

На правах рукописи



Иванов Максим Викторович

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

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

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург
2025

Работа выполнена на кафедре инноватики и интегрированных систем качества федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения».

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент
Фролова Елена Александровна

Официальные оппоненты: **Ивахненко Александр Геннадьевич**,
доктор технических наук, профессор,
федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования «Юго-Западный
государственный университет», профессор кафедры
машиностроительных технологий и оборудования

Щеглов Дмитрий Константинович,
кандидат технических наук, доцент, акционерное общество
«Северо-Западный региональный центр Концерна ВКО
«Алмаз-Антей» - Обуховский завод», научный
руководитель расчетно-исследовательского отдела

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский
государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»
им. В.И. Ульянова (Ленина)», 197022, г. Санкт-Петербург,
ул. Профессора Попова, д.5, литера Ф

Защита состоится «25» марта 2025 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета 24.2.384.02 при федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения», расположенному по адресу: 190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д.67, литера А.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» по адресу: 190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д.67, литера А и на сайте университета <http://guar.ru/dissov>.

Автореферат разослан 11 февраля 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.384.02,
кандидат технических наук, доцент



Назаревич С.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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., Бенджио 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 пп. 4, 20, 22, 25 паспорта специальности 2.5.22 – «Управление качеством продукции. Стандартизация. Организация производства».

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, позволяющая 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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении объяснена актуальность темы диссертации, сформулирована цель и задачи, определены объект, предмет и методы их исследования, раскрыты достоверность научного исследования, его научная новизна и практическая значимость, апробация и публикации по проведенному исследованию, перечислены основные положения, выносимые на защиту, личный вклад автора в проведенном исследовании, публикации по теме исследования, структура и объем диссертации.

В первом разделе диссертации рассмотрены процессы производства наукоемкой продукции приборостроительной организации, проведено исследование причинно-следственных связей возникновения несоответствий и технических рисков в системе ТДО. Выявлены причины возникновения несоответствий в системе ТДО предприятия, использующего средства АС при согласовании ТД в электронном виде на основе использования инструментов управления качеством FMEA, ETA и QFD: отсутствие материалов и покупных комплектующих изделий, указанных в ТД, превышение длительности согласования ТД, вызванные неоперативным обменом информацией об изделии между проектными и производственными подразделениями организации. 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, учитывающая наличие неформализованных связей в межпроцессном пространстве производственной системы.

СМК представляет собой цикл, в котором ТДО осуществляет актуализацию, обновление, изъятие и передачу в производство технической документации (ТД), необходимой для реализации научно-исследовательских и опытно-конструкторских процессов разработки изделий единичного и мелкосерийного производства. Процессы СМК осуществляются с применением АС управления жизненным циклом продукции и регламентируются нормативно-технической документацией.

В состав жизненного цикла производства входят процессы ТДО, в которых могут возникать несоответствия, инициирующие группу рисков технического и управленческого свойства, порождают противоречие в плане обеспечения единого и непрерывного (в соответствии с ГОСТ Р ИСО 15489-1) источника информации об изделии между этапами проектирования и производства (рис.1).

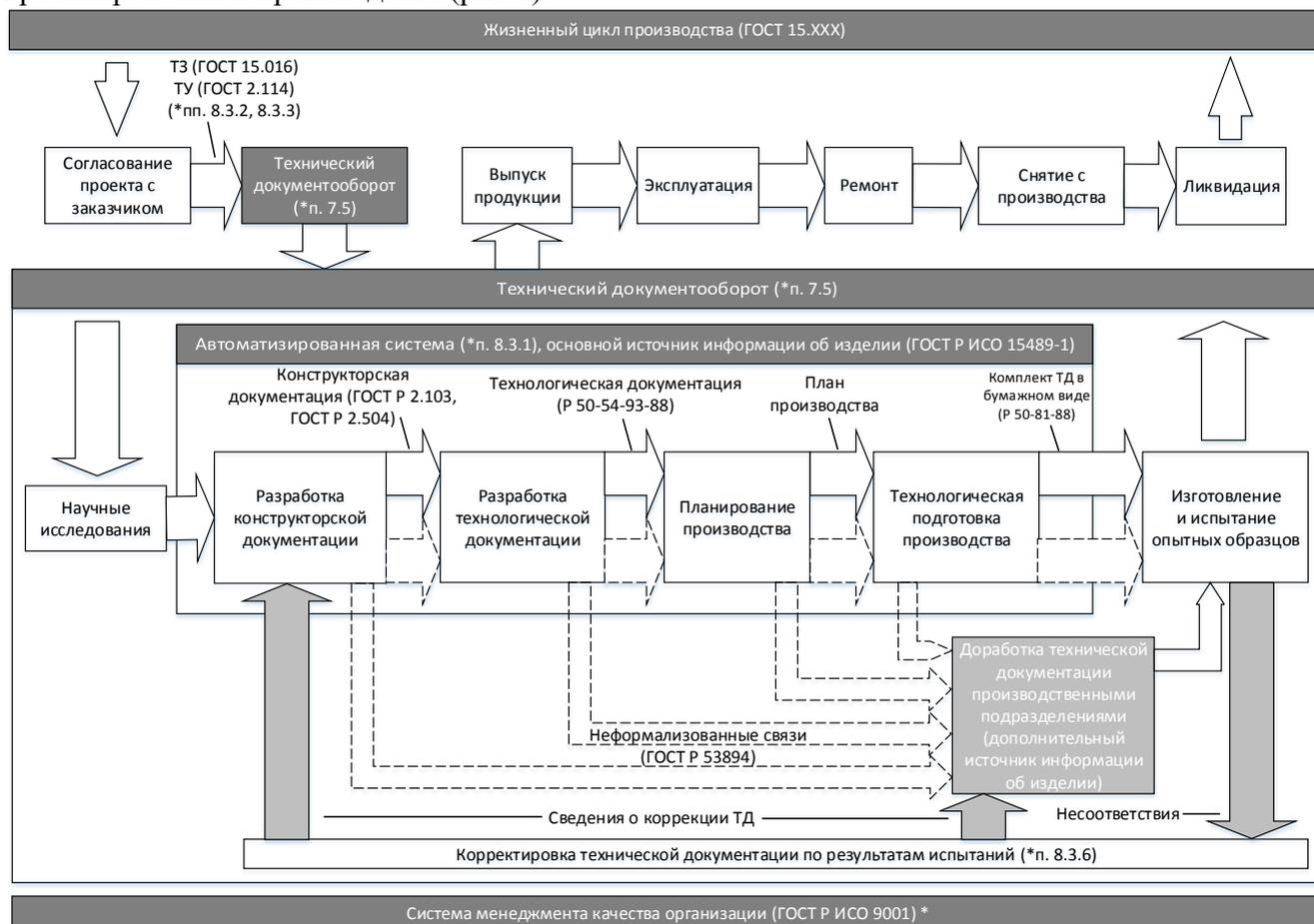


Рисунок 1 – Технический документооборот в составе жизненного цикла производства

На качество конечных результатов и на количество технических и управленческих рисков оказывают влияние неформализованные связи в межпроцессном пространстве ТДО, представляющие собой информационные каналы между участниками процесса разработки изделий, не учтенные СМК организации при проектировании системы, формируя полную информацию об изделии.

Исследование причинно-следственных связей рисков, связанных с процессами создания ТД и ее передачи в производство на основе FMEA-и ЕТА-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 организации, вызванного превышением длительности согласования ТД.

Результаты QFD-анализа 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.

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, согласно которой выбраны показатели результативности процессов ТДО, представленные в таблице 1.

Таблица 1 – 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, n - количество утвержденных ТД за рассматриваемый период	Эффективность затраченного времени, Еу-2-S	$L < 1 \text{ мес.}$ – не требуются улучшения; $1 \text{ мес.} \leq L < 2 \text{ мес.}$ – требуются предупреждающие действия; $L \geq 2 \text{ мес.}$ – требуются корректирующие действия.
2	Доля утвержденной ТД	$A = \frac{n}{n_{\text{общ}}}$	n - количество утвержденных ТД за рассматриваемый период, $n_{\text{общ}}$ - общее количество ТД за рассматриваемый период	Выполнение задачи, Ef-1-G	$A > 90\%$ – не требуются улучшения; $60\% < A \leq 90\%$ – требуются предупреждающие действия; $A < 60\%$ – 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, n - количество утвержденных ТД за рассматриваемый период	Задачи с ошибками, Ef-4-G	$E < 10\%$ – не требуются улучшения; $10\% \leq E < 20\%$ – требуются предупреждающие действия; $E \geq 20\%$ – требуются корректирующие действия

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

$$Q_i = \frac{p - p_{\text{баз}}}{p_{\text{баз}}}, \quad (1)$$

где $p_{\text{баз}}$ и p - значения показателей эффективности или 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:

$$Q_{\text{ком}} = -\frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{\alpha_i}{Q_i}}, \quad (2)$$

где α_i - весовой коэффициент частного показателя качества, Q_i - частный показатель качества, рассчитанный по формуле (4).

Для оценки результативности процессов ТДО требуется формирование количественных критериев, согласно требованиям СМК организации в области документооборота в бумажном виде (таб.2).

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 представлены несколькими видами: конструкторская

документация; технологическая документация; сквозная технологическая документация (разрабатываемая несколькими производственными площадками организации).

Таблица 2 – 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%

В соответствии с выбранной моделью качества, методика улучшения качества процессов ТДО включает в себя:

- контроль состояния процессов ТДО на основе значений показателей результативности в соответствии с критериями, регламентируемыми СМК организации;
- 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;
- 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.

Расчет показателей результативности процессов ТДО осуществляется в соответствии с выражениями, представленными в таблице 1.

Результаты расчета показателей результативности процессов ТДО до (t_1) и после (t_2) модернизации, а также весовых коэффициентов α_i на их основе, представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Значения весовых коэффициентов α_i для итогов расчета показателей результативности процессов ТДО до (t_1) и после (t_2) модернизации

Показатель результативности процессов ТДО, единица измерения	t_1	t_2	α_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		

Значения частных показателей качества Q_i рассчитаны по формуле (1) и представлены в таблице 4.

Таблица 4 – 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	α_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

* $p_{баз}$ – значение показателя результативности до внедрения разработки; p – значение показателя результативности после внедрения разработки; Q_i – значение частного показателя качества по формуле (1); α_i – весовой коэффициент частного показателя качества.

Значение комплексного показателя качества рассчитан по формуле (2):

$$Q_{комп} = 0,23$$

Разработанная методика улучшения качества процессов выявления несоответствий и технических рисков в системе ТДО позволяет учитывать множественный возврат ТД на доработку в процессе согласования в условиях отсутствия цифровой связи с производством, отразить влияние возникновения несоответствий на процессы ТДО, а также обнаруживать проблемы обработки информации об изделии в подсистемах проектно-производственного цикла ТДО и выявлять в них подлежащие улучшению структурные элементы на основе учета неформализованных связей в межпроцессном пространстве производственной системы.

Во втором разделе проведены обзор и критическая оценка подходов функционального и имитационного моделирования, сравнение их возможностей и ограничений при использовании. Предложен подход к моделированию процессов ТДО предприятия с использованием элементов теории ИНС. Разработана имитационная модель для выявления неформализованных связей и обмена информацией между участниками ТДО наукоемкого производства с применением элементов теории ИНС.

Искусственные нейронные сети являются одним из инструментов реализации цифрового производства в рамках концепции “Индустрия 4.0”. Их отличительными особенностями являются механизм адаптации к изменениям внешних и внутренних свойств, самоорганизация и способность к обучению.

Рассматривая совокупность подходов IDEF0, имитационного моделирования и ИНС выявлены общие черты как визуально, так и с функциональной точки зрения (рис.2).

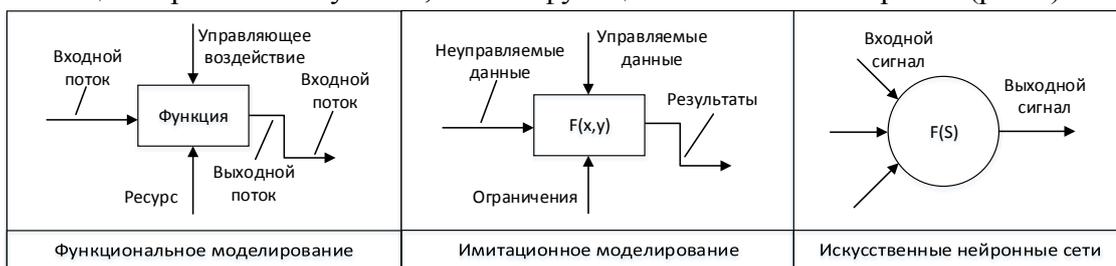


Рисунок 2 – Общие черты подходов IDEF0, имитационного моделирования и ИНС

Таким образом, возможно применение ИНС в задачах имитационного моделирования без существенных ограничений для построения рассматриваемой исследователем модели.

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. Нейронный элемент преобразует взвешенную сумму входных сигналов:

$$y = F\left(\sum_{i=1}^N w_i x_i\right) = F(WX), \quad (3)$$

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 — функция-преобразователь (или функция активации нейрона).

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

$$Y = F_M(F_{M-1}(\dots(F_1(XW_1)W_2)\dots)W_{M-1})W_M), \quad (4)$$

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.

Условно процессы ТДО наукоемкого производства возможно разделить на следующие последовательные этапы подготовки ТД:

- проектирование (определение компонентов изделия, их свойств и функций);
- конструирование (определение формы, размеров и взаимного расположения элементов модели изделия);
- разработка технологии (разработка и определение методов, процессов и материалов, участвующих в производстве изделия);
- планирование производства (определение ресурсных и временных потребностей);
- технологическая подготовка производства (определение трудоемкости производства изделия и распределение производственных мощностей для организации процесса создания изделий);
- выпуск изделия (завершающий этап, включающий в себя испытания и отгрузку изделия).

Представление информационных связей в виде нейронных элементов, содержащих агрегированные признаки информации об изделии, выраженной в ТД, позволяет создать ИНС-модели различных этапов обработки ТД, являющихся многослойными персептронами прямого распространения, обучение которых осуществляется с помощью алгоритма обратного распространения ошибки, имитирующего влияние несоответствий на процесс обработки информации об изделии в виде ТД (рис.3).

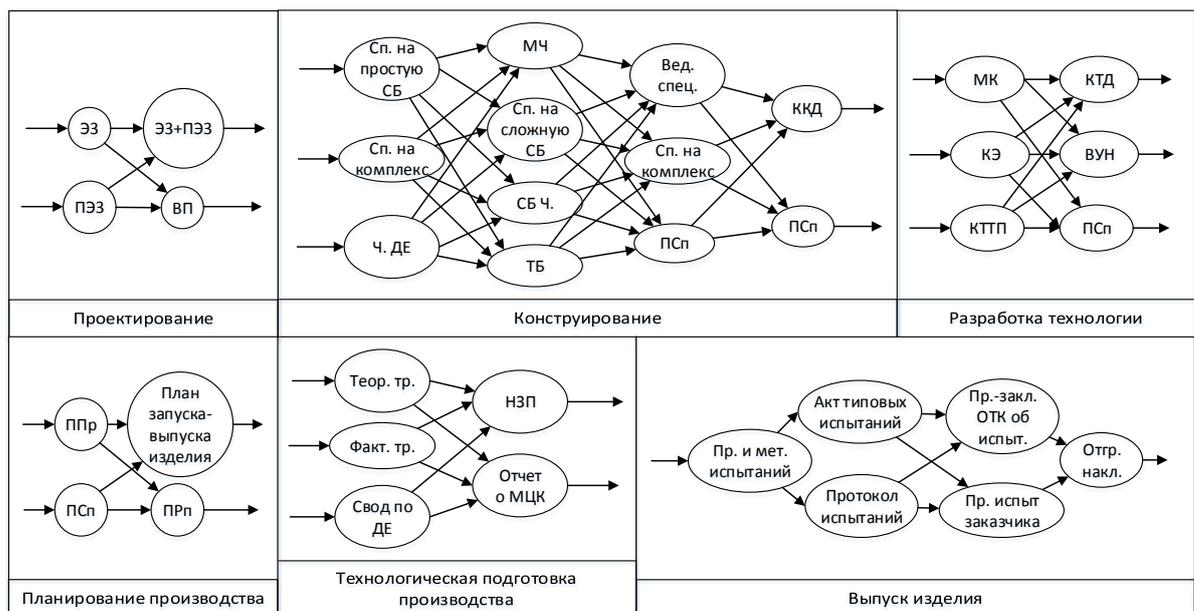


Рисунок 3 – Этапы подготовки ТД, представленные в виде ИНС-моделей

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 (таб.5).

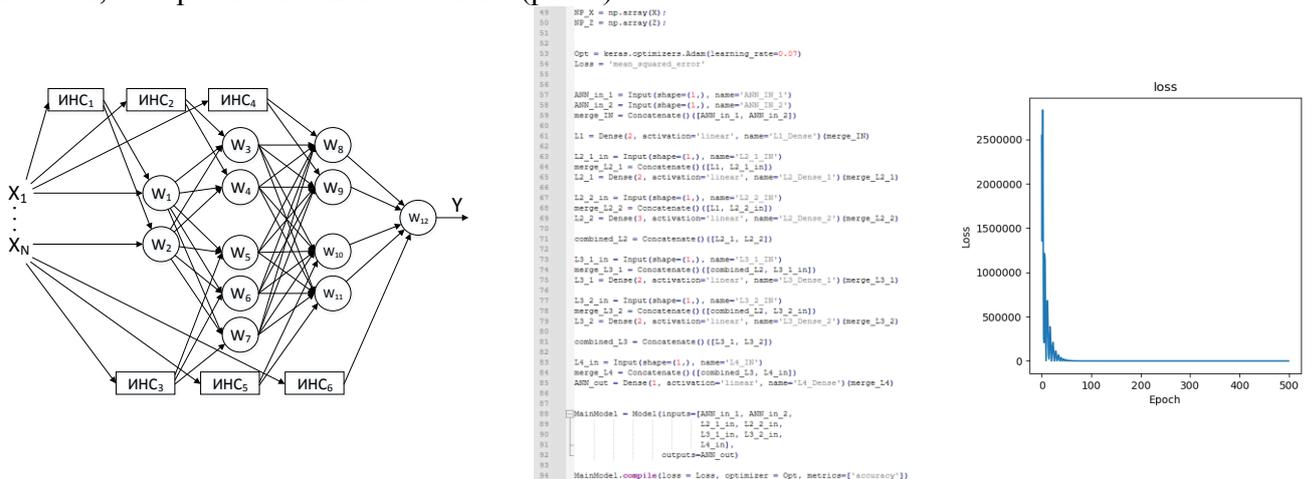
Таблица 5 – Значения степени приоритета обработки ТД различных видов

Наименование риска	ТД														
	ЭЗ	ПЭЗ	ТБ	ВП	Ч.ДЕ	Ч.СБ	МЧ	Сп.п.СБ	СП.с.СБ	СП.К	МК	КТТП	КЭ	ВУН	ПСп
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.

Для оценки способности ИНС-моделей устанавливать соответствие входной и выходной информации об изделии, выраженных соответственно во входной и выходной ТД на каждом этапе их обработки, используется F-мера. В связи с наличием у ИНС-моделей нескольких выходов со множеством компонентов берутся усредненные значения последовательно по каждому фактору.

Для получения имитационной модели обмена информацией о ТД между участниками ТДО необходимо объединить ИНС-модели различных этапов обработки ТД в систему, поддерживающую связь подмоделей с внешней средой без потери свойств распространяемых сигналов, которая также является ИНС (рис.4).



а) ИНС-модель

б) Фрагмент программного кода реализации

в) График зависимости значений функции потерь от пройденной эпохи обучения

Рисунок 4 – Имитационная модель обмена информацией о ТД между участниками ТДО

Предложенная имитационная модель обмена информацией о ТД на изделие позволяет учитывать каналы связи между участниками ТДО, не предусмотренные СМК организации, путем агрегирования отличительных особенностей входных данных об изделии по видам используемой в организации ТД с их объединением и усложнением на последующих слоях ИНС, а также выявлять внутренние процессы ТДО, имеющие проблемы при обработке информации об изделии и требующие модернизации.

В третьем разделе рассмотрена система ТДО в части маршрута согласования ТД, используемого в среде АС предприятия, выполнена его модернизация с применением элементов теории ИНС. Разработана методика создания структурной ИНС-модели исследуемого маршрута согласования ТД в среде АС для последующей разработки проекта

стандарта для масштабирования полученного опыта. Разработана модель маршрута согласования ТД с учетом возможностей среды АС в рамках цифровой СМК организации.

Маршрут согласования ТД в среде АС предприятия является частью цифровой СМК организации и представляет собой цепь последовательно соединенных статусов ТД и переходов между ними. Переход между статусами возможен при наличии всех необходимых электронных цифровых подписей лиц, согласующих ТД на каждом конкретном переходе. 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. Традиционный маршрут согласования ТД в среде АС предприятия и длительность согласования ТД по его статусам представлены соответственно на рисунке 5 а,б.

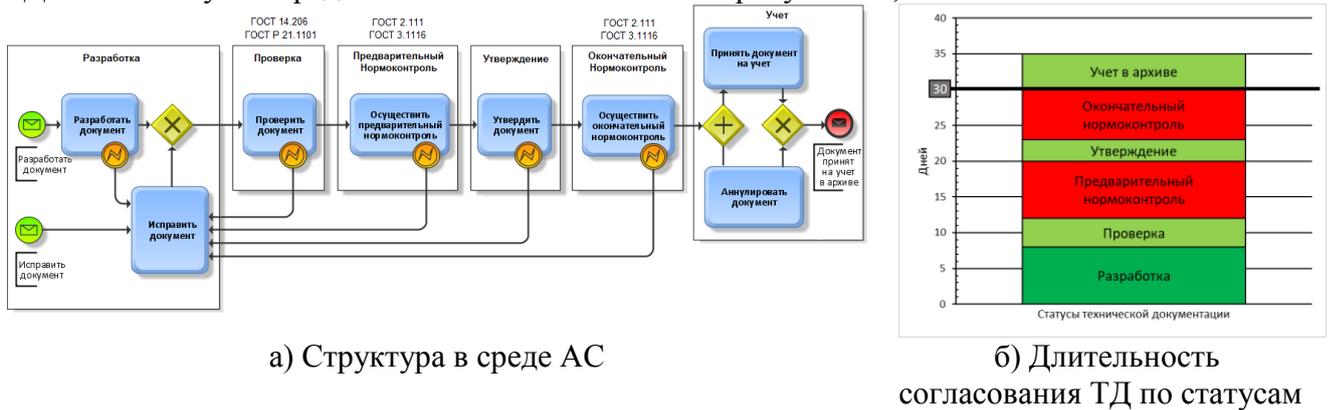


Рисунок 5 – Традиционный маршрут согласования ТД в среде АС организации

На основе анализа результатов работы имитационной модели ТДО разработана методика, которая заключается в преобразовании элементов и внутренних связей традиционного маршрута согласования ТД во внутренние связи и элементы замещающей структурной нейросетевой модели соответственно (рис.6), в которой возможно выделить группы однотипных элементов (рис.7):

- элементы, возвращающие ТД в начало маршрута (группа 1);
- элементы промежуточной обработки ТД (группа 2);
- элементы окончательной обработки ТД (группа 3).

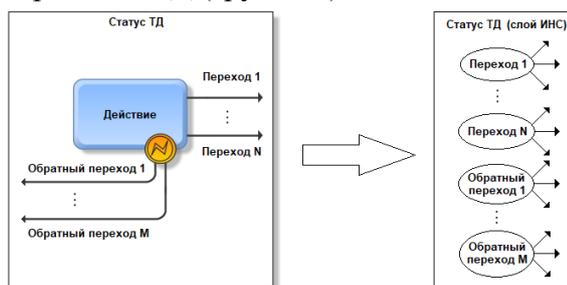


Рисунок 6 – Преобразование статуса ТД в слой ИНС-модели маршрута согласования ТД

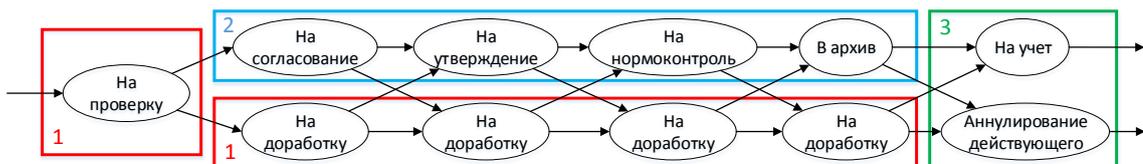


Рисунок 7 – ИНС-модель традиционного маршрута согласования ТД с выделенными группами элементов для улучшения

Разработанная методика создания ИНС-модели исследуемого маршрута согласования ТД в условиях появления несоответствий и оперативной реакции на них в среде АС позволяет распределить группы элементов по слоям ИНС и реализует процесс унификации структуры

маршрута согласования ТД на основе замены множества элементов одним, выполняющим аналогичную функцию, что позволяет сократить количество структурных элементов для реализации процесса ТДО (рис.8).

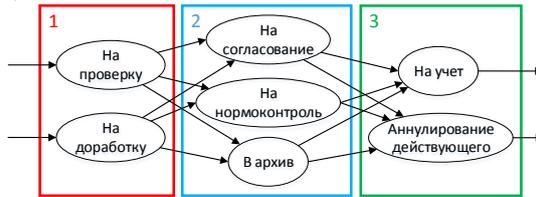
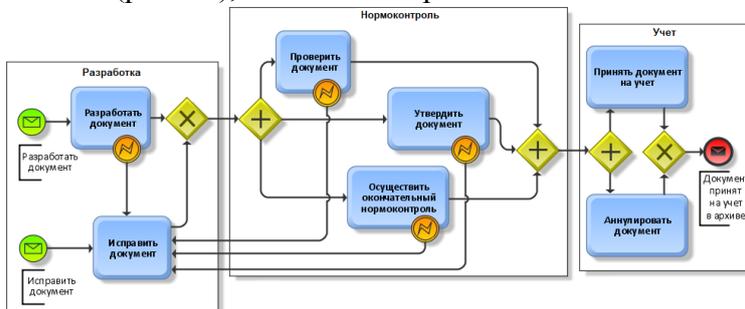


Рисунок 8 – Модернизированная ИНС-модель маршрута согласования ТД

Каждый слой полученной модели возможно восстановить в виде отдельного статуса согласования ТД с указанием лиц, участвующих в подписании ТД в соответствии с требованиями цифровой СМК организации, что позволяет создать модернизированный маршрут согласования ТД, отличающийся от исходного меньшим количеством статусов с возможностью параллельной процедуры подписания, что достигается веерной рассылкой ТД абонентам (рис.9 а), позволяя сократить длительность согласования ТД (рис.9 б).



а) Структура в среде АС



б) Длительность согласования ТД по статусам

Рисунок 9 – Модернизированный маршрут согласования ТД

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

Используя возможности среды АС, предложенная модель маршрута согласования ТД позволяет развить цифровую СМК организации путем организации унифицированных связей между участниками ТДО на основе учета скрытых связей между элементами маршрута, повышая результативность согласования ТД путем уменьшения количества статусов ТД.

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 РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в ведущих рецензируемых научных изданиях

1. *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.
2. *Иванов М.В.* Методика улучшения качества маршрута технического документооборота / М.В. Иванов // Компетентность. 2023. № 6. С. 37-40.
3. *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.
4. *Иванов М.В.* Исследование особенностей цифровизации организаций, выпускающих изделия приборостроения, с использованием импортозамещающего программного обеспечения / М.В. Иванов, С.А. Афанасенков // Наука и бизнес: пути развития. 2021. №4(118). С. 72-77.
5. *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.
6. *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.
7. *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.

Статьи в рецензируемых журналах, входящих в системы цитирования Web of Science и Scopus

8. *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. Afanasev, E.A. Skorniakova // Journal of Physics: Conference Series 2021, 1889(2), 022070.

9. *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.

Статьи в других изданиях и материалы конференций

10. *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.

11. *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.

12. *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.

13. *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.

14. *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.

15. *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 // Материалы III Международного форума «Метрологическое обеспечение инновационных технологий». 2021. С. 75-76.

16. *Иванов М.В.* Разработка нейронносетевой модели документооборота для организации тренажерного комплекса производственного предприятия / М.В. Иванов // Материалы VI Международной научно-практической конференции (школы-семинара) молодых ученых «Прикладная математика и информатика: современные исследования в области естественных и технических наук». 2020. С. 261-265.

17. *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». 2017. С.222-223.

18. *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.

Авторские свидетельства, патенты, информационные карты, алгоритмы

19. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ: «Программная реализация нейронносетевой модели документооборота производственного предприятия» / М.В. Иванов // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2020611400, 30.01.2020. Заявка № 2020610449 от 21.01.2020.