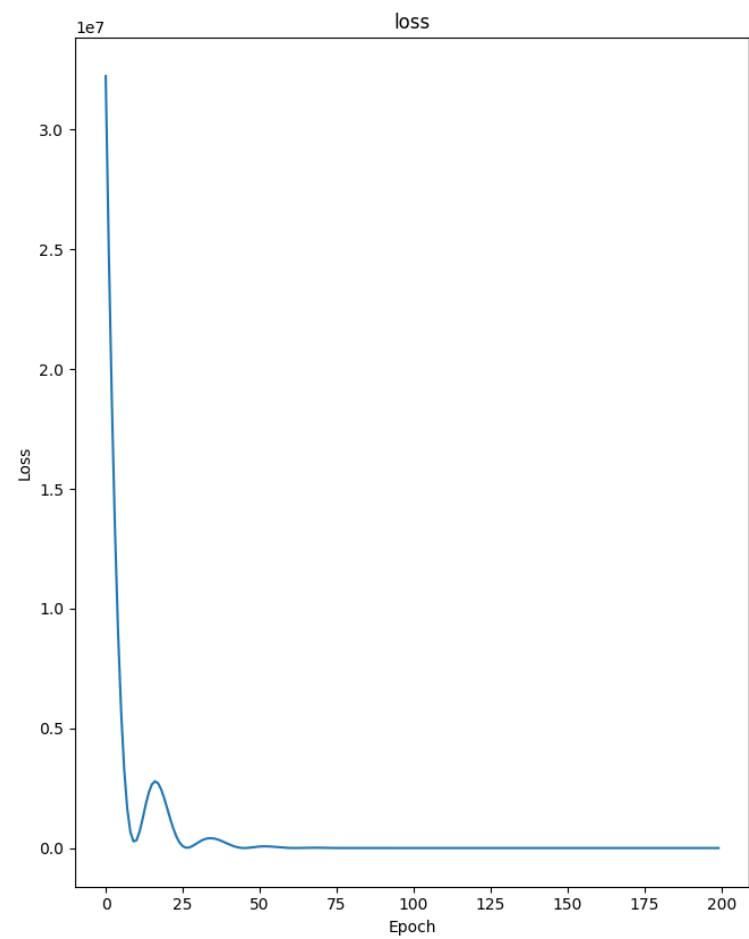


б) «Конструирование»

Рисунок Г. 1 - График зависимости функции потерь (Loss) от пройденной эпохи обучения (Epoch) ИНС-моделей этапов ТДО

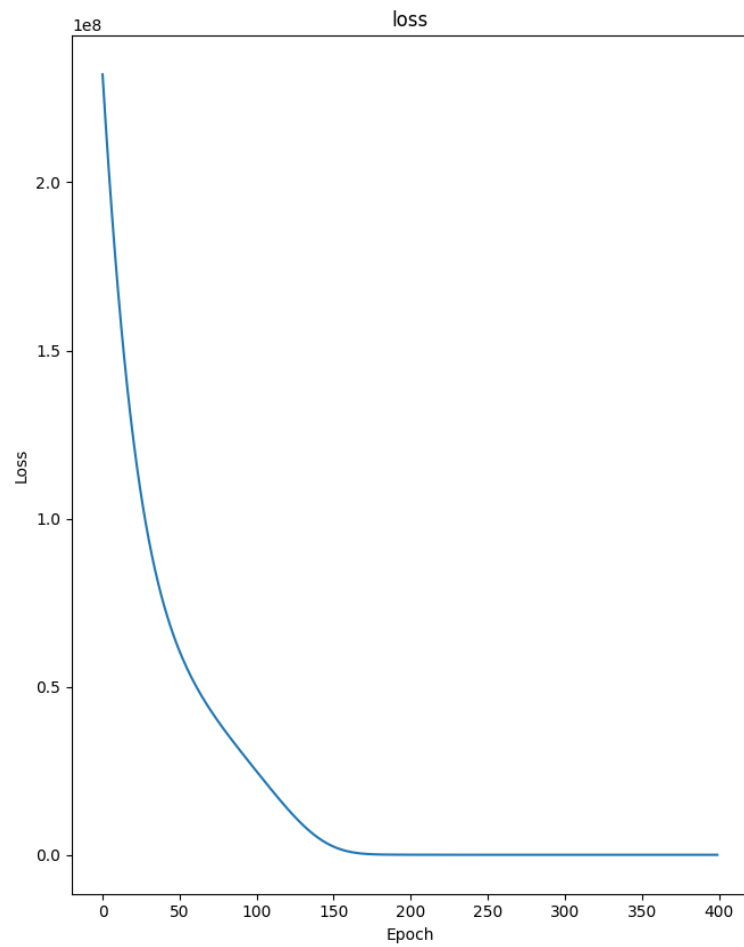


а) «Разработка технологии»

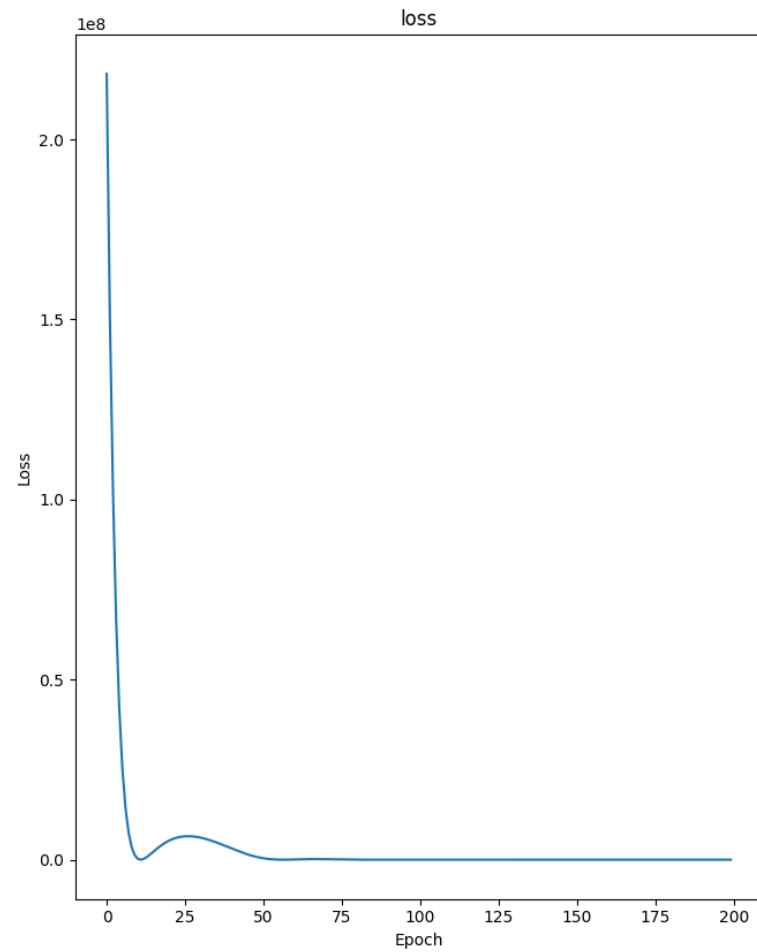


б) «Планирование производства»

Рисунок Г. 2 - График зависимости функции потерь (Loss) от пройденной эпохи обучения (Epoch) ИНС-моделей этапов ТДО



а) «Технологическая подготовка производства»



б) «Выпуск изделия»

Рисунок Г. 3 - График зависимости функции потерь (Loss) от пройденной эпохи обучения (Epoch) ИНС-моделей этапов ТДО

## Приложение Д

### Программная реализация ИНС-моделей различных этапов ТДО

#### Фрагмент листинга программы ЭВМ для этапа «Проектирование»

```
Opt = keras.optimizers.Adam(learning_rate=0.5)
Loss = 'mean_squared_error'

model = Sequential()
model.add(Dense(units=2, activation='sigmoid', input_shape=(1,)))
model.add(Dense(units=2, activation='sigmoid'))
model.compile(loss = Loss, optimizer = Opt, metrics=['accuracy'])

history = model.fit(NP_X_Data_Norm, NP_Y_Data12T_Norm, epochs=10000)
classes = model.predict(NP_X_Data_Norm) * MAX_Y
```

#### Фрагмент листинга программы ЭВМ для этапа «Конструирование»

```
Opt = keras.optimizers.Adam(learning_rate=0.025)
Loss = 'mean_squared_error'

model = Sequential()
model.add(Dense(units=3, activation='sigmoid', input_shape=(1,)))
model.add(Dense(units=4, activation='sigmoid'))
model.add(Dense(units=3, activation='sigmoid'))
model.add(Dense(units=2, activation='sigmoid'))
model.compile(loss = Loss, optimizer = Opt, metrics=['accuracy'])

earlyStop = EarlyStopping(monitor='loss', min_delta=0, patience=10, verbose=1,
                           mode='auto', baseline=None, restore_best_weights=True)

history = model.fit(NP_X_Data_Norm, NP_Y_Data12T_Norm, epochs=30000)

classes = model.predict(NP_X_Data_Norm) * MAX_Y
```

#### Фрагмент листинга программы ЭВМ для этапа «Разработка технологии»

---

```
Opt = keras.optimizers.Adam(learning_rate=0.029)
Loss = 'mean_squared_error'

model = Sequential()
model.add(Dense(units=3, activation='sigmoid', input_shape=(1,)))
model.add(Dense(units=3, activation='sigmoid'))
model.compile(loss = Loss, optimizer = Opt, metrics=['accuracy'])

history = model.fit(NP_X_Data_Norm, NP_Y_Data123T_Norm, epochs=10000)
classes = model.predict(NP_X_Data_Norm) * MAX_Y
```

## Фрагмент листинга программы ЭВМ для этапа «Планирование производства»

```
Opt = keras.optimizers.Adam(learning_rate=0.045)
Loss = 'mean_squared_error'

model = Sequential()
model.add(Dense(units=2, activation='linear', input_shape=(1,)))
model.add(Dense(units=2, activation='linear'))
model.compile(loss = Loss, optimizer = Opt, metrics=['accuracy'])

history = model.fit(NP_X_Data, NP_Y_Data12T, epochs=200)
classes = model.predict(NP_X_Data)
```

## Фрагмент листинга программы ЭВМ для этапа «Технологическая подготовка производства»

```
Opt = keras.optimizers.Adam(learning_rate=0.01)
Loss = 'mean_squared_error'

model = Sequential()
model.add(Dense(units=3, activation='linear', input_shape=(1,)))
model.add(Dense(units=2, activation='linear'))
model.compile(loss = Loss, optimizer = Opt, metrics=['accuracy'])

history = model.fit(NP_X_Data, NP_Y_Data12T, epochs=400)
classes = model.predict(NP_X_Data)
```

## Фрагмент листинга программы ЭВМ для этапа «Выпуск изделия»

```
Opt = keras.optimizers.Adam(learning_rate=0.03)
Loss = 'mean_squared_error'

model = Sequential()
model.add(Dense(units=1, activation='linear', input_shape=(1,)))
model.add(Dense(units=2, activation='linear'))
model.add(Dense(units=2, activation='linear'))
model.add(Dense(units=1, activation='linear'))
model.compile(loss = Loss, optimizer = Opt, metrics=['accuracy'])

history = model.fit(NP_X_Data, NP_Y_Data1, epochs=200)
classes = model.predict(NP_X_Data)
```

## Приложение Е

### Программная реализация ОИНС-модели на основе на нейронных элементов, включающих в себя ИНС-подмодели различных этапов ТДО

Фрагмент листинга программы для ЭВМ этапов «Проектирование»,  
«Конструирование» и «Разработка технологии»

```
Opt = keras.optimizers.Adam(learning_rate=0.03) #0.03
Loss = 'mean_squared_error'

ANN_in = Input(shape=(1,), name='ANN_IN')
L1 = Dense(1, activation='linear', name='L1_Dense')(ANN_in)
L1_M = Model(inputs=ANN_in, outputs=L1)
ANN1_PREDICTED = ANN1.predict(NP_X); #print(ANN1_PREDICTED)
L1_W = L1_M.get_weights()
L1_W[1][0] = ANN1_PREDICTED[0][0]
L1_M.set_weights(L1_W);
#print(L1_M.get_weights())
L1_M_out = L1_M.predict(NP_X)

L2_1 = Dense(2, activation='linear', name='L2_Dense_1')(L1)
L2_1_M = Model(inputs=ANN_in, outputs=L2_1)
ANN2_PREDICTED = ANN2.predict(L1_M_out); #print(ANN2_PREDICTED)
L2_1_W = L2_1_M.get_weights()
L2_1_W[3][0] = ANN2_PREDICTED[0][0]
L2_1_W[3][1] = ANN2_PREDICTED[0][0]
L2_1_M.set_weights(L2_1_W)
#print(L2_1_M.get_weights())
L2_1_M_out = L2_1_M.predict(NP_X)

L2_2 = Dense(3, activation='linear', name='L2_Dense_2')(L1)
L2_2_M = Model(inputs=ANN_in, outputs=L2_2)
ANN3_PREDICTED = ANN3.predict(L1_M_out); #print(ANN3_PREDICTED)
L2_2_W = L2_2_M.get_weights()
L2_2_W[3][0] = ANN3_PREDICTED[0][0]
L2_2_W[3][1] = ANN3_PREDICTED[0][0]
L2_2_W[3][2] = ANN3_PREDICTED[0][0]
L2_2_M.set_weights(L2_2_W)
#print(L2_2_M.get_weights())
L2_2_M_out = L2_2_M.predict(NP_X)

combined_L2 = Concatenate()([L2_1, L2_2])
combined_L2_out = np.concatenate((ANN2_PREDICTED.flatten(), ANN3_PREDICTED.flatten()))
```



Фрагмент листинга программы для ЭВМ этапов «Планирование  
производства», «Технологическая подготовка производства»  
и «Выпуск изделия»

```
L3_1 = Dense(2, activation='linear', name='L3_Dense_1')(combined_L2)
L3_1_M = Model(inputs=ANN_in, outputs=L3_1)
ANN4_PREDICTED = ANN4.predict(combined_L2_out); #print(ANN4_PREDICTED)
L3_1_W = L3_1_M.get_weights()
L3_1_W[7][0] = ANN4_PREDICTED[0][0]
L3_1_W[7][1] = ANN4_PREDICTED[0][0]
L3_1_M.set_weights(L3_1_W)
#print(L3_1_M.get_weights())
L3_1_M_out = L3_1_M.predict(NP_X)

L3_2 = Dense(3, activation='linear', name='L3_Dense_2')(combined_L2)
L3_2_M = Model(inputs=ANN_in, outputs=L3_2)
ANN5_PREDICTED = ANN5.predict(combined_L2_out); #print(ANN5_PREDICTED)
L3_2_W = L3_2_M.get_weights()
L3_2_W[7][0] = ANN4_PREDICTED[0][0]
L3_2_W[7][1] = ANN4_PREDICTED[0][0]
L3_2_W[7][2] = ANN4_PREDICTED[0][0]
L3_2_M.set_weights(L3_2_W)
#print(L3_2_M.get_weights())
L3_2_M_out = L3_2_M.predict(NP_X)

combined_L3 = Concatenate()([L3_2, L3_2])
combined_L3_out = np.concatenate((ANN4_PREDICTED.flatten(), ANN5_PREDICTED.flatten()))
#print(combined_L3_out)

ANN_out = Dense(1, activation='linear', name='ANN_OUT')(combined_L3)
ANN6_PREDICTED = ANN6.predict(combined_L3_out); #print(ANN6_PREDICTED)
MainModel = Model(inputs=ANN_in, outputs=ANN_out)
L4_W = MainModel.get_weights()
L4_W[9][0] = ANN6_PREDICTED[0][0]
MainModel.set_weights(L4_W)
#print(MainModel.get_weights())

MainModel.compile(loss = Loss, optimizer = Opt, metrics=['accuracy'])
history = MainModel.fit(NP_X, NP_Z, epochs=500) # 500
classes = MainModel.predict(NP_X)
#print(classes)
print(classes.round())
```

## Приложение Ж

### Программная реализация имитационной модели обмена информацией о ТД на изделие в виде ОИНС

Листинг фрагмента программного кода реализации архитектуры ОИНС

```
49 NP_X = np.array(X);
50 NP_Z = np.array(Z);
51
52
53 Opt = keras.optimizers.Adam(learning_rate=0.07)
54 Loss = 'mean_squared_error'
55
56
57 ANN_in_1 = Input(shape=(1,), name='ANN_IN_1')
58 ANN_in_2 = Input(shape=(1,), name='ANN_IN_2')
59 merge_IN = Concatenate()([ANN_in_1, ANN_in_2])
60
61 L1 = Dense(2, activation='linear', name='L1_Dense')(merge_IN)
62
63 L2_1_in = Input(shape=(1,), name='L2_1_IN')
64 merge_L2_1 = Concatenate()([L1, L2_1_in])
65 L2_1 = Dense(2, activation='linear', name='L2_Dense_1')(merge_L2_1)
66
67 L2_2_in = Input(shape=(1,), name='L2_2_IN')
68 merge_L2_2 = Concatenate()([L1, L2_2_in])
69 L2_2 = Dense(3, activation='linear', name='L2_Dense_2')(merge_L2_2)
70
71 combined_L2 = Concatenate()([L2_1, L2_2])
72
73 L3_1_in = Input(shape=(1,), name='L3_1_IN')
74 merge_L3_1 = Concatenate()([combined_L2, L3_1_in])
75 L3_1 = Dense(2, activation='linear', name='L3_Dense_1')(merge_L3_1)
76
77 L3_2_in = Input(shape=(1,), name='L3_2_IN')
78 merge_L3_2 = Concatenate()([combined_L2, L3_2_in])
79 L3_2 = Dense(2, activation='linear', name='L3_Dense_2')(merge_L3_2)
80
81 combined_L3 = Concatenate()([L3_1, L3_2])
82
83 L4_in = Input(shape=(1,), name='L4_IN')
84 merge_L4 = Concatenate()([combined_L3, L4_in])
85 ANN_out = Dense(1, activation='linear', name='L4_Dense')(merge_L4)
86
87
88 MainModel = Model(inputs=[ANN_in_1, ANN_in_2,
89                          L2_1_in, L2_2_in,
90                          L3_1_in, L3_2_in,
91                          L4_in],
92                  outputs=ANN_out)
93
94 MainModel.compile(loss = Loss, optimizer = Opt, metrics=['accuracy'])
```

Листинг фрагмента программного кода реализации управления  
тренировочными данными и визуализации результатов обучения ОИНС

```
97 ANN1_PREDICTED = ANN1.predict(NP_X);
98 ANN1_MEAN = np.array(np.mean(ANN1_PREDICTED, axis=1));
99
100 ANN2_PREDICTED = ANN2.predict(NP_X);
101 ANN2_MEAN = np.array(np.mean(ANN2_PREDICTED, axis=1));
102
103 ANN3_PREDICTED = ANN3.predict(NP_X);
104 ANN3_MEAN = np.array(np.mean(ANN3_PREDICTED, axis=1));
105
106 ANN4_PREDICTED = ANN4.predict(NP_X);
107 ANN4_MEAN = np.array(np.mean(ANN4_PREDICTED, axis=1));
108
109 ANN5_PREDICTED = ANN5.predict(NP_X);
110 ANN5_MEAN = np.array(np.mean(ANN5_PREDICTED, axis=1));
111
112 ANN6_PREDICTED = np.array(ANN6.predict(NP_X));
113
114
115 history = MainModel.fit([NP_X, ANN1_MEAN,
116 | ANN2_MEAN, ANN3_MEAN,
117 | ANN4_MEAN, ANN5_MEAN,
118 | ANN6_PREDICTED], NP_Z, epochs=500)
119
120
121 classes = MainModel.predict([NP_X, ANN1_MEAN,
122 | ANN2_MEAN, ANN3_MEAN,
123 | ANN4_MEAN, ANN5_MEAN,
124 | ANN6_PREDICTED])
125
126 print(classes.round())
127
128 plt.figure()
129 plt.subplot(1,2,1); plt.plot(history.history['loss'])
130 plt.title('loss'); plt.ylabel('Loss'); plt.xlabel('Epoch')
131
132 plt.subplot(1,2,2); plt.plot(history.history['accuracy'])
133 plt.title('accuracy'); plt.xlabel('Epoch')
134
135 plt.subplots_adjust(wspace=0.5, hspace=0.3)
136 plt.show()
```

## Приложение И

### Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2020611400

**Программная реализация нейронносетевой модели  
документооборота производственного предприятия**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования «Балтийский  
государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им.  
Д.Ф. Устинова» (RU)*

Автор: *Иванов Максим Викторович (RU)*




Заявка № 2020610449

Дата поступления 21 января 2020 г.

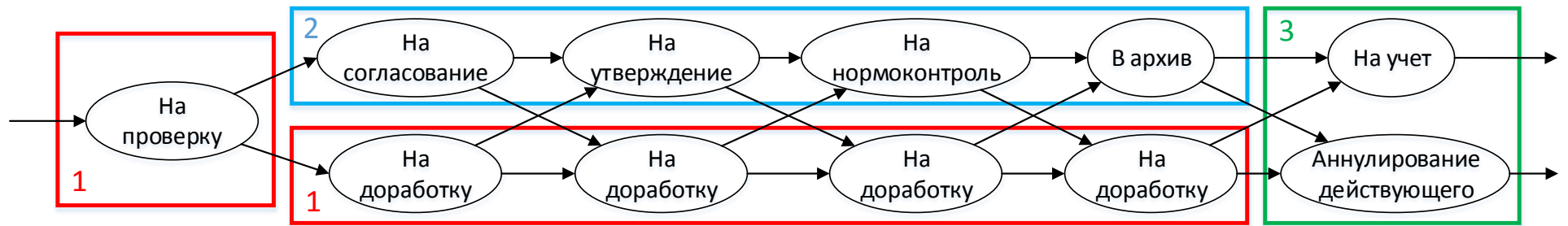
Дата государственной регистрации  
в Реестре программ для ЭВМ 30 января 2020 г.

Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

 Г.П. Ивлиев

## Приложение К

### Структурная нейросетевая модель традиционного маршрута согласования технической документации с выделенными группами элементов



## Приложение Л

# Акт о внедрении результатов диссертационной работы в ФГАОУ ВО ГУАП «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения»



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования  
«Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения»  
(ГУАП)

Санкт-Петербург № \_\_\_\_\_

УТВЕРЖДАЮ  
Ректор ГУАП,  
доктор экономических наук,  
профессор



Ю.А. Антохина  
МП  
2024г.

### АКТ О ВНЕДРЕНИИ

результатов диссертационной работы  
Иванова Максима Викторовича

«Модели и методики цифровизации систем менеджмента качества наукоемкого производства», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.22 Управление качеством продукции. Стандартизация. Организация производства

Комиссия в составе:

Председатель – заместитель директора Института ФПТИ, канд. техн. наук, доцент  
А.В. Чабаненко

Члены комиссии:

Милова В.М., доцент, канд. техн. наук, доцент кафедры инноватики и интегрированных систем качества;

Смирнова В.О., доцент, канд. техн. наук, доцент кафедры инноватики и интегрированных систем качества;

Щеников Я.А., доцент, канд. техн. наук, доцент кафедры инноватики и интегрированных систем качества;

составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы «Модели и методики цифровизации систем менеджмента качества наукоемкого производства», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук:

— методика создания нейросетевой модели исследуемого маршрута согласования технической документации в условиях появления несоответствий и оперативной реакции на них в среде автоматизированной системы, позволяющая организовать унифицированные связи между участниками технического документооборота в рамках цифровой системы менеджмента качества организации;

— имитационная модель обмена информацией о технической документации на изделие, как структурный элемент цифровой системы менеджмента качества организации, обеспечивающий функциональную связь между участниками технического документооборота приборостроительной организации, позволяющая описать систему технического документооборота в условиях реакции на возникающие в процессе производства изделий несоответствия с использованием элементов теории искусственных нейронных сетей, включая возможность идентификации неформализованных связей путем агрегирования отличительных особенностей входных данных с последующим их объединением и усложнением на каждом последующем слое искусственной нейронной сети;

— модель маршрута согласования технической документации с учетом возможностей цифровой системы менеджмента качества организации, полученная восстановлением статусов технической документации в среде автоматизированной системы на основе послойно распределенных элементов маршрута по этапам разработки технической документации в условиях появления несоответствий и их группировки по выполняемым функциям;

— методика улучшения качества процессов выявления несоответствий и технических рисков в системе технического документооборота, включая использование основных положений и содержания Всеобщего Управления Качеством (TQM), и ЕТА, QFD, FMEA, учитывающая наличие неформализованных связей в межпроцессном пространстве производственной системы,

использованы в деятельности Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения».

Материалы диссертационной работы Иванова Максима Викторовича были использованы в учебном процессе в дисциплинах «Основы технического анализа промышленной продукции», «Организация проектно-конструкторской деятельности», «Технология цифровых процессов в управлении организацией», «Основы технической

документации», «Управление процессами», «Методы и средства процессов проектирования», читаемых на кафедре №5 Инноватики и интегрированных систем качества для студентов направлений «Управление качеством», «Инноватика», «Стандартизация и метрология» уровня бакалавриата и магистратуры.

Председатель комиссии  
зам. директора института ФПТИ,  
канд. техн. наук, доцент



А.В. Чабаненко

Члены комиссии:

доцент кафедры  
инноватики и интегрированных систем качества  
канд. техн. наук, доцент



В.М. Милова

доцент кафедры  
инноватики и интегрированных систем качества  
канд. техн. наук, доцент



В.О. Смирнова

доцент кафедры  
инноватики и интегрированных систем качества  
канд. техн. наук, доцент



Я.А. Щеников



## Приложение М

# Акт внедрения научных результатов работы в ООО «Научно-производственное предприятие Волоконно-Оптического и Лазерного Оборудования»



Общество с ограниченной ответственностью  
"Научно-производственное предприятие  
Волоконно-Оптического и Лазерного Оборудования"



Генеральный директор  
ООО «НПП ВОЛО»  
В.М. Журба  
2024 г.

### АКТ О ВНЕДРЕНИИ

научных результатов работы Иванова Максима Викторовича

Комиссия в составе: генерального директора ООО «НПП ВОЛО» Журбы Владимира Михайловича (председателя комиссии) и членов: начальника научно-исследовательского отдела к.т.н. Пуйши Александра Эдуардовича, ведущего инженера-исследователя Чучина Виктора Юрьевича, составила настоящий акт в том, что научные результаты работы Иванова Максима Викторовича:

1. модель маршрута согласования технической документации с учетом возможностей цифровой системы менеджмента качества организации, полученная восстановлением статусов технической документации в среде автоматизированной системы на основе послыбно распределенных элементов маршрута по этапам разработки технической документации в условиях появления несоответствий и их группировки по выполняемым функциям;
2. методика создания нейросетевой модели исследуемого маршрута согласования технической документации в условиях появления несоответствий и оперативной реакции на них в среде автоматизированной системы, позволяющая организовать унифицированные связи между участниками технического документооборота в рамках цифровой системы менеджмента качества организации

внедрены в ООО «НПП ВОЛО» и используются в обеспечении качества процессов жизненного цикла конструкторской документации предприятия. Внедрение указанных результатов позволило сократить длительность согласования конструкторской документации на 17%, повысить производительность труда конструкторского отдела, а также снизить затраты на производстве.


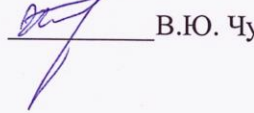
Председатель комиссии:  
генеральный директор



В.М. Журба

Члены комиссии:

начальник научно-исследовательского отдела, к.т.н.  
ведущий инженер-исследователь

А.Э. Пуйша

В.Ю. Чучин

## Приложение Н

### Акт о внедрении результатов научной работы в Учреждении науки «Инженерно-конструкторский центр сопровождения эксплуатации космической техники»

УТВЕРЖДАЮ

Директор Учреждения науки ИКЦ СЭКТ



доктор технических наук  
профессор

О.В. Краснов

2024 г.

о внедрении результатов диссертационного исследования  
Иванова Максима Викторовича

Комиссия в составе:

председателя комиссии – заместителя директора по НИОКР Быченка В.А.  
членов комиссии:

- начальника проектно-конструкторского отдела-старшего инженера Сергеева Д.С.,
- руководителя технологий неразрушающего контроля – старшего научного сотрудника Беркутова И.В.,

составила настоящий акт в том, что материалы диссертационной работы Иванова М.В. на тему: «Модели и методики цифровизации систем менеджмента качества наукоемкого производства» были использованы в Учреждении науки ИКЦ СЭКТ при модернизации процессов согласования технологической документации при проектировании изделий гражданской продукции.

При этом были реализованы следующие результаты диссертационной работы:

- имитационная модель обмена информацией о технической документации на изделие, как структурный элемент цифровой системы менеджмента качества организации, обеспечивающий функциональную связь между участниками технического документооборота приборостроительной организации, позволяющая описать систему технического документооборота в условиях реакции на возникающие в процессе производства изделий несоответствия с использованием элементов теории искусственных нейронных сетей, включая возможность идентификации неформализованных связей путем агрегирования отличительных особенностей входных данных с последующим их объединением и усложнением на каждом последующем слое искусственной нейронной сети;
- методика улучшения качества процессов выявления несоответствий и технических рисков в системе технического документооборота, включая использование основных положений и содержания Всеобщего Управления Качеством (TQM), и ETA, QFD, FMEA, учитывающая наличие

неформализованных связей в межпроцессном пространстве производственной системы.

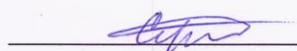
Использование указанных результатов диссертационной работы позволило снизить затраты на производство на 7-9%, а также повысить производительность труда технологического отдела на 4-5% за счет сокращения на 16% жизненного цикла технологической документации.

Председатель комиссии:  
кандидат технических наук



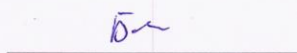
В.А. Быченко

Члены комиссии:  
кандидат технических наук



Д.С. Сергеев

кандидат технических наук



И.В. Беркутов

## Приложение П

### Акт о внедрении научных результатов работы в ООО «НИИ «Масштаб»

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель генерального директора  
АО «НИИ «Масштаб» по научной работе  
кандидат технических наук



А.Г. Фортинский

«07» ноября 2024 года

Акт

внедрения в АО «НИИ «Масштаб» научных результатов диссертационной работы

Иванова Максима Викторовича:


- методика улучшения качества процессов выявления несоответствий и технических рисков в системе технического документооборота, включая использование основных положений и содержания Всеобщего Управления Качеством (TQM), и ETA, QFD, FMEA, учитывающая наличие неформализованных связей в межпроцессном пространстве производственной системы;
- методика создания нейросетевой модели исследуемого маршрута согласования технической документации в условиях появления несоответствий и оперативной реакции на них в среде автоматизированной системы, позволяющая организовать унифицированные связи между участниками технического документооборота в рамках цифровой системы менеджмента качества организации.

Комиссия в составе: председателя комиссии советника генерального директора доктора технических наук, кандидата военных наук, доцента Билятдинова К.З. и членов комиссии начальника научно-системного центра Гагарина С.П. и начальника научно-технического отдела Хрусталева Е.В. в период с 01.09.2024 по 01.11.2024 провела проверку реализации научных результатов диссертационной работы Иванова М.В. и установила: внедрение указанных результатов позволили повысить производительность труда технологического отдела на 6% за счет сокращения на 22% жизненного цикла технологической документации сквозного производства, реализуемого на нескольких производственных площадках предприятия, а также добиться снижения затрат на производство изделий гражданской продукции на 11-13%.

Научные результаты диссертационной работы введены в состав системы менеджмента качества организации в качестве рекомендаций сотрудникам по повышению качества продукции и применены при разработке маршрута согласования технологической документации в автоматизированной системе организации.

Председатель комиссии:

Советник генерального директора АО «НИИ «Масштаб»

доктор технических наук, кандидат военных наук, доцент  К.З. Билятдинов

Члены комиссии:

Начальник научно-системного центра

Начальник научно-технического отдела

«07» ноября 2024 года



С.П. Гагарин

Е.В. Хрусталева