

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
АЭРОКОСМИЧЕСКОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ»

На правах рукописи



Петрушевская Анастасия Андреевна

МОДЕЛИ И МЕТОДИКИ ОРГАНИЗАЦИИ ЦИФРОВОГО
ПРОИЗВОДСТВА РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ ИЗДЕЛИЙ НА ОСНОВЕ
ВНЕДРЕНИЯ МЕЖМАШИННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

Специальность 05.02.22 – Организация производства
(радиоэлектроника и приборостроение)

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Коршунов Геннадий Иванович

Санкт-Петербург – 2020

Оглавление

Введение.....	4
1 Текущее состояние и перспективы развития интеграции технологических инноваций в производственные процессы монтажа радиоэлектронных изделий	18
1.1 Общая характеристика и основные особенности внедрения элементов концепции «Индустрия 4.0» на цифровом производстве	18
1.2 Анализ текущей ситуации и выявление направлений совершенствования организации радиоэлектронного производства на основе оценки патентной активности.....	25
1.3 Обоснование направления совершенствования производственного процесса радиоэлектронных изделий за счет внедрения киберфизических систем	34
1.4 Особенности организации технологического процесса изготовления радиоэлектроники в условиях внедрения цифрового производства	46
1.5 Результаты и выводы по главе 1	60
2 Разработка моделей и методики повышения результативности технологического процесса изготовления радиоэлектронных изделий в условиях цифровизации производства	61
2.1 Детализация этапов процесса автоматического монтажа радиоэлектроники за счет внедрения технологических инноваций с использованием аппарата марковских цепей.....	61
2.2 Модель повышения вероятности выхода годных изделий радиоэлектроники в технологическом процессе при заданных требуемых значениях.....	71
2.3 Математическая модель структуризации и типизации производственного процесса на основе оценки вероятностей переходов состояний технологической линии при монтаже радиоэлектронных изделий.....	84

2.4 Методика планирования производственного процесса монтажа радиоэлектронных изделий при их поэтапном совершенствовании, формирующая критериальную оценку состояния работоспособности производственной линии	98
2.5 Результаты и выводы по главе 2	113
3 Модели и методика обеспечения результативности технологических процессов изготовления радиоэлектронных изделий на основе поэтапного внедрения технологических инноваций	116
3.1 Функционирование технологической линии автоматического монтажа радиоэлектронных изделий при использовании киберфизических систем ..	116
3.2 Методика мониторинга процессов монтажа радиоэлектронных изделий и внедрения технологии межмашинного интеллектуального взаимодействия компонентов оборудования.....	121
3.3 Модель организации производственного процесса монтажа радиоэлектронных изделий на основе многопараметрических нечетких регуляторов с возможностью формирования базы данных	156
3.4 Экспериментальная модель производственной цифровой линии с применением программного пакета Plant Simulation Siemens	177
3.5 Выводы и результаты по главе 3	186
Заключение	189
Список сокращений и условных обозначений.....	193
Список литературы	195
Приложение А. Акт об использовании от ООО «ПАНТЕС груп»	207
Приложение Б. Акт об использовании от ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения»	209
Приложение В. Акт об использовании от ООО ПФ «ЭЛКОН».....	211
Приложение Г. Акт об использовании от ООО «Альт-Комплект»	213
Приложение Д. Акт об использовании от ООО «РБС:Консалтинг»	215
Приложение Е. Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ и баз данных.....	217

Введение

Реализация концепции цифровизации производства на предприятиях отечественной промышленности неизбежно ведет к взаимодействию современных интернет-технологий с производственным оборудованием и средствами автоматизированного управления производственными процессами. Тенденции интеллектуализации производств характерны для различных отраслей промышленности и, в особенности, при изготовлении радиоэлектроники.

Существующие технологии автоматического монтажа печатных плат непрерывно развиваются, однако базовый состав оборудования технологической линии сохраняется. Тенденции микроминиатюризации электронной компонентной базы диктуют повышенные требования, предъявляемые как к производственному оборудованию, так и к технологическим процессам. Одной из наиболее важных проблем радиоэлектронной промышленности является широкое применение импортной электронной компонентной базы в отечественной радиоэлектронной аппаратуре. Повышение результативности производственных процессов достигается за счет модернизации производственных мощностей, в то же время велик риск неопределённости в процессах управления, возникающий по причине отсутствия учета взаимного влияния этапов производственной линии. Обеспечение результативности производственного процесса достигается совершенствованием характеристик оборудования, однако влияние «человеческого фактора» и отсутствие учета взаимного влияния частей технологической линии остаются факторами неопределенности производственного процесса.

Обеспечение результативности технологического процесса изготовления радиоэлектронной продукции возможно как за счет модернизации технологического оборудования, так и за счет поэтапной организации цифрового производства, усовершенствования процессов формирования и принятия управленческих решений путем разработки

адаптивного программного комплекса (далее – ПК). Актуальность совершенствования существующих и создания перспективных средств управления процессами изготовления радиоэлектроники обусловлено включением направления систем автоматизированного и интеллектуального управления в стратегию развития электронной промышленности Российской Федерации на период до 2030 года, утвержденную распоряжением правительства Российской Федерации от 17 января 2020 года №20-р. Базовой задачей стратегии является создание конкурентоспособной отрасли на основе развития научно-технического и кадрового потенциала, оптимизации и технического перевооружения производственных мощностей, создания и освоения новых промышленных технологий, а также совершенствования нормативно-правовой базы для удовлетворения потребностей в современной электронной продукции [1].

Отрасль играет важную роль в достижении национальных целей и стратегических задач развития Российской Федерации, установленных Указом Президента Российской Федерации от 7 мая 2018 г. № 204 «О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года». Существенный вклад радиоэлектронная отрасль вносит в ускорение технологического развития Российской Федерации, увеличение количества организаций, осуществляющих технологические инновации, а также в обеспечение ускоренного внедрения цифровых технологий в экономике и социальной сфере [2].

Одним из приоритетов научно-технологического развития Российской Федерации, в соответствии со «Стратегией научно-технологического развития Российской Федерации», утвержденной указом Президента Российской Федерации от 01.12.2016 г. № 642, является переход к передовым цифровым, интеллектуальным производственным технологиям, роботизированным системам, новым материалам и способам конструирования, создание систем обработки больших объемов данных, машинного обучения и искусственного интеллекта [3].

Актуальной задачей является повышение результативности производства радиоэлектроники путем внедрения элементов концепции «Индустрия 4.0» и сокращения влияния человеческого фактора при функционировании производственной линии. Достижение необходимого уровня результативности технологического процесса и надежности производственного оборудования невозможно без решения задач контроля, мониторинга, оценки вероятностей переходов состояний производственного процесса. Для этого требуется корректное отображение статистической информации в интеллектуальных системах, созданных на основе элементов концепции «Индустрия 4.0».

В качестве одних из наиболее значимых направлений радиоэлектронной отрасли для импортозамещения в стратегии отмечены системы автоматизированного и интеллектуального управления, что подтверждает актуальность проводимых исследований [4].

Действительно, большинство предприятий на рынке активно инвестируют в создание «умного производства». Изменения касаются практически всех аспектов работы: увеличиваются производственные мощности, устанавливается современное оборудование, автоматизируются процессы управления производством и качеством продукции. Перспективы развития промышленного производства поддерживаются на государственном уровне, поскольку потребность в современной электронике будет только увеличиваться. Так, технический комитет «Киберфизические системы» совместно со Всероссийским институтом сертификации при поддержке Министерства промышленности и торговли РФ 29.01.2020 г. представил на публичное обсуждение серию предварительных национальных стандартов в области «Умного производства» [4].

Разработка документов инициирована для формирования полноценной экосистемы нормативно-технического регулирования цифровой промышленности. Предлагаемые стандарты окажут существенное влияние на

ускоренную цифровизацию промышленного сектора, а также развитие рынка Технет Национальной технологической инициативы [5].

Перед радиоэлектронной промышленностью стоит актуальная задача повышения результативности производственного процесса с использованием методов и средств мониторинга и контроля качества технологических процессов изготовления радиоэлектроники. Растущие требования к качеству изделий радиоэлектроники, а также реализация политики импортозамещения влекут за собой необходимость разработки инновационных методов и моделей управления цифровыми производствами. Важнейшие функции большинства радиоэлектронных устройств и систем выполняются на основе программируемых электронных компонентов, расположенных на платах печатного монтажа.

В концепции «Индустрия 4.0» предусматривается объединение производственного оборудования с современными интернет-технологиями посредством автоматизации, направленной на организацию и контроль всей цепи создания стоимости на протяжении всего технологического цикла изготовления продукции.

Внедрение элементов концепции «Индустрия 4.0» и сокращение влияния «человеческого фактора» определяются задачами повышения результативности производства. Обеспечение результативности технологических процессов и повышение надежности производственного оборудования невозможны без решения задачи прогнозирования будущего состояния производственного процесса, достижение которой возможно при корректном отображении статистической информации в интеллектуальных автоматизированных системах, созданных на основе элементов концепции «Индустрия 4.0».

Концепция цифрового производства и киберфизических систем является атрибутом современного этапа инновационного развития. На сегодняшний день признаками цифрового производства, применяемыми отечественными предприятиями промышленности, являются: лазерные метки,

вычислительные сети, обработка данных и управление оборудованием по офлайн разработанным программам, развитая система серверов. Дальнейшее развитие предполагает постепенное наращивание «интернета вещей» и «облачных вычислений» онлайн.

Наиболее сложными задачами повышения результативности производства радиоэлектроники являются встраивание технологий в производственные системы, подготовка и переоборудование производственной базы для увеличения объемов и номенклатуры производимой продукции, повышения ее качества. Корректная организации производства с использованием дополнительных коммуникационных возможностей и локализации позволяет преобразовывать мехатронные системы в киберфизические. Для повышения результативности функционирования цифрового производства на основе внедрения технологических инноваций необходимо детализировать процессы изготовления продукции и подвергнуть ее анализу на всех этапах жизненного цикла: от этапа закупки комплектующих до отгрузки клиентам.

Постоянно возрастающие требования как к процессу изготовления радиоэлектроники на протяжении всего жизненного цикла, так и к качественным характеристикам готового изделия требуют прозрачности и детализации систем управления и организации производства в целом.

Решение задачи мониторинга производственных процессов за счет внедрения моделей и методик поэтапной организации цифрового производства позволяет оценить необходимость реализации полного комплекса мероприятий по контролю качества процессов изготовления электронной продукции, что подтверждает актуальность выбранной темы.

Степень научной разработанности темы. Вопросы организации производства получили развитие в работах Г.И. Коршунова, Е.Г. Семеновой, В.М. Балашова, А.В. Кивелева, А.В. Сидорина, З.М. Селивановой, Б.В. Гнеденко, В.К. Беляева, А.Д. Соколова, Ю.Б. Зубарева, М.Г. Миронова, Е.Ф. Розмировича, М.В. Радлевского.

Этапы развития организации производства в промышленности отражены в трудах М.И. Бухалкова, А.Н. Ильиченко, И.Н. Иванова, О.Г. Туровец, В.Б. Родионова, Н.И. Новицкого, О.В. Девяткиной, О.И. Волковой, Л.А. Одинцовой.

Способы проектирования систем цифрового управления и автоматизации производственных систем представлены в работах С.В. Богословского, В.Ф. Шишлакова, В.А. Фетисова, С.М. Вертешева, В.А. Коневцова, И.С. Павловского, В.П. Орлова, В.В. Вороновой, С.Ф. Чермошенцева, И.С. Ярлычева, Б.С. Падуна, Д.Д. Куликова, Е.И. Яблочникова, Н.А. Демкович.

Направления и перспективы развития концепции «Индустрия 4.0» рассмотрены в работах Армина Рота, Е.Б. Липкина, А.И. Боровкова, О.И. Клявина, В.М. Марусевой, В.П. Куприяновского, Ю.В. Куприяновской, Д.Е. Намиота, С.А. Синягова, В.А. Левенцова, А.Е. Радаева, Н.Н. Николаевского, В.И. Дрожжина, М.О. Иванова, А.Р. Ингеманссона, Ю.Ф. Тельнова, А.В. Данилова, В.А. Казакова, Д.А. Кузнецова, М.А. Чернышева, В.А. Овчинниковой, Ян Лю.

Вопросам обеспечения качества технических средств автоматизации, математических методов в теории надежности, увеличения процента выхода годных посвящены работы Е.Г. Семеновой, А.Г. Варжапетяна, Г.И. Коршунова, В.М. Миловой, Б.В. Гнеденко, В.К. Беляева, А.Д. Соколова.

Тенденции интеллектуализации и цифровизации ТП в определяющей степени проявляются в развитии исследований по росту мощности производства, анализу элементов концепции «Индустрия 4.0», обеспечению результативности производственного процесса, по разработке математических моделей, обеспечивающих интеллектуализацию производственного процесса, программного обеспечения (далее – ПО) для адаптивной реакции на возмущения и устойчивого формирования управляющих воздействий на исполнительные устройства. Известные результаты исследований в недостаточной степени обеспечивают решение

данных задач при организации цифрового производства радиоэлектроники, что подтверждает актуальность выбранной темы исследования.

Цель исследования заключается в повышении результативности процесса цифрового производства радиоэлектронных изделий на основе разработки моделей и методик поэтапного внедрения межмашинного взаимодействия.

Для достижения поставленной цели требуется решить следующие *научные задачи*:

1. Разработка математической модели структуризации и типизации производственного процесса на основе оценки вероятностей переходов состояний технологической линии при монтаже радиоэлектронных изделий.

2. Разработка методики планирования производственного процесса монтажа радиоэлектронных изделий при их поэтапном совершенствовании, формирующая критериальную оценку состояния работоспособности производственной линии.

3. Разработка методики мониторинга процессов монтажа радиоэлектронных изделий и внедрения технологии межмашинного интеллектуального взаимодействия компонентов оборудования.

4. Разработка модели организации производственного процесса монтажа радиоэлектронных изделий на основе многопараметрических нечетких регуляторов с возможностью формирования базы данных.

Объектом исследования являются технологические процессы при производстве радиоэлектронных изделий.

Предметом исследования являются модели и методики управления технологическими процессами цифрового производства радиоэлектронных изделий.

Методы исследования. Методы математического анализа, методы системного анализа, методы математического моделирования в средах Matlab, iThink, Tecnomatix Plant Simulation, Aris, RAM Commander, методы управления качеством, метод Design For Manufacturing.

На защиту выносятся следующие результаты исследования:

1. Математическая модель структуризации и типизации производственного процесса на основе оценки вероятностей переходов состояний технологической линии при монтаже радиоэлектронных изделий.

2. Методика планирования производственного процесса монтажа радиоэлектронных изделий при их поэтапном совершенствовании, формирующая критериальную оценку состояния работоспособности производственной линии.

3. Методика мониторинга процессов монтажа радиоэлектронных изделий и внедрения технологии межмашинного интеллектуального взаимодействия компонентов оборудования.

4. Модель организации производственного процесса монтажа радиоэлектронных изделий на основе многопараметрических нечетких регуляторов с возможностью формирования базы данных.

Научной новизной обладают следующие результаты исследования:

1. Математическая модель структуризации и типизации производственного процесса монтажа радиоэлектронных изделий, отличающаяся от существующих сокращением числа операций при вычислении вероятностей выпуска годных изделий и последующей корректировкой требований к минимальным вероятностям перехода состояний.

2. Методика планирования производственного процесса монтажа радиоэлектронных изделий при внедрении технологических инноваций, отличающаяся от известных проведением анализа параметров технологического процесса и формированием критериальной оценки работоспособности производственной линии.

3. Методика мониторинга монтажа радиоэлектронных изделий, отличающаяся от известных внедрением новых программно-аппаратных технологий межмашинного интеллектуального взаимодействия компонентов оборудования и адаптируемая в соответствии с характеристиками производственного процесса.

4. Модель организации производственного процесса монтажа радиоэлектронных изделий на основе многопараметрических нечетких регуляторов, отличающаяся от существующих процедурой принятия решений, реализованной в программной экспертной системе.

Практической значимостью обладают:

1. Внедрение математической модели повышения результативности монтажа радиоэлектронных изделий позволило уменьшить долю бракованной продукции с 2% до 0,5%.

2. Математическая модель производственного процесса монтажа радиоэлектронных изделий, обеспечивающая определение вероятностей выполнения технологических операций при заданных объемах производимой партии и интенсивности загрузки оборудования для формирования критериальной оценки с целью принятия решения об изменении заданных характеристик работы оборудования.

3. Методика мониторинга монтажа радиоэлектронных изделий и внедрения технологии межмашинного интеллектуального взаимодействия компонентов оборудования, обеспечивающая поэтапное уменьшения временных затрат на работу персонала от 1,2 до 3,5 раз за счет сокращения влияния человеческого фактора на технологический процесс.

4. Модель организации процесса автоматического монтажа изделий радиоэлектроники и принятия решений посредством применения многопараметрических нечетких регуляторов и базы данных, реализованных в программном комплексе управления.

5. Разработанные модели и методики использованы при обосновании технического проекта по проектированию линии автоматического монтажа изделий радиоэлектроники ООО ПФ «ЭЛКОН»

6. Семь разработанных и зарегистрированных в Роспатенте в 2018-2019 годах программ для ЭВМ, обеспечивающих практическую реализацию имитационного моделирования предложенных в диссертационном исследовании методик. Три созданных и зарегистрированных в Роспатенте в

2018-2019 годах базы данных, аккумулирующих данные и знания, необходимые для практической реализации разработанных в диссертационном исследовании моделей и методик.

Апробация работы. Основные результаты исследования докладывались и обсуждались на Международной конференции «Conference on Applied Physics, Information Technologies and Engineering» APITECH-2019 (г. Красноярск, 2019 г.), Международной конференции «Conference on Information Technologies in Business and Production» ITBI-2019 (Новосибирск, 2019 г.), Шестой международной научной конференции «Передовые инновационные разработки. Перспективы и опыт использования, проблемы внедрения в производство» (Казань, 2019 г.), Тринадцатых Всероссийских научных чтениях «Научно-технические проблемы в промышленности: будущее сильной России в высоких технологиях» (Санкт-Петербург, 2019 г.), XXXVII Международной научной конференции «Перспективные направления развития современной науки» (Москва, 2018 г.), XI International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS Tomsk, 2017 г.), Второй международной научно-практической конференции «Нечеткие системы и мягкие вычисления. Промышленные применения-2018» (Fuzzy Technologies in the Industry – FTI, Ulyanovsk, 2018 г.), Международной научно-практической конференции «САПР и моделирование в современной электронике» (Брянск, 2017 г.), конференции «Моделирование и ситуационное управление качеством сложных систем 2017» (Санкт-Петербург, 2017 г.), 70-й Международной студенческой научной конференции ГУАП (Санкт-Петербург, 2017 г.), Международной научно-практической конференции «Новейшие достижения в науке и образовании» (Смоленск, 2016 г.), Всероссийской научно-практической конференции «Решение» (Березники, 2016 г.).

Результаты работы использованы при выполнении прикладных научных исследований по соглашению о предоставлении субсидии от 26 сентября 2017 г. № 14.578.21.0233 в рамках Федеральной целевой программы

«Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы» по теме: «Разработка экспериментального образца устройства для обеспечения беспроводной подзарядки аккумуляторов имплантатов» с целью формирования технических требований и предложений по разработке, производству и эксплуатации устройств для обеспечения беспроводной подзарядки аккумуляторов имплантатов и беспроводного питания безаккумуляторных имплантатов с учетом технологических возможностей и особенностей индустриального партнера – организации реального сектора экономики.

Результаты исследования также использованы при выполнении опытно-конструкторских и технологических работ в рамках реализации комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства программных средств автоматического анализа документации на бумажных и цифровых носителях с применением семантико-когнитивных технологий для целей каталогизации слабоструктурированной информации, проводившегося в соответствии с соглашением № 075-11-2019-055 от 27 ноября 2019 г. согласно Постановлению Правительства РФ №218 от 9 апреля 2010 г.

Публикации. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 8 международных и 5 всероссийских научных конференциях. По теме диссертации опубликовано 34 работы, из них: 12 – без соавторов, в том числе 10 статей опубликованы в ведущих рецензируемых научных изданиях, 13 статей в сборниках трудов конференций, в том числе 8 в научных изданиях, входящих в международные реферативные базы данных и системы цитирования Scopus и Web of Science, получено 7 свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ и 3 баз данных, издано 1 учебное пособие.

Результаты интеллектуальной деятельности:

Программы для ЭВМ:

1. Комплекс моделирования оптимизации и управления

производственным процессом монтажа радиоэлектронных изделий на основе многопараметрических нечетких регуляторов рег.№ 2020610584 от 16.01.2020 г.

2. Программа мониторинга процессов производства радиоэлектроники на основе межмашинного интеллектуального взаимодействия компонентов оборудования рег.№ 2020610583 от 16.01.2020 г.

3. Программа адаптации структуры цифровой линии монтажа электроники компонентами технологических инноваций на основе анализа вероятностей состояний процессов, обеспечивающая оценку результативности производства и качества продукции» рег.№ 2019661707 от 05.09.2019 г.

4. Программа интеллектуализации производственных процессов изготовления электроники, обеспечивающая критериальную оценку качества продукции» рег.№ 2019661474 от 02.09.2019 г.

5. Программа управления процессом автоматического монтажа печатных плат на основе введения средств интеллектуального межмашинного взаимодействия компонентов оборудования» рег.№ 2019619203 от 12.07.2019 г.

6. Программа моделирования этапов цифрового производства электроники для систем мониторинга» рег. № 2018616699 от 06.06.2018 г.

7. Программа интеллектуальной системы управления производственным процессом изготовления электронной продукции на этапе Solder Paste Inspection» рег. № 2018663527 от 30.10.2018 г.

Базы данных:

– Компоненты обеспечения качества технологических процессов изготовления электроники в условиях цифрового производства рег.№2018620449 от 16.04.2018 г.

– База данных управления процессом автоматического монтажа электроники с применением многопараметрического нечеткого регулятора рег. № 2018621926 от 03.12.2018 г.

– Элементная база для изготовления модулей устройств беспроводной передачи данных рег. № 2018622062 от 17.12.2018 г.

Структура работы. Во введении обосновывается актуальность темы исследования, формулируются основные цели и задачи работы, приводятся основные положения, содержащие научную новизну, обосновывается теоретическая и практическая значимость работы.

В первой главе проанализировано текущее состояние и перспективы развития интеграции технологических инноваций в производственный процесс монтажа изделий радиоэлектроники, представлена общая характеристика и основные особенности внедрения элементов концепции «Индустрия 4.0» на цифровом производстве, проведен анализ текущей ситуации и выявлены направления совершенствования организации радиоэлектронного производства на основе оценки технической документации, выполнения НИОКР и патентной активности, представлено обоснование направления совершенствования производственного процесса изготовления радиоэлектроники за счет внедрения технологических инноваций, выделены особенности организации технологический процесс в условиях внедрения цифрового производства.

Во второй главе представлены модели и методика повышения результативности производственного процесса изготовления изделий радиоэлектроники в условиях цифровизации производства. Проведена детализация этапов процесса автоматического монтажа радиоэлектроники за счет внедрения технологических инноваций с использованием аппарата марковских цепей. Разработаны: модель повышения вероятности выхода годных изделий радиоэлектроники в технологический процесс при заданных требуемых значениях, математическая модель структуризации и типизации производственного процесса на основе оценки вероятностей переходов состояний технологической линии при монтаже радиоэлектронных изделий и методика планирования производственного процесса монтажа радиоэлектронных изделий при их поэтапном совершенствовании,

формирующая критериальную оценку состояния работоспособности производственной линии.

В третьей главе разработаны модели и методика обеспечения результативности производственного процесса изготовления изделий радиоэлектроники на основе поэтапного внедрения технологических инноваций. Проведен анализ функционирования технологической линии автоматического монтажа изделий радиоэлектроники при использовании киберфизических систем. Разработаны: методика мониторинга процессов монтажа радиоэлектронных изделий и внедрения технологии межмашинного интеллектуального взаимодействия компонентов оборудования, модель организации производственного процесса монтажа радиоэлектронных изделий на основе многопараметрических нечетких регуляторов и экспериментальная модель производственной цифровой линии с применением программного пакета Plant Simulation Siemens.

Внедрение результатов исследования: внедрение основных научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертационной работе подтверждено актами об использовании, полученными автором от ООО «ПАНТЕС групп», ООО ПФ «ЭЛКОН», ООО «Альт-Комплект», ООО «РБС:Консалтинг», федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения».

Структура диссертационной работы: диссертация состоит из введения, 3 глав, заключения, списка использованной литературы из 116 наименований. Текст диссертации изложен на 206 страницах, содержит 117 рисунков и 10 таблиц. Общий объем диссертационной работы с учетом приложений составляет 226 страниц.

1 Текущее состояние и перспективы развития интеграции технологических инноваций в производственные процессы монтажа радиоэлектронных изделий

1.1 Общая характеристика и основные особенности внедрения элементов концепции «Индустрия 4.0» на цифровом производстве

В стратегии развития электронной промышленности Российской Федерации на период до 2030 года, утвержденной распоряжением правительства Российской Федерации от 17 января 2020 года №20-р пункт 5 посвящен «Организации производства» [1], в котором отмечается, что в настоящее время отмечается тенденция роста потребности во внедрении информационных технологий в систему планирования отрасли, операционные процессы проектирования, разработки и производства электронной продукции, сбора отраслевой статистики, сопровождения закупочной деятельности и продвижения новой продукции. Сформированы заделы для развития единой отраслевой информационной управленческой системы.

Современный реальный сектор экономики характеризуется интенсивным использованием результатов интеллектуальной деятельности в производимой продукции.

Стратегия научно-технологического развития Российской Федерации, утвержденная 1 декабря 2016 года указом президента РФ №642, формулирует цель и основные задачи научно-технологического развития страны, а также определяет основные направления и приоритеты государственной политики в этой области [3]. Одним из девяти приоритетных направлений научно-технологического развития Российской Федерации является переход к передовым цифровым, интеллектуальным производственным технологиям, роботизированным системам, новым материалам и способам конструирования, создание систем обработки больших объемов данных, машинного обучения и искусственного интеллекта [3].

Достигнутый технологический уровень радиоэлектроники и доля инновационной продукции радиоэлектронной промышленности, доля

организаций, осуществивших ТИ по отношению к общему количеству производителей в 2013-2019 гг. представлены на рисунках 1–3.

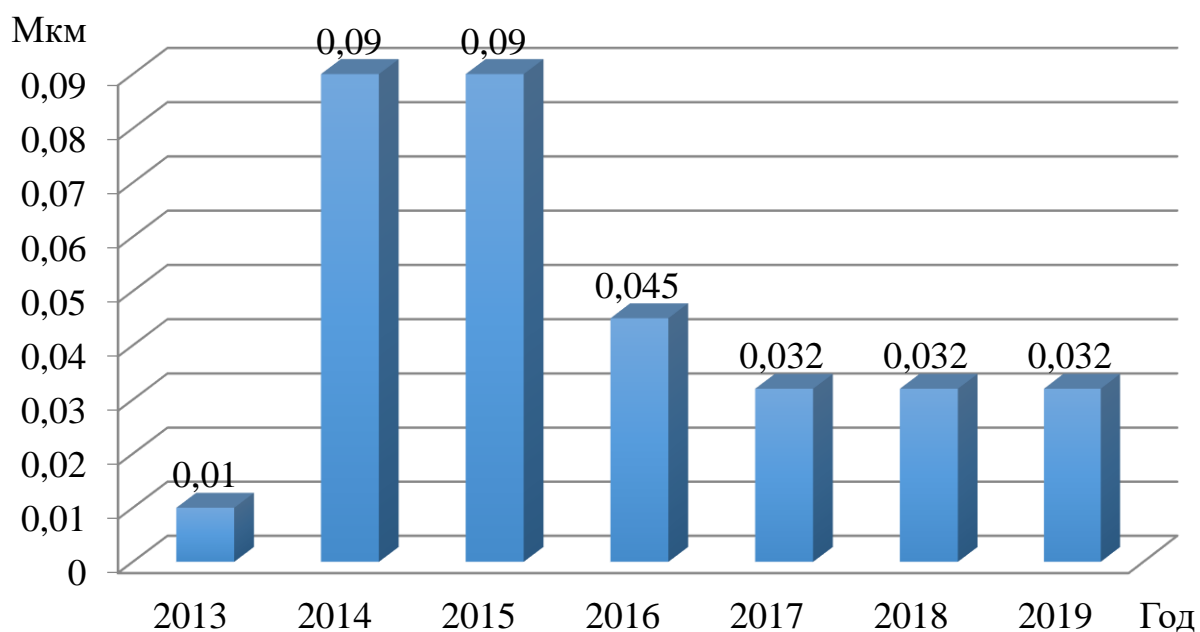


Рисунок 1 – Достигнутый технологический уровень радиоэлектроники в 2013-2019 гг.

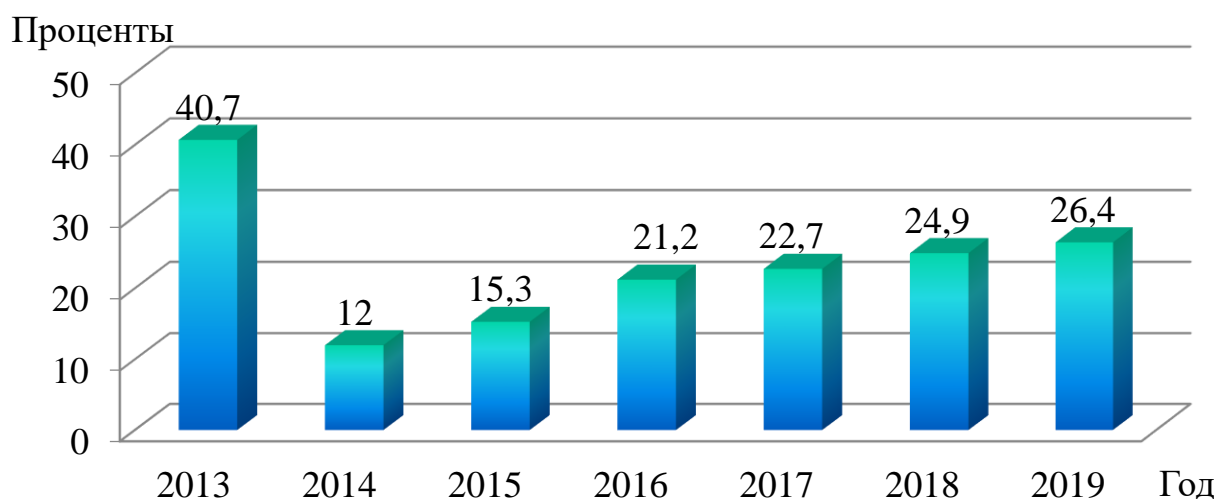


Рисунок 2 – Доля инновационной продукции радиоэлектронной промышленности в 2013-2019 гг.

Доля инновационной продукции в 2019 году по сравнению с 2014 годом радиоэлектронной промышленности выросла на 12,9% (рисунок 2), доля организаций, осуществивших технологические инновации ежегодно растет,

так в период с 2013 по 2019 гг. объем внедрения новых технологий увеличился на 4,6% (рисунок 3), что говорит о стабильном росте разработок в отрасли.

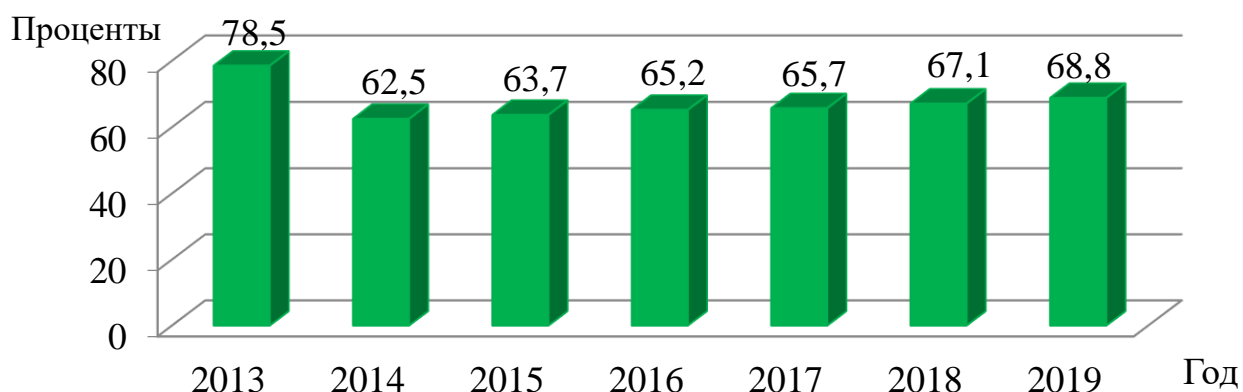


Рисунок 3 – Доля организаций, осуществивших ТИ в радиоэлектронной и электронной отраслях по отношению к общему количеству производителей в 2013-2019 гг.

Немаловажную роль в организации производства занимает количество создаваемых высококачественных рабочих мест на промышленных предприятиях в период с 2014 по 2019 гг. их численность увеличилась на 2 тыс. человек (рисунок 4).

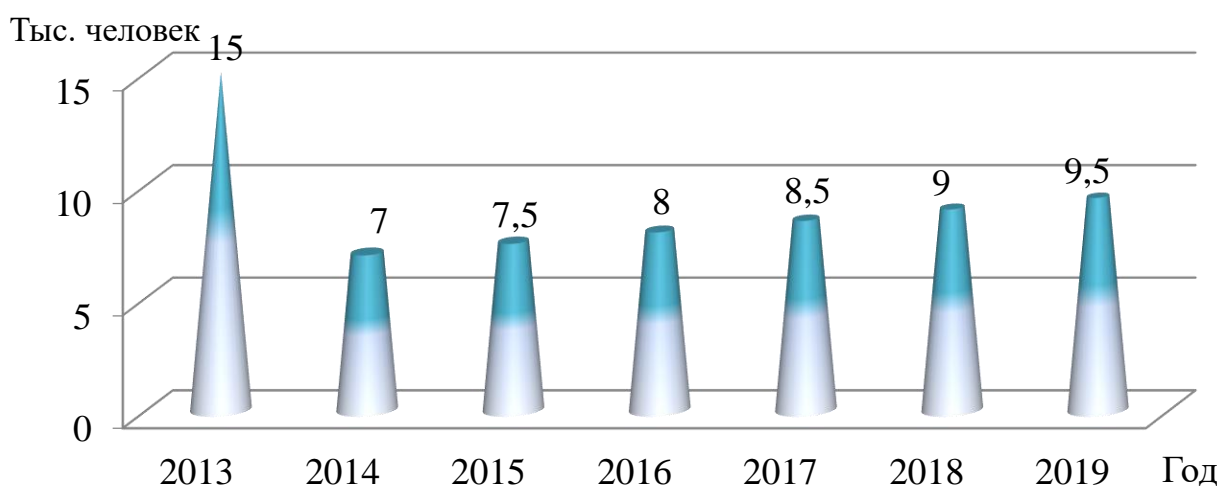


Рисунок 4 – Количество создаваемых высококачественных рабочих мест (нарастающим итогом) в 2013-2018 гг.

Технические средства автоматизации в различных сферах деятельности постоянно являются объектом инновационного развития. Принятое в России

направление цифрового развития непосредственно связано с глобальными изменениями, определяемыми четвертой промышленной революцией, и охватывает создание новых средств автоматизации. В принятой классификации технологических революций от Индустрии 1.0 до Индустрии 4.0 [6, 7] рассмотрен переход к более совершенным видам энергии и новым цифровым технологиям, необходимых для адаптации западных технологий под современный уклад автоматизированной линии производства печатных плат.

Технические средства автоматизации систем управления производством за счет их интеллектуализации и создания необходимых программно-аппаратных комплексов являются как объектами, так и средствами цифрового производства.

Постоянное совершенствование процессов реализуется поэтапным внедрением сквозных цифровых технологий и сокращением влияния человеческого фактора.

Современные цифровые технологии предполагают использование цифровой модели ПП и представленных в цифровом виде требований к качеству процессов. Задачи построения автоматических линий монтажа радиоэлектронных изделий, соответствующих концепции «Индустрия 4.0».

Целью концепции «Индустрия 4.0» является интеллектуальное предприятие, которое характеризуется адаптивностью, эффективностью и полной цифровой интеграцией. Цифровое производство предполагает объединение современных интернет-технологий с технологическим оборудованием посредством автоматизации [8], направленная на организацию и контроль всей цепи создания стоимости на протяжении всего производственного цикла изготовления продукции. Элементы концепции «Индустрия 4.0» представлены на рисунке 5.



Рисунок 5 – Элементы концепции «Индустрия 4.0»

На современных предприятиях хранится огромный массив цифровой информации, представляющий собой накопленные статистические данные организации производства на каждом этапе изготовления продукции. С помощью существующих технических средств управления большими данными и разработкой новых оптимизирующих методов менеджмента обработки цифровых массивов возможно сокращение времени обработки информации и принятия управленческих решений.

Использование элемента концепции «Интернет вещей» (Internet of things (далее – IoT) позволит осуществлять взаимодействие между заказчиком и исполнителем, разработчиком и производством, человеком и производственным оборудованием, самостоятельным функционированием установок (межмашинное взаимодействие – M2M) [9] более системным и контролируемым быстрым и надёжным. Преимущества внедрение интернета вещей представлены на рисунке 6.

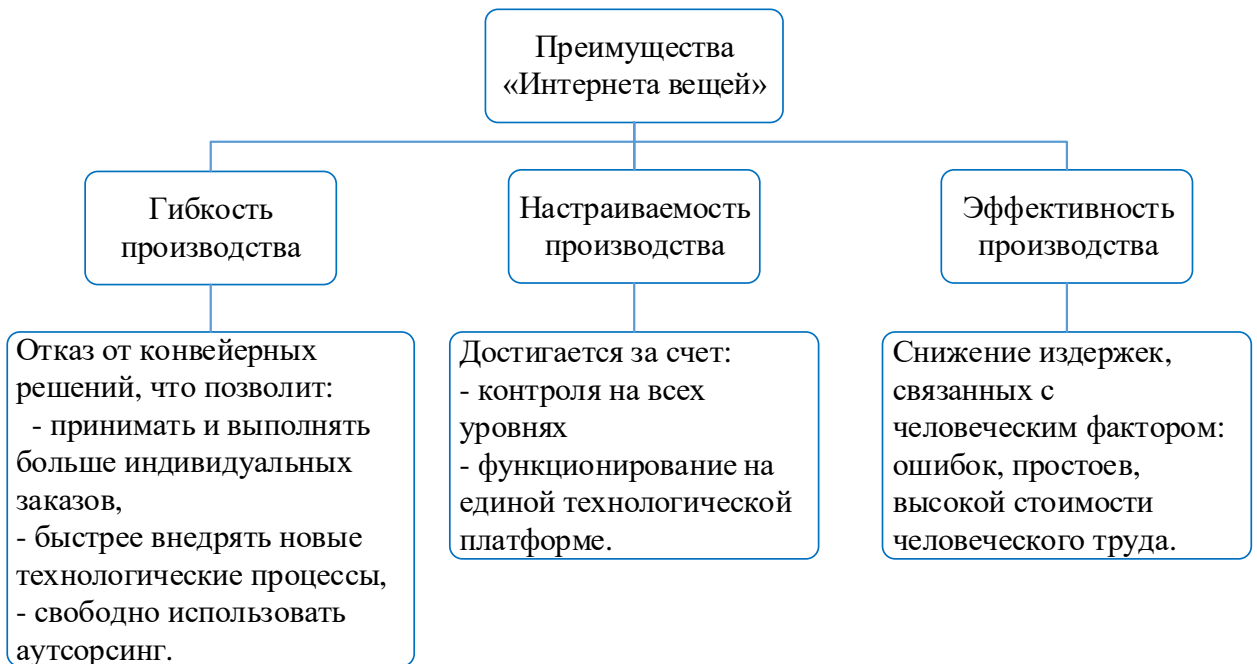


Рисунок 6 –Преимущества использования в производственном процессе интернета вещей

Придание физическим объектам цифровых свойств т.е. визуализация действий, выполняемых в производственном процессе (далее – ПП) требует малых затрат на ее осуществление. Виртуальная и дополненная реальность в производстве подразумевает возможность отобразить информацию об объекте заказа и основную информацию о стадиях производства [10].

Аддитивные технологии (3D-печать) представляют собой совокупность технологий послойного синтеза, т.е. постепенное наложение материала на основании данных смоделированной CAD модели [11].

Внедрение технологий печатной электроники предполагает цифровой дистанционный учет с помощью чипирования плат (RFID-метки, лазерное напыление). Использование печатной электроники значительно ускорит процесс входного и выходного контроля, пересчет количества полученной, произведенной на каждом этапе технологического процесса (далее – ТП) и отгруженной продукции.

Квантовые вычисления строятся на основе современных высокотехнологичных компьютеров, которые используют новый подход к обработке информации. С помощью использования квантовых вычислений

создается промышленный интеллект способный автономно принимать управленческие решения при производстве и запускать новые типы алгоритмов для обработки информации более целостно.

Применение распределённых реестров способствует перераспределению управленческих функций на руководителей подразделений и с использованием открытого сетевого взаимодействия. Использование этого элемента концепции «Индустрия 4.0» способствует сокращению временных затрат на принятие решений и обеспечивает прозрачность выполнения действий, что способствует повышению доверия к системе менеджмента на промышленном предприятии.

На этапах диссертационного исследования осуществляется разработка новых методов и средств для организации производственных процессов с использованием элементов концепции «Индустрия 4.0», содержащего методики обеспечения результативности процессов цифрового производства радиоэлектроники и процедуры обеспечения качества ТП с использованием трех элементов концепции, а именно: интернет вещей, печатная электроника и аддитивные технологии.

В мире существует три основные модели развития радиоэлектронных производств:

1. сборочное производство;
2. разработка и проектирование;
3. полный цикл создания продукции (далее – IDM).

На сегодняшний день предприятия промышленности всех типов производств нуждаются в модернизации систем управления ТП. Учитывая ряд особенностей отечественных предприятий, реализация принципов концепции «Индустрия 4.0» в полном объеме в уже существующие системы управления (далее – СУ) не представляется возможным, в связи с этим в диссертационном исследовании предпринята попытка разработки методического аппарата, направленного на поэтапную организацию цифрового производства для обеспечения качества радиоэлектронной продукции.

Учитывая политику импортозамещения возникает необходимость разработки отечественного программно-алгоритмического комплекса, основанного на принципах концепции «Индустрия 4.0», учитывающего реальные особенности организации производства на предприятиях отечественной промышленности.

1.2 Анализ текущей ситуации и выявление направлений совершенствования организации радиоэлектронного производства на основе оценки патентной активности

С целью выявления тенденций развития радиоэлектронной отрасли проведено исследование полученных отечественных и зарубежных патентов и свидетельств о государственной регистрации на объекты интеллектуальной собственности, полученных предприятиями реального сектора экономики, высшими учебными заведениями, научными организациями. Вместе с тем, в соответствии с показателями (индикаторами) государственной программы «Развитие электронной и радиоэлектронной промышленности на 2013 – 2025 годы», утверждённой распоряжением Правительства РФ от 15 декабря 2012 г. N 2396-р проанализировано количество отечественных и зарубежных патентов и свидетельств о государственной регистрации на результаты интеллектуальной деятельности, полученных в радиоэлектронной отрасли (рисунок 7), что позволяет сделать вывод о развитии и увеличении объема перспективных разработок.

Проценты

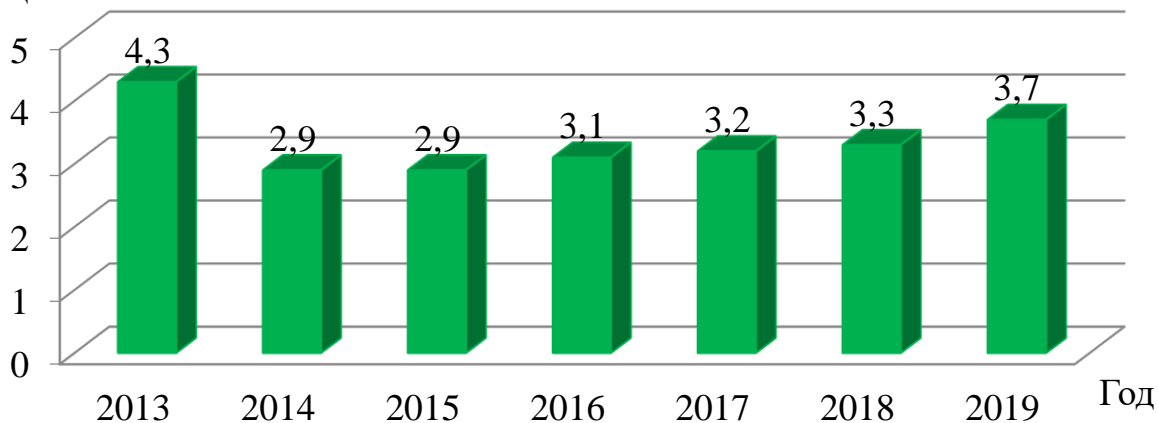


Рисунок 7 – Динамика нематериальных активов

Эффективность промышленного внедрения и коммерциализации новых разработок непосредственно зависит от характеристик результатов интеллектуальной деятельности и степени их влияния на улучшение потребительских свойств, и повышение как технического уровня, так и конкурентоспособности объекта техники.

Проведение исследования технического уровня разработок в области цифрового производства радиоэлектроники, выявление тенденций совершенствования ТП, недостаточны для развития отрасли в целом. Необходимо также проведение расширенного поиска с глубокой ретроспективностью, в частности, проведение экспертизы по каждой стране в отдельности, что является исследованием патентной чистоты объекта, обеспечивающей возможность свободного использования объекта в какой-либо стране без нарушения действующих на ее территории исключительных прав третьих лиц.

Необходимость в совершенствовании и развитии систем управления ПП обусловлена повышением предписаний и требований к качеству производства изделий для радиоэлектроники в условиях тенденции модернизации отечественных производителей. Для определения тенденций развития как на отечественном, так и в мировом масштабе проведен патентный поиск и построен патентный ландшафт по основным элементам концепции «Индустрия 4.0».

Патентные исследования проводились целью выявления изобретательской активности методов и средств организации производства радиоэлектроники, способов внедрения на предприятия радиоэлектроники средств концепции «Индустрия 4.0», определения тенденций развития данного вида техники и выявления направления технического поиска ведущих компаний в этой области.

Согласно требованиям, ГОСТ Р 15.011-96 глубина проведения патентных исследований при определении технического уровня и тенденций развития должна соответствовать периодам сменяемости поколений техники.

Поскольку организация цифровых производств радиоэлектроники относится к области быстросменяемых технологий, для проведения патентного исследования была принята глубина поиска в 20 лет, т.е. с 1999 года по настоящее время.

В результате проведения патентных исследований были выявлены ведущие страны в области патентования технологий организации цифровых производств с использованием элементов концепции «Индустрия 4.0»: Россия (RU), США (US), Китай (CN), Германия (DE), Корея (KR), Франция (FR), Япония (JP), Нидерланды (NL), Австралия (AU), Тайвань (TW), Всемирная организация интеллектуальной собственности (ВОИС, WO), Европейское патентное ведомство (ЕПВ, EP) [12-23].

Исследование проведено по ключевым словам: smart production (умное производство), digital production (цифровое производство), Internet of things (интернет вещей), automated production systems (автоматизированные производственные системы), decision support systems (системы поддержки принятий решений), автоматизированные производственные системы, технологии межмашинного взаимодействия или M2M и т.д.

По всему миру выявлено 37 патентов, связанных с «smart production», 30 из которых действует (рисунки 8). Активное патентование разработок в области «умного производства» начинается с 2013 года, что говорит об актуальности рассматриваемой области.

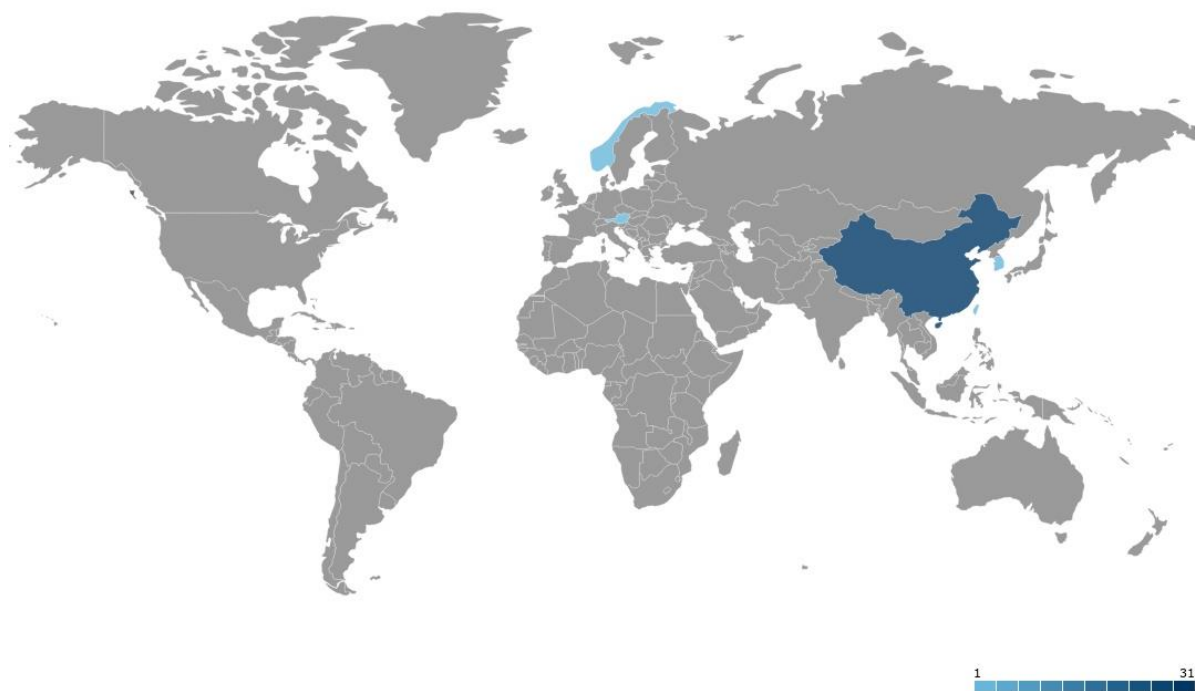


Рисунок 8 – Распределение результатов построения патентного ландшафта в области «smart production» по приоритетным странам

Использование концепции бережливого производства преобладает на многих отечественных предприятиях среди множества известных управленческих стратегий с 90-х годов XX века. Концепция «lean production» для российских предприятий является основой для внедрения четвертой промышленной революции.

Известные подходы концепции бережливого производства, а именно: минимизация потерь, максимизация эффективности, регулярные улучшения, быстрая переналадка производства, управление цепочками создания ценности, встраивание качества в ТП и постоянное обеспечение качества технологических инноваций являются подсистемой, создающей цифровое производство. Постепенный переход от бережливого производства к цифровому, т.е. внедрение элементов концепции «Индустрия 4.0» на предприятиях возможно с использованием языка программ и приложений, в частности, интеграция lean с agile и lean start ups.

Таким образом, при адаптации цифрового производства или элементов западной концепции «Индустрия 4.0» российских предприятий принципы бережливого производства станут основой новых производственных систем.

Анализ динамики полученных патентов в мире, приоритетные технологии, распределение процентного соотношения количества патентов по отраслям в области «Internet of things» приведен на рисунках 9-13.

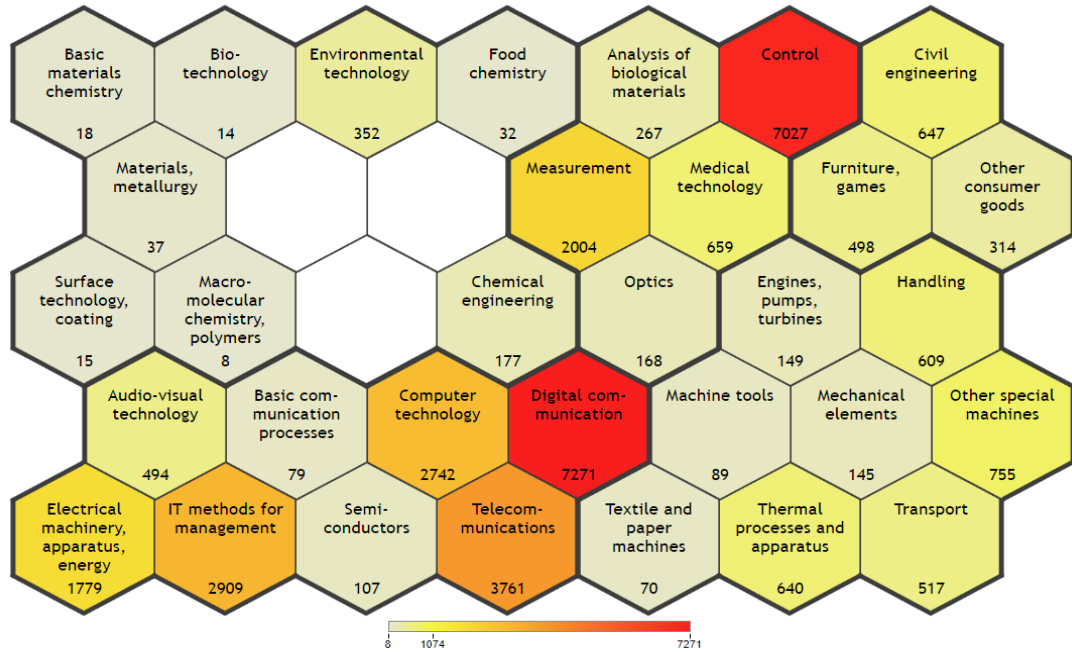


Рисунок 9 – Количество действующих патентов в области «Internet of things» по отраслям

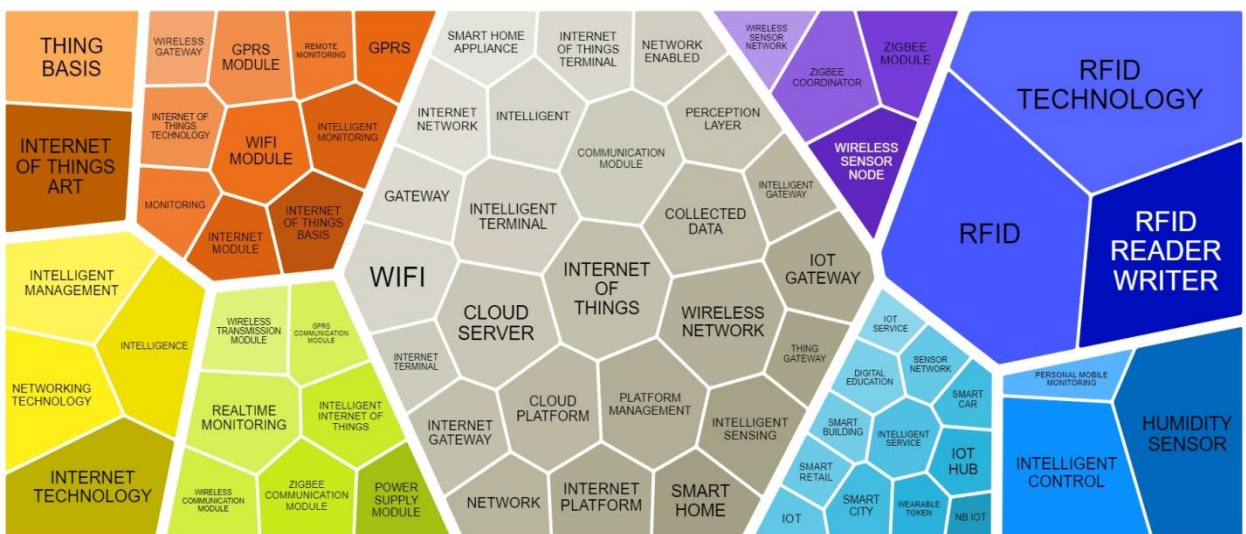


Рисунок 10 – Приоритетные технологии патентования в области «Internet of things»

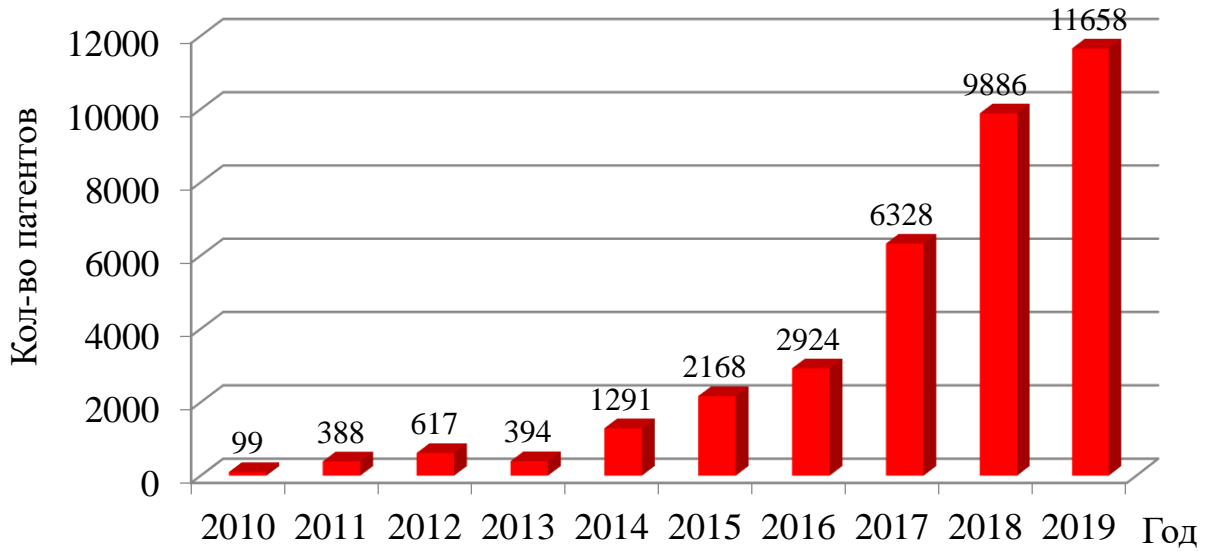


Рисунок 11 – Динамика полученных патентов в мире, связанных с технологией «Internet of things» по годам приоритета

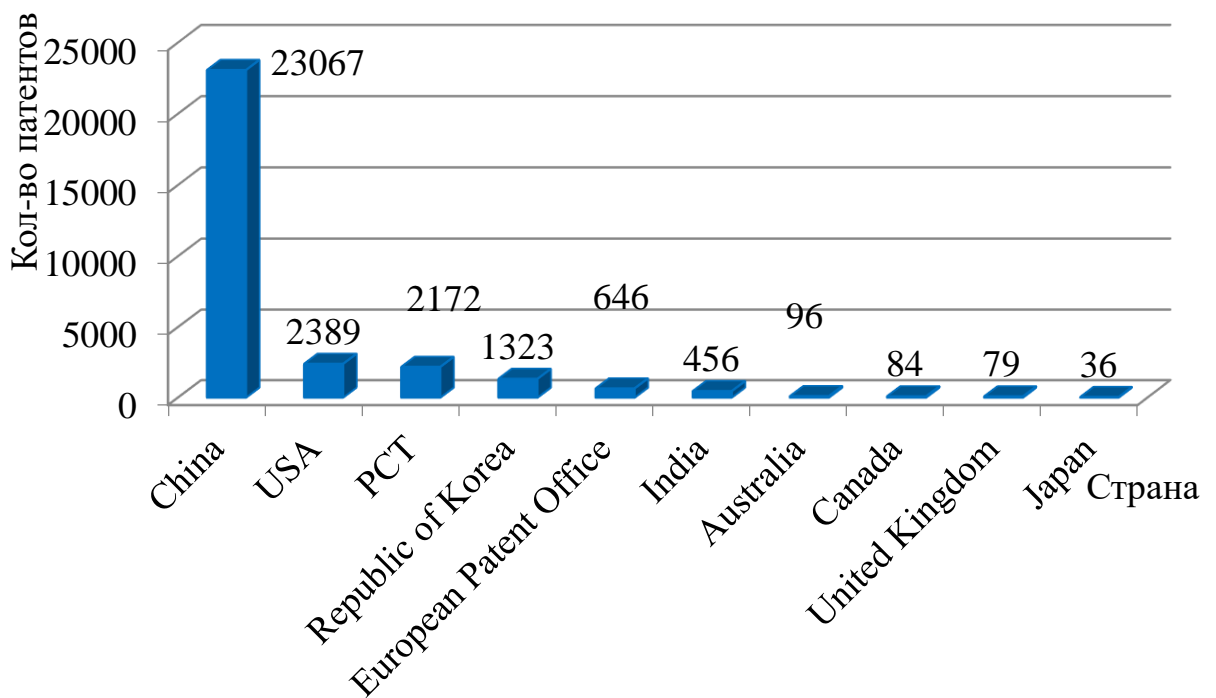


Рисунок 12 – Распределение процентного соотношения количества патентов в области «Internet of things» в мире

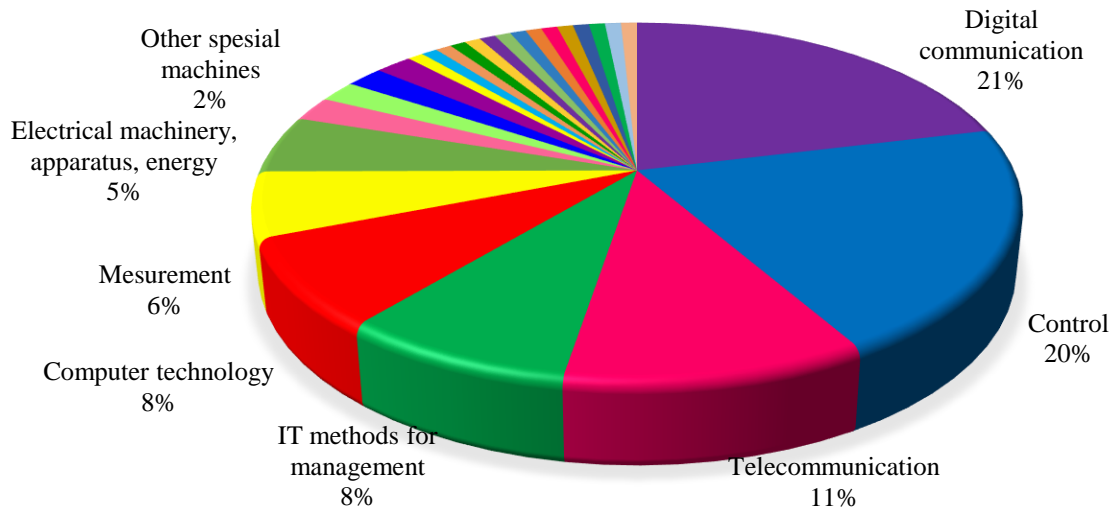


Рисунок 13 – Распределение процентного соотношения количества патентов в области «Internet of things» отраслям

Из проведенного анализа можно сделать вывод, что уверенные позиции для развития рыночного потенциала радиоэлектронных средств занимают такие направления, как системы интеллектуального управления, телекоммуникационное оборудование, вычислительная техника и микроэлектроника.

Наибольший интерес в области систем поддержки принятия решений наблюдается у заявителей США, Китая, Японии и Кореи, как представлено на рисунке 14.

Страна первого приоритета	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
US	27	18	31	34	37	34	27	29	21	11
CN	14	11	20	24	21	24	33	35	40	55
JP	10	8	10	4	5	9	4	8	13	4
KR	6	3	6	3	6	4	4	8	3	3
EP		1	1	2	1	2	5	2	2	1
IN	2	2	1	2	3	2		3	3	2
WO		1			1	2	2	3	2	1
TW		1		2		2	1	4	3	1
DE		2	1	2				1		1
AU		2	1	1			1			
GB	1							1		
CA			1	1			1			
DK			1		1		1	1	1	
MY				1			3	1		
SE		1				1		1		1
TR						1	1	2	1	
NZ							1			
RO				4						
UA				1	1		1		1	
IL										

Рисунок 14 – Динамика выданных патентов в мире по годам публикации в области систем поддержки принятия решений

По анализу технического уровня систем автоматического управления, были выявлены «приоритетные» страны и компании-производители радиоэлектроники по уровню изобретательской активности в исследуемой области техники, представленные на рисунке 15.

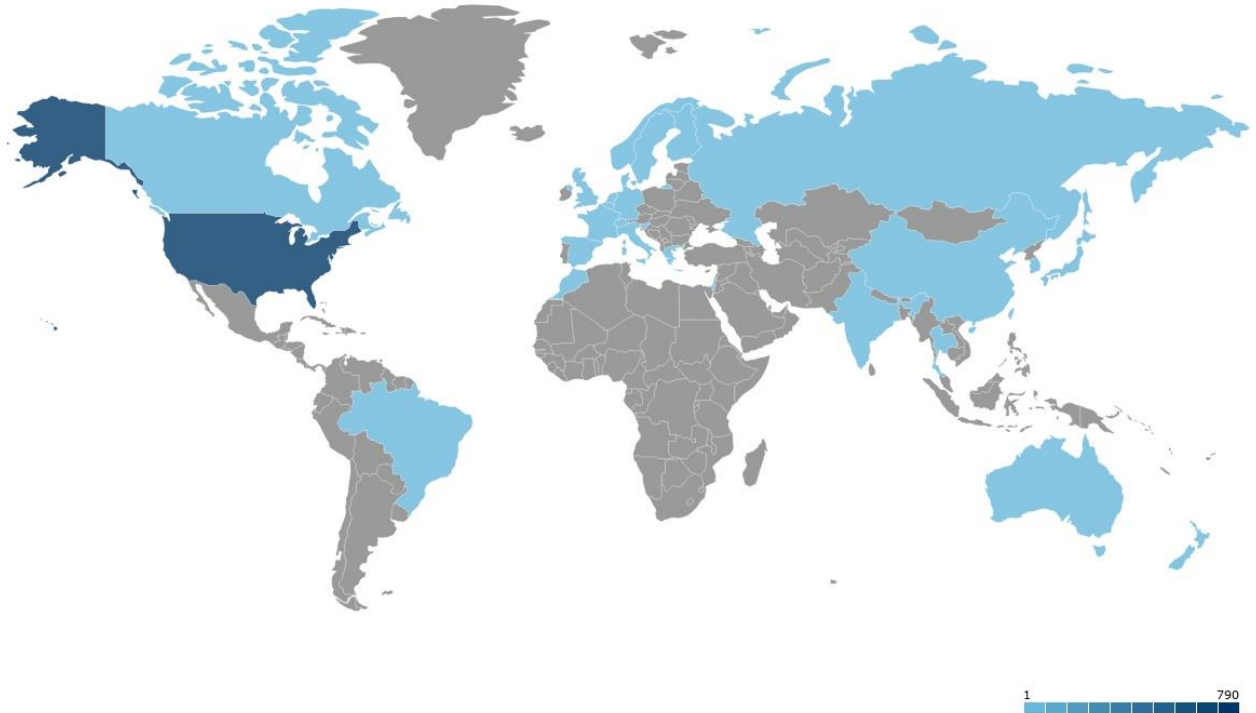


Рисунок 15 – Распределение результатов построения патентного ландшафта систем автоматического управления по приоритетным странам

По анализу технического уровня были выявлены «приоритетные» страны по уровню изобретательской активности в исследуемой области техники (помимо России), а именно: США, Германия, Япония, Великобритания, Франция, Канада и КНР.

Элементы концепции «Индустрия 4.0» только начинают использоваться на предприятиях радиоэлектронной промышленности, но до сих пор не вошли на производство в совершенном ее понимании. Многие российские предприятия еще не полностью готовы к переходу на исключительно роботизированные технологии производственной линии.

В последнее время наблюдается рост сотрудничества отечественных предприятий радиоэлектронной отрасли с университетами, центрами

проектирования и научными организациями и в области разработки и освоения в производстве новых изделий.

Целевыми значениями показателей развития отрасли к 2030 году являются:

- увеличение доли выручки от реализации российской электронной продукции в валовом внутреннем продукте страны – 3,5 процента;
- увеличение доли гражданской электронной продукции, произведенной российскими организациями отрасли, в общем объеме внутреннего рынка электроники (по выручке) – 57,4 процента;
- увеличение доли электронной продукции, произведенной российскими организациями отрасли, в общем объеме внутреннего рынка электроники (по выручке) – 59,1 процента;
- увеличение выработки продукции на 1 сотрудника в электронной промышленности – 12,5 млн. рублей [1].

Организации отечественной промышленности обладают достаточным потенциалом для реализации наукоемких производств за счет адаптивного внедрения технологических инноваций с учетом особенностей отечественных предприятий радиоэлектроники. Отсутствие квалифицированной технологической поддержки в применении элементов концепции «Индустрия 4.0» приводит к частичному использованию функционала оборудования.

На сегодняшний день наметилась положительная тенденция к реконструкции российских предприятий радиоэлектроники и направленность на создание высокотехнологичных конкурентоспособных производств малой и средней серии.

1.3 Обоснование направления совершенствования производственного процесса радиоэлектронных изделий за счет внедрения киберфизических систем

На сегодняшний день наметилась устойчивая тенденция модернизации отечественной промышленности. Действительно, большинство предприятий на рынке активно инвестируют в создание «умного производства». Изменения касаются практически всех аспектов работы: увеличиваются мощности производства, закупается новое современное оборудование, автоматизируются процессы управления производством и качеством продукции. В целом, перспективы развития промышленного производства поддерживаются на государственном уровне, поскольку потребность в современной радиоэлектронике будет только увеличиваться. Сокращение негативного влияния человеческого фактора на ТП является одним из приоритетных направлений развития отечественной промышленности.

Для реализации такого элемента концепции «Индустрия 4.0», как киберфизические системы, необходимо формирование базы данных предприятия, содержащей детальную статистическую информацию о состоянии ПП на всех этапах от закупки комплектующих до отгрузки продукции заказчику [25].

С целью формирования базы данных ТП изготовления радиоэлектроники необходима детальная расшифровка основных видов возмущений и неопределенностей, возникающих на каждой стадии ТП. Следует заметить, что сформированная база данных не изменяет риск возникновения возмущений, но способствует принятию решений, которые положительно влияют на характеристики ТП, адаптивно изменяя воздействие на исполнительные устройства.

В качестве технических рисков выступают: спад эффективности оборудования, рост издержек, срыв сроков выполнения заказа и т.д. Большинство ПК, решающих задачи управления производством, тем или

иным способом допускали возможность искажения данных, что приводило к не всегда объективной оценке отдельных показателей.

Речь идет о привлечении соответствующего инструментария для реализации когнитивных цифровых технологий управления малосерийным производством и, таким образом, внедрения инновационных подходов, укладываемых в русло концепции четвертой промышленной революции «Индустрия 4.0». На сегодняшний день в промышленном производстве можно выделить несколько приоритетных векторов, которые существенным образом определяют направление разработки и производства оборудования (рисунок 16).

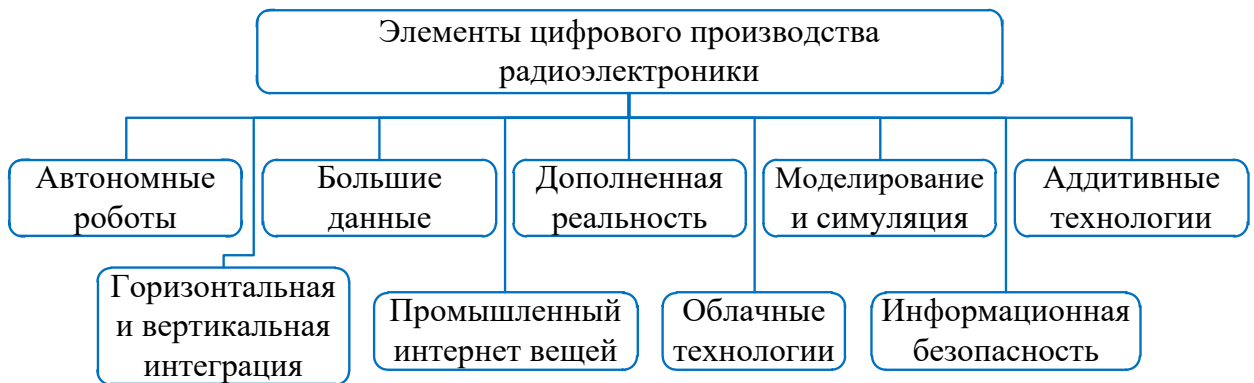


Рисунок 16 – Элементы цифрового производство радиоэлектроники

В условиях контрактного производства, когда необходимы постоянные переналадки оборудования, в связи с большой номенклатурой изготавливаемых изделий, оптимальным направлением является совершенствование ТП в режиме реального времени.

Принимая во внимание мировые тенденции, направленные на интеллектуализацию ТП изготовления радиоэлектроники, актуальной задачей является поэтапное внедрение элементов концепции «Индустрия 4.0», на основе анализа средств и процессов производства в рамках структурного, функционального и информационного описания [25].

В связи с микроминиатюризацией изделий радиоэлектроники и повышением требований к качеству процессов производства и

автоматического монтажа радиоэлектроники рациональным представляется реализация такого элемента концепции Индустрия 4.0 как «Межмашинное интеллектуальное взаимодействие» (далее – МИВ). Для результативного внедрения указанного элемента необходимо формирование базы данных предприятия, содержащих детальную статистическую информацию о состоянии ПП на всех этапах изготовления продукции от этапа закупки комплектующих до отгрузки заказчику. Одновременно необходимо обеспечить возможность оборудования самостоятельно собирать информацию о выполняемых операциях, анализировать ее и вносить корректировки в целях совершенствования качества и производительности.

Основой для перехода к цифровому производству послужили следующие элементы:

1. Интернет вещей (IoT).
2. большие данные (Big data).
3. Киберфизические системы (CPS, КФС) (рисунок 17).

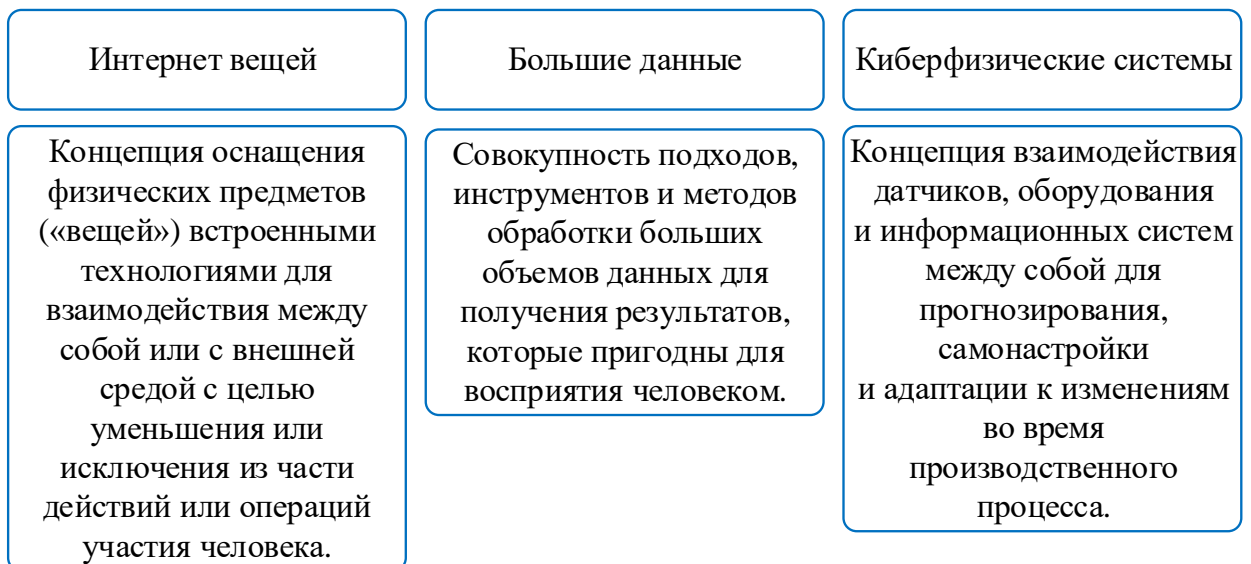


Рисунок 17 – Элементы концепции «Индустрия 4.0»

Инновации, как правило, внедряются в массовом продукте, производство которого обеспечено технологическими инновациями с постоянно возрастающей ролью цифрового производства. Радиоэлектронная

промышленность активно развивается в связи с тем, что в ней создаются инновации, которые первыми трансформируются в массовый рыночный продукт.

Спецификой изготовления радиоэлектроники являются ежедневно возрастающие требования к производству на протяжении всего жизненного цикла, а повышение требований к качественным показателям связано с эксплуатацией, производимой продукцией в экстремальных условиях, которыми являются резкое повышение температурных режимов и механические воздействия.

Указанная проблема может быть решена внедрением методов послепроизводственного контроля, т.е. проведению контроля изделия на всех технологических этапах от входного визуального контроля компонентов и заготовок печатных плат до выходного функционального контроля. Оказание влияния непосредственно на контроль до начала производства сводится к проверке входных показателей аппаратуры и проведению тестов на её работоспособность.

Работоспособность радиоэлектронной аппаратуры непосредственно зависит от ее возможности противостоять внешним воздействиям, поэтому в решении проблемы обеспечения качества изделий значительная роль принадлежит испытаниям с целью оценки ее работоспособности и долговечности [26]. Испытания на соответствие требованиям стойкости к внешним воздействующим факторам:

1. Испытания при нормальных условиях.
2. Испытания при повышенных (пониженных) рабочих температурах.
3. Испытания при предельных температурах.
4. Механические испытания: ударные нагрузки, вибрационные нагрузки и т.д.
5. Испытания на электромагнитную совместимость [26].

Повышение результативности производства радиоэлектроники и увеличение выхода годных возможно при адаптации некоторых принципов

концепции «Индустрия 4.0» для создания ЦП на отечественных предприятиях с помощью технологических инноваций. Для повышения качества продукции необходимо создание и применение модели системы мониторинга процесса изготовления электронных устройств на всем этапе жизненного цикла, моделирование этапов ПП осуществляется с помощью цепей Маркова.

Для определения соответствия изделий требованиям необходимо проведение длительных испытаний для больших объемов выборок, однако существуют ускоренные испытания, позволяющие оценить надежность изделия, сократив время испытаний и увеличив интенсивность нагрузки согласно методикам Highly Accelerated Stress Screens (HASS) и Highly Accelerated Life Test (HALT), моделирование этого этапа необходимо для детализированного отражения взаимосвязи этапов производства в математической форме. Моделирование процессов и последующая реализация цифрового производства послужат решению актуальных задач импортозамещения и конкурентоспособности российской радиоэлектроники.

Концепции КФС и IoT являются атрибутом современного этапа инновационного развития и организации ЦП на отечественных предприятиях. Основная цель состоит в том, чтобы использовать прогресс, достигнутый при помощи информации, коммуникаций и технологий, ожидаемый от перехода к цифровому производству в ближайшем будущем для развития промышленных предприятий.

Одной из наиболее сложных задач повышения результативности производства радиоэлектроники, поставленных перед российскими предприятиями является непротиворечивое встраивание киберфизических технологий в производственные системы, подготовка и переоборудование производственной базы для увеличения объемов производимой продукции, повышения ее качества.

Корректная организации производства с использованием дополнительных коммуникационных возможностей и частичной автономии позволяет преобразовывать мехатронные системы в киберфизические

системы (CPS или КФС) [6]. Концепция 4-ой промышленной революции позволяет упростить управление производством на следующих уровнях: процессы, организация, технология, персонал и проекты – путем создания соответствующих сетей и стандартизации. Основные признаки КФС приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Основные признаки киберфизических систем

№	Признак	Определение	Сущность
1	Идентифицированность	Процесс присвоения каждому отдельному физическому объекту идентификационного обозначения, по которому его можно будет отличить от остальных объектов (метки).	Возможность отслеживать каждый отдельный физический объект, определенный с помощью меток. За счет датчиков КФС способны собирать данные и преобразовывать в механическое движение при помощи исполнительных элементов, воздействуя ПП.
2	Взаимодействие через IoT и услуг	Концепция вычислительных сетей, объединяющих производственные системы с искусственным интеллектом, интеллектуальными СУ киберфизическими машинами на уровне ТП получил название промышленный IoT.	Взаимодействие, обеспечиваемое за счет высокой производительности встраиваемых систем и специализированного пользовательского интерфейса, позволяет напрямую обращаться к средствам производства через Интернет и посылать обработанные данные в виде управляющих сигналов производственному оборудованию.
3	Наличие глобальных вычислений	Концепция, содержащая подходы и методы	Каждый идентифицированный объект, оснащенный соответствующей

		доступного и удобного для человека отображения полученных результатов внесенных в интеллектуальную систему анализа больших данных.	микроэлектронной и сенсорной техникой, должен обладать способностью обрабатывать и передавать сведения и данные с помощью глобальных вычислений.
4	Облачная обработка данных	Технологии и методы обработки собранной информации и данных, отображаемой и анализируемой не на серверах предприятия, а в облачных интернет сервисах.	Облачная обработка данных позволяет контролировать и обслуживать систему в режиме реального времени.

Применительно к производству радиоэлектронных устройств [27] признаки КФС реализуются лазерными метками, вычислительными сетями, обработкой данных и управлением оборудования по офлайн разработанным программам, развитой системой серверов. Дальнейшее развитие предполагает постепенное наращивание IoT и онлайн «облачных вычислений». Внедрение других известных компонентов ЦП и сокращение «человеческого фактора» определяется задачами повышения результативности производства. Требования к современным СМК [28-36] включают оценку результативности и рисков процессов [37, 38]. При этом формальное представление процессов как «преобразование входов в выходы» может быть развито на основе математических моделей.

Степени внедрения элементов цифровизации в ПП является одним из ключевых критериев повышения уровня технологической зрелости

промышленного предприятия. Внедрение цифровой СУ производством позволит предприятию «связать» технологическое оборудование и осуществлять оперативное управление ПП.

Классификация уровней технологической зрелости промышленных предприятий представлена на рисунке 18.

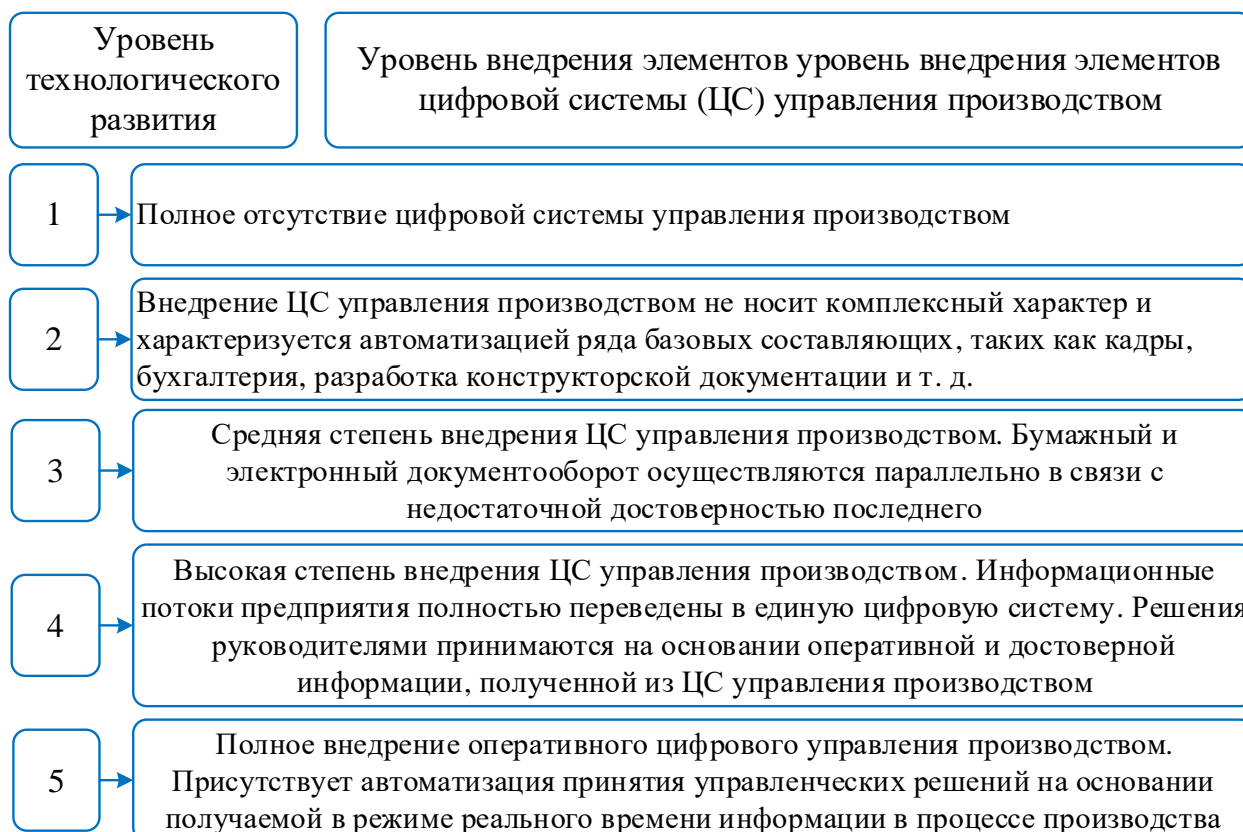


Рисунок 18 – Классификация уровней технологической зрелости промышленных предприятий

На пятом уровне технологической зрелости производственное предприятие готово к внедрению технологий цифрового производства таких как IoT, большие данные, КФС, распределенные реестры, аддитивное производство.

Этапы реализации концепции «Индустрия 4.0» на промышленном предприятии представлены на рисунке 19.

№	Наименование этапа	Внедряемое ПО	Примечание
1	Внедрение систем автоматизированной разработки КД и ТД	Системы автоматизированного проектирования (CAD/CAM/CAE)	Обеспечение сквозного проектирования
2	Внедрение систем электронного документооборота	Системы управления данными об изделии (PLM)	
3	Внедрение цифровой системы управления производством на уровне цеха	Система управления производственными процессами (MES)	Обеспечение прослеживаемости, диспетчирования и оперативного планирования в производстве
4	Внедрение цифровой системы управления производством на уровне предприятия	Система планирования ресурсов предприятия (ERP)	Решения принимаются руководителями на основании оперативной и достоверной информации, полученной из ЦС управления производством
5	Интеграция оборудования и ПО в единое информационное пространство по принципам «Индустрии 4.0»	Система промышленного «Интернета вещей» (IoT)	Автоматизация принятия управленческих решений на основании получаемой в режиме реального времени информации в процессе производства

Рисунок 19 – Этапы реализации концепции «Индустрия 4.0» на промышленном предприятии

Для адаптации элементов «Индустрия 4.0» на промышленном предприятии необходимо создать детализированное функциональное описание структуры производства, управлять процессом проектирования по результатам путем раскрытия неопределенностей, производства и инновационными проектами.

С целью разработки моделей и методик поэтапной организации цифрового производства для обеспечения качества радиоэлектронной продукции необходимо провести анализ взаимосвязи элементов имитационных моделей при реализации ТП изготовления радиоэлектроники на стадиях жизненного цикла ПП.

При внедрении в ПП технологических инноваций необходимо выделить следующие актуальные задачи, которые решаются с применением элементов «Индустрия 4.0»:

- изучение актуальных требований потребителя, разработка и быстрое внедрение в производство;
- улучшения характеристик электронной продукции, в первую очередь надежность и долговечность;
- увеличения выхода годных изделий;
- быстрая переналадка ТП и оборудования;
- снижение себестоимости за счет уменьшения трудоемкости производства;
- обеспечение качества процессов и продукции.

Вместе с тем при построении модели производства актуальной задачей является создания единых методов, средств и процедур управления качеством ПП в радиоэлектронной промышленности. В последние 5 лет появилось достаточно много исследований посвящённых методам использования Digital, Smart, and Virtual Fabrics.

В радиоэлектронной промышленности данные методы могут быть соотнесены со стадиями жизненного цикла продукции следующим образом (рисунок 20).

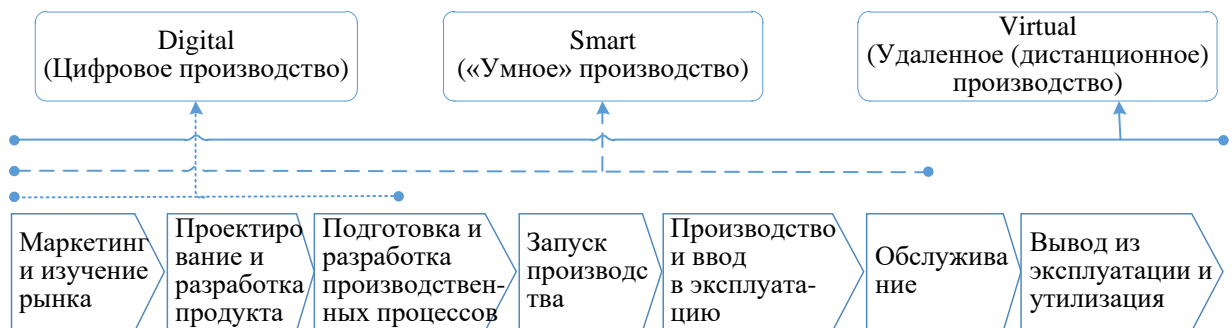


Рисунок 20 – Взаимосвязь предприятий будущего со стадиями жизненного цикла продукции

В совокупности, использование методов в рамках Digital, Smart and Virtual Fabrics должно способствовать решению поставленных задач. Важным элементом Digital factory является создание комплекса имитационных моделей, пооперационно описывающие ТП от этапа изготовления продукции до испытаний. Использование имитационной модели наиболее целесообразно на этапах от проектирования и разработки продукции до монтажа и ввода в эксплуатацию (рисунок 21).

Для максимального приближения имитационных моделей к реальному производству необходимо ввести следующие параметры:

- конфигурация и состав создаваемого изделия, влияющая на характеристики ПП;
- стадии и характеристики ПП с детальным описанием каждой стадии на технологической линии, временем изготовления одного изделия, количеством трудоемкости персонала, указание использования других видов ресурсов;
- описание цепей поставок от этапа входного контроля, перемещения на территории производства, складирования до этапа отгрузки потребителю и обязательным указанием альтернативных схем движения с целью минимизации рисков и возможной адаптации к принципам цифрового производства;

Одной из основных задач определения взаимосвязи предприятий будущего со стадиями жизненного цикла продукции является повышение производительности предприятий, возможность быстрой переналадки производства и удовлетворение современных требований потребителя к продукции. Решение этих задач позволит занять конкурентную позицию на рынке производителей изделий радиоэлектроники, что приведет к увеличению рентабельности продукции и дохода организации.

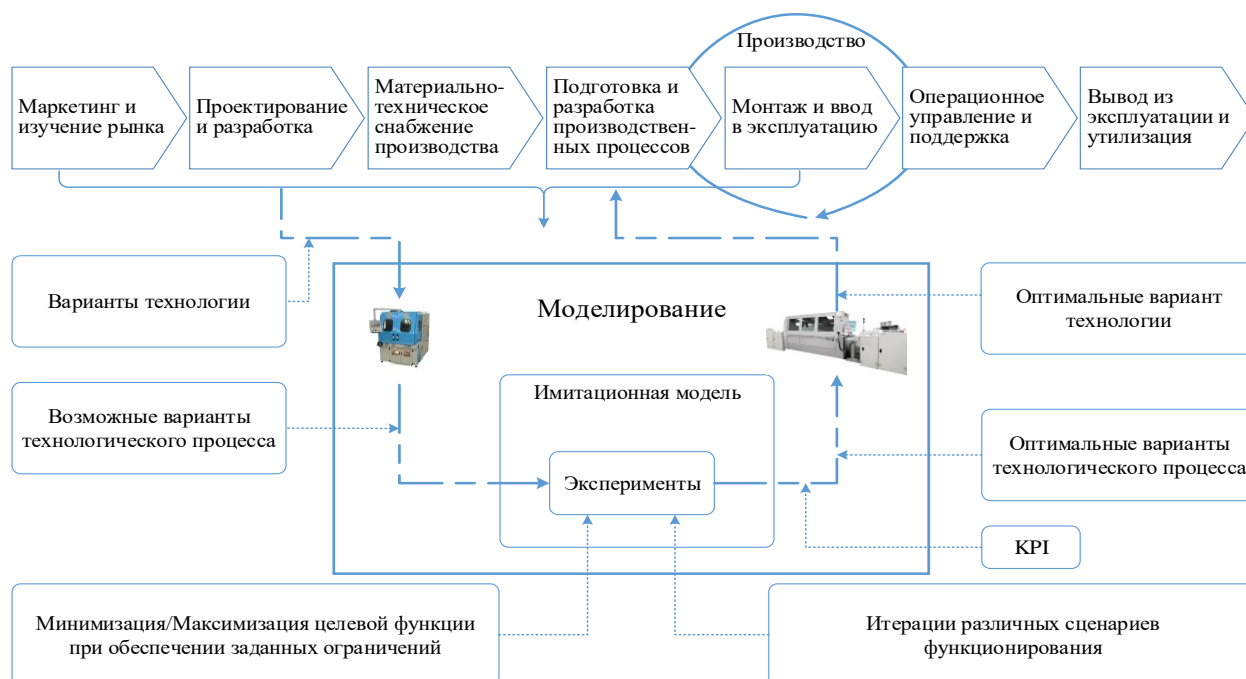


Рисунок 21 – Вариант применения имитационных моделей при реализации ТП изготовления радиоэлектроники на стадиях жизненного цикла производственного процесса

При создании цифрового производства одними из основных элементов являются большие данные, распределенные реестры, межмашинное взаимодействие и интернет вещей. При проектировании ТП используя имитационное моделирование на производстве целесообразно разделять значительный объем статистической информации (большие данные) при помощи распределенных реестров.

Взаимосвязь имитационных моделей процессов, протекающих на предприятии, осуществляется по базам данных двух типов.

Первый тип баз данных содержит информацию, необходимую для определения параметров имитационной модели: основная информация об изделии, материальные и трудовые затраты, особенности ПП. Формирование подобной базы данных особенно целесообразно при внедрении аппарата нечеткой логики в ПП. Адаптация в ПП такого элемента «Индустрия 4.0» как искусственный интеллект приведет к разработке имитационных моделей в автоматическом режиме.

Базы данных второго типа содержат накопленную информацию о результатах апробации имитационных моделей. Целью таких баз данных является систематизация моделей, служащих для лица, принимающего решение, информацию о возможном создании и применении новых технологических инноваций в ПП, построенные с использованием элементов цифрового производства.

В настоящее время предприятия уделяют большее внимание процессам проектирования, как основной из стадий ЖЦ. В связи с чем, непосредственно организации производства, детализации ТП отводится меньшее значение. Благодаря поэтапному планированию возможно спрогнозировать возникающие риски, эффективность производства, уделить необходимое внимание компонентам обеспечения качества ТП.

Декомпозиция и детальное представление этапов ПП в условиях внедрения КФС способствует сокращению временных и материальных затрат на разработку и внедрение технологических инноваций, элементов интеллектуальных автоматизированных производственных систем (элементов межмашинного взаимодействия), которые снижают вероятность появления продукции несоответствующего качества.

1.4 Особенности организации технологического процесса изготовления радиоэлектроники в условиях внедрения цифрового производства

Непрерывный рост требований к качеству ТП, увеличение объемов производства конкурентоспособных изделий и освоение инновационных технологий приводят к необходимости совершенствования и интеллектуализации методов и средств мониторинга производственных и вспомогательных процессов

В процессе реализации принципов 4-й промышленной революции осуществляется постепенный переход от автоматизированных СУ ТП к «умным производствам». Технологии умного производства позволяют

оперативно идентифицировать сбой в функционировании оборудования, сократить энергопотребление, своевременно реагировать на отклонения от заданных значений параметров, самостоятельно использовать накопленные ранее сведения и опыт для поддержки принятия решений на этапах технологических операций.

Прогресс в развитии ПП монтажа радиоэлектронных изделий связан с интеграцией элементов концепции «Индустрия 4.0» на отечественных предприятиях. Внедрение элементов ЦП открыло новые возможности для обеспечения качества радиоэлектронной продукции. Производственный интеллект и накопленная информация об изменившихся критериях позволят оборудованию на линии АМ печатных плат в автоматическом режиме корректировать ПП и, тем самым, обеспечить гибкость и адаптацию производства к современным рыночным условиям.

Одним из важнейших факторов обеспечения результативности автоматического монтажа печатных плат на основе введения средств МИВ компонентов оборудования является встраивание в цифровое производство 3D-инспекций.

Производство радиоэлектроники, отвечающей требованиям стандартов, характеризуется непрерывным контролем качества на каждом этапе. Контроль продукции в процессе монтажа радиоэлектронных изделий осуществляется установками автоматической оптической инспекции. Существующие инспекции подразделяются на следующие виды:

- после нанесения паяльной пасты (операция проверки паяльной пасты) – Solder paste inspection (далее – SPI);
- после установки компонентов - pre-reflow inspection (далее – AOI);
- после печи оплавления и нанесения лазерной маркировки (операция автоматической оптической инспекции) – automatic optical inspection (далее – AOI);
- дополнительный контроль монтажа BGA – 3D X-Ray inspection (далее – AXI) [39].

На первых двух этапах установки оптической инспекции встраиваются в линию с целью предупредить появление брака. На последнем же этапе ОАИ по факту информирует оператора о бракованной продукции. Дополнительный контроль монтажа в виде установки рентгеноскопии необходим для контроля паяных соединений BGA компонентов. Для максимального снижения брака необходимо устанавливать систему АОИ после каждого этапа (рисунок 22), однако, это требует больших инвестиций.



Рисунок 22 – Производственная линия монтажа радиоэлектронных изделий

Установки оптического контроля успешно применяются для контроля качества производственных этапов. Однако до недавнего времени на производствах использовались исключительно установки 2D инспекции, которые не позволяют обеспечить контроль ряда важных параметров (например, для этапа нанесения паяльной пасты: объем, смещение, компланарность и т.д.) [40].

Появление такой технологической инновации, как 3D инспекция, расширяет возможности производителей в области определения дефектов монтажа на ранних этапах, как следствие, сокращения издержек на ремонт и утилизацию бракованной продукции.

Организация межмашинного взаимодействия повышает автоматизированность системы и устраняет негативные последствия «человеческого фактора», в результате чего ускоряется процесс производства и в разы снижается вероятность возникновения ошибочных действий, приводящих к несоответствиям изделий стандартам.

В задачах управления ПП изготовления радиоэлектроники и перехода от 2D- к 3D-инспекциям цифровое представление данных и разработка

соответствующего ПО становится все более актуальным. Это связано с большими объемами данных для выбора необходимых переменных при организации производства, таких, как размеры изделий и компонентов, время операций, количество изделий в одной партии.

Примерами современных стандартов и оборудования являются IPC-HERMES-9852 (The Hermes Standard for vendor independent machine-to-machine communication in SMT Assembly Version 1.1) [41, 42] и Saki Self-Programming Software Accelerates 3D Inspection and M2M Communication [43].

Соответствующее ПО обеспечивает функционирование программно-совместимого оборудования в цифровой линии. Чем больше возможностей предоставляет ПО, тем меньшие затраты несет фирма в процессе производства. Saki Self-Programming Software является бесшовной системой, не требующей использования DFM. При помощи одновременного сканирования разных полей зрения, ПО фиксирует высоту и данные XY. Одновременно с этим ПО предоставляет доступ к библиотеке (базе данных), в которой находится более 300000 компонентов. Для программирования установки необходимо иметь данные Gerber и Centroid CAD.

В рамках развития концепции «Индустрия 4.0» и межмашинного взаимодействия Saki Self-Programming Software ведет работу по совершенствованию связи между установками. Данное ПО обеспечивает выполнение калибровки машины, диагностику, техническое обслуживание, проверку, сбор данных, а также предоставляет расширенные функции отчетности.

Приведенные технологические инновации и аналогичные им предназначены для контроля нанесения паяльной пасты, а также поддержки обратной связи с принтером трафаретной печати и ремонтной станцией. Данные установки автоматизированы и при появлении дефектов, идентифицируемых в базе знаний, на основе которой они работают, обеспечивают их устранение.

Отдельно стоит остановиться на организации 3D рентгеноскопии, а именно распространенная рентгеноскопическая 3D система Dage XD7600NT применяется для инспекции качества скрытых BGA паек и обнаружения контрафактных комплектующих. Метрологическое обеспечение системы не предусмотрено, поэтому она может классифицироваться как индикатор. Однако необходимость обеспечения качества и обоснованности результатов заставляет организовать периодический контроль ее технического состояния. Это достигается применением эталонных мер для сличения с контролируемыми размерами.

Выбор материала таких мер связан с особенностями рентгеновского спектра, а единица эталона должна быть в 5...10 раз меньше критического контролируемого размера. В развитие может применяться обработка изображений для проверки соответствия качества паек стандартам IPC [44-53]. В частности, обработка изображений может включать оценку качества пайки по критерию (1):

$$\frac{\sum_{(i)} d_i}{D} \leq K, \quad (1)$$

где D – диаметр пайки,

d_i – диаметры воздушных пустот,

K – допустимая доля пустот.

Для адаптации зарубежного опыта на отечественные предприятия необходимо создание адаптированной модели межмашинного взаимодействия посредством использования промышленного интернета [39].

Обратная связь между автоматическим принтером трафаретной печати (далее – АПТП) и установкой 3D SPI организовывается посредством использования промышленного интернета вещей.

Стандартный шаблон «запрос-ответ», использующийся в сети интернет, не подходит для связи АПТП-3D SPI. Для данного случая больше подходит шаблон «подписка на события». Использование данного шаблона

обеспечивают следующие протоколы: CoAP, XMPP и General Event Notification Architecture.

В ситуации организации связи АПТП-3D SPI шаблон «подписка на события» предоставляет следующие преимущества:

- сокращения количества сообщений, которыми обмениваются в процессе работы установки в линии; принтеру нет необходимости постоянно отправлять запросы на сервер о том, произошло ли какое-то событие или нет;
- сокращение времени между возникновением события (обнаружения дефекта или тенденции к появлению брака) и получением информации принтером о том, как решить данную проблему [39].

Схематично связь АПТП-3D SPI представлена на рисунке 23. В представленной системе в качестве датчика выступает камера, находящаяся в установке 3D инспекции. 3D SPI проводит неразрушающий оптический контроль сборки, при этом чаще всего используются методы многочастотного муара или лазерной триангуляции.

При неразрушающем контроле датчик получает данные об отпечатках паяльной пасты на печатной плате. Полученные данные о смещении отпечатка паяльной пасты сравниваются с допустимыми значениями и в случае выхода из допуска или обнаружения тенденции к выходу 3D SPI отправляет сообщение на сервер о появлении события. После получения сообщения сервер, используя базу знаний, обрабатывает полученную информацию.

После вышеуказанных действий сервер либо отправляет инструкции принтеру трафаретной печати, либо производит оповещение оператора линии на ремонтной станции.

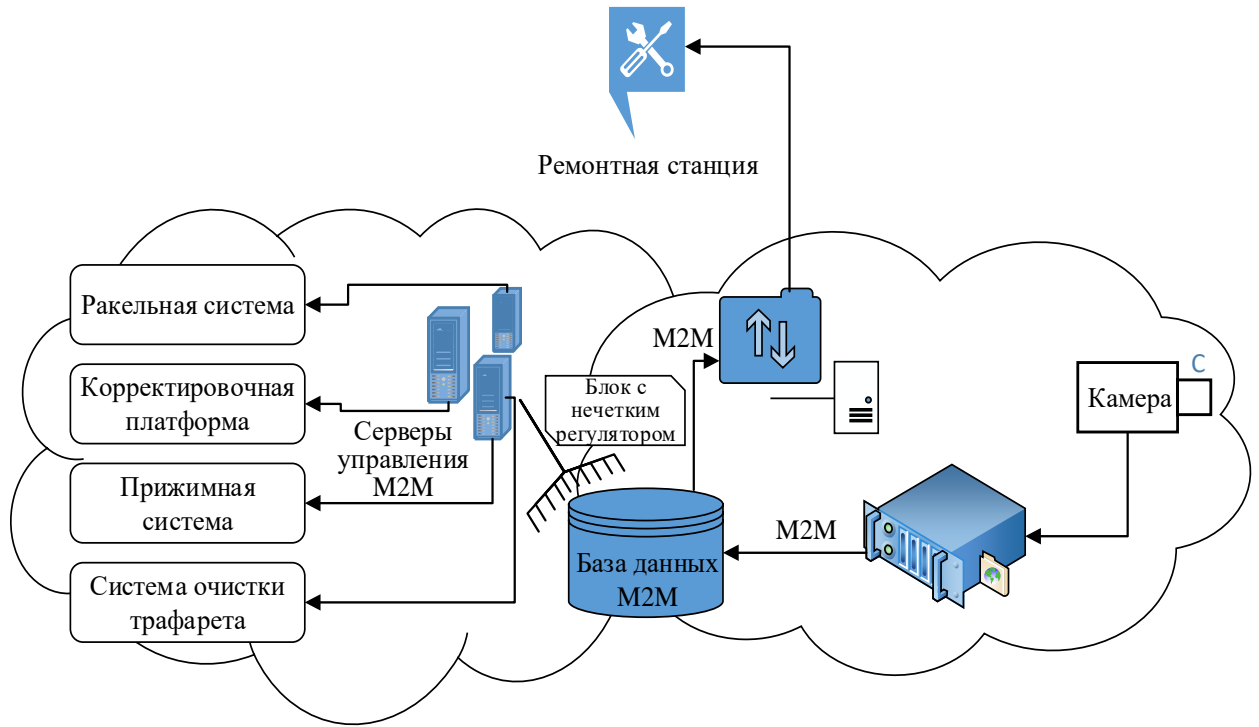


Рисунок 23 – Связь автоматического принтера трафаретной печати и 3D SPI

Виды дефектов печатных плат в соответствии ГОСТ Р 56251-2014 «Платы печатные. Классификация дефектов» [54] представлены на рисунке 24.



Рисунок 24 – Виды дефектов печатных плат в соответствии ГОСТ Р 56251-2014 «Платы печатные. Классификация дефектов»

В печатной радиоэлектронике в среднем различают 10 видов дефектов:

1. Solder Bridging – Соединение припоя.
2. Lifted Components (Tombstone) – Поднятые компоненты (надгробная плита).
3. Excessive Solder – Чрезмерный припой.
4. Solder Balling – Припой Balling.
5. Solder De-Wetting/Non-Wetting – Смачивание и растекание припоя.
6. Lifted Pads – Поднятые колодки.
7. Pin Holes & Blow Holes – Булавки и выдувные отверстия.
8. Solder Skips – Припой пропускает.
9. Solder Flags – Флаги припоя.
10. Solder Discoloration – Обесцвечивание припоя.

При распознавании данных дефектов от сервера на принтер поступают команды, которые предназначены ликвидировать причины несоответствий (таблица 2).

Таблица 2 – Команды обратной связи АПТП-3D SPI

Дефект	Причины появления	Действия по устранению
Недостаток пасты на контактных площадках	1. Недостаточная жесткость ракеля* 2. Высокое давление ракеля 3. Большой размер апертур*	Сервер отправляет на принтер команду «уменьшить давление ракеля». Корректируется работа ракельной системы.
Избыток пасты на контактных площадках	1. Низкое давление ракеля; 2. Истирание кромки ракеля («вмазывание» пасты); 3. Зазор между трафаретом и платой; 4. Большая толщина трафарета*; 5. Недостаточная поддержка платы снизу*	Сервер отправляет на принтер команду «увеличить давление ракеля» Корректируется работа ракельной системы. Сервер отправляет на ремонтную станцию оповещение «необходимость замены ракеля». Сервер отправляет на принтер команду «устранить зазор». Корректируется прижимная система.

Смещение пасты относительно контактных площадок	Плохое совмещение трафарета с рисунком печатной платы	Сервер отправляет на принтер команду «скорректировать точность совмещения трафарета с ПП». Корректировочная платформа устанавливает правильное положение трафарета относительно ПП.
Перемычки	1. Слабое натяжение трафарета на раме 2. Низкая вязкость паяльной пасты 3. Повреждения (деформация) трафарета	Сервер отправляет на принтер команду «увеличить натяжение принтера». Сервер отправляет на принтер команду «снизить скорость перемещения ракеля». Корректируется рапельная система. Сервер отправляет на ремонтную станцию оповещение о необходимости замены пасты. Сервер отправляет на ремонтную станцию оповещение о необходимости замены трафарета.

*Причины, которые не относятся к отклонениям в работе принтера

На сегодняшний день существует множество производителей оборудования технологических линий печатных плат, например, Yamaha, Walter Lemmen GmbH, IMO GmbH, INVACU, TWS Automation, SJ Innotech, JUKI, BOKAR Int., Vitronics Soltec, QINE, SYSTRONIC GmbH & Co.KG, Exmore и др. Многие из перечисленных производителей предлагают оборудование для монтажа радиоэлектронных изделий полного цикла:

1. Дозаторы пасты и клея;
2. Трафаретные принтеры;
3. Установщики компонентов;
4. Печи оплавления;
5. Установки для пайки волной;
6. Установки оплавления паром;
7. Установки селективной пайки;
8. Системы контроля;
9. Системы маркировки;

10. Конвейерные системы;
11. Системы отмывки РСВ;
12. Системы влагозащиты;
13. Инструменты для пайки.

Трафаретные принтеры производители предлагают автоматические, полуавтоматические или ручные.

Один из наиболее распространенных производителей оборудования для монтажа радиоэлектронных изделий – Yamaha. Машины нового поколения компании-производителя оснащены оптическими камерами, осуществляющими сканирование расположения компонентов по X, Y, Z осям.

Функционирование вышеперечисленных установок осуществляется следующим образом: когда SPI выявляет отклонения, которые выходят за пределы допустимых значений, с помощью базы знаний формируется и отправляется управляющий сигнал на корректировку автоматическому принтеру трафаретной печати. В зависимости от дефекта SPI дает принтеру следующие команды:

- перезагрузка принтера;
- очистка трафарета;
- смещение печатной платы;
- изменение усилия ракеля;
- замена трафарета;
- изменение скорости прохода ракеля;
- изменить натяжение трафарета и т.д.

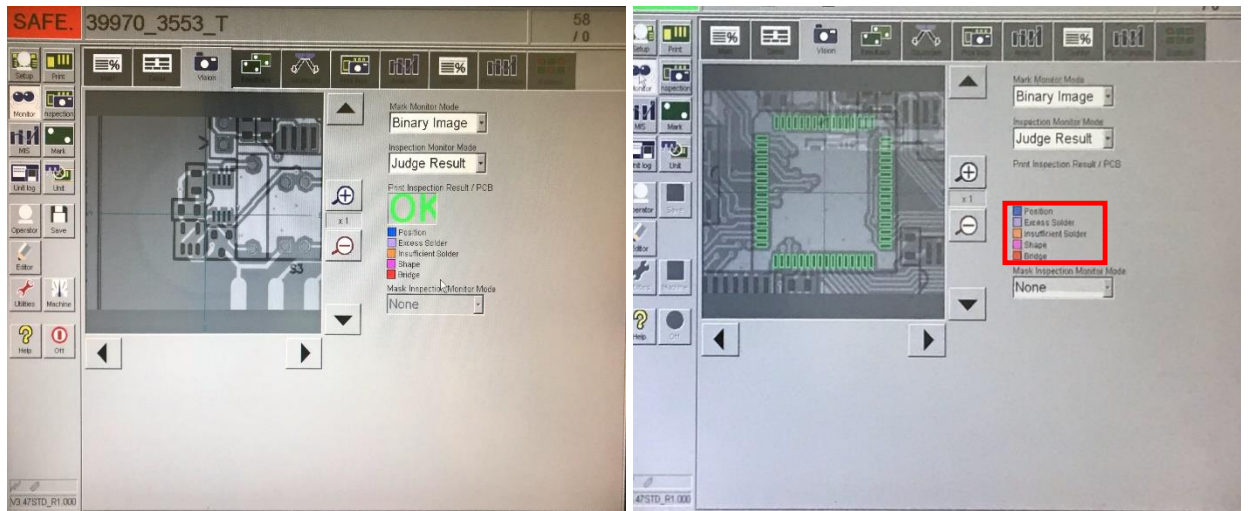
Если в базе знаний нет решения, то информация о несоответствиях отправляется на ремонтную станцию, на которой дальнейшие решения принимает специалист. База знаний при необходимости дополняется.

3D SPI способен определять следующие дефекты:

- Недостаток/избыток пасты на контактных площадках;
- Смещение пасты относительно контактных площадок;
- Перемычки;

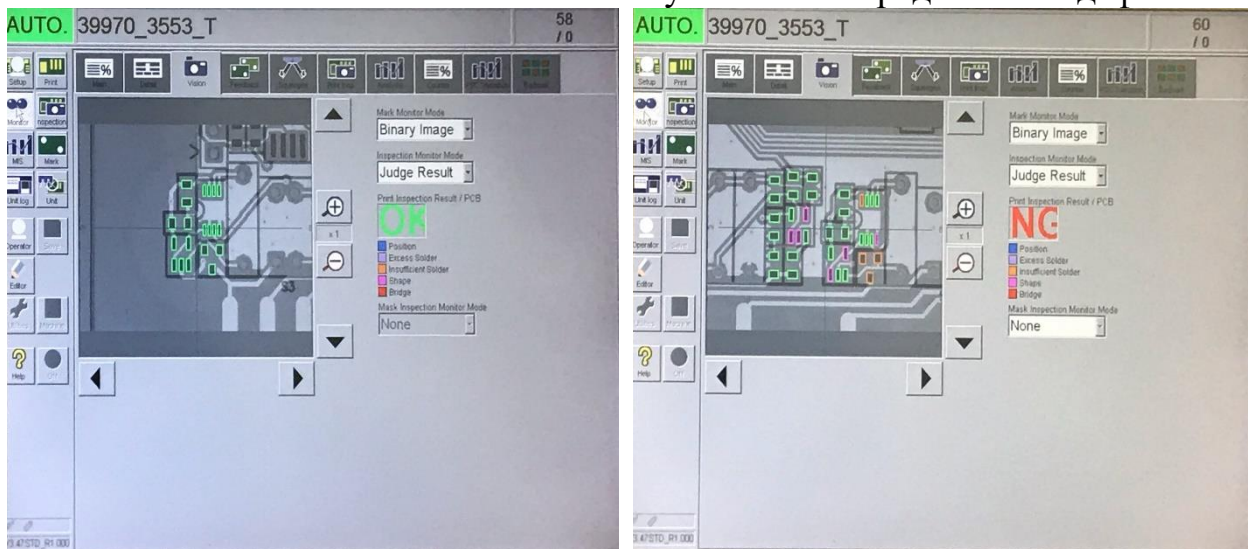
– Смазывание пасты.

Основные виды дефектов, идентифицируемые оборудованием нового поколения представлены на рисунке 25.



а – Состояние соответствия

б – Состояние соответствия с
указанием определяемых дефектов



в – Состояние соответствия

г – Обнаружение дефектов на
печатной плате

Рисунок 25 – Основные виды дефектов, идентифицируемые оборудованием нового поколения

Как представлено на практическом примере, проводимом на предприятии ООО «ПАНТЕС групп» [55], оборудование Yamaha идентифицирует 4-5 видов дефектов:

1. Position Позиция.
2. Excess solder Лишний припой.

3. Insufficient solder Недостаточный припой.
4. Shape форма.
5. Bridge (или solder bridging) паяное соединение.

В процессе работы с оборудованием предприятия попытка искусственно создать дефект и ожидать отклика от системы обнаружения (рисунок 26).

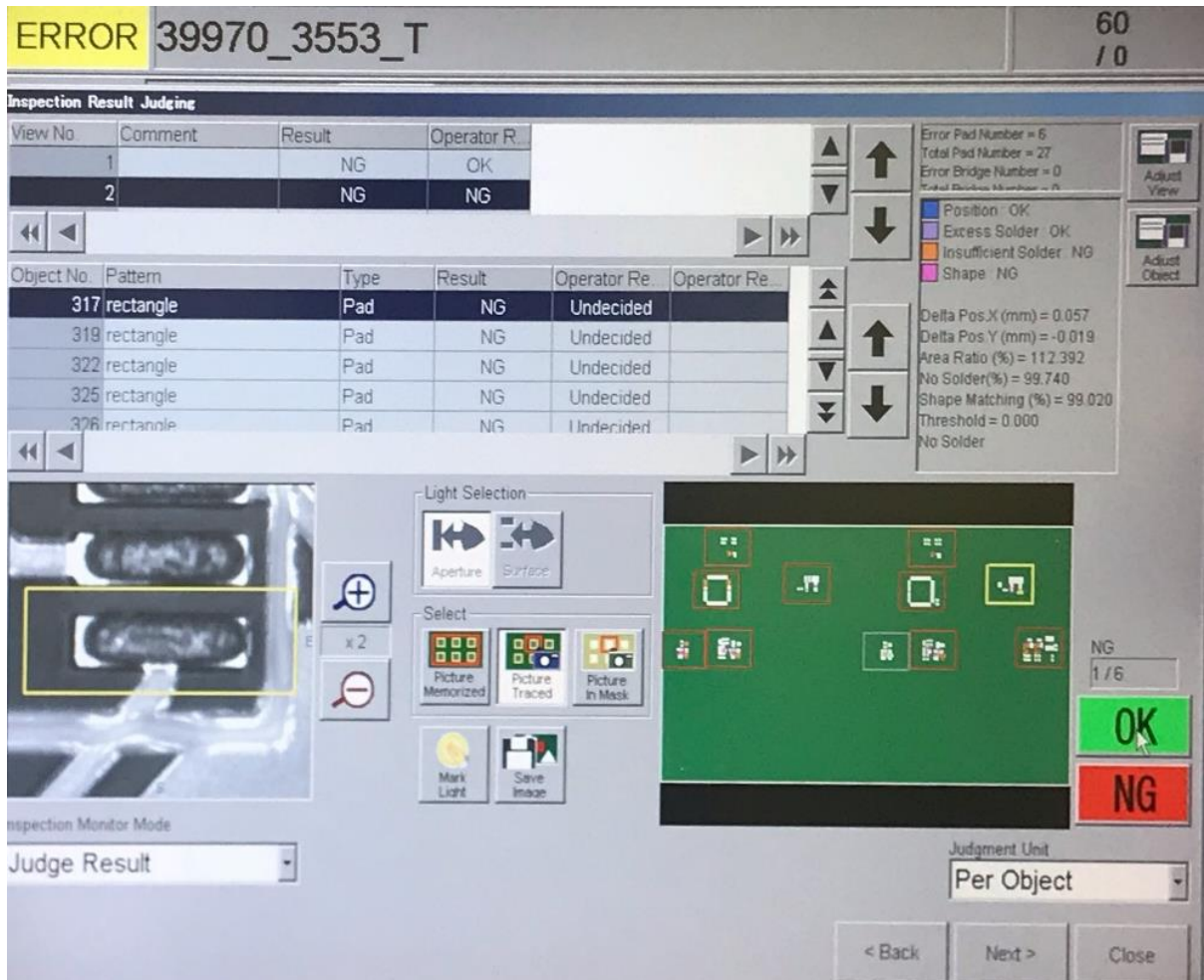


Рисунок 26 – Определение состояния несоответствия производственным оборудованием (вывод ошибки)

Система обнаружения перевела плату в состояние «ERROR» и потребовала оператора принять решение о действиях, направленных на устранение несоответствия заранее заданным критериям для продолжения работы. Современное производственное оборудование печатной радиоэлектроники идентифицирует до 8 видов несоответствий, однако, как правило, не способно самостоятельно принимать решение по корректировке выявленного дефекта.

Сквозное цифровое проектирование ПП представляет собой передачу результатов моделирования одного этапа на последующий в едином программном комплексе, учитывая вносимые изменения на каждой стадии ПП. Одной из современных систем сквозного САПР, решающих задачи конструкторского проектирования электронных устройств.

Процесс проектирования радиоэлектроники состоит из трех основных этапов:

1. Системотехнический (внешнее и структурное проектирование),
2. Схемотехнический (разработка и анализ спроектированных схем и подбор диагностических (испытационных) тестов);
3. Технический.

Функциональная сложность сквозного цифрового проектирования ПП объясняется многократностью моделирования этапов производства. Сложностью сквозного моделирования является привлечение большого количества участников, высокий уровень детализации и использования сложнейших информационных технологий (систем автоматизированного проектирования и систем управления данными). Таким образом, возникает необходимость в разработке моделей и методик поэтапной организации цифрового производства для повышения результативности и обеспечения качества радиоэлектронной продукции.

1.5 Результаты и выводы по главе 1

1. Исследованы текущее состояние и перспективы развития интеграции технологических инноваций в производственные процессы изготовления радиоэлектроники. В результате анализа текущего состояния и перспектив интеграции ТИ в ПП изготовления радиоэлектроники выявлено, что основным направлением совершенствования организации производства радиоэлектроники для обеспечения качества продукции является поэтапная организация ЦП посредством внедрения элементов концепции «Индустрия 4.0».

2. Представлены общая характеристика и основные особенности внедрения элементов концепции «Индустрия 4.0» на цифровом производстве.

3. Проведен анализ текущей ситуации и выявлены направления совершенствования организации производства радиоэлектроники на основе оценки патентной активности.

4. Представлено обоснование направлений совершенствования производственного процесса монтажа радиоэлектронных изделий за счет внедрения киберфизических систем.

5. Выделены особенности организации технологического процесса монтажа радиоэлектронных изделий в условиях внедрения цифрового производства.

Качественный уровень радиоэлектроники обеспечивается использованием производственных систем с возможностью не только диагностировать, но и прогнозировать возможное техническое состояние изделия на всех этапах ЖЦ.

Задача повышения результативности процесса производства радиоэлектронных изделий и увеличения вероятности выхода годных изделий может быть решена при адаптации отдельных принципов концепции «Индустрия 4.0» (интернет вещей (IoT), M2M, распределенные реестры и т.д.) к ПП на отечественных предприятиях на всех этапах ЖЦ продукции.

2 Разработка моделей и методики повышения результативности технологического процесса изготовления радиоэлектронных изделий в условиях цифровизации производства

2.1 Детализация этапов процесса автоматического монтажа радиоэлектроники за счет внедрения технологических инноваций с использованием аппарата марковских цепей

На сегодняшний день радиоэлектронная промышленность является одной из наиболее динамично развивающихся отраслей, осуществляющей разработку и производство высокотехнологичной наукоемкой продукции мирового уровня. Устойчивое развитие и эффективное функционирование и выполнение намеченных планов в радиоэлектронной отрасли являются необходимыми условиями достижения высоких показателей экономического роста государства.

Все более актуальным становится процессный и ситуационный подходы, обеспечивающие адаптивное управление всеми стадиями ЖЦ производства продукции от маркетинга и изучения рынка до утилизации. Жизненный цикл изделий радиоэлектроники на предприятии представлен на рисунке 27.



Рисунок 27 – Жизненный цикл радиоэлектронных изделий

Процесс изготовления печатных плат для радиоэлектроники представляет собой сложный набор операций, требующих участия персонала с высокой квалификацией, способного оперативно встраивать ТИ в ПП. Качественные характеристики изготавливаемой продукции в полной мере зависят от соответствия стадий ЖЦ нормативной и технологической документации [11].

Вопросы прогнозирования будущего состояния ТП, ремонта или обслуживания исследуются и анализируются с помощью накопленных статистических данных, а корректному их отображению способствуют интеллектуальные автоматизированные системы, созданные на основе элементов концепции «Индустрия 4.0» такие как промышленный интернет, большие данные, межмашинное взаимодействие, распределенные реестры, аддитивное производство и т.д. Модель цифрового производства представлена на рисунке 28.

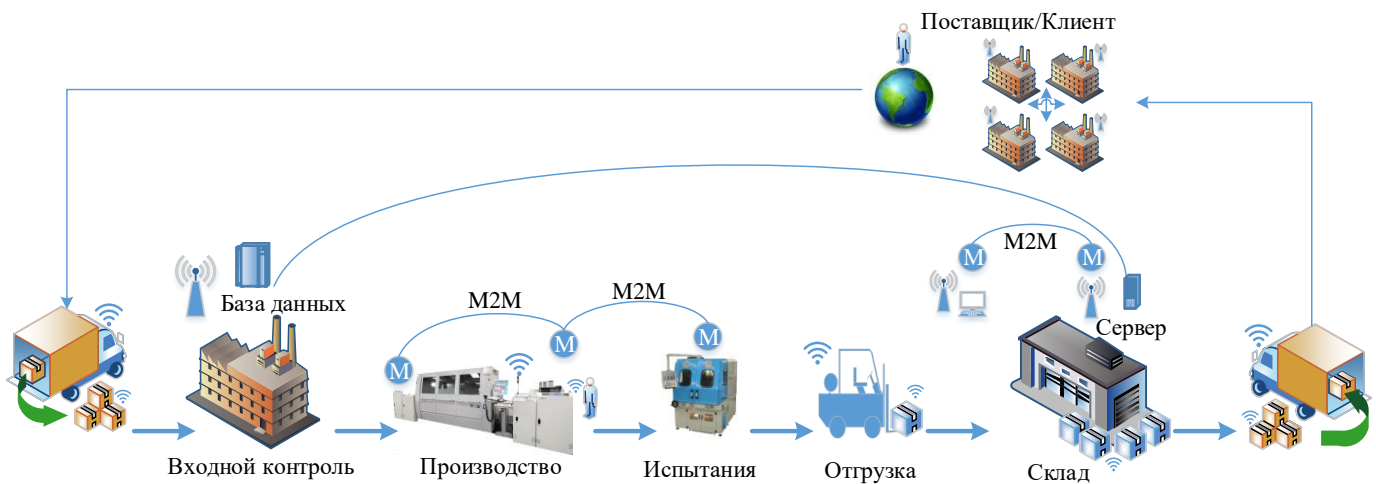


Рисунок 28 – Модель цифрового производства радиоэлектроники

В реальном ПП изготовления радиоэлектроники соответствие операций технологического цикла требует применения сложных алгоритмов раздельного учета и контроля каждой технологической стадии.

Для разработки модели структуризации и типизации ПП на основе оценки вероятностей переходов состояний технологической линии при производстве печатных плат для радиоэлектроники использовалась теория

марковских процессов. Ввиду дискретности пространства состояний ПП применен частный случай марковского процесса, а именно марковская цепь. Применение Марковских методов подробно изложено в ГОСТ Р МЭК 61165–2019 [56]. Использование указанного математического аппарата позволило в созданной модели наращивания структуры автоматической линии учесть необходимые условия статической устойчивости.

Цепи Маркова использованы для описания модели по этапам производства радиоэлектроники, в связи с тем, что данный математический аппарат позволяет оценивать многие характеристики ТП, такие как вероятное время завершения определенных этапов работы, достоверность контроля, степень близости параметра к полю допуска и т.д.

Использование теории марковских цепей эффективно в условиях, требующих реализации гибких стратегий управления и принятия оперативных адекватных и результативных решений, позволяет раскрыть не только структуру изделия, состоящего из отдельных элементов, но и выполнить декомпозицию ПП для диагностики систем с дискретным и непрерывным временем, что позволяет обеспечивать высокую достоверность и точность получаемых решений.

Моделирование по этапам производства позволяет раскрыть не только структуру изделия, но и показать топологию ТП его изготовления. Производственный процесс изготовления электронных устройств можно представить в виде трех укрупненных этапов (уровней), представленных на рисунке 29.



Рисунок 29 – Укрупненные этапы (уровни) производственного процесса изготовления радиоэлектроники

Первый этап представляет собой ПП изготовления электронных устройств (рисунок 30). Процесс представлен в виде графа, в котором вершина

P_0 (product) определяет заготовку изделия из которой производится готовое устройство (вершина P_n).

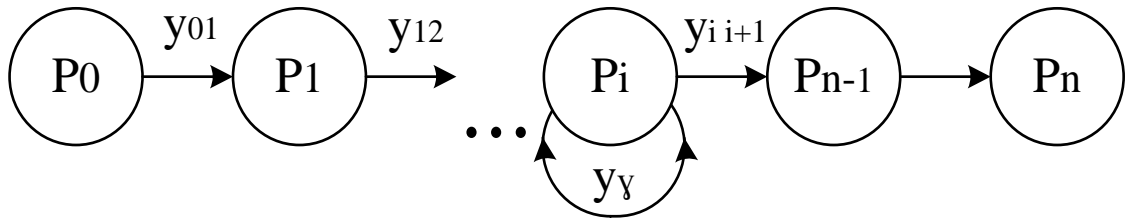


Рисунок 30 – Модель процесса изготовления радиоэлектроники (модель первого уровня)

На рисунке 31 проиллюстрирован ПП изготовления радиоэлектронных устройств с указанием вероятностей переходов процесса. Описание модели технологического процесса изготовления изделия представлено матрицей (2).

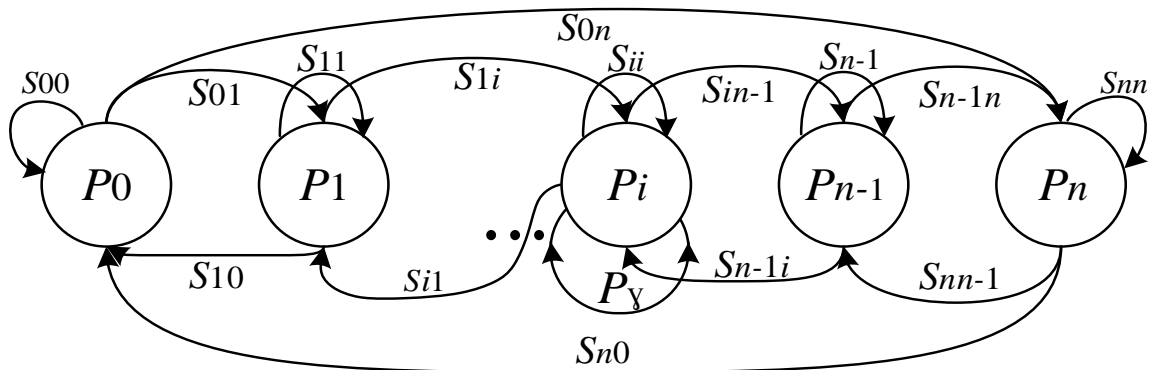


Рисунок 31 – Модель технологического процесса изготовления изделия

$$S = \begin{bmatrix} S_{00} & S_{01} & 0 & 0 & S_{n0} \\ S_{01} & S_{11} & S_{1i} & 0 & 0 \\ 0 & S_{i1} & S_{ii} & S_{i-n1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{n-1n-1} & S_{n-1n} \\ S_{n0} & 0 & 0 & S_{m-1} & S_{nn} \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Второй этап производства представляет собой монтаж изделия, в моделировании процесса участвуют компоненты и элементы системы. ПП монтажа включает в себя ряд последовательных операций по установке,

созданию различных видов соединений составных частей изделия (рисунок 32).

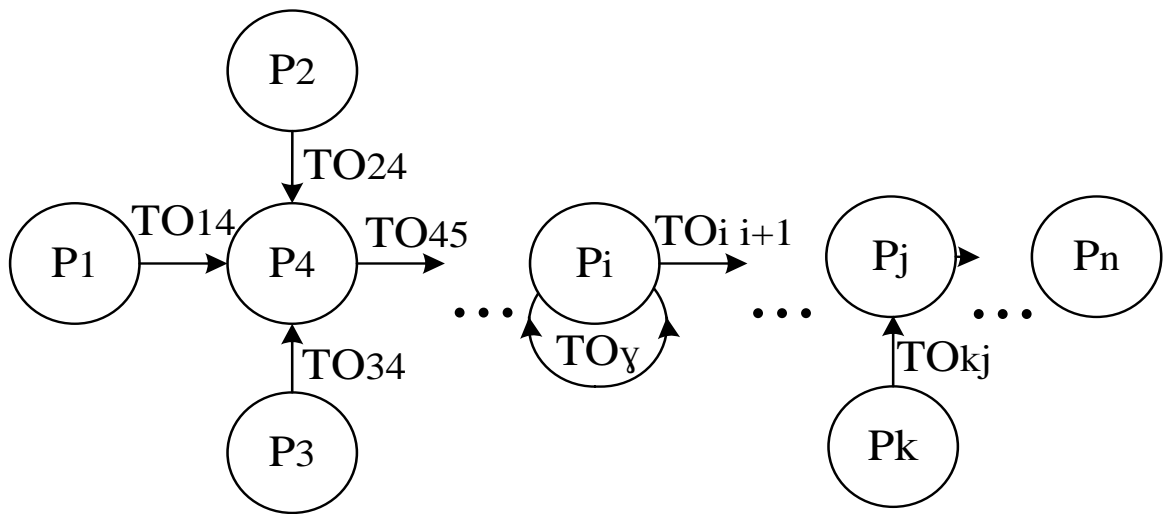


Рисунок 32 – Модель процесса монтажа радиоэлектроники (модель второго уровня)

Изображенные на рисунке 32 вершины P графа определяют промежуточное состояние собираемого изделия, соединительные линии TO (technological operation) описывают ПП на данном этапе сборки, дуга TO_y характеризует присоединение к элементам системы дополнительных материалов (припой, уплотнители, сплавы, мастики), необходимых для осуществления сборки [45].

На рисунке 33 проиллюстрирован ПП монтажа электронных устройств с указанием вероятностей переходов процесса. Описание модели технологического процесса монтажа изделия представлено матрицей (3).

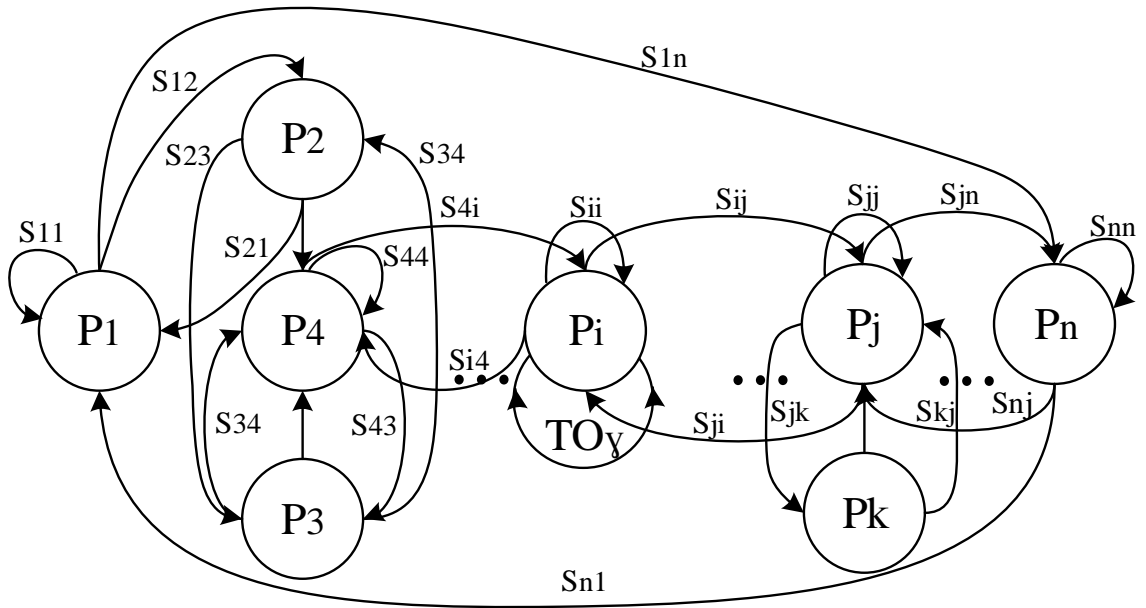


Рисунок 33 – Модель технологического процесса монтажа изделия

$$S = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{18} \\ S_{21} & 0 & S_{23} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & S_{32} & 0 & S_{34} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & S_{43} & S_{44} & S_{4i} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{i4} & S_{ii} & S_{ij} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{ji} & S_{jj} & S_{jk} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ S_{81} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{mn} \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Заключительный этап ПП – наладка и испытание готового изделия (рисунок 34). Именно от этого этапа в значительной степени зависит работоспособность, ремонтпригодность и надежность выпускаемого продукта, которые определяются после проведения операций контроля, регулировки и испытания готового изделия [42].

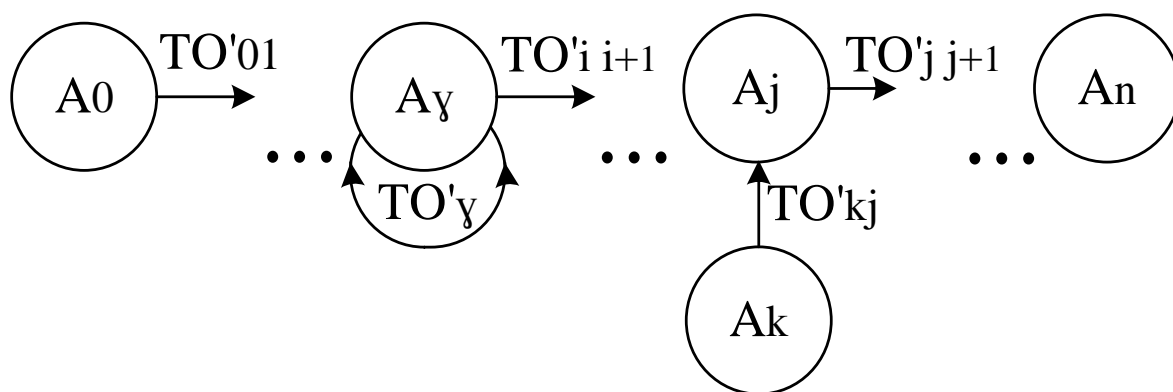


Рисунок 34 – Модель процесса наладки и испытания радиоэлектроники (модель третьего уровня).

В процессе наладки (регулировки) возможно присоединение материалов или необходимых элементов (A_k) для настройки изделия, а также выполнение дополнительных технологических операций (TO_y) необходимых для корректной работы устройства.

На рисунке 35 проиллюстрирован ПП наладки и испытания радиоэлектронных устройств с указанием вероятностей переходов процесса. Описание модели технологического процесса наладки и испытания изделия представлено матрицей (4).

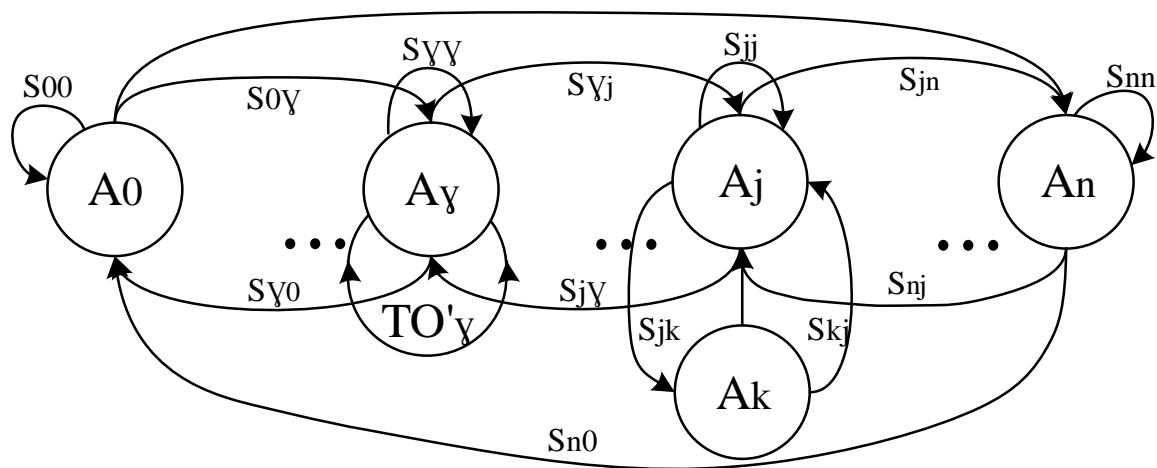


Рисунок 35 – Модель технологического процесса наладки и испытания изделия

$$S = \begin{bmatrix} S_{00} & S_{0j} & 0 & 0 & S_{0n} \\ S_{j0} & S_{jj} & S_{ji} & 0 & 0 \\ 0 & S_{ij} & S_{ii} & S_{ik} & 0 \\ 0 & 0 & S_{ij} & 0 & 0 \\ S_{n0} & 0 & 0 & 0 & S_{nn} \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Готовое изделие может быть охарактеризовано показателями, определенными из анализа остальных элементов графа и своевременного выявления дефектов.

Произведенная декомпозиция производственного процесса с использованием теории графов позволяет разработать адаптивную модель технологического цикла изготовления электронных изделий адекватным образом учитывающую особенности каждого этапа ПП (рисунок 36) с учетом последовательности состояний вероятностей перехода.

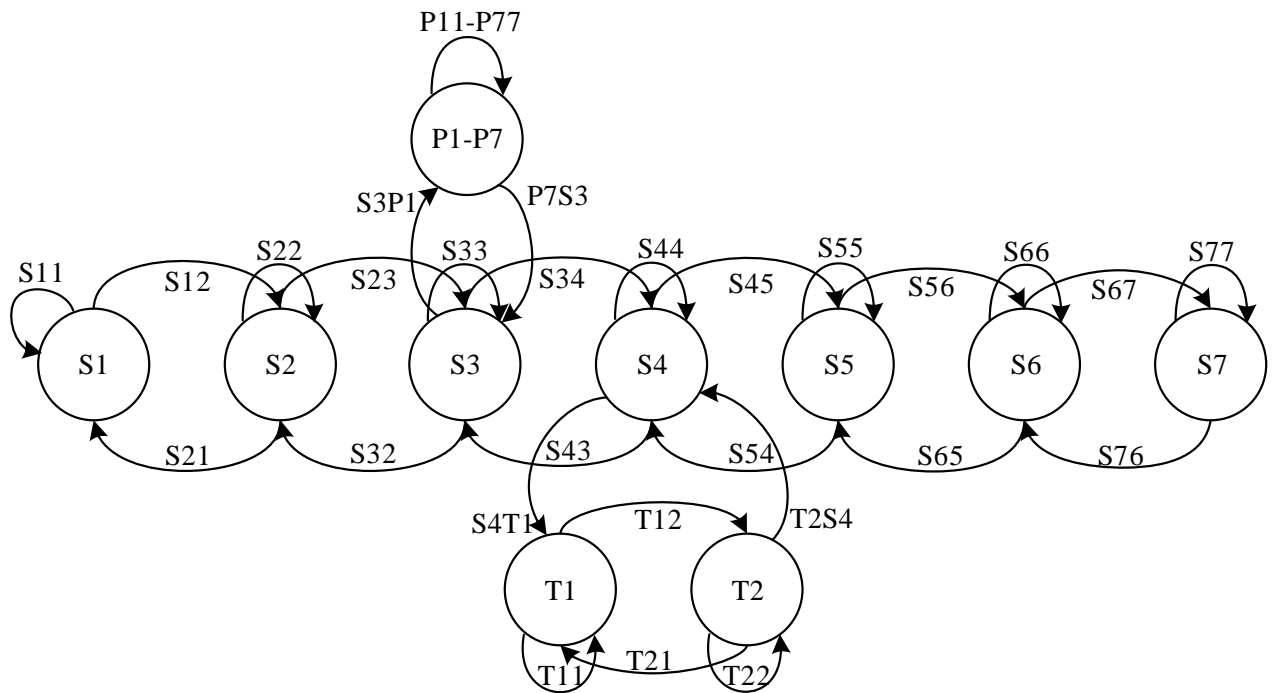


Рисунок 36 – Граф технологического цикла изготовления радиоэлектронных изделий с учетом последовательности состояний вероятностей перехода

Описание графа технологического цикла изготовления радиоэлектронных изделий с учетом последовательности состояний вероятностей перехода представлено матрицей (5).

$$S = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & S_{32} & S_{33} & S_{34} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & S_{43} & S_{44} & S_{45} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{54} & S_{55} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{65} & S_{66} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66} & S_{67} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{76} & S_{77} \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Представленная модель детализированного ПП при изготовлении радиоэлектронных изделий позволяет выделить критические стадии для внедрения технологических инноваций. Граф поэтапной организации монтажа радиоэлектронных изделий с использованием технологических инноваций, предложенных в диссертационном исследовании представлен на рисунке 37.

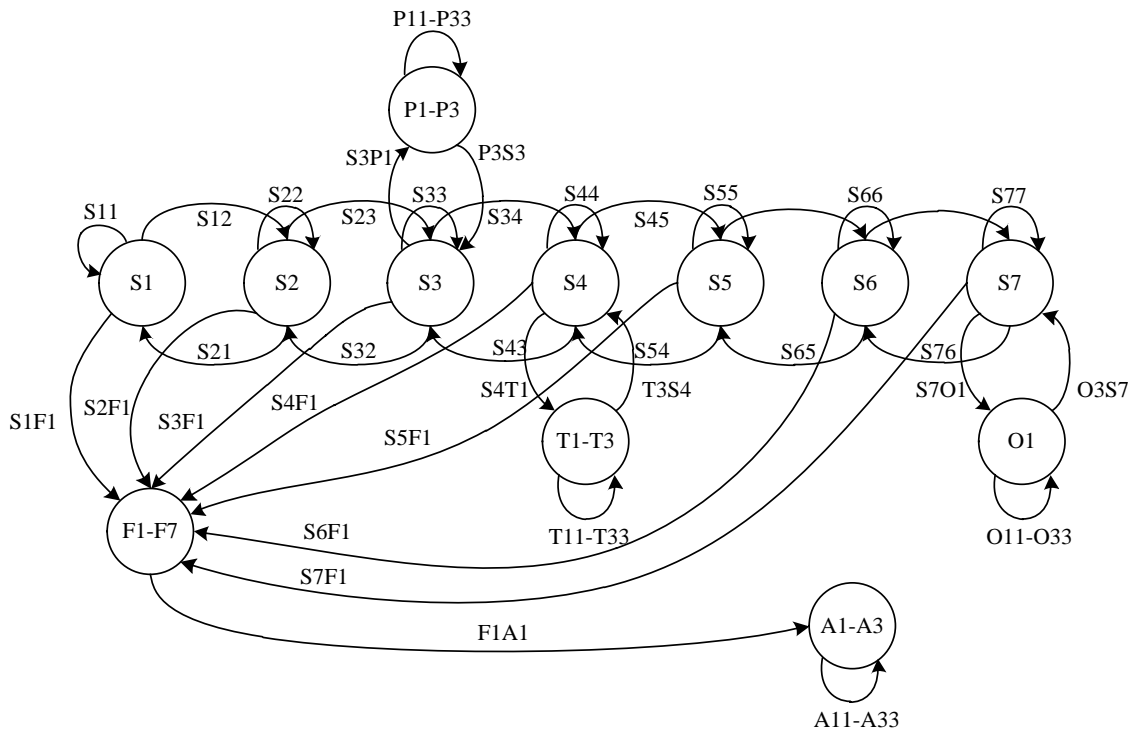


Рисунок 37 – Граф поэтапной организации монтажа радиоэлектронных изделий с использованием технологических инноваций, предложенных в диссертационном исследовании

Для повышения результативности необходимо детализированное рассмотрение состава, структуры и модели производства радиоэлектроники (рисунок 38).



Рисунок 38 – Процессный подход производственного цикла изготовления радиоэлектроники

При разработке модели произведена пооперационная детализация ТП. Создание математической модели определено недостаточной степенью проработанности вопросам моделированию ПП в рамках создания передовых технологических систем, реализуемых на основании элементов цифрового производства.

С применением модели осуществляется анализ состояния цифровой линии на этапах изготовления, монтажа, наладки и испытания изделия в процессе встраивания компонентов «Индустрия 4.0», таких как промышленный интернет, большие данные, M2M, распределенные реестры, аддитивное производство и т.д.

Этапы, изложенные в модели, содержат элементы концепции КФС, так как подразумевает непосредственную интеграцию вычислительных ресурсов в физические процессы, подвергаемые мониторингу. Детализированная

модель предназначена для поэтапного внедрения технологических инноваций в цифровое производство радиоэлектроники.

2.2 Модель повышения вероятности выхода годных изделий радиоэлектроники в технологическом процессе при заданных требуемых значениях

Концепция «Индустрия 4.0» и ее реализация в виде «цифрового производства» охватывают все этапы жизненного цикла. Однако для конкретных технологий и производственного цикла должна быть сформирована стратегия развития, определяющая выбор методов и средств организации производства. Исходя из направления исследования, такие процессы могут и должны быть реализованы поэтапно для цифрового производства радиоэлектроники. В этой интенсивно развивающейся области описаны, по меньшей мере, две стратегии развития.

Первая – эффективное использование оборудования, включая оптимизацию режимов работы и загрузки оборудования, повышение производительности труда. Вторая – обеспечение качества продукции на стадии проектирования.

Одновременная реализация двух или более стратегий неэффективна, поэтому для рассматриваемых процессов в цифровом производстве радиоэлектроники на ряде предприятий при выборе стратегии первая была признана менее актуальной, что подтверждено успешным опытом надежного оборудования при выполнении требований эксплуатации [55]. Актуальность и выбор второй стратегии определяются большим значением человеческого фактора при проектировании для производства (DFF), в частности, при разработке эскизно-конструкторской документации: ошибками в проектировании принципиальных электрических схем, в выборе компонентной базы, и, как следствие, в проектировании топологии печатных плат (printed circuit board, далее – PCB), например, с использованием программных продуктов Gerber, Altium, PADS, OrCAD.

Развитие технологий для создания радиоэлектроники охватывает широкий круг областей. При написании модели рассматриваются некоторые методы и технологии, необходимые для развития процессов поэтапной организации цифрового производства радиоэлектронных печатных плат.

Конструирование электрических схем выполняется с помощью системы автоматизированного проектирования электроники, а именно графическом редакторе принципиальных электрических схем P-CAD Schematic. Результатом сквозного процесса проектирования является файл PCB, выполненный в графическом редакторе печатных плат P-CAD PCB.

В условиях, когда требования к результативности ТП непрерывно повышаются, изготовление и монтаж радиоэлектроники труднореализуемы без применения технологических инноваций. Внедрение элементов концепции «Индустрия 4.0» открыло новые возможности для роста результативности ТП изготовления радиоэлектронной продукции на основе более полной цифровизации производства.

Принимая во внимание мировые тенденции к интеллектуализации ТП изготовления радиоэлектроники, предлагается внедрять элементы концепции «Индустрия 4.0» поэтапно, на основе анализа средств и процессов производства в рамках структурного, функционального и информационного описаний [57].

При разработке математической модели структуризации и типизации ПП на основе оценки вероятностей переходов состояний производственной линии при монтаже радиоэлектронных изделий изначально рассматривались следующие этапы ПП при организации ЦП радиоэлектроники:

1. Операция трафаретной печати;
2. Операция нанесения паяльной пасты;
3. Операция установки компонентов;
4. Операция оплавления;
5. Операция лазерной маркировки

При выполнении операции необходимо рассмотреть вероятность перехода из предыдущего состояния (этапа) S_i в последующее состояние (этап) S_{i+1} . Обозначим ее как $P_{i,i+1}$. Требования к минимально допустимому значению $P_{i,i+1}$ заданы существующей нормативной документацией как 0,97 [46, 47, 54]. В случае расхождения с надлежащими ГОСТ и нормативной документацией произойдет переход не в следующее состояние (на следующий этап), а в состояние несоответствия (fail). Обозначим вероятность перехода в состояние несоответствия как P_{if} [58]. Граф переходов для пяти приведенных выше состояний представлен на рисунке 39.

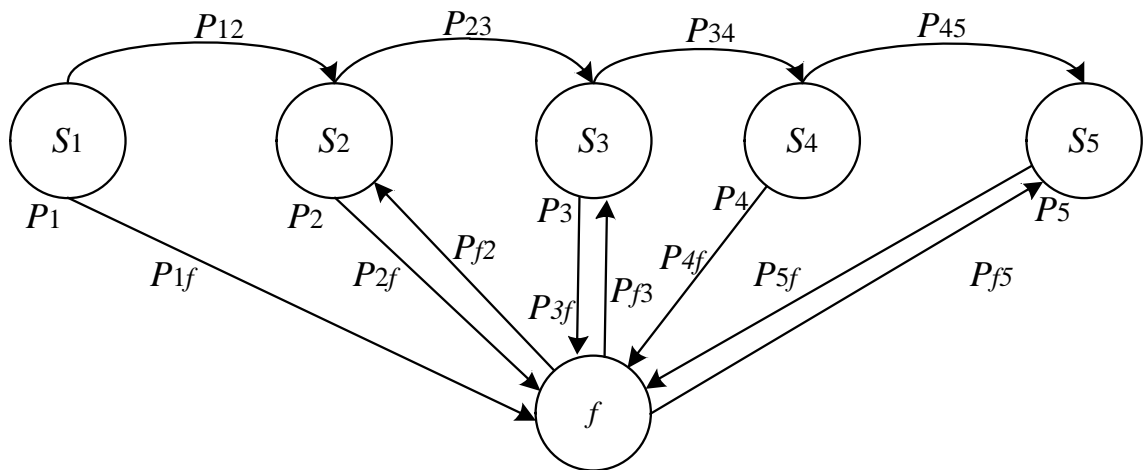


Рисунок 39 – Граф состояний ПП монтажа радиоэлектронных изделий для пяти этапов

Наличие ненулевых вероятностей P_{f2} , P_{f3} и P_{f4} говорит о том, что в случае выявления несоответствий при выполнении установки компонентов (2), нанесения паяльной пасты (3) и лазерной маркировки (5) данные операции могут быть выполнены повторно после проведения корректирующих действий.

Вероятности перехода задаются матрицей (6):

$$P = \begin{bmatrix} 0 & P_{12} & 0 & 0 & 0 & P_{1f} \\ 0 & 0 & P_{23} & 0 & 0 & P_{2f} \\ 0 & 0 & 0 & P_{34} & 0 & P_{3f} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & P_{45} & P_{4f} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & P_{5f} \\ 0 & P_{f2} & P_{f3} & P_{f4} & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Определим повышение результативности процесса как уменьшение значений вероятностей перехода в состояние несоответствия. Начальный вектор состояний отражает распределение вероятностей в начале процесса $[P_1(0), P_2(0), \dots, P_i(0), \dots, P_5(0)]$. Он задается на основе накопленных статистик.

Получена следующая формула вычисления вероятности нахождения ПП на i -том этапе в k -тый момент времени $P_i(k)$ (7):

$$P_i(k) = \sum_{i=1}^k P_i(k-1) \cdot P_{i,k} - \sum_{i=1}^k (P_{fi} - P_{i,f}). \quad (7)$$

При полном отсутствии несоответствий $P_i(k) = 1$. Для рассматриваемого ПП из пяти этапов:

$$P_2(1) = P_1(0) \cdot P_{12} + P_2(0) \cdot P_{22} + P_3(0) \cdot P_{32} + P_4(0) \cdot P_{42} + P_5(0) \cdot P_{52} + P_6(0) \cdot P_{62} + P_7(0) \cdot P_{72} + P_f(0) \cdot P_{f2} = 1 \cdot 0,9702 + 0 \cdot 0 + 0 \cdot 0 + 0 \cdot 0 + 0 \cdot 0 + 0 \cdot 0 + 0 \cdot 0 + 0 \cdot 0 + 0 \cdot 0 = 0,9756.$$

$$P_3(2) = P_1(1) \cdot P_{13} + P_2(1) \cdot P_{23} + P_3(1) \cdot P_{33} + P_4(1) \cdot P_{43} + P_5(1) \cdot P_{53} + P_6(1) \cdot P_{63} + P_7(1) \cdot P_{73} + P_f(1) \cdot P_{f3} = 0 \cdot 0 + 0,9756 \cdot 0,9987 + 0 \cdot 0 + 0 \cdot 0 + 0 \cdot 0 + 0 \cdot 0 + 0 \cdot 0 + 0 \cdot 0 = 0,9774.$$

$$P_4(3) = P_1(2) \cdot P_{14} + P_2(2) \cdot P_{24} + P_3(2) \cdot P_{34} + P_4(2) \cdot P_{44} + P_5(2) \cdot P_{54} + P_6(2) \cdot P_{64} + P_7(2) \cdot P_{74} + P_f(2) \cdot P_{f4} = 0 \cdot 0 + 0 \cdot 0 + 0,9774 \cdot 0,9966 + 0 \cdot 0 + 0 \cdot 0 + 0 \cdot 0 + 0 \cdot 0 + 0 \cdot 0 = 0,9710.$$

$$P_5(4) = P_1(3) \cdot P_{15} + P_2(3) \cdot P_{25} + P_3(3) \cdot P_{35} + P_4(3) \cdot P_{45} + P_5(3) \cdot P_{55} + P_6(3) \cdot P_{65} + P_7(3) \cdot P_{75} + P_f(3) \cdot P_{f5} = 0 \cdot 0 + 0 \cdot 0 + 0 \cdot 0 + 0,9710 \cdot 0,9966 + 0 \cdot 0 + 0 \cdot 0 + 0 \cdot 0 + 0 \cdot 0 = 0,9815.$$

В настоящее время отечественными предприятиями промышленности активно внедряются рациональные технологии предварительного исследования критически важных объектов, обеспечивающие безопасность эксплуатации инженерных и технических систем путем разработки методик и процедур по анализу их текущей надёжности и оценке риска.

Анализ значений и изменений вероятностей состояний, в том числе P_f на i -том шаге МЦ может быть выполнен с помощью анализа причин и последствий отказов «Failure modes and effects analysis» (далее – FMEA) [59-64]. Тогда корректирующие действия по совершенствованию процессов включают дополнение технологическими инновациями в соответствии с принципами «Индустрия 4.0».

Использование метода FMEA целесообразно при определении упреждающих мероприятий реагирования на ситуации, связанные с возникновением рисков и угроз в ПП изготовления радиоэлектроники на линии автоматического монтажа в соответствии с ГОСТ Р 51814.2-2001 [65].

Одним из несомненных преимуществ этого метода является выявление неблагоприятных последствий до непосредственного воздействия на процесс, а также выработка превентивных мероприятий, выполнение которых позволит избежать негативных последствий.

Поскольку анализ рисков и угроз проводится экспертной группой, появляется возможность выработки адекватного решения в труднореализуемых задачах, характерных для многономенклатурного производства заводского типа в условиях их высокой формализации.

Для целей диссертационного исследования анализ проводился тремя экспертами, которые проранжировали и выделили наиболее важные показатели:

1. Тяжесть последствий для потребителя (severity, S_v).
2. Вероятность возникновения оцениваемого показателя (occurrence, O_c).
3. Рейтинг выявления оцениваемого показателя (detection, D_t).

Базовыми расчетами методики является расчет приоритетного числа рисков (далее – ПЧР) по формуле (8), а также проведение оценки значимости коэффициента конкордации (9) с помощью вычисления согласования по критерию Пирсона (10):

Формула расчета ПЧР выглядит следующим образом (далее – ПЧР) (8):

$$ПЧР = S_v O_c D_t. \quad (8)$$

Показатель ПЧР позволяет распределять по степени значимости потенциальные отказы. Например, более низкая вероятность обнаружения соответствует более высокому значению ПЧР и более высокой приоритетности вида несоответствия.

Далее определяются необходимые решения и упреждающие действия (далее – ПрД), исходя из величины ПЧР.

С целью подтверждения согласованности мнений экспертов в работе рассчитан коэффициент конкордации (9):

$$W = \frac{S}{\frac{1}{12}m^2(n^3 - n) - m\sum T_i}, \quad (9)$$

где n – число представленных к анализу показателей,

m – количество экспертов,

S – сумма квадратов разностей порядкового номера оцениваемого показателя;

T_i – число видов повторяющихся оцениваемых показателей в оценках каждого

i -го эксперта, $T_i = \frac{1}{12} \sum (t_l^3 - t_l)$.

t_l – количество повторяющихся оцениваемых показателей в первой связке для каждого i -го эксперта.

Если коэффициент конкордации больше 0,7, то степень согласованности мнений экспертов высокая, от 0,7 до 0,4 – удовлетворительная, от 0,4 до 0 – низкая.

Оценка значимости W вычисляется сравнением коэффициента Пирсона χ^2 (10) с принятым табличным значением. Если рассчитанный χ^2 больше табличного, то значение коэффициента конкордации неслучайное и результаты анализа можно использовать для дальнейшего исследования.

$$\chi^2 = \frac{S}{\frac{1}{12}mn(n+1) + \frac{1}{n-1}\sum T_i}. \quad (10)$$

Последовательность действий при проведении FMEA-анализа представлен на рисунке 40.

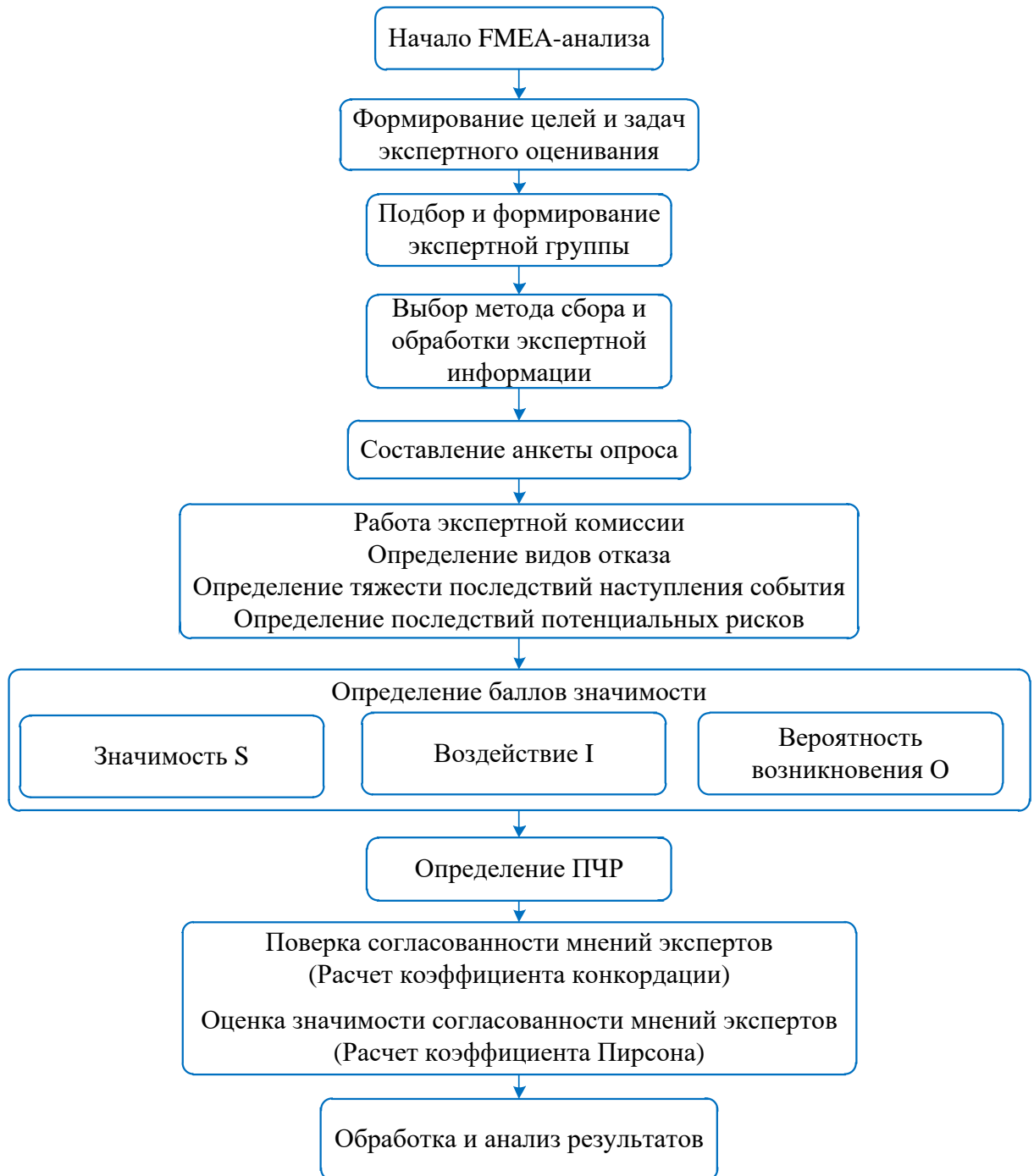


Рисунок 40 – Последовательность действий при проведении FMEA-анализа

В рамках диссертационного исследования рассмотрен процесс оценки возможного возникновения рисков в системе управления линией автоматического монтажа при производстве радиоэлектронных изделий, проанализированы возможные виды рисков и их последствия, в зависимости от этапа технологического цикла. В таблице 3 представлены наиболее важные виды угроз и рисков.

Таблица 3 – Характерные примеры угроз и рисков

Угрозы	Риски
Технологическая подсистема	
Высокая вероятность возникновения дефектов на радиоэлектронных компонентах и отказ от несоответствующей партии	Устаревшее производственное оборудование, которое невозможно адаптировать к ТИ
	Ошибочные действия персонала при возникновении нештатных ситуаций на линии АМ
	СУ не имеет необходимого интерфейса для контроля качества производимой продукции в процессе монтажа
Остановка технологического процесса автоматического монтажа ввиду возникновения бракованной партии	Неспособность СУ к адаптации и автоматической подстройке
	Низкий уровень интеллектуальности системы, неспособность к обучению и накоплению информации
	Длительность операций, связанных с переналадкой контрольного оборудования

После определения характерных для анализируемого процесса нежелательных параметров эксперты определяют наиболее приоритетный (для разработки мероприятий по сокращению влияния) риск с точки зрения вероятности его появления, возможности обнаружения и оценки значимости последствий (таблица 4).

Приоритетные риски, определенные в исследовании по результатам работы экспертной группы, представлены на рисунке 41.

Таблица 4 – Ранжирование рисков по ПЧР

№	Риск	ПЧР
1	Устаревшее производственное оборудование, которое невозможно адаптировать к ТИ	54
2	Ошибочные действия персонала при возникновении нештатных ситуаций на линии АМ	216
3	СУ не имеет необходимого интерфейса для контроля качества производимой продукции в процессе монтажа	48
4	Неспособность СУ к адаптации и автоматической подстройке	164
5	Низкий уровень интеллектуальности системы, неспособность к обучению и накоплению информации	326
6	Длительность операций, связанных с переналадкой контрольного оборудования	56



Рисунок 41 – Распределение рисков по ПЧР

На следующем этапе анализа и оценки рисков при производстве радиоэлектронной продукции на линии автоматического монтажа определяются необходимые решения и ПрД, исходя из величины ПЧР. Для определения результативности от разработанных предупреждающих действий необходимо провести ранжирование ПрД, аналогичное ранжированию рисков и угроз.

В таблице 5 приведены сформулированные в результате FMEA-анализа возможные причины нежелательных ситуаций и предупреждающие действия. Основной нежелательной ситуацией (риском) являются низкий уровень интеллектуальности производственного оборудования и неспособность к обучению и накоплению информации.

Выявлены четыре основные причины данного риска и разработан перечень предупреждающих действий. Разработке и анализу каждого из них ниже посвящено один или несколько параграфов диссертации.

Очевидным представляется выявление предупреждающих действий для минимизации риска, которые включают методы и средства устранения и управления угрозами, с встраиванием в ПП технологии Internet of things (IoT), в том числе: прогнозного моделирования, установки современных датчиков, отслеживающих производительность линии и идентифицирующих этапы, когда требуется вмешательство, способствующее оптимизации времени и повышению результативности ПП.

Применение методики FMEA, содержащей предупреждающие действия призвано обеспечить необходимой информационной поддержкой процесс генерирования управляющих воздействий, позволяющих повысить качество управления, гибкость ПП и сократить число отказов производственного оборудования.

Таблица 5 – Возможные причины нежелательных ситуаций и предупреждающие действия

Риск (нежелательная ситуация)	ПЧР (оценка появления этой ситуации)	Причины риска (другие нежелательные ситуации)	O_c	D_t	S_v	ПЧР	Необходимость принятия ПрД	Оценка уровня риска невыполнения действий					
								ПрД	Риск невыполнения ПрД (нежелательная ситуация)	O_c	D_t	S_v	ПЧР
Низкий уровень интеллектуальности производственного оборудования, неспособность к обучению и накоплению информации	326	Жесткий алгоритм действия СУ параметрами системы, запрограммированной на заводе изготовителе	5	4	5	100	ПрД необходимы	Введение в систему многопараметрического нечеткого регулятора и модуля управления, способного удерживать ТП в заданных границах (п. 3.3 диссертации)	Нехватка квалифицированных кадров. Изменение схемы функционирования системы.	5	2	5	50
		Управляющая СУ не имеет в своем составе базы знаний	6	5	9	270	ПрД необходимы	Включение в управляющий контур аппарата прогнозирования, технологий IoT, КФС, М2М и тд. (пп. 2.3, 3.2 диссертации)	Отсутствие базы накопленной статистики	3	3	6	54

		Функционал СУ не предусматривает самообучение и прогнозирование	5	7	9	315	ПрД необходимы	Встраивание в ПП модуля адаптации производственной линии в процессе внедрения технологий IoT, КФС, M2M, дающего возможность построения динамических систем (пп. 2.3, 3.2 диссертации)	Изменение схемы функционирования системы, требующее дополнительной трудоемкости	6	3	5	90
		Задержка реакции исполнительных устройств в ПП	5	6	5	150	ПрД необходимы	Введение принципов планирования и поэтапной организации мониторинга и адаптивного управления параметрами производственной линии, с элементами технологий IoT и M2M (п. 2.4 диссертации)	Изменение организации ПП с учетом критериальной оценки работоспособности состояния производственной линии, требующее больших затрат времени и финансов	5	2	8	80

Такой анализ целесообразно выполнять по результатам выпуска каждой промышленной партии изделия, когда при заданном распределении вероятностей состояний в начале процесса и вероятностях переходов МЦ может быть получено новое распределение вероятностей состояний, выполнена его оценка с применением FMEA-анализа и приняты меры для изменения вероятностей переходов. Это достигается внедрением адаптированных технологических инноваций на основе принципов концепции «Индустрия 4.0», создающих ЦП отечественных промышленных предприятий.

Применение предложенных подходов и оценок обеспечит устойчивое снижение процента брака. Последовательность процессов для разработки моделей может быть развита и улучшена, не нарушая целостности цифровой системы в целом.

В результате проведения анализа вида, причин и последствий отказов и полученных рекомендаций по адаптации принципов «Индустрия 4.0» от технических специалистов производственной линии и применение FMEA-анализа была произведена корректировка этапов ПП (таблица 6).

Таблица 6 – Корректировка этапов производственного процесса

№	Исходные этапы ПП	Откорректированные этапы ПП
1	Операция трафаретной печати	Операция загрузки печатных плат
2	Операция установки компонентов	Операция трафаретной печати
3	Операция нанесения паяльной пасты	Операция нанесения паяльной пасты
4	Операция оплавления	Операция загрузки и установки компонентов
5	Операция лазерной маркировки	Операция оплавления
6	–	Операция лазерной маркировки
7	–	Операция автоматической оптической инспекции

Как следует из таблицы 7, по итогам полученных рекомендаций специалистов производственной линии и проведения FMEA-анализа в качестве корректировки ПП для дальнейшего исследования добавлены 2 типовых этапа – операция загрузки печатных плат (1), а также операция (7) автоматической оптической инспекции.

2.3 Математическая модель структуризации и типизации производственного процесса на основе оценки вероятностей переходов состояний технологической линии при монтаже радиоэлектронных изделий

Выбор теории графов при разработке математического моделирования основан на основных производственных этапах изготовления элементов в связи с раскрытием высокого уровня детализации моделируемого объекта и обеспечением полной взаимосвязи компонентов изделия с целью недопущения выпуска брака и повышения качества продукции при минимальных затратах.

На рисунке 42 представлен полученный после корректировки ПП граф переходов для семи состояний при монтаже радиоэлектронных изделий. Отметим, что в случае выявления несоответствия при выполнении операции загрузки печатных плат (1) изделие не будет утилизировано, а операция загрузки повторится. Так же, как и в ПП до корректировки, в случае выявления несоответствий при выполнении загрузки и установки компонентов (4) и лазерной маркировки (6) данные операции выполняются повторно после проведения корректирующих действий. Об этом свидетельствует наличие ненулевых вероятностей P_{f4} и P_{f6} .

Указанная особенность относится и к операции нанесения паяльной пасты (3), $P_{f3} > 0$. Подробно корректирующие действия при выполнении операций 3, 4 и 6 рассмотрены в методике планирования ПП радиоэлектроники (п. 2.4, рисунок 50).

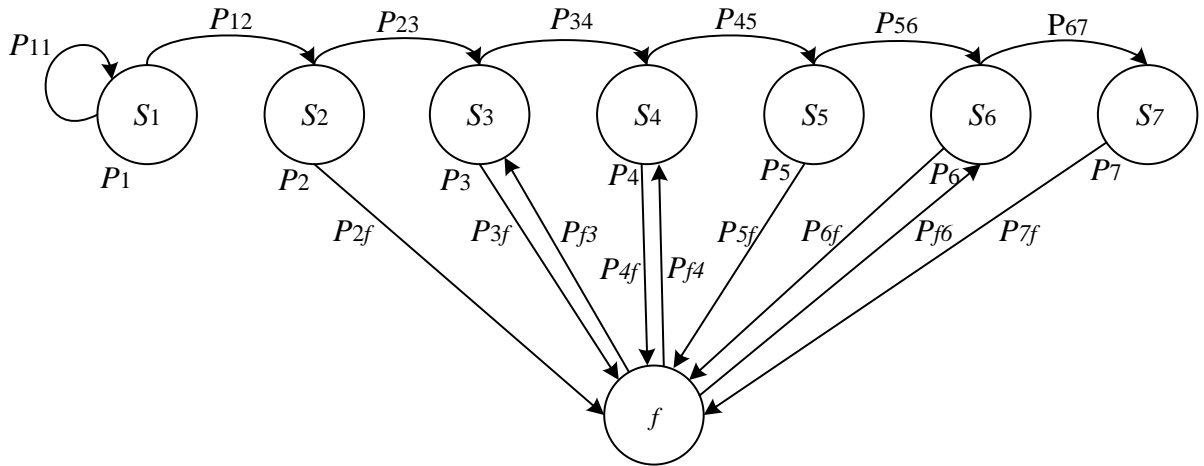


Рисунок 42 – Откорректированный граф состояний производственного процесса монтажа радиоэлектронных изделий для семи этапов

Вероятность нахождения ПП на i -том этапе в k -тый момент времени $P_i(k)$ определяется в соответствии с формулой (7), приведенной в п. 2.2 диссертации.

К вычислениям для приведенного в п. 2.2 примера добавляются:

$$P_2(1) = P_1(0) * P_{12} + P_2(0) * P_{22} + P_3(0) * P_{32} + P_4(0) * P_{42} + P_5(0) * P_{52} + P_6(0) * P_{62} + P_7(0) * P_{72} + P_f(0) * P_{f2} = 1 * 0,9702 + 0 * 0 + 0 * 0 + 0 * 0 + 0 * 0 + 0 * 0 + 0 * 0 + 0 * 0 = 0,9756.$$

$$P_3(2) = P_1(1) * P_{13} + P_2(1) * P_{23} + P_3(1) * P_{33} + P_4(1) * P_{43} + P_5(1) * P_{53} + P_6(1) * P_{63} + P_7(1) * P_{73} + P_f(1) * P_{f3} = 0 * 0 + 0,9756 * 0,9987 + 0 * 0 + 0 * 0 + 0 * 0 + 0 * 0 + 0 * 0 + 0 * 0 = 0,9774.$$

Технологические процессы изготовления радиоэлектроники могут быть детализированы до уровня простейших операций, однако предлагается рассматривать только основные процессы, протекающие на линии автоматического монтажа.

В таблице 7 представлены основные откорректированные ТП и обозначены вероятности достижения заданных технологической и нормативной документацией состояний процессов. Детализация отклонений и классификация несоответствий должны быть рассмотрены отдельно.

Таблица 7 – Описание откорректированного графа переходов состояний при монтаже радиоэлектронных изделий

Этапы (состояния)	Описание процесса	Вероятность наступления этапа
S_1	Операция загрузки печатных плат	P_1
S_2	Операция трафаретной печати	P_2
S_3	Операция проверки паяльной пасты	P_3
S_4	Операция загрузки и установки компонентов	P_4
S_5	Операция оплавления	P_5
S_6	Операция лазерной маркировки	P_6
S_7	Операция автоматической оптической инспекции	P_7
f	Состояние несоответствия	P_f

Вероятности перехода в соответствии с откорректированным графом задаются матрицей (11):

$$P = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & P_{23} & 0 & 0 & 0 & 0 & P_{2f} \\ 0 & 0 & 0 & P_{34} & 0 & 0 & 0 & P_{3f} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & P_{45} & 0 & 0 & P_{4f} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & P_{56} & 0 & P_{5f} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & P_{67} & P_{6f} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & P_{7f} \\ 0 & 0 & P_{f3} & P_{f4} & 0 & P_{f6} & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (11)$$

В разработанной модели вероятность перехода из предыдущего состояния (этапа) S_i в последующее состояние (этап) S_{i+1} обозначена как $P_{i,i+1}$.

При отклонении текущих значений характеристик радиоэлектронных компонентов от заданных произойдет переход в состояние несоответствия (fail).

Обозначим вероятность перехода в состояние несоответствия как P_{if} . Теория графов использована в связи с возможностью детализации моделируемого объекта с целью повышения качества изготавливаемой продукции.

С целью уменьшения доли бракованных изделий разработана математическая модель структуризации и типизации ПП на основе оценки вероятностей переходов состояний производственной линии при монтаже радиоэлектронных изделий (рисунок 42) с последующей реализацией полученных значений в среде компьютерного моделирования MatLab.

Для разработки математической модели с целью повышения результативности ПП производится декомпозицию ТП с помощью аппарата МЦ, оптимально отражающего вероятность выхода годных изделий.

Для оценки результативности ПП монтажа радиоэлектронных изделий и построения прогнозных значений выхода годных изделий для ПП n партий в среде компьютерного моделирования MatLab разработана программа вычисления вероятности выхода годных при заданных предельных вероятностях. Основной функцией данной программы является функция вычисления вероятности *QualityProbability*.

Входными параметрами функции *QualityProbability* являются:

- *reqProb* – значение минимальной требуемой вероятности качественной продукции,
- *nChainUnits* – число звеньев производственной цепочки,
- *nIterations* – количество повторений вычислений вероятности выхода годных изделий одной цепочки, где одна итерация соответствует вычислению вероятностей переходов между всеми звеньями одной цепочки.

Функция вычисляется как (12):

$$functionAvgProb = QualityProbability(reqProb, nChainUnits, nIterations) \quad (12).$$

Начальное значение суммы вероятностей каждой цепочки задано как $Sum = 0$.

Выполнен цикл вычислений вероятности максимальных значений по показателю «Выход годных» (13):

$$\text{for } j = 1 : (nChainUnits - 1). \quad (13)$$

В дальнейших вычислениях значение вероятности наступления текущего этапа получено путем умножения вероятности наступления предыдущего этапа и вероятности перехода к текущему этапу.

Цикл вычислений одной цепочки состоит из $nChainUnits$ звеньев (14):

$$\text{for } j = 1 : (nChainUnits - 1). \quad (14)$$

На каждом этапе ПП вычисляется вероятность отсутствия брака при переходе к следующему звену производственной цепочки. Например, для минимального требуемого значения 0,98 и семи звеньев на каждом шаге осуществляется умножение на случайную величину в интервале $[0,98^{(1/7)}, 1]$ (15):

$$QualityProb = QualityProb * (realpow(reqProb, 1 / (nChainUnits - 1)) + rand(1,1) * (1 - realpow(reqProb, 1 / (nChainUnits - 1))))); \quad (15)$$

end

Текущее значение суммы вероятностей увеличивается на вероятность качественной продукции рассмотренной цепочки (16):

$$Sum = Sum + QualityProb. \quad (16)$$

Среднее значение определяется делением текущего значения суммы вероятностей на число итераций (17):

$$AvgProb = Sum / nIterations. \quad (17)$$

С помощью разработанной программы были получены значения вероятностей перехода для производственной цепочки из семи звеньев и, в итоге, вероятности выхода годных изделий, которые приведены в таблице 8 для одного изделия и партий из 10, 50 и 100 изделий соответственно.

Таблица 8 – Вероятности выхода годных изделий для производственной цепочки из семи звеньев

1 изделие	10 изделий	50 изделий	100 изделий
>>QualityProbability (0,98;7;1)	>>QualityProbability (0,98;7;10)	>>QualityProbability (0,98;7;50)	>>QualityProbability (0,98;7;100)
ans = 0,9800	ans = 0,9806	ans = 0,9810	ans = 0,9809

График изменения полученных в результате имитационного моделирования вероятностей выхода годных изделий в зависимости от числа изделий в партии для производственной цепочки из 7 звеньев представлен на рисунке 43.

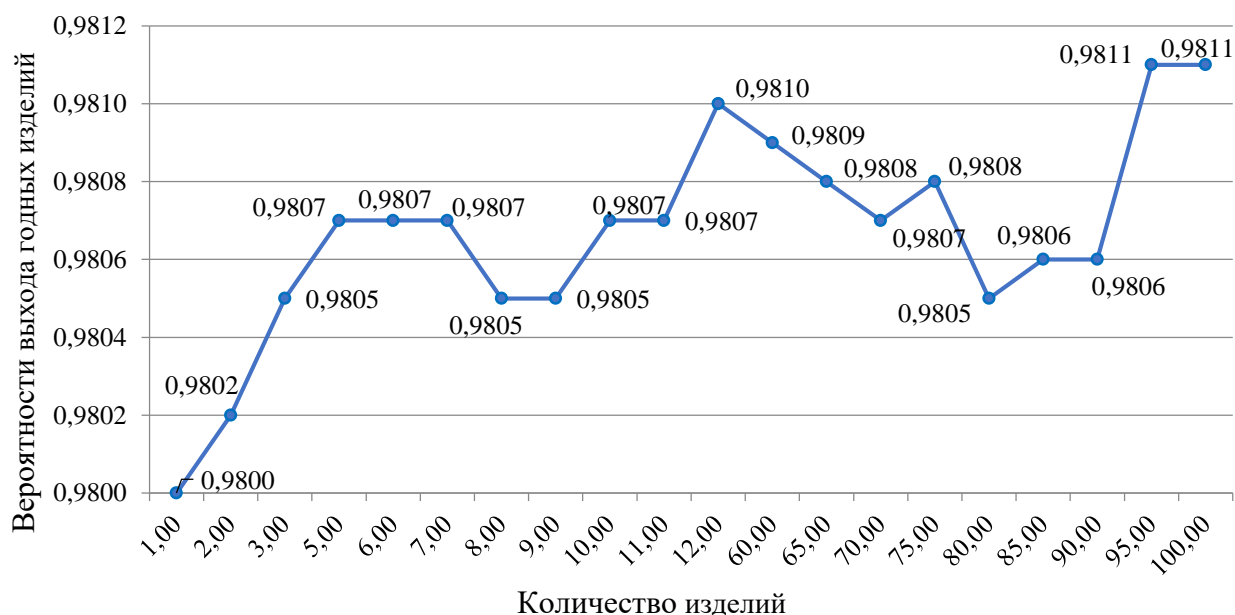


Рисунок 43 – Вероятности выхода годных изделий для технологической линии из 7 звеньев (100 изделий)

На рисунке 44 представлены результаты имитационного моделирования с целью вычислений вероятностей выхода годных изделий для 20 партий из 20 изделий в каждой партии.

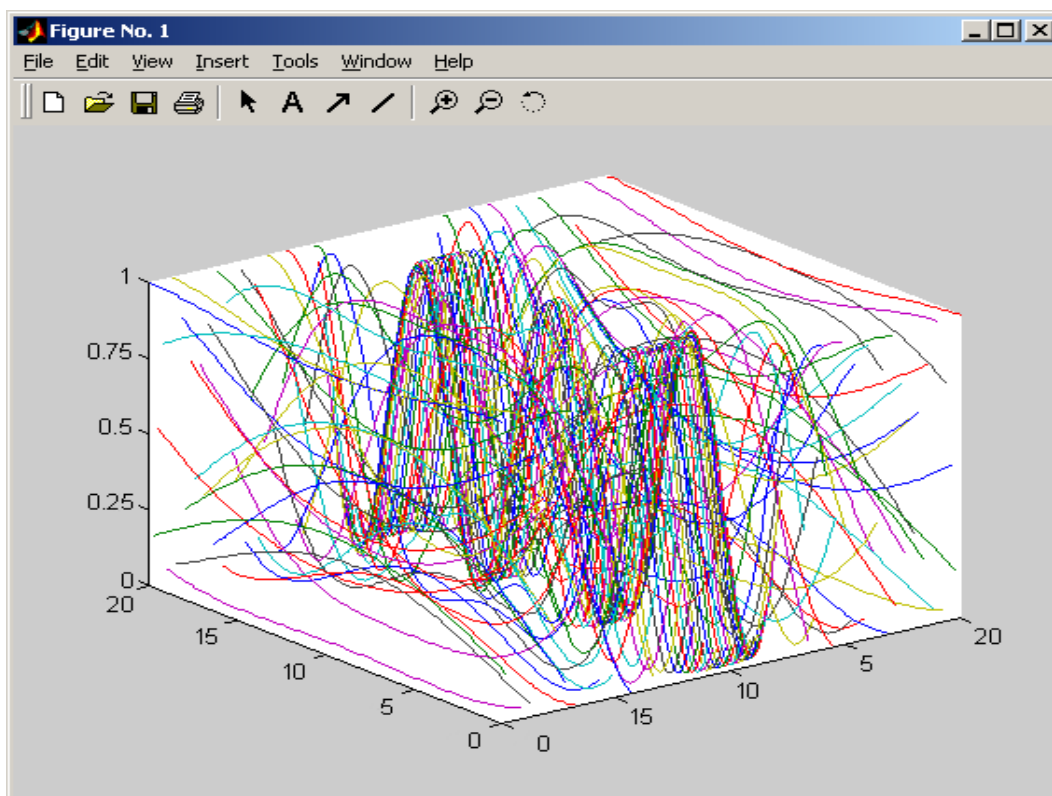


Рисунок 44 – Вероятности выхода годных изделий для производственной цепочки из 7 звеньев в среде MatLab (20 партий по 20 изделий)

Исходя из полученных данных, необходимо выполнить корректировку требований к минимальным вероятностям перехода состояний при монтаже радиоэлектронных изделий.

Важное место при организации цифрового производства радиоэлектроники занимает использование принципа (анализа) design for manufacturing (далее – DFM). Обеспечение устранения доли несоответствующих печатных плат для радиоэлектроники достигается за счет применения DFM анализа. Требования к качеству печатных плат изложены в стандартах международной ассоциации производителей электроники (IPC).

Повышение результативности организации ПП достигается за счет учета особенностей и технологических возможностей линии АМ на стадии проектирования [67].

Принцип DFM укрупненно можно представить в виде 4 этапов (рисунок 45).

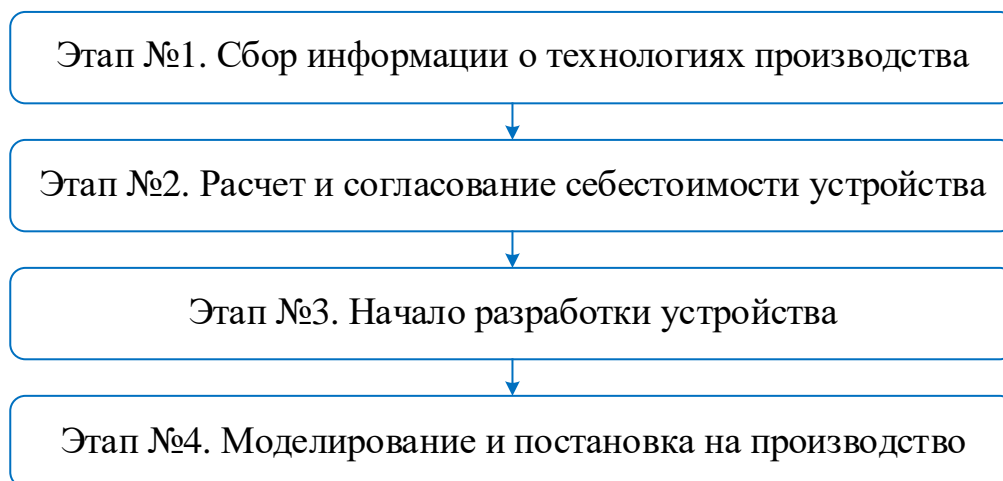


Рисунок 45 – Этапы анализа design for manufacturing

Использование принципа разработки DFM позволяет спрогнозировать топологию проектной схемы печатной платы с учетом производственных возможностей с целью быстрой переналадки технологической линии.

DFM анализ состоит из двух основных компонентов:

1. design for fabrication (далее – DFF) «проектирование для производства»,
2. design for assembly (далее – DFA) «проектирование монтажа».

С целью дополнительного контроля над исполнением правил проектирования DFM используются такие программные продукты, как VayoPro-DFM Expert и Mentor graphics PCB, встраиваемые в программную среду Cadence OrCAD или Allegro.

В ТП возникают различные непрогнозируемые возмущения, которые неизбежно приводят к ряду отклонений от технических характеристик продукции и классифицируются как дефекты.

DFM представляет собой процесс проектирования изделия для радиоэлектроники, а также сопровождение проектной деятельности по выпуску готовой продукции [67]. Концепция DFM используется в процессе определения комплекса превентивных мероприятий для минимизации уровня риска выхода некачественной продукции и сокращения влияния непрогнозируемых возмущений на ТП. Инструменты DFM обеспечивают

устранение отклонений в соответствии с требованиями стандартов ИРС в ходе этого процесса.

Получение достоверной информации в процессе производства и монтажа радиоэлектронных изделий и ее оперативная обработка представляют основу современного управления ТП. Поэтому качественные характеристики изготавливаемой продукции в превалирующей степени будут определяться результативностью управления ТП.

Задачи повышения результативности процесса производства радиоэлектроники и увеличения процента выхода годных изделий может быть решена путем адаптации принципов концепции «Индустрия 4.0» на всех этапах жизненного цикла продукции (далее – ЖЦ), а также моделирования рассматриваемых этапов ЖЦ. Обеспечение качества достигается совершенствованием характеристик оборудования, однако влияние человеческого фактора и отсутствие учета взаимодействия частей технологической линии остаются факторами неопределенности ПП.

В результате оптимизации поиска решений по повышению процента выхода годных изделий с применением принципов элементов ЦП можно сделать вывод о том, что разработанные программно-алгоритмические решения, как показало моделирование, позволяют положительно влиять на характеристики ТП. Адаптивно изменяя воздействие на исполнительные устройства, можно сократить сроки подготовки и гарантированно выполнить обязательства перед заказчиками по качеству изделий.

Для повышения результативности процесса производства радиоэлектроники необходимо применение инструментария, позволяющего оптимизировать процесс выявления отклонений от нормы на каждом этапе производственного цикла и, соответственно, приблизить процесс управления параметрами ПП к интеллектуальному за счет превентивных процедур, моделей, использующих аппарат удаленного мониторинга, идентификации процессов при возникновении в возмущенной окружающей среде признаков критического состояния и т.п. [67]. Таким инструментом выбран DFM-анализ,

реализация которого на всех этапах ЖЦ позволяет корректировать возникающие незначительные отклонения от требуемых значений в ТП изготовления продукции на самой ранней стадии обнаружения несоответствия.

DFM-анализ проводится по запросу клиента перед подготовкой файлов плат для производства (на этапе запроса) так, чтобы у клиента оставалось время внести корректировки в файлы. В процессе анализа выявляются несоответствия между платой и спецификацией (лишние компоненты в спецификации, несоответствие корпуса компонента посадочному месту на плате и пр.). Несоответствия выявляются в проекте, а не на готовых платах, что позволяет значительно уменьшить время запуска блоков в производство, снизить материальные затраты и избежать ручной допайки блоков.

Проверка проходит с учетом требований IPC и возможностей конкретного производства. В результате анализа клиент получает отчет о всех выявленных несоответствиях. Применение инструментов DFM позволит обеспечить устранение несоответствий в соответствии с требованиями стандартов IPC в процессе выполнения этапа [68].

Следует заметить, что DFM-анализ может применяться для всех видов ТП изготовления различных радиоэлектронных изделий, а явные преимущества от использования технологии DFM наблюдаются в условиях производства изделий, состоящих из многономенклатурных электронных компонентов.

В результате использования компонента DFM – design for assembly (далее – DFA) «проектирование монтажа» и при строгом учете требований:

ГОСТ Р 56251-2014 «Платы печатные. Классификация дефектов» [54],

ГОСТ Р 55693-2013 «Платы печатные жесткие. Технические требования» [69],

ГОСТ Р 55490-2013 «Платы печатные. Общие технические требования к изготовлению и приёмке» [70],

ГОСТ 3.1115-79. «Единая система технологической документации. Правила оформления документов, применяемых при ремонте изделий» [71],

были выполнены программные структуризация и типизация ПП на основе оценки вероятностей переходов состояний технологической линии при монтаже радиоэлектронных изделий.

В структурированной модели содержатся классификация видов дефектов, вероятное время завершения определенных этапов работы, достоверность контроля, степень близости параметра к полю допуска, предельные значения критериев качества печатной радиоэлектроники, переходные процессы и вероятности состояния ТП [72].

С учетом использования DFA и применения разработанной модели были выполнена повторная оценка результативности ПП монтажа радиоэлектронных изделий и построение прогнозных значений выхода годных изделий.

Полученные значения вероятностей перехода представлены в таблице 9.

Таблица 9 – Вероятности выхода годных изделий для производственной цепочки из семи звеньев при применении подхода DFA

1 изделие	10 изделий	50 изделий	100 изделий
>>QualityProbability (0,98;7;1)	>>QualityProbability (0,98;7;10)	>>QualityProbability (0,98;7;50)	>>QualityProbability (0,98;7;100)
ans = 0,9804	ans = 0,9820	ans = 0,9836	ans = 0,9856

На рисунке 46 приведены графики изменения полученных в результате имитационного моделирования вероятностей выхода годных изделий в зависимости от числа изделий в партии для производственной цепочки из 7 звеньев с использованием и без использования подхода DFA.

Так, при использовании DFA и одном изделии в партии вероятность выхода годного изделия будет равна 0,9804, в случае партии из пяти изделий вероятность выхода годных будет равна 0,9812, из десяти – 0,9820, из шестидесяти пяти – 0,9844 и т.д.

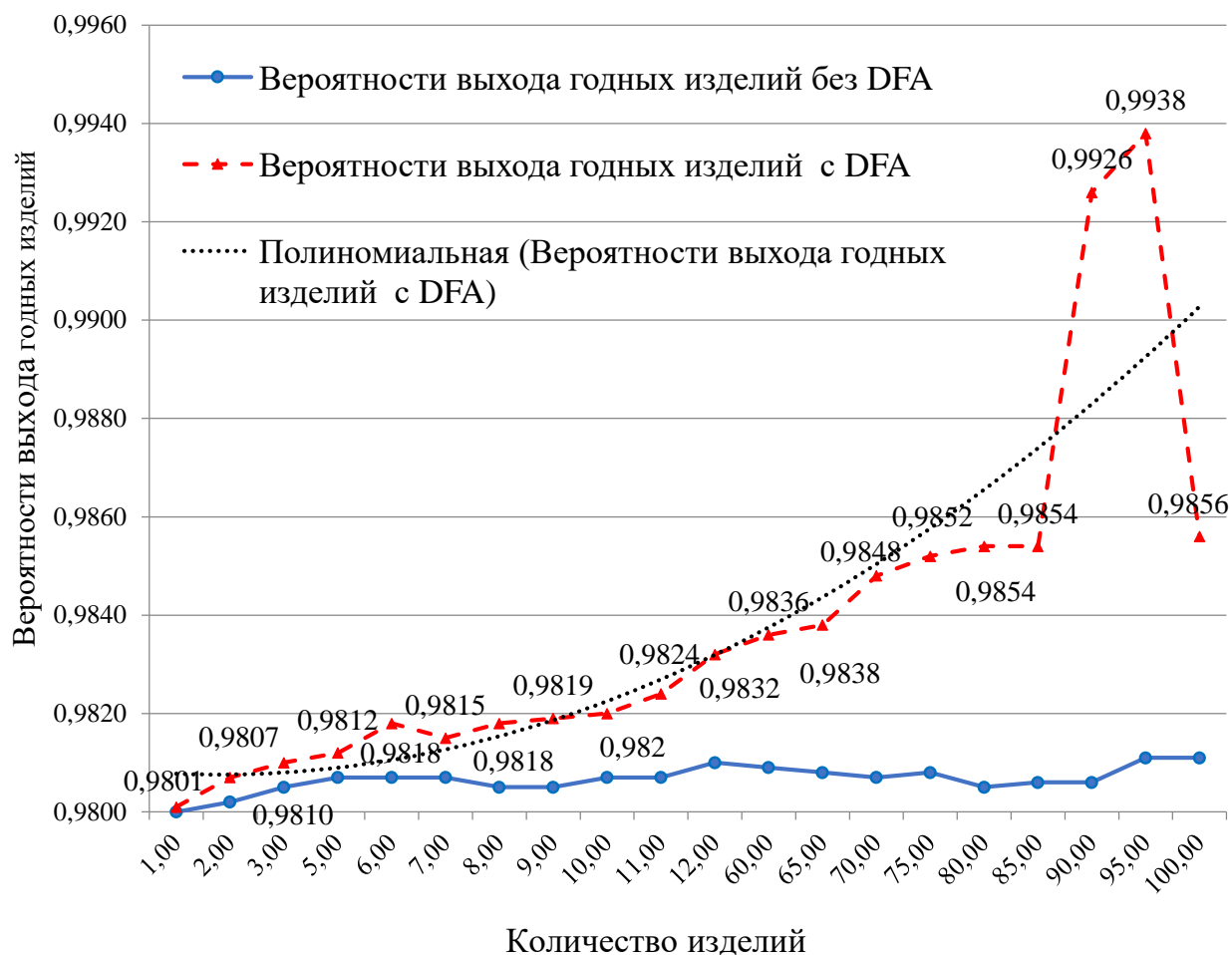


Рисунок 46 – Вероятности выхода годных изделий для технологической линии из 7 звеньев с использованием и без использования подхода DFA (100 изделий)

Таким образом, отмечен тренд, отражающий рост вероятности выхода годных изделий при использовании подхода DFA.

На рисунке 47 представлены результаты имитационного моделирования с целью вычислений вероятностей выхода годных изделий для 20 партий из 20 изделий в каждой партии при применении подхода DFA. Отмечен рост вероятностей по сравнению с производственной цепочкой без применения указанного подхода [73].

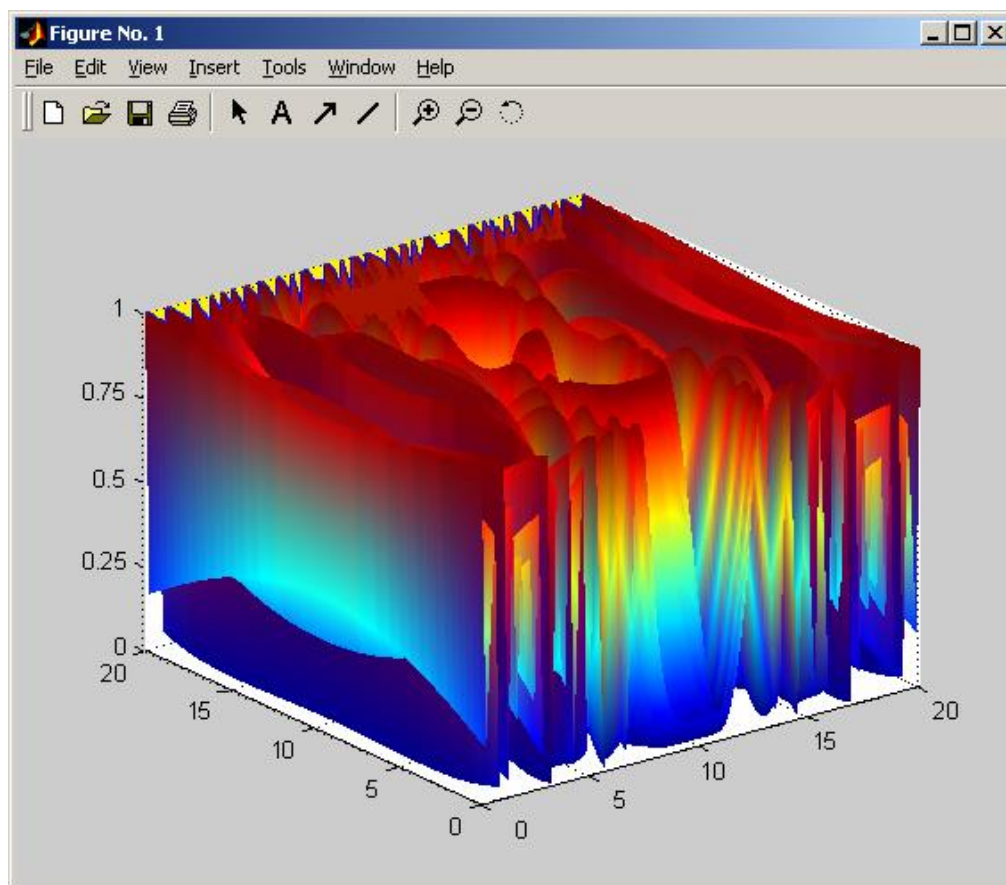


Рисунок 47 – Вероятности выхода годных изделий для производственной цепочки из 7 звеньев в среде MatLab при применении подхода DFA (20 партий по 20 изделий)

Полученные результаты моделирования свидетельствуют об увеличении вероятности выхода годных изделий на основе оценки вероятностей переходов состояний технологической линии. Полученные значения свидетельствуют об увеличении вероятности выхода годных изделий в условиях наращивания производственных мощностей и увеличения промышленных партий. По результатам выпуска каждой промышленной партии в случае отклонения от заданных пределов будут выполнена оценка несоответствия и произведены корректирующие мероприятия в зависимости от величины несоответствия.

Из графиков зависимостей следует, что при применении DFA в процессе изготовления радиоэлектроники процент выхода годных изделий с каждой партией увеличивается, что доказывает целесообразность использования данного аппарата в ПП.

Математическая модель структуризации и типизации ПП предназначена для последовательной адаптации структуры цифровой линии монтажа радиоэлектроники к компонентам концепции «Индустрия 4.0» на основе анализа вероятностей состояний процессов. Разработанная модель обеспечивает оценку результативности производства на каждом этапе и качества выпускаемой продукции [74].

Предложенная модель с применением методики DFM позволит эффективно использовать имеющиеся у предприятия ресурсы, исключая как потерю непрерывности и устойчивости управления, так и отклонения качественных характеристик изготавливаемого изделия от норм и заданных стандартами требования [75].

Использование DFM в процессе производства радиоэлектроники обеспечивает реализацию превентивных мероприятий, позволяющих сократить сроки поставки и гарантировать требуемые качественные показатели изготавливаемой продукции [76].

Использование теории марковских цепей, последовательно разработанных и усовершенствованных при создании методики применительно к организации производства наиболее эффективно в условиях, требующих реализации гибких стратегий управления.

Требуемая функциональная организация и возможности ее наращивания за счет технологических инноваций определяют основу для выбора структуры линии автоматического монтажа радиоэлектронной продукции. Ключевым фактором для формирования конкурентоспособного производства в условиях минимизации затрат является техническое переоснащение за счет внедрения программно-аппаратных средств.

Процесс переоснащения производства должен протекать непрерывно с постоянной «обратной связью», то есть после внедрения технологической инновации происходит переход на этап мониторинга состояния ТП.

В результате разработки модели созданы и зарегистрированы в Роспатенте:

– база данных: «Компоненты обеспечения качества технологических процессов изготовления электроники в условиях цифрового производства» рег. № 2018620790 от 16.04.2018 г. (№ заявки 2018620449 от 16.04.2018 г.) [77].

– программа для ЭВМ: «Программа адаптации структуры цифровой линии монтажа электроники компонентами технологических инноваций на основе анализа вероятностей состояний процессов, обеспечивающая оценку результативности производства и качества продукции» рег. № 2019661707 от 05.09.2019 г. (№ заявки 2019660444 21.08.2019 г.) [78].

2.4 Методика планирования производственного процесса монтажа радиоэлектронных изделий при их поэтапном совершенствовании, формирующая критериальную оценку состояния работоспособности производственной линии

Техническое переоснащение является ключевым фактором при организации конкурентоспособного цифрового производства радиоэлектроники. Процесс переоборудования технологической линии носит циклический характер: от обнаружения несоответствия текущих параметров объекта до этапа внедрения ТИ, обеспечивающих гибкость процесса производства. После анализа результатов внедрения ТИ происходит переход на этап мониторинга состояния ПП.

Наиболее развитым подходом в этой области является пошаговый переход к требованиям стандартов Hermes.Std [41, 42]. Этот стандарт поддерживают крупные производители оборудования и технологий. В настоящее время достигается переход от уровня электрических и механических интерфейсов по стандарту IPC-SMEMA-9851 к полному внедрению элементов концепции «Индустрия 4.0»: «M2M (машина с машиной)», баз данных, процессов идентификации. Стандарт The Hermes Standard for vendor independent machine-to-machine communication in SMT Assembly Version 1.0.2 [41] устанавливает новые требования и способы реализации для обеспечения прослеживаемости изделий путем

дополнительной идентификации, внедрения баз данных с требованиями качества к элементной базе и выполнению операций в цифровой форме, внедрения дополнительных функций промышленного интернета вещей.

В соответствии с п. 9.1 ГОСТ Р 55490-2013 «Платы печатные. Общие технические требования к изготовлению и приемке», первостепенной задачей статистического контроля технологического процесса является непрерывное уменьшение варьирования в технологических процессах, продукции и услугах по обслуживанию [69]. Описание параметров статистического контроля технологического процесса, которые должны исследоваться в соответствии с ГОСТ Р 55490-2013, представлены на рисунке 48.

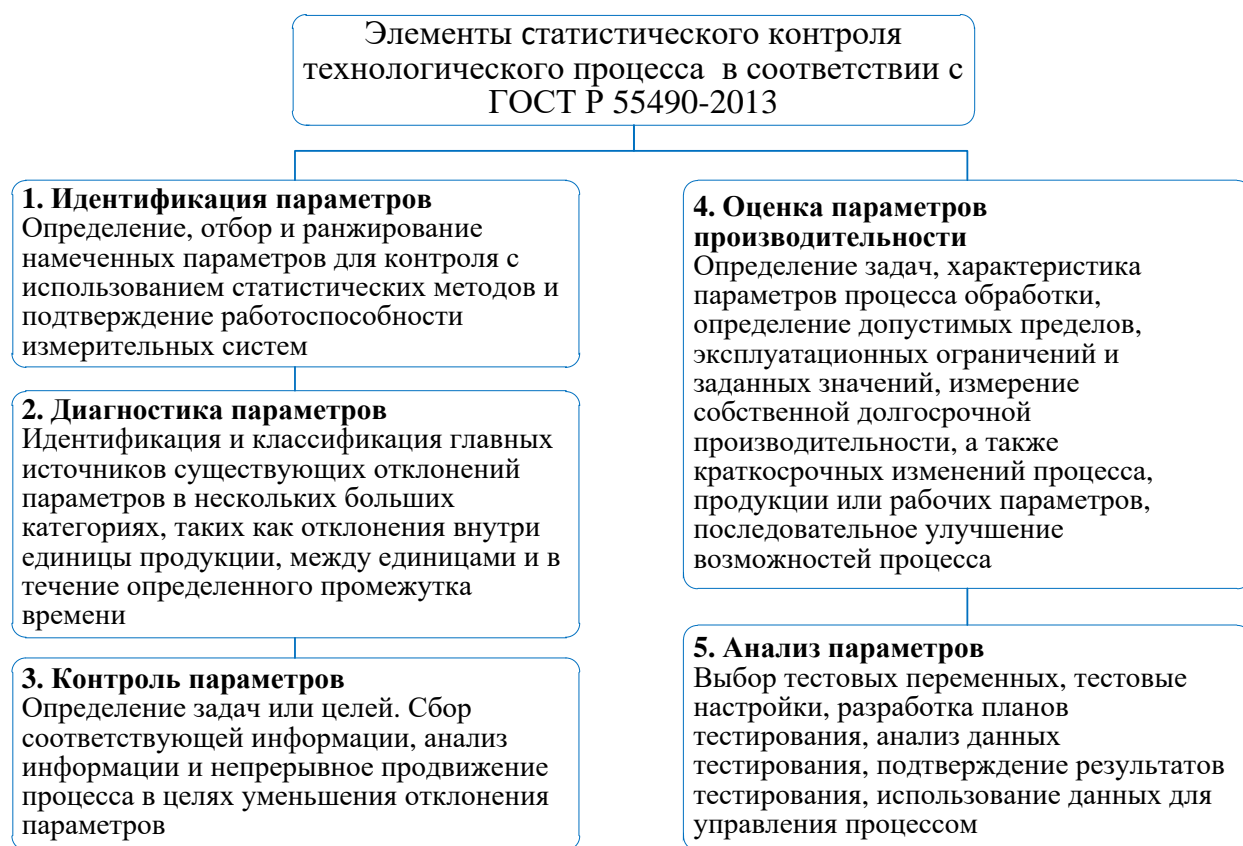


Рисунок 48 – Элементы статистического контроля технологического процесса в соответствии с ГОСТ Р 55490-2013

Идентификация, диагностика, контроль параметров, оценка параметров производительности и анализ параметров выполняются в ходе реализации ТП. Отметим, что ПП может быть условно разделен на DFF и

ДФА и допускает адаптацию конфигурации производственной линии в зависимости от вида изделия. Структурная схема такого ПП приведена на рисунке 49.

Статистический контроль технологического процесса связан с проведением этапов выбора метода результативного контроля за состоянием производственной линии и изготовления автоматизированной системы контроля, диагностики, прогнозирования и мониторинга всех этапов ПП.

Современным промышленным технологиям необходимо создание конкурентоспособной базовой аппаратной структуры, представляющей собой интеграционную платформу для интернета вещей и обеспечивающую получение, хранение, обработку, визуализацию данных и интеграцию их на всех уровнях предприятия.

Платформа М2М предприятия изготовления радиоэлектроники должна содержать универсальные драйверы устройств на всем производственном оборудовании предприятия, позволяющие подключать любое промышленное или пользовательское IoT-устройство по закодированной связи «туманных вычислений», что говорит о создании адаптивной модели управления ПП.

Для создания интеграционной платформы для интернета вещей необходимо выстраивание онтологии предприятия и баз данных, представляющих собой детализацию работы на всех этапах жизненного цикла предприятия, а также с использованием DFM своевременно реагировать и принимать комплекс мер по определению возможных рисков и проблемных частей, которые могут негативно отразиться на ПП [76].

Одной из наиболее важных задач для детализации процессов и создания баз знаний предприятия является раскрытие неопределенностей. Корректно выполненное моделирование не исключает неопределённость, однако, сокращает вероятность их возникновения.



Рисунок 49 – Структурная схема разделения ПП на DFF и DFA с адаптивной конфигурацией производственной линии в зависимости от вида изделия

С целью анализа и доработки ТП при поэтапном совершенствовании процессов радиоэлектронного предприятия разработана методика планирования ПП радиоэлектроники при их поэтапном совершенствовании, формирующая критериальную оценку работоспособности состояния линии автоматического монтажа.

Для моделирования процессов и разработки модели в составе методики последовательности ПП, обеспечивающей поэтапную оценку состояния линии автоматического монтажа и оценку результативности по заданному критерию, используются уравнения Колмогорова [79].

На основе разработанной методики для заданного объема производимой партии определяется интенсивность загрузки оборудования, а также находятся все вероятности состояний ПП как функции времени. Эти вероятности определяют оценки несоответствующей продукции при выполнении отдельных операций и окончательного брака. В процессе проведения исследования критериями работоспособности состояния линии АМ учитывались:

- время простоя линии,
- показатель нагрузки на один этап,
- скорость работы оборудования и инспекций,
- количество неправильно установленных компонентов,
- интенсивность загрузки оборудования,
- наличие коротких замыканий.

Для детального представления ПП и последующей интерпретации операций в формализованном виде выполнено моделирование в программе iThink [80].

Управляемый ПП изготовления радиоэлектроники в пакете структурного математического моделирования представлен на рисунке 50.

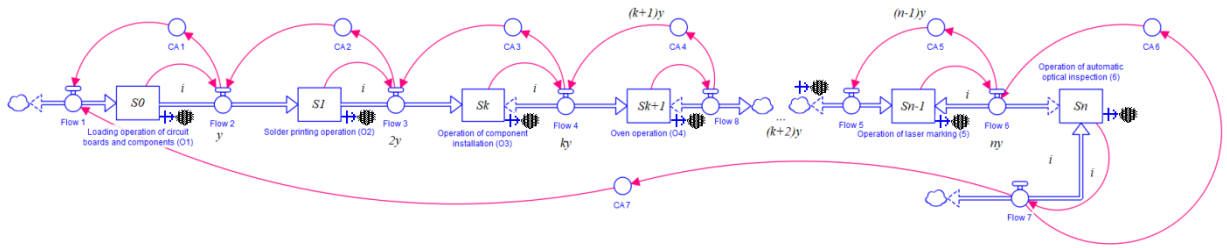


Рисунок 50 – Процессная модель монтажа радиоэлектронных изделий

Партия на начальном этапе i переводит всю систему из любого состояния S_k ($k = \overline{1, n-1}$) в последующее состояние S_{k+1} , при этом вероятность перехода одинакова и равна i . В дифференциальных уравнениях неизвестными функциями являются вероятности состояний [82].

Для определения одноканальных итоговых вероятностей используется система уравнений Колмогорова (18):

$$\begin{cases} -\lambda p_0 + \alpha p_1 = 0 \\ \dots \\ \lambda p_{k-1} - (\lambda + k\alpha) p_k + (k+1)\alpha p_{k+1} = 0, k = \overline{2, n-1}. \\ \dots \\ \lambda p_{n-1} - \alpha p_n = 0 \end{cases} \quad (18)$$

Уравнение нормирования для системы (19):

$$p_0 + p_1 + \dots + p_n = 1. \quad (19)$$

Решение системы (20):

$$p_0 = \frac{1}{\sum_{\lambda=0}^n \frac{\alpha^\lambda}{\lambda!}}, p_k = p_0 \frac{\alpha^k}{k!}, k = \overline{1, n}, \quad (20)$$

где $\alpha = \frac{\lambda}{y}$ – объем производимой партии, $p_{f7} = p_n = p_0 \frac{\alpha^n}{n!}$, p_{f7} – вероятность появления несоответствия в конце ПП (для одноканальных итоговых вероятностей).

По составленному уравнению вероятность брака (несоответствия) равняется вероятности p_n .

Система уравнений для критериальной оценки работоспособности состояния линии представлена формулами (21). Использование системы позволяет рассчитать показатель простоя линии, вероятность нагрузки на одну операцию, вероятность появления несоответствия на каждом этапе ПП [81].

$$\left\{ \begin{array}{l} -\lambda p_0 + \gamma p_1 = 0 \\ \dots \\ \lambda p_{k-1} - (\lambda + k\gamma) p_k + (k+1)\gamma p_{k+1} = 0, k = \overline{2, n-1} \\ \dots \\ \lambda p_{n-1} - (i + n\gamma) p_n + n\gamma p_{n+1} = 0 \\ \dots \\ \lambda p_{n+k-1} - (\lambda + n\gamma) p_{n+k} + n\gamma p_{n+k+1} = 0, k = \overline{1, m-1} \\ \dots \\ \lambda p_{n+m-1} - n\gamma p_{n+m} = 0 \end{array} \right. , \quad (21)$$

где p_0 – вероятность простоя линии АМ,
 p_k – вероятность нагрузки на одну операцию,
 p_n – вероятность появления несоответствия,
 i – вероятность перехода,
 λ – интенсивность загрузки оборудования,
 γ – время проведения операции,
 m – количество изделий,
 k – этап (операция).

Уравнение нормирования для системы (22):

$$\sum_{k=0}^{n+m} p_k = 1. \quad (22)$$

Для решения уравнения необходимо ввести дополнительный коэффициент β . Коэффициент будет представлять собой показатель нагрузки на один этап (23).

$$\beta = \frac{\alpha}{n} = \frac{\lambda}{n\gamma}. \quad (23)$$

Решение системы уравнений Колмогорова выражается через вероятность простоя системы p_0 (24, 25).

$$p_0 = \begin{cases} \left(\sum_{k=0}^n \frac{n^k}{k!} \beta^k + \frac{n^n}{n!} * \frac{\beta^{n+1}(1-\beta^m)}{1-\beta} \right)^{-1}, \\ \left(\sum_{k=0}^n \frac{n^k}{k!} + \frac{n^n}{n!} * m \right)^{-1}, \beta = 1 \end{cases}, \quad (24)$$

$$p_0 = \begin{cases} \left(\frac{n^k}{k!} \right) \beta^k p_0, k = \overline{1, n} \\ \left(\frac{n^n}{n!} \right) \beta^k p_0, k = \overline{n+1, n+m} \end{cases}. \quad (25)$$

Вероятность брака – это вероятность того, что система находится в состоянии S_{n+m} . Вероятность брака рассчитывается по формуле (26):

$$P_{\text{брака}} = p_{n+m} = p_0 \beta^{n+m} \frac{n^n}{n!} \quad (26)$$

– вероятность появления несоответствия в конце ПП (для многоканальных итоговых вероятностей) [80].

Для определенности в качестве примера рассмотрим процессную модель, которая описывает предельные вероятности всех состояний этапов на основе детализированного описания взаимодействия звеньев ПП.

Управляемый ПП изготовления радиоэлектроники в пакете структурного математического моделирования представлен на рисунке 51.

В программе iThink с учетом характеристик анализируемого процесса, описываемого с помощью систем уравнений, выбраны библиотеки работы оборудования технологической линии изготовления печатных плат, представляющие номера положений и режимов оборудования в зависимости от веса, размера, видов и количества компонентов на печатной плате при работе оборудования.

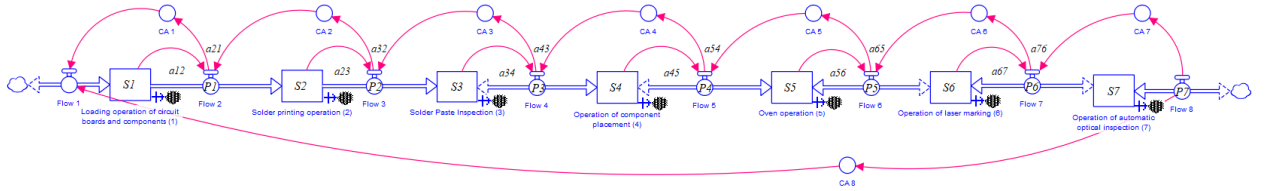


Рисунок 51 – Процессная модель монтажа радиоэлектронных изделий

Рассмотрим упорядоченное множество состояний монтажа радиоэлектронных изделий $S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6, S_7$.

Переходы могут осуществляться только последовательно друг за другом и наоборот в случае возникновения брака. Все переходные потоки переводят ПП по стрелкам: $\alpha_{k,k+1}$ или $\alpha_{k+1,k}$.

В соответствии с процессной моделью, построенной в iThink, составлены и решены алгебраические уравнения для предельных вероятностей состояний ПП. Уравнения составлены из возможности перехода из каждого предыдущего состояния в последующее.

При решении дифференциальных уравнений вероятности состояний равны (27-38):

для S_1 (27):

$$\alpha_{12}p_1 = \alpha_{21}p_2 \quad (27)$$

Вероятность состояния для S_2 (28):

$$(\alpha_{23} + \alpha_{21})p_2 = \alpha_{12}p_1 + \alpha_{32}p_3. \quad (28)$$

Приведенный вид для S_2 (29):

$$\alpha_{23}p_2 = \alpha_{32}p_3. \quad (29)$$

Вероятность состояния для S_3 (30):

$$(\alpha_{34} + \alpha_{32})p_3 = \alpha_{23}p_2 + \alpha_{43}p_4. \quad (30)$$

Приведенный вид для S_3 (31):

$$\alpha_{34}p_3 = \alpha_{43}p_4. \quad (31)$$

Вероятность состояния для S_4 (32):

$$(\alpha_{45} + \alpha_{43})p_4 = \alpha_{34}p_3 + \alpha_{54}p_5. \quad (32)$$

Приведенный вид для S_4 (33):

$$\alpha_{45}p_4 = \alpha_{54}p_5. \quad (33)$$

Вероятность состояния для S_5 (34):

$$(\alpha_{56} + \alpha_{54})p_5 = \alpha_{45}p_4 + \alpha_{65}p_6. \quad (34)$$

Приведенный вид для S_5 (35):

$$\alpha_{56}p_5 = \alpha_{65}p_6. \quad (35)$$

Вероятность состояния для S_6 (36):

$$(\alpha_{67} + \alpha_{65})p_6 = \alpha_{56}p_5 + \alpha_{76}p_7. \quad (36)$$

Приведенный вид для S_6 (37):

$$\alpha_{67}p_6 = \alpha_{76}p_7. \quad (37)$$

Вероятность состояния для S_7 (38):

$$\alpha_{76}p_7 = \alpha_{67}p_6. \quad (38)$$

В результате составления уравнений для предельных вероятностей всех состояний получена следующая система уравнений (39):

$$\left\{ \begin{array}{l} \alpha_{12}p_1 = \alpha_{21}p_2 \\ \alpha_{23}p_2 = \alpha_{32}p_3 \\ \alpha_{34}p_3 = \alpha_{43}p_4 \\ \alpha_{45}p_4 = \alpha_{54}p_5 \\ \alpha_{56}p_5 = \alpha_{65}p_6 \\ \alpha_{67}p_6 = \alpha_{76}p_7 \\ \alpha_{76}p_7 = \alpha_{67}p_6 \end{array} \right. \quad (39)$$

Уравнение нормирования для системы имеет вид (40):

$$p_1 + p_2 + p_3 + p_4 + p_5 + p_6 + p_7 = 1. \quad (40)$$

При анализе выхода годных изделий будем считать, что состояние этапа ПП равен S_k , переход системы из предыдущего состояния S_k в последующее имеет вид S_{k+1} , переход S_k в состояние несоответствующей продукции равен S_{k-1} .

Решение системы уравнений имеет вид (71-47):

$$p_1 = \left(1 + \frac{\alpha_{12}}{\alpha_{21}} + \frac{\alpha_{23}\alpha_{12}}{\alpha_{32}\alpha_{21}} + \frac{\alpha_{34}\alpha_{23}}{\alpha_{43}\alpha_{32}} + \frac{\alpha_{45}\alpha_{34}}{\alpha_{54}\alpha_{43}} + \frac{\alpha_{56}\alpha_{45}}{\alpha_{65}\alpha_{54}} + \frac{\alpha_{67}\alpha_{56}}{\alpha_{76}\alpha_{65}}\right)^{-1}, \quad (41)$$

$$p_2 = \frac{\alpha_{12}}{\alpha_{21}} p_1, \quad (42)$$

$$p_3 = \frac{\alpha_{23}\alpha_{12}}{\alpha_{32}\alpha_{21}} p_1, \quad (43)$$

$$p_4 = \frac{\alpha_{34}\alpha_{23}}{\alpha_{43}\alpha_{32}} p_1, \quad (44)$$

$$p_5 = \frac{\alpha_{45}\alpha_{34}}{\alpha_{54}\alpha_{43}} p_1, \quad (45)$$

$$p_6 = \frac{\alpha_{56}\alpha_{45}}{\alpha_{65}\alpha_{54}} p_1, \quad (46)$$

$$p_7 = \frac{\alpha_{67}\alpha_{56}}{\alpha_{76}\alpha_{65}} p_1. \quad (47)$$

Таким образом, полученные значения вероятностей уточнены по сравнению с общей моделью, так как учитывают особенности взаимодействия звеньев, представляющих этапы монтажа радиоэлектронных изделий [80].

На основании определённых (идентифицированных) параметров делается критериальная оценка и их соблюдение в соответствии с ГОСТ параметров качества изделия [46, 47, 54, 65, 69, 70, 71, 107-117] или принятой ТД [69]. Пример возможной критериальной оценки параметров работоспособности линии АМ представлен на рисунке 52.

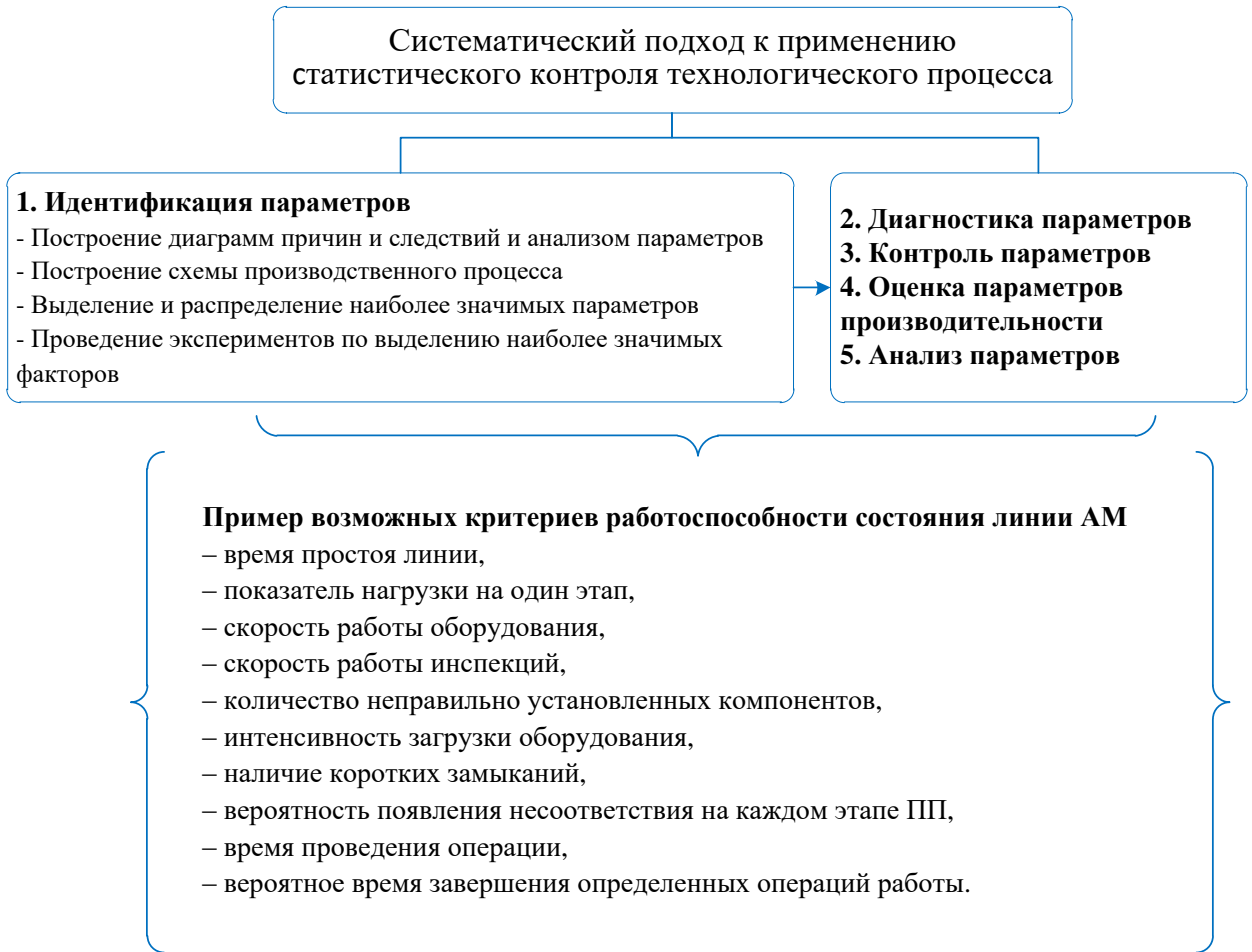


Рисунок 52 – Пример возможной критериальной оценки параметров состояния работоспособности линии АМ

Методика планирования ПП радиоэлектроники регламентирует наличие в ПП семи этапов, после введения в результате применения метода FMEA операций загрузки печатных плат и компонентов и нанесения паяльной пасты.

Методика позволяет определить критериальную оценку работоспособности состояния линии АМ. Алгоритм семиэтапного ПП радиоэлектроники представлен на рисунке 53.

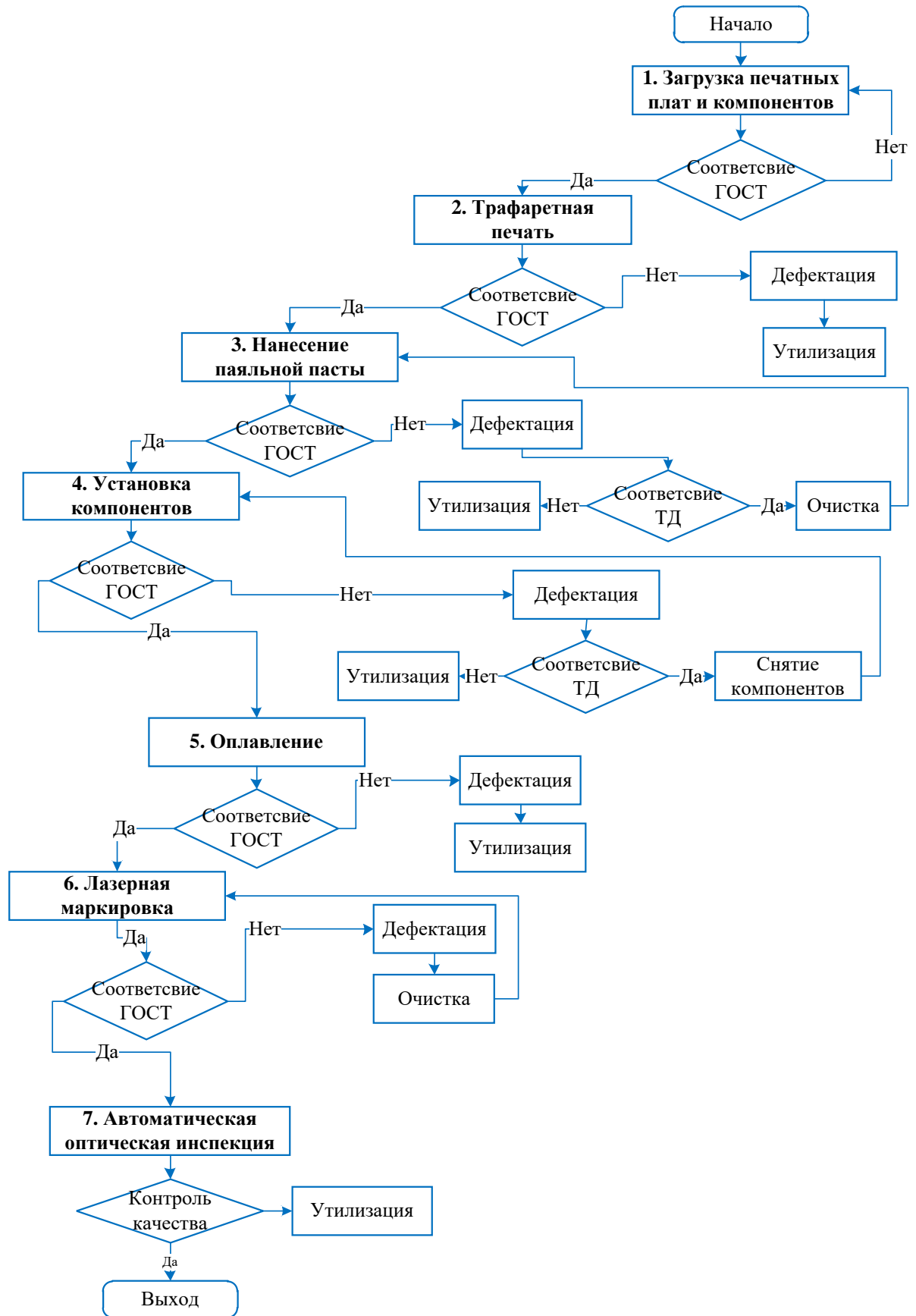


Рисунок 53 – Алгоритм поэтапного выполнения ПП радиоэлектроники, состоящего из семи этапов

Разработанная методика предназначена для регулирования скорости работы оборудования и инспекций, осуществления контроля и соответствия заданным критериям качества продукции, а также позволяет определить вероятности появления бракованной продукции на каждом этапе ПП и все вероятности состояний как функции времени.

В методике проводится анализ видов проверок, производимых на каждом этапе, условий и вероятностей перехода на следующий этап либо отправки изделий на утилизацию. Кроме того, на каждом этапе можно спрогнозировать вероятность простоя системы, вероятное время завершения определенных операций работы, определить интенсивность загрузки оборудования, достоверность контроля, степень близости параметра к полю допуска.

Методика способствует интеллектуализации ПП монтажа радиоэлектронных изделий и формирует критериальную оценку работоспособности состояния линии АМ. Для поэтапного внедрения ТИ в модель линии АМ вводятся этапы и значения параметров для конкретного производства.

С учетом тенденции интеллектуализации ПП монтажа радиоэлектронных изделий разработана методика планирования ПП предусматривает реализацию IoT и формирование базы данных предприятия, содержащей детальную статистическую информацию о состоянии ТП на всех этапах производства продукции.

Разработана новая методика планирования ПП изготовления радиоэлектроники при внедрении ТИ, отличающаяся проведением анализа параметров ТП и формированием критериальной оценки работоспособности линии АМ.

При последующей разработке методики мониторинга монтажа радиоэлектронных изделий и внедрения технологии МИВ компонентов оборудования осуществляется анализ состояния цифровой линии в процессе встраивания компонентов концепции «Индустрия 4.0», таких, как

промышленный интернет, большие данные, M2M, распределенные реестры, аддитивное производство и т.д.

Таким образом, разработанная методика планирования ПП радиоэлектроники при их поэтапном совершенствовании позволяет осуществлять пооперационную декомпозицию ПП и выявить операции, которые с большей вероятностью могут привести к возникновению несоответствия и дать детализированную оценку работоспособности линии АМ заранее заданных параметров для анализа.

В результате разработки методики на языке программирования C++ была написана и зарегистрирована в Роспатенте программа для ЭВМ: «Программа интеллектуализации производственных процессов изготовления электроники, обеспечивающая критериальную оценку качества продукции» рег. № 2019661474 от 02.09.2019 г. (№ заявки 2018620449 от 16.04.2018 г.) [83]. Программа осуществляет активацию каналов передачи сигналов управления по скрытым Bluetooth-каналам и по защищенным Wireless каналам заданной скоростью (для каждого оборудования свой номер и расширение сети передачи данных, в том числе ограничение доступа каждого сотрудника к информации об объемах передачи данных).

2.5 Результаты и выводы по главе 2

Представлены модели и методика повышения результативности ТП изготовления радиоэлектроники в условиях ЦП.

1. Произведена детализация этапов процесса АМ радиоэлектроники за счет внедрения ТИ с использованием аппарата МЦ, позволяющая выделить критические стадии для внедрения ТИ и дальнейшей разработки адаптивной модели технологического цикла изготовления радиоэлектронных изделий, учитывающей особенности каждого этапа ПП и вероятности переходов состояний.

2. Разработана модель повышения вероятности выхода годных изделий радиоэлектроники в ТП при заданных требуемых значениях, предназначенная для адаптации структуры цифровой линии монтажа радиоэлектроники к компонентам «Индустрия 4.0» на основе анализа вероятностей состояний процессов. Получена формула вычисления вероятности нахождения ПП на i -том этапе в k -тый момент времени. В результате проведения анализа «Failure modes and effects analysis» и полученных рекомендаций по адаптации принципов «Индустрия 4.0» от технических специалистов производственной линии была произведена корректировка этапов ПП.

3. С целью уменьшения доли бракованных изделий разработана новая математическая модель структуризации и типизации ПП изготовления радиоэлектроники, отличающаяся сокращением числа операций при вычислении вероятностей выпуска годных изделий и последующей корректировкой требований к минимальным вероятностям перехода состояний.

Для оценки результативности ПП монтажа радиоэлектронных изделий и построения прогнозных значений выхода годных изделий для ПП в среде компьютерного моделирования MatLab разработана программа вычисления вероятности выхода годных при заданных предельных вероятностях.

С помощью разработанной программы были получены значения вероятностей перехода от звена к звену для производственной цепочки из семи

звеньев и, в итоге, выхода годных изделий для данной производственной цепочки.

Исходя из полученных данных, произведена корректировка требований к минимальным вероятностям перехода и выполнено сокращение числа операций при вычислении вероятностей выпуска годных изделий при монтаже радиоэлектронных изделий с использованием DFM-анализа. Полученные результаты моделирования свидетельствуют об увеличении вероятности выхода годных изделий на основе оценки вероятностей переходов состояний технологической линии.

В результате разработки модели созданы и зарегистрированы в Роспатенте:

– база данных: «Компоненты обеспечения качества технологических процессов изготовления электроники в условиях цифрового производства» рег. № 2018620790 от 16.04.2018 г. [77].

– программа для ЭВМ: «Программа адаптации структуры цифровой линии монтажа электроники компонентами технологических инноваций на основе анализа вероятностей состояний процессов, обеспечивающая оценку результативности производства и качества продукции» рег. № 2019661707 от 05.09.2019 г. [78].

4. С целью анализа и доработки ТП при поэтапном совершенствовании процессов предприятия радиоэлектронной промышленности разработана новая методика планирования ПП изготовления радиоэлектроники при внедрении ТИ, отличающаяся проведением анализа параметров ТП и формированием критериальной оценки работоспособности линии АМ.

В методике проводится анализ видов проверок, производимых на каждом этапе, условий и вероятностей перехода на следующий этап либо отправки изделий на утилизацию. Кроме того, на каждом этапе можно спрогнозировать вероятность простоя системы, время простоя линии, показатель нагрузки на один этап, скорость работы оборудования и инспекций, количество неправильно установленных компонентов,

интенсивность загрузки оборудования, вероятность появления несоответствия на каждом этапе ПП, время проведения операции, вероятное время завершения определенных операций работы.

В результате методика способствует интеллектуализации ТП производства радиоэлектроники и формирует критериальную оценку работоспособности состояния линии АМ. Для поэтапного внедрения ТИ в модель линии АМ вводятся этапы и значения параметров для конкретного производства.

В результате разработки методики на языке программирования С++ была создана и зарегистрирована в Роспатенте программа для ЭВМ: «Программа интеллектуализации производственных процессов изготовления электроники, обеспечивающая критериальную оценку качества продукции» рег. № 2019661474 от 02.09.2019 г. [83].

Обеспечение гибкости ПП и обучаемости оборудования производственной линии предлагается осуществлять за счет формирования базы знаний возмущений в процессе производства, процедур нечеткого регулирования, оценки результативности процедур управления качеством ПП на выбранных этапах ЖЦ, а также поэтапном внедрении технологии межмашинного взаимодействия.

3 Модели и методика обеспечения результативности технологических процессов изготовления радиоэлектронных изделий на основе поэтапного внедрения технологических инноваций

3.1 Функционирование технологической линии автоматического монтажа радиоэлектронных изделий при использовании киберфизических систем

Обеспечение качества инновационных КФС на этапах ЖЦ изделий приводит к необходимости разработки новых моделей и методик производственных комплексов предприятий будущего. Такие предприятия в своих производственных мощностях будут интегрировать программные, технологические и технические средства и системы, автоматизирующие этапы ЖЦ от этапа разработки до изготовления и последующей логистики.

Встраивание КФС в производство возможно с использованием промышленного интернета, интерфейса IoT, M2M, протоколов беспроводной передачи данных, адаптации, датчиков отслеживания и контроля за ТП, пользовательского оборудования, средств управления и контроля (телефонов, компьютеров, планшетов, мультимедийных часов), адаптации технологий облачных вычислений к станкам и т.д.

Для обеспечения работы оборудования разрабатываются программные средства управления ПП на основе нечеткой логики и базы данных, обеспечивающие формирование необходимых оборудованию команд для корректного выполнения операций в автоматическом режиме и принятия интеллектуального управленческого решения в случае возникновения несоответствий [84].

При организации ПП радиоэлектроники предлагается использовать следующую схему взаимодействия автоматического технологического оборудования, киберфизических систем и специалистов, учитывающую внедрение разработанных предложений в диссертационном исследовании ТИ (рисунок 54).



Рисунок 54 – Взаимодействие автоматического технологического оборудования, киберфизических систем и специалистов на цифровом производстве

Цифровая СУ ПП в рамках диссертационного исследования представляет собой имитационную модель, которая воспроизводит работу датчиков загрузки и контроля состояния оборудования, наличия ресурсов, исполнительных устройств, контроллеров управления оборудованием, которые обеспечивают мониторинг технологических операций.

Внедрение ТИ обеспечивает функциональное и информационное обеспечение, предусмотренное концепцией «Индустрия 4.0» с помощью использования элементов концепции M2M, DFM, BOM, ID-идентификаторов

[80]. Примеры ТИ, функционального и информационного обеспечения приведены в таблице 9.

Таблица 9 – Примеры функционального и информационного обеспечения технологических инноваций

Технологическая инновация	Функциональное обеспечение	Информационное обеспечение	Обеспечение качества
M2M	Параметрическая модель процесса, средства хранения и обработки больших данных, доступный интерфейс пользователя.	Драйверы устройств, интернет вещей.	Корректировка технологий на основе контроля качества.
База данных Solder Paste Inspection (далее – SPI)	Обеспечивает контроль нанесения паяльной пасты в 2D или 3D форматах.	Оборудование проецирования полос, формирующее объемное изображение.	Корректировка материалов и доработка изделий технологий на основе контроля качества.
База данных Automated Optical Inspection (далее – AOI)	Обеспечивает хранение моделей эталонов, процесс идентификации дефектов и минимизации количества ложных отказов. Позволяет хранить все	Цифровая модель эталона.	Обеспечивает соответствие стандартам качества.

	<p>найденные дефекты и подтверждать их перед изменением рабочей программы. При противоречивых результатах контроля спорные параметры отображаются на экране.</p>		
<p>Интегрированная база данных</p>	<p>База знаний интегрирует базы данных, данные по технологическим операциям и материалам, позволяет найти необходимую информацию. Содержит систематизированный список дефектов для разных стадий ПП, интерфейс для ввода новых данных пользователем.</p>	<p>Средства представления определенных и нечетких знаний в заданной предметной области, онтологии.</p>	<p>Постоянное совершенствование качества на основе параметрической модели, нечетких описаний или в условиях неопределенности.</p>

Структуры подсистем, включающих M2M и базу знаний, приведены на рисунке 55. Представленная базовая структура взаимодействия элементов концепции «Индустрия 4.0».

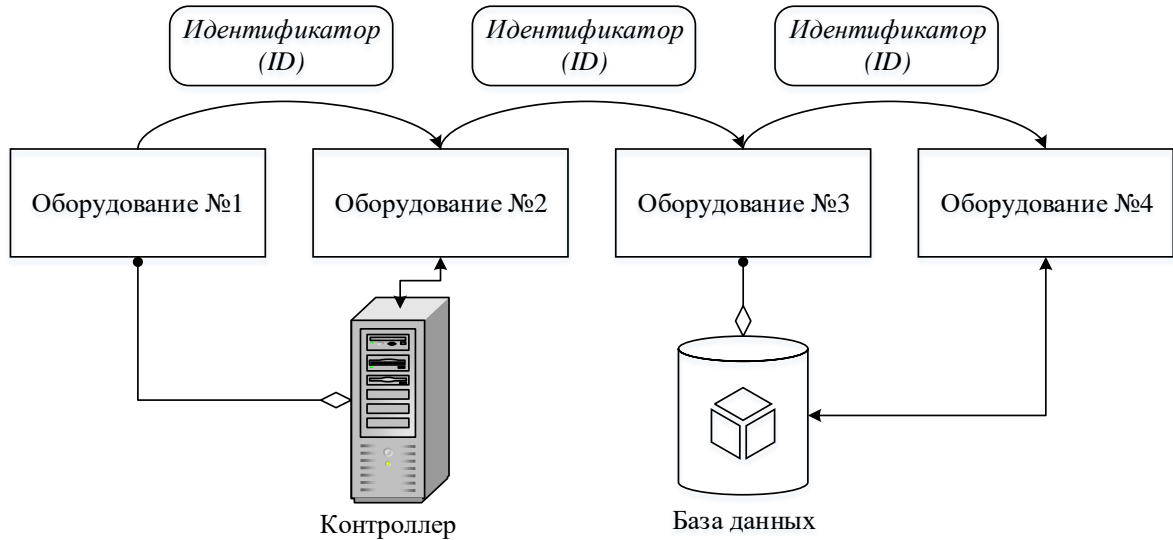


Рисунок 55 – Функциональное обеспечение производственного процесса монтажа радиоэлектронных изделий

Особенности построения моделей, методов и критериев применительно к внедрению ТИ требуют специального исследования. Это связано с принципиальной неопределенностью инновационных процессов. Таким образом, решение задачи обеспечения качества в этом случае включает использование моделей и методов раскрытия неопределенностей [85].

Вместе с тем анализ неопределенностей, связанных с рисками снижения качества, может быть дополнен моделями и методами анализа новых возможностей. Такие возможности возникают при внедрении технологических инноваций, и их результативность должна быть оценена количественно.

3.2 Методика мониторинга процессов монтажа радиоэлектронных изделий и внедрения технологии межмашинного интеллектуального взаимодействия компонентов оборудования

Внедрение технологических инноваций в монтажа радиоэлектронных изделий обуславливается необходимостью снижения затрат на предотвращение и устранение брака готовой продукции, а также достижения большей надежности продукции. Устранение дефектов на ранних этапах (при нанесении паяльной пасты и т.д.), которые в дальнейшем могут привести к появлению брака конечной продукции, является менее затратным процессом, чем устранение неисправности конечной сборки. Для производителей важно не только снижение затрат на производство, но и мнение клиентов: качественный товар повышает его конкурентоспособность.

Для поэтапного внедрения ТИ в ЦП радиоэлектроники необходимо создание интегрированной базы данных всех ПП. Для создания системы интеллектуального обеспечения требуется разработать программы для ЭВМ, построенные на основе нечеткой логики и позволяющие машине самостоятельно принимать решение, что обеспечивает повышение результативности ПП изготовления изделий радиоэлектроники. При разработке модели ПП используется пооперационная детализация ТП, выполненная ранее в диссертационном исследовании.

С помощью баз данных облегчается поиск и выбор необходимых средств проектирования производства для поэтапной разработки радиоэлектронной продукции. Необходимость создания такого ПО вызвано недостаточной степенью проработанности вопросов моделирования ПП в рамках создания инновационных технологических систем, реализуемых в рамках концепции «Индустрия 4.0».

Технологии АМ печатных плат постоянно развиваются, однако состав оборудования остается соответствующим базовой структуре. Совершенствование и миниатюризация радиоэлектронной компонентной базы выдвигают новые требования к оборудованию, а также к ПК. При этом

влияние «человеческого фактора» и отсутствие учета взаимного влияния частей технологической линии остаются факторами неопределенности ПП ввиду большой вероятности наступления брака [86].

Особую роль в развитии IoT играют интеллектуальные решения в области M2M. Новые возможности для обеспечения качества радиоэлектронной продукции открываются как на основе все более полной «цифровизации» производства, так и при переходе к полному цифровому ЖЦ продукции. В рамках диссертационного исследования разработана имитационная модель, которая воспроизводит работу датчиков загрузки и контроля состояния оборудования, наличия ресурсов, исполнительных устройств, контроллеров управления оборудованием, которые обеспечивают мониторинг технологических операций.

На рисунке 56 представлена разработанная в методике модель поэтапного производства радиоэлектронных изделий на основе введения технологии МИВ компонентов оборудования, предназначенная для последовательного внедрения ТИ в линию АМ [84].

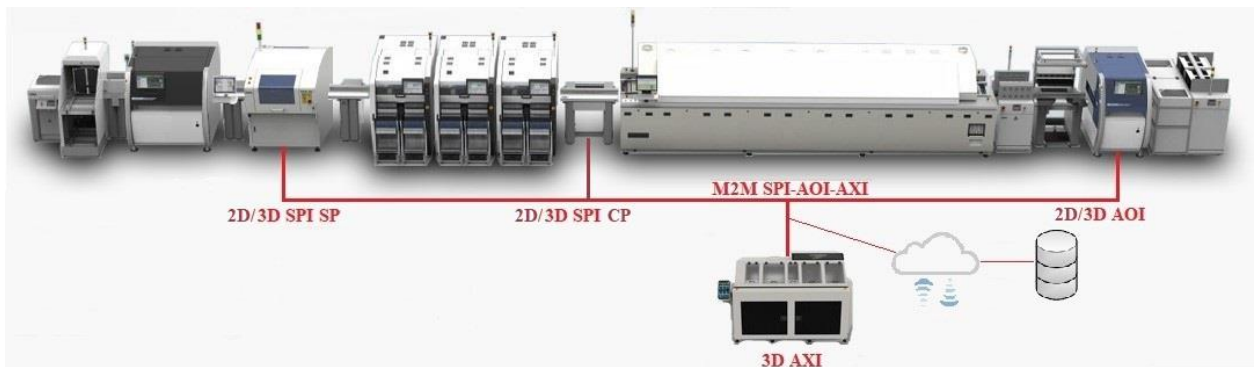


Рисунок 56 – Модель предполагаемых к внедрению технологических инноваций на линии АМ

Иллюстрация ТП при внедрении базы данных возникающих несоответствий при реализации ПП представлена на рисунке 57.

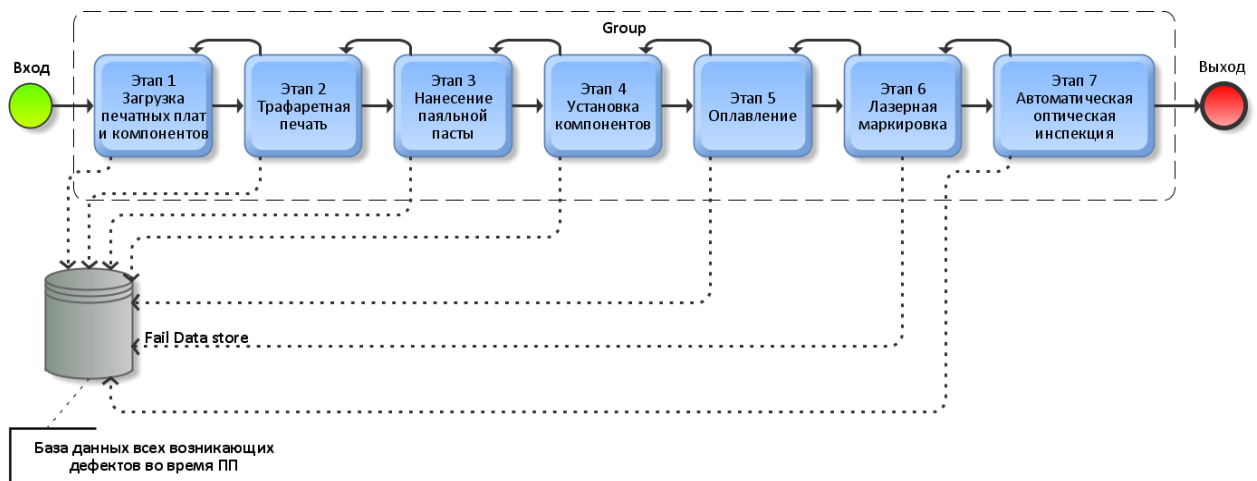


Рисунок 57 – Иллюстрация технологического процесса при внедрении базы данных возникающих несоответствий при реализации ПП

В качестве исходной модели рассмотрим этапы ПП с учетом управляющего воздействия (control action) и человеческого фактора. Представленная на рисунке 57 схема является дальнейшим развитием разработанной ранее математической модели ТП изготовления радиоэлектроники, обеспечивающей поэтапную оценку качества состояния линии АМ (рисунок 51), и отличается последовательным внедрением ТИ M2M-SPI SP, M2M-SPI CP, M2M SPI-AOI и M2M SPI-AOI-AXI. На рисунке 58 операции CA₃, CA₇ выполняются оператором (человеком). Такое состояние соответствует стандарту «The Hermes Standard for vendor independent machine-to-machine communication in SMT Assembly».

Поэтапное внедрение ТИ представляет собой поэтапный перевод операторов в дистанционную рабочую зону (work pool). Операторы отслеживают корректность выполнения операций и дополняют базу знаний возможных несоответствий.

Операторы отслеживают корректность выполнения операций и дополняют базу знаний возможных несоответствий. Операторы на этапах 3 и 7 контролируют работу инспекций после нанесения паяльной пасты, а также после нанесения лазерной маркировки (рисунок 58). В дальнейшем использование логических операций на этапах проверки паяльной пасты (S_3) и автоматической оптической инспекции (S_7) осуществляется за счет

программных средств, исключая негативное влияние человеческого фактора. Одним из обязательных условий применения такого метода являются одновременный учет и отслеживание дискретной и непрерывной частей технологической линии.

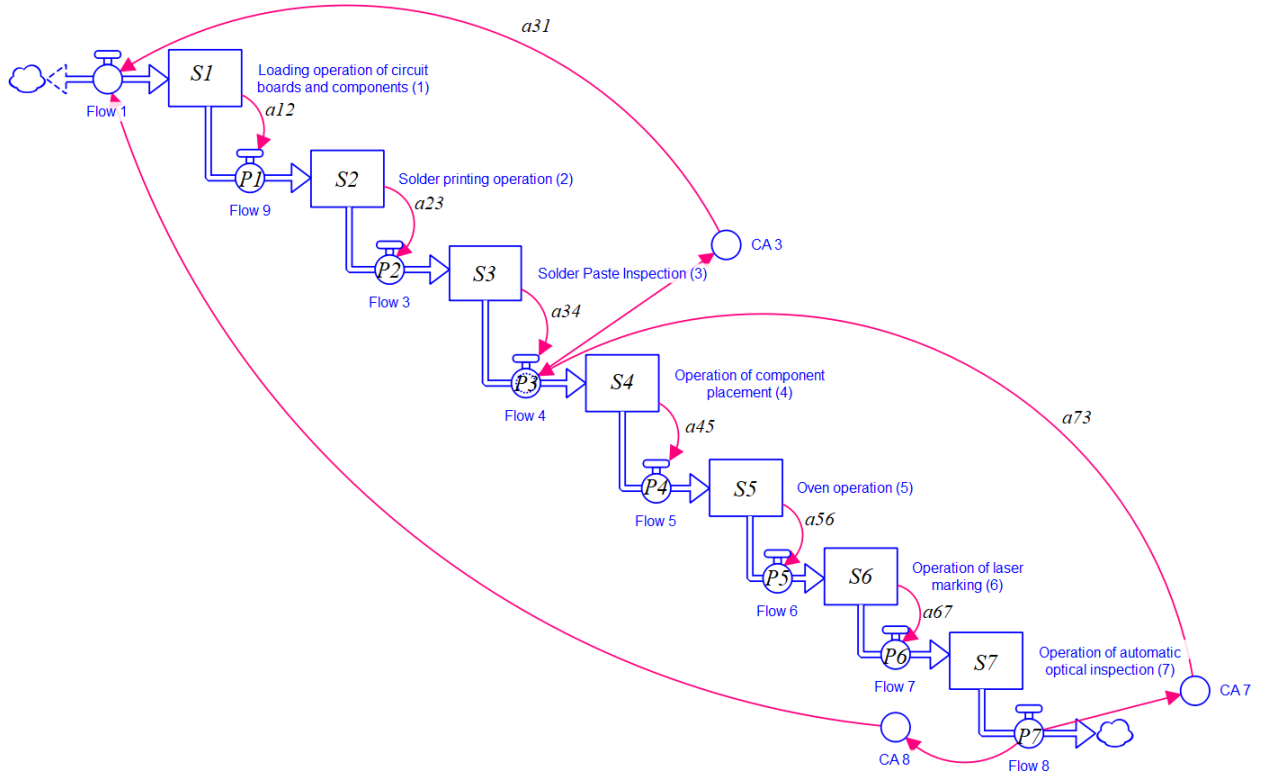


Рисунок 58 – Поэтапная реализация цифровой производственной линии с участием оператора (лица, принимающего решения)

Элементами оценивания качества продукции на этапах «проверка паяльной пасты» и «автоматическая оптическая инспекция» могут быть:

- покрытие площадки паяльной пастой;
- наполнение объема трафарета;
- соблюдение формы отверстия;
- наличие перемычек.

В задачах управления ПП при интеллектуализации технологической линии некоторые переменные могут принимать несколько дискретных значений, что связано с большими объемами данных для выбора подходящих переменных для организации производства, таких как: размеры изделий,

время изготовления, количество изделий в одной партии, скорость работы оборудования, внесенные показатели в соответствии с ГОСТ [46, 47, 54, 65, 69, 70, 71, 107-117]. Для решения задач программного сопряжения систем управления большими данными и современных систем автоматизированного проектирования предлагается применять методы дискретного линейного или смешанного целочисленного программирования. Применение такого подхода логических операций позволит более детально смоделировать ПП и спрогнозировать возможные возмущения с максимальной точностью.

Последовательное внедрение технологических инноваций на предприятии в виде интеллектуальной СУ ПП и большими массивами данных осуществляется заменой последовательных межоперационных связей после этапов:

1. Нанесение паяльной пасты (CA₃),
2. Установка компонентов (CA₄),
3. Лазерная маркировка (CA₇),
4. Дополнительный рентгеновский контроль монтажа BGA

на укрупненные операторы этапов 3 (M2M-SPI SP), 4 (M2M-SPI CP), 7 (M2M SPI-AOI) и BGA (M2M AXI). Указанные операторы соответствуют базовой структуре (рисунок 51).

Необходимость внедрения ТИ в виде многопараметрических нечетких регуляторов (далее – НР) на каждом из рассматриваемых этапов определяется в результате статистического анализа вероятностей наступления этапа, следующего за рассматриваемым.

Алгоритм анализа состояния ПП и определения необходимости внедрения технологических инноваций приведен на рисунке 59.

Для того чтобы принять решение о внедрении устройства инспекции паяльной пасты (SPI SP), предварительно проводится анализ вероятности наступления этапа загрузки и установки компонентов. В соответствии с разработанным алгоритмом анализа состояния ПП и определения необходимости внедрения ТИ, для определения необходимости

использования устройства инспекции установки компонентов (SPI CP) предварительно выполняется анализ вероятности наступления этапа оплавления. По итогам ПП проводится анализ вероятности выхода годных изделий.

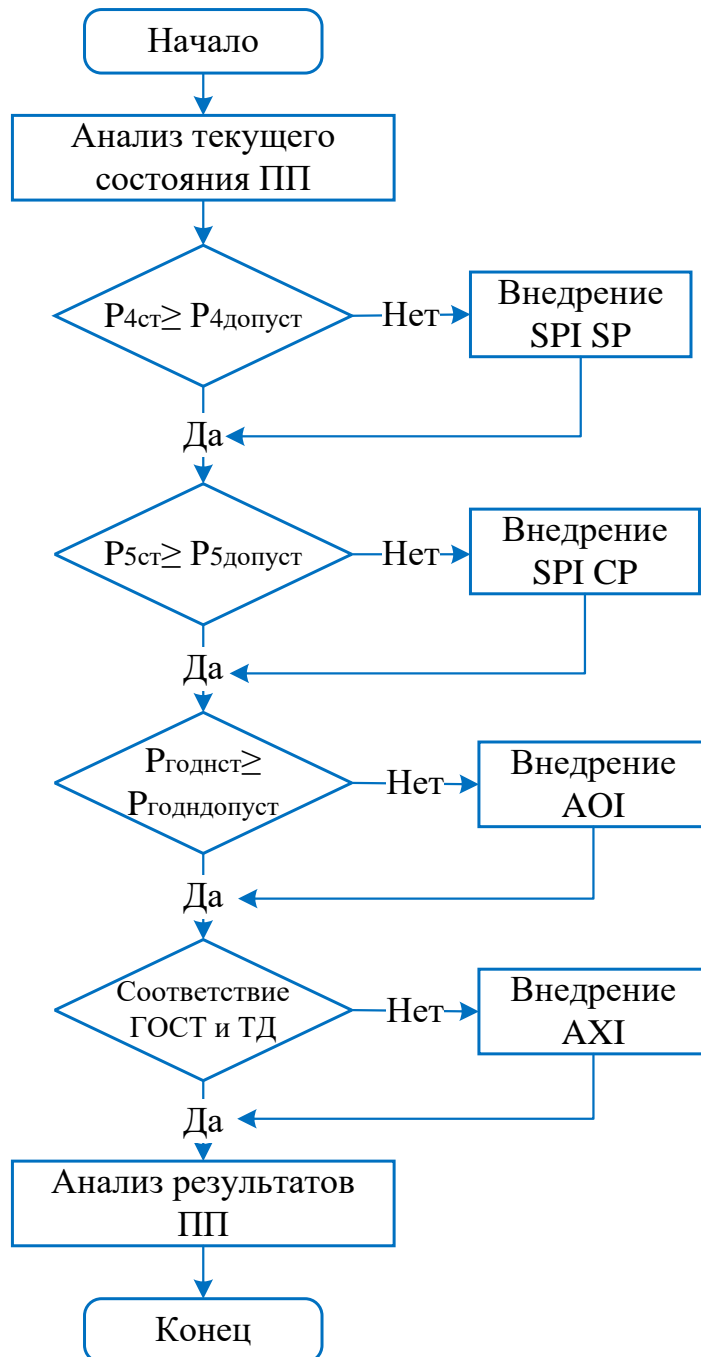


Рисунок 59 – Алгоритм анализа состояния ПП и определения необходимости внедрения технологических инноваций

Если по итогам выполненных анализов выяснится, что оцениваемые вероятности ниже требуемых значений, принимается решение об использовании в ПП устройств инспекций паяльной пасты, установки компонентов и автоматической оптической инспекции (АОИ), реализованных в рамках данного исследования в виде специальных датчиков и нечеткого регулятора с программным управлением. Также предложенный алгоритм предполагает внедрение аналогично реализованного устройства дополнительного рентгеновского контроля монтажа (АХИ) в случае, если предварительный статистический анализ покажет, что доля соответствий произведённых изделий ГОСТ [46, 47, 54, 65, 69, 70, 71, 107-117] и ТД ниже требуемого значения.

Иллюстрация ТП при внедрении интеллектуальной системы после нанесения паяльной пасты представлена на рисунке 60.

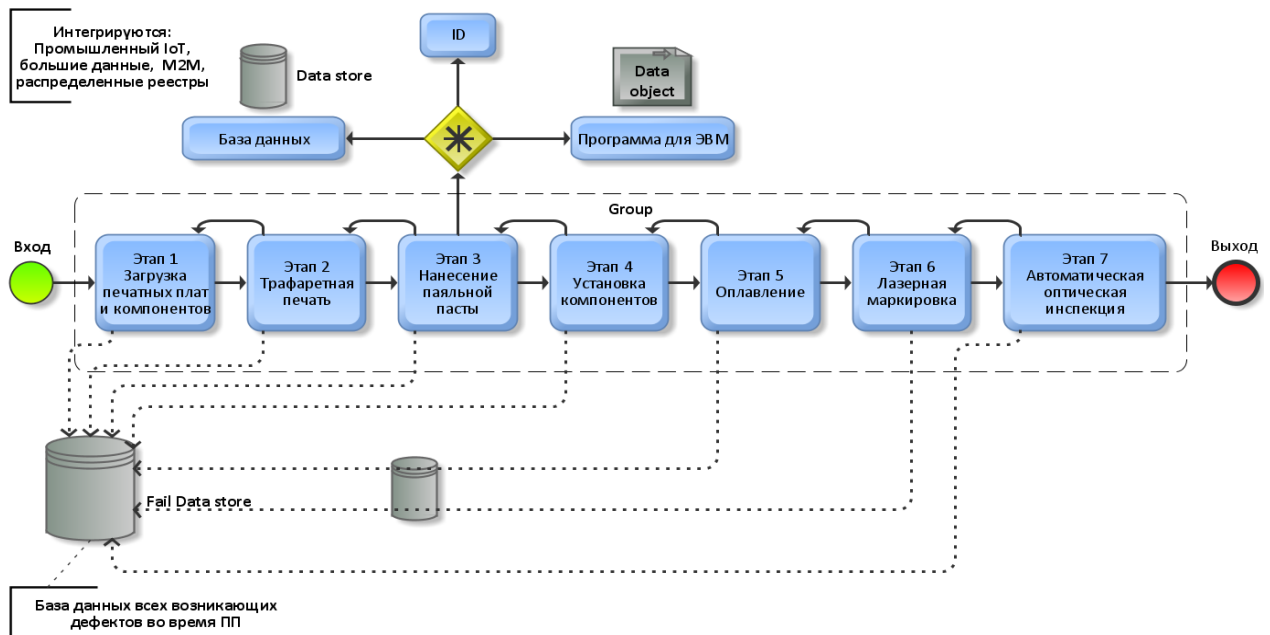


Рисунок 60 – Иллюстрация технологического процесса при внедрении интеллектуальной системы после нанесения паяльной пасты

Данная иллюстрация ТП соответствует процессной модели, представленной на рисунке 61

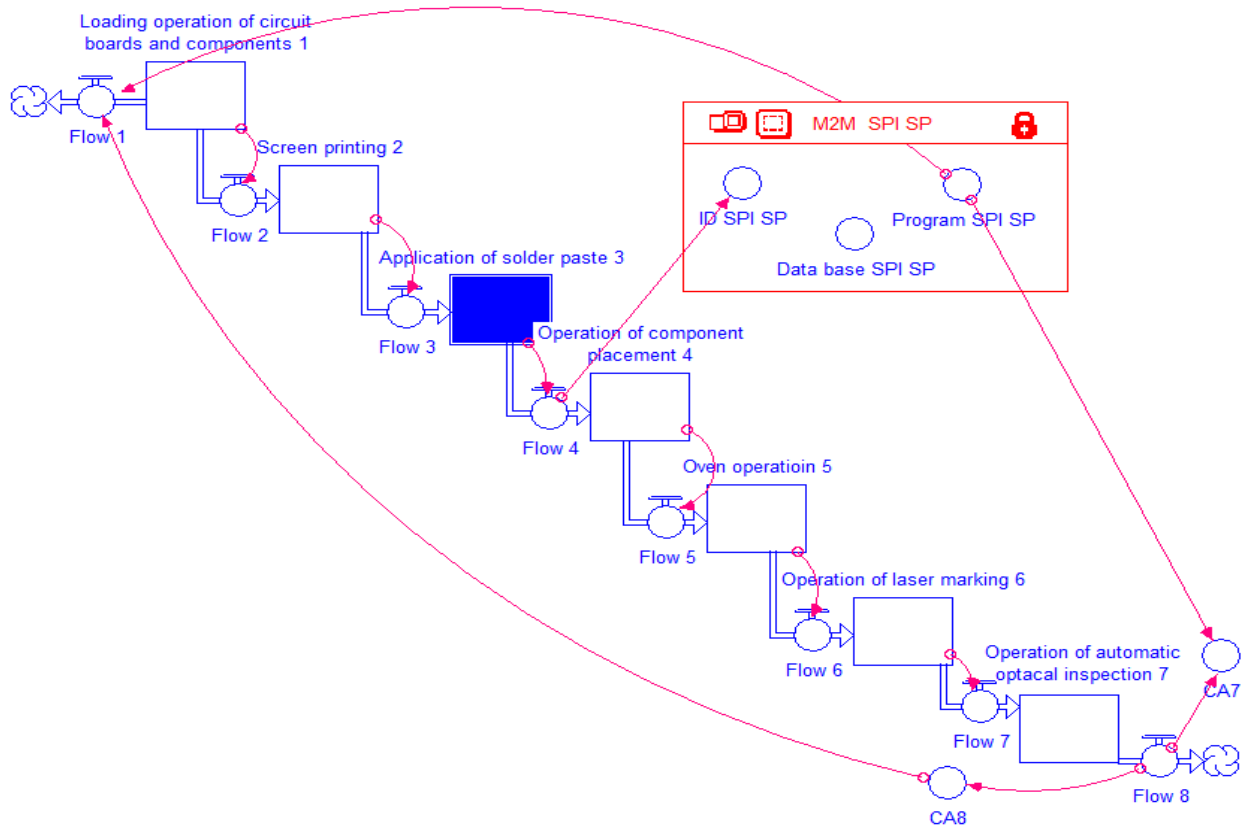


Рисунок 61 – Процессная модель АМ с внедрением интеллектуальной системы межмашинного взаимодействия после нанесения паяльной пасты

Алгоритм выполнения ПП радиоэлектроники с внедрением устройства инспекции паяльной пасты (SPI SP) после нанесения паяльной пасты, соответствующий процессной модели (рисунок 61), приведен на рисунке 62.

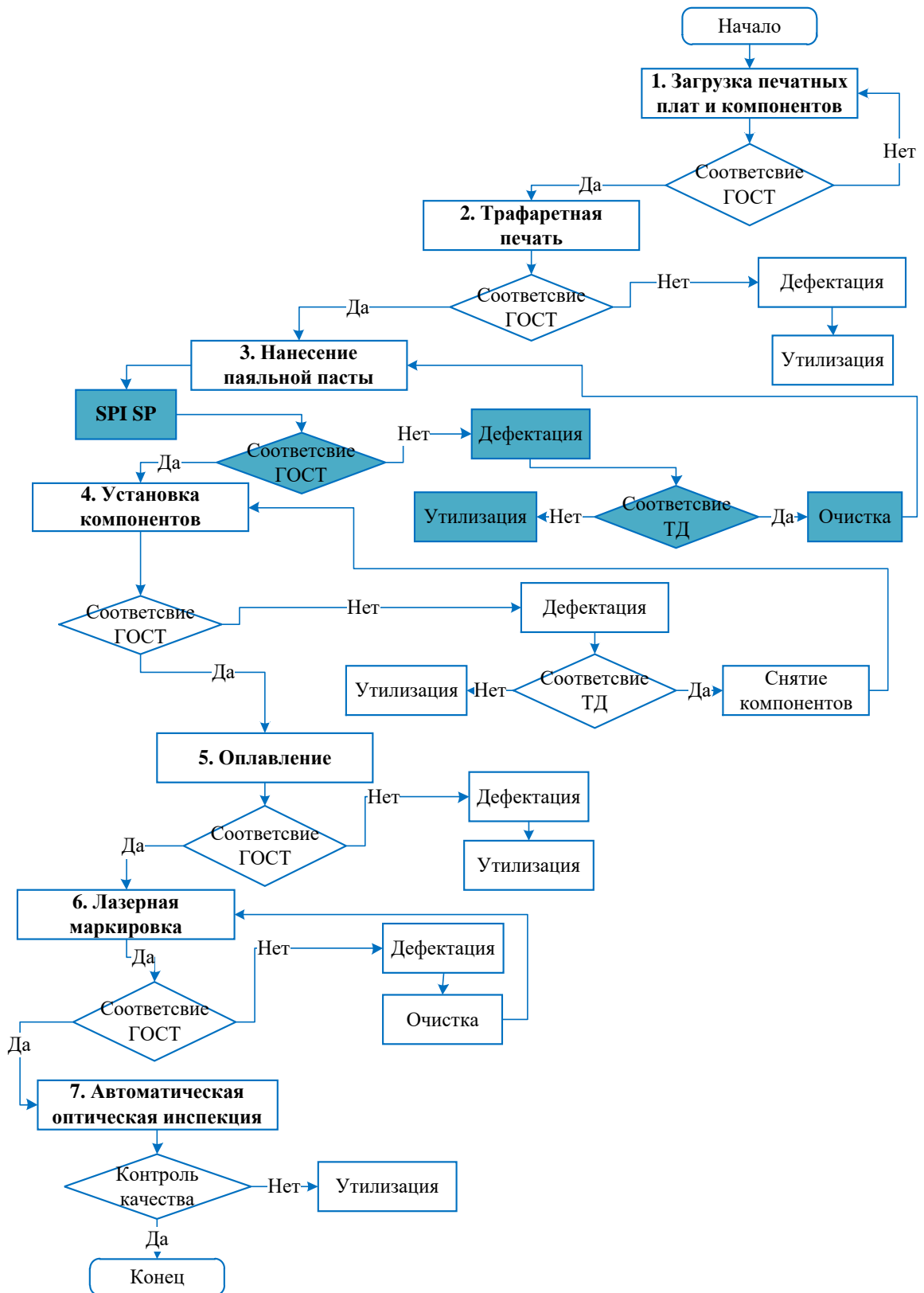


Рисунок 62 – Алгоритм выполнения ПП радиоэлектроники с внедрением устройства инспекции паяльной пасты (SPI SP) после нанесения паяльной пасты

Иллюстрация ТП при внедрении интеллектуальной системы после установки компонентов представлена на рисунке 63.

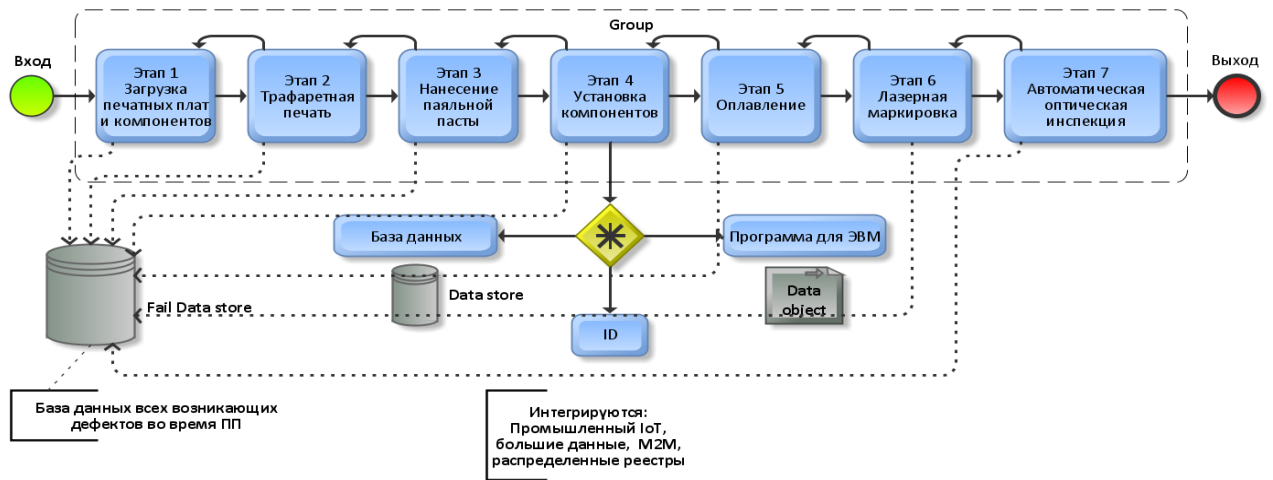


Рисунок 63 – Иллюстрация технологического процесса при внедрении интеллектуальной системы после установки компонентов

Данная иллюстрация ТП соответствует процессной модели, представленной на рисунке 64.

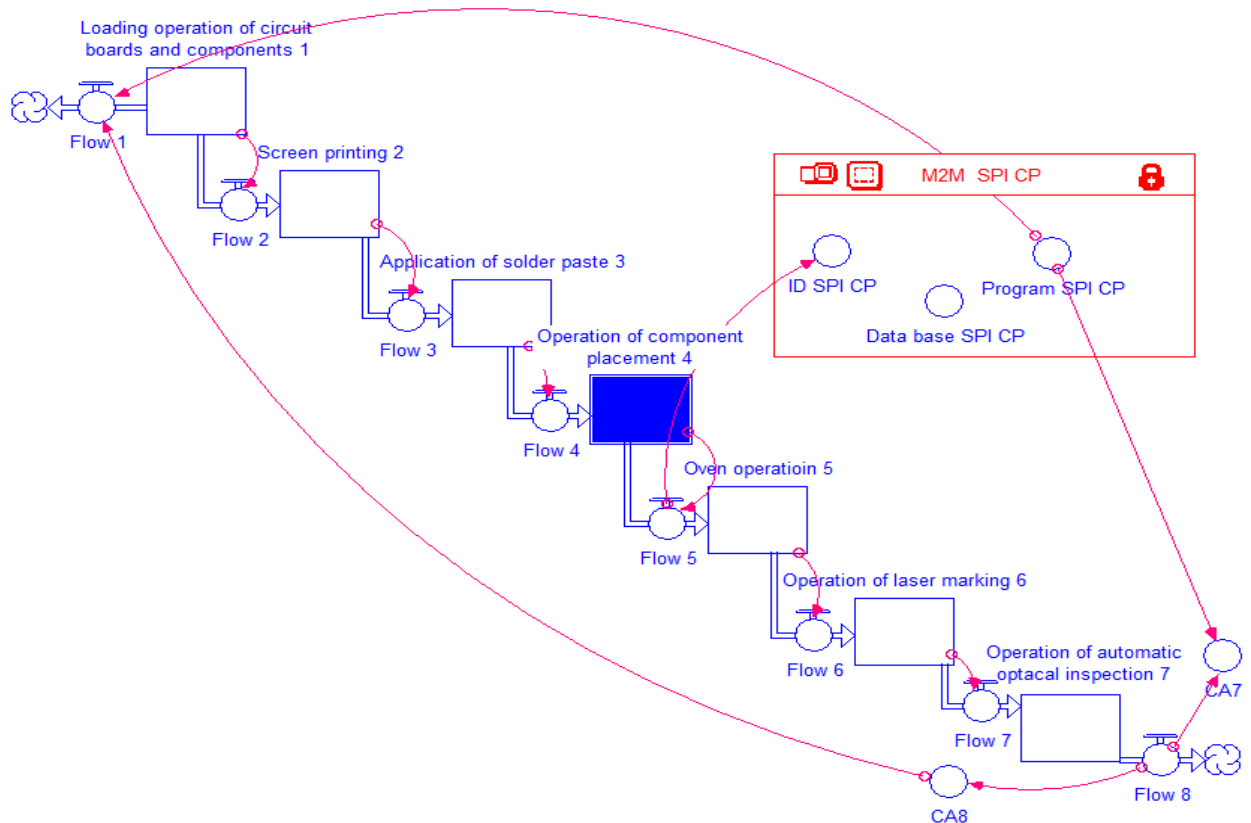


Рисунок 64 – Процессная модель АМ с внедрением интеллектуальной системы межмашинного взаимодействия после установки компонентов

Алгоритм выполнения ПП радиоэлектроники с внедрением устройства инспекции установки компонентов (SPI CP) после нанесения установки компонентов, соответствующий процессной модели (рисунок 64), приведен на рисунке 65.

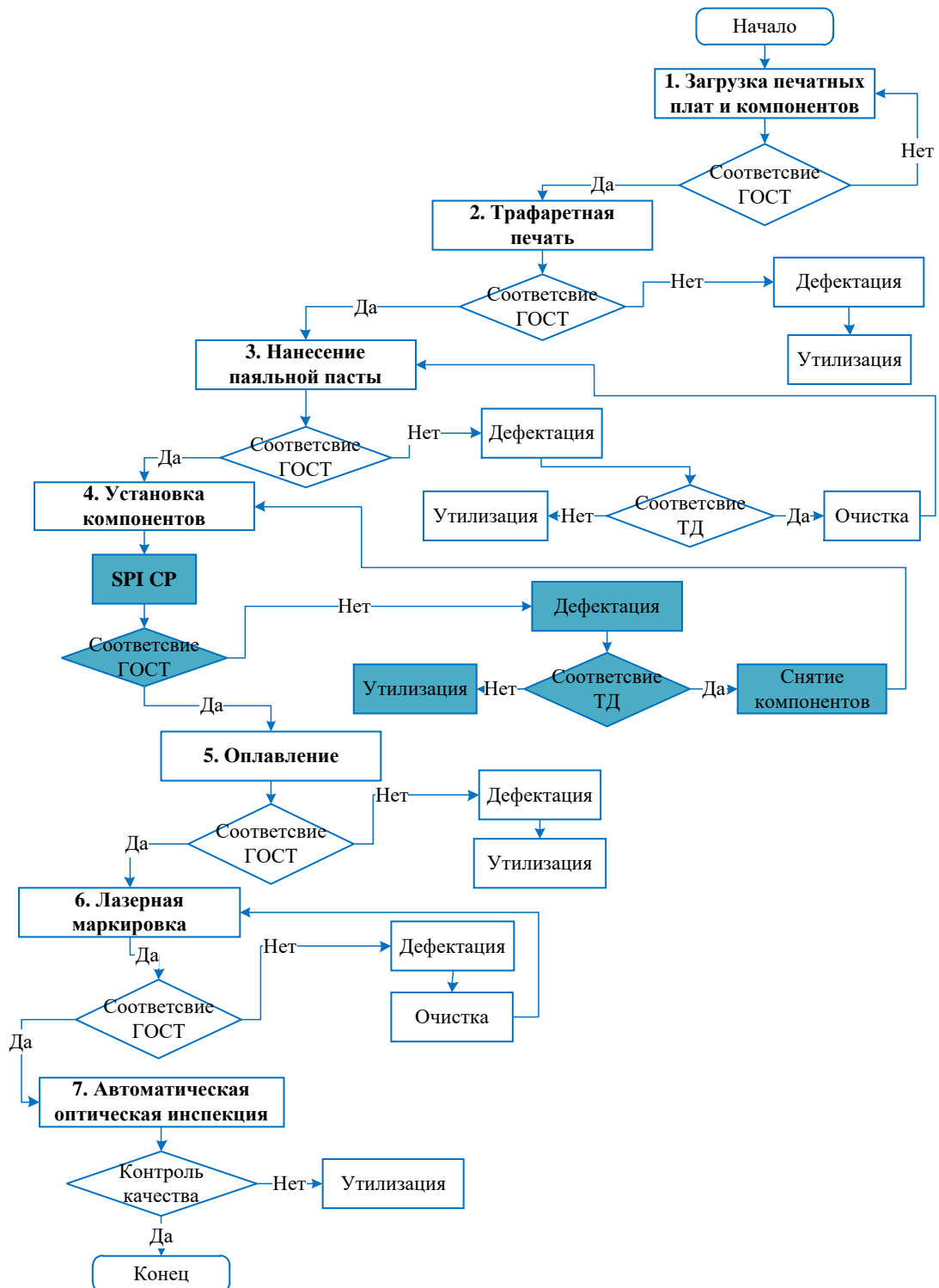


Рисунок 65 – Алгоритм выполнения ПП радиоэлектроники с внедрением устройства инспекции установки компонентов (SPI CP) после операции установки компонентов

Иллюстрация ТП при внедрении интеллектуальной системы нанесения лазерной маркировки представлена на рисунке 66.

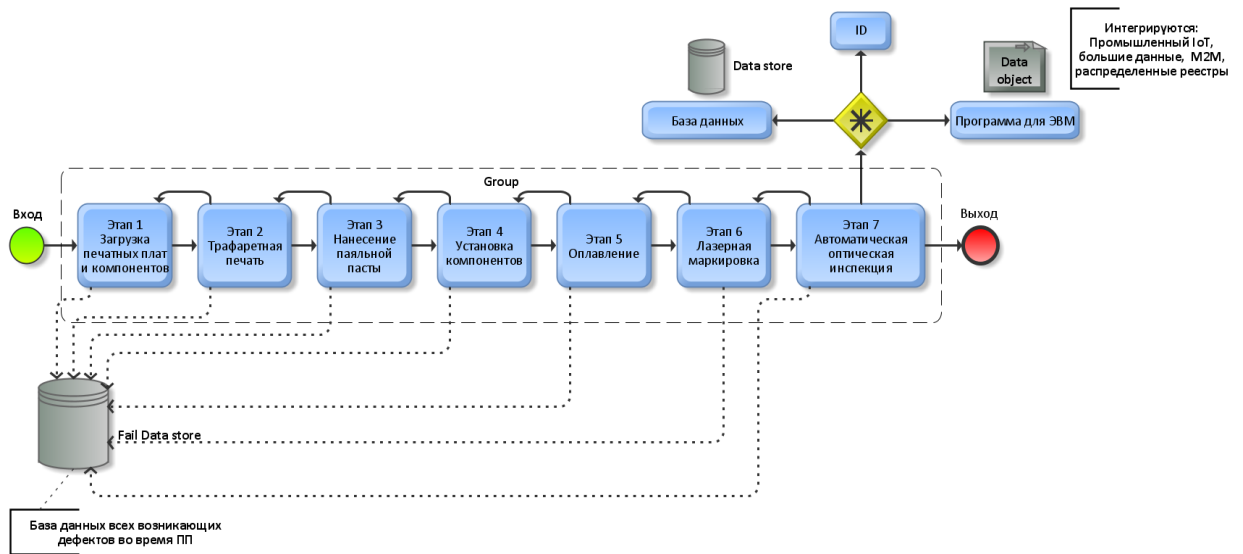


Рисунок 66– Иллюстрация ТП при внедрении интеллектуальной системы после нанесения лазерной маркировки

Данная иллюстрация ТП соответствует процессной модели, представленной на рисунке 67.

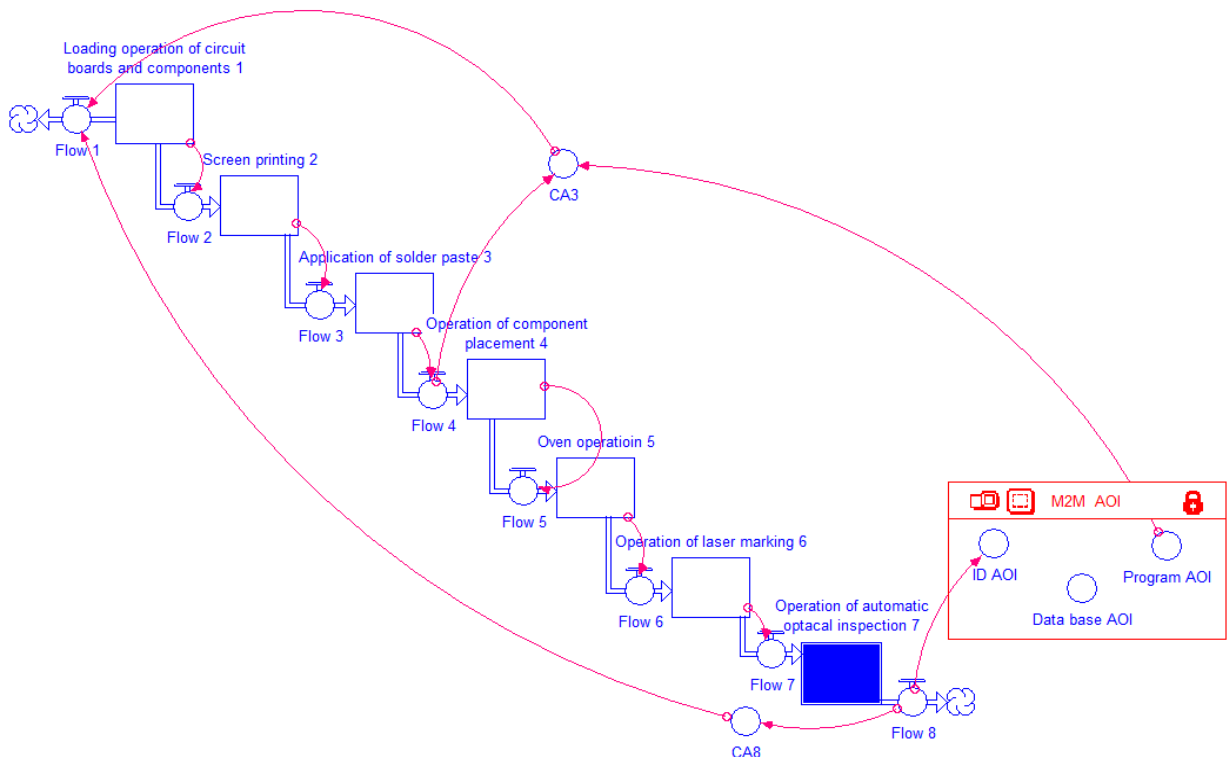


Рисунок 67 – Процессная модель АМ с внедрением интеллектуальной системы межмашинного взаимодействия после нанесения лазерной маркировки

Алгоритм выполнения ПП радиоэлектроники с внедрением устройства автоматической оптической инспекции (АОИ) после нанесения лазерной маркировки, соответствующий процессной модели (рисунок 67), приведен на рисунке 68.

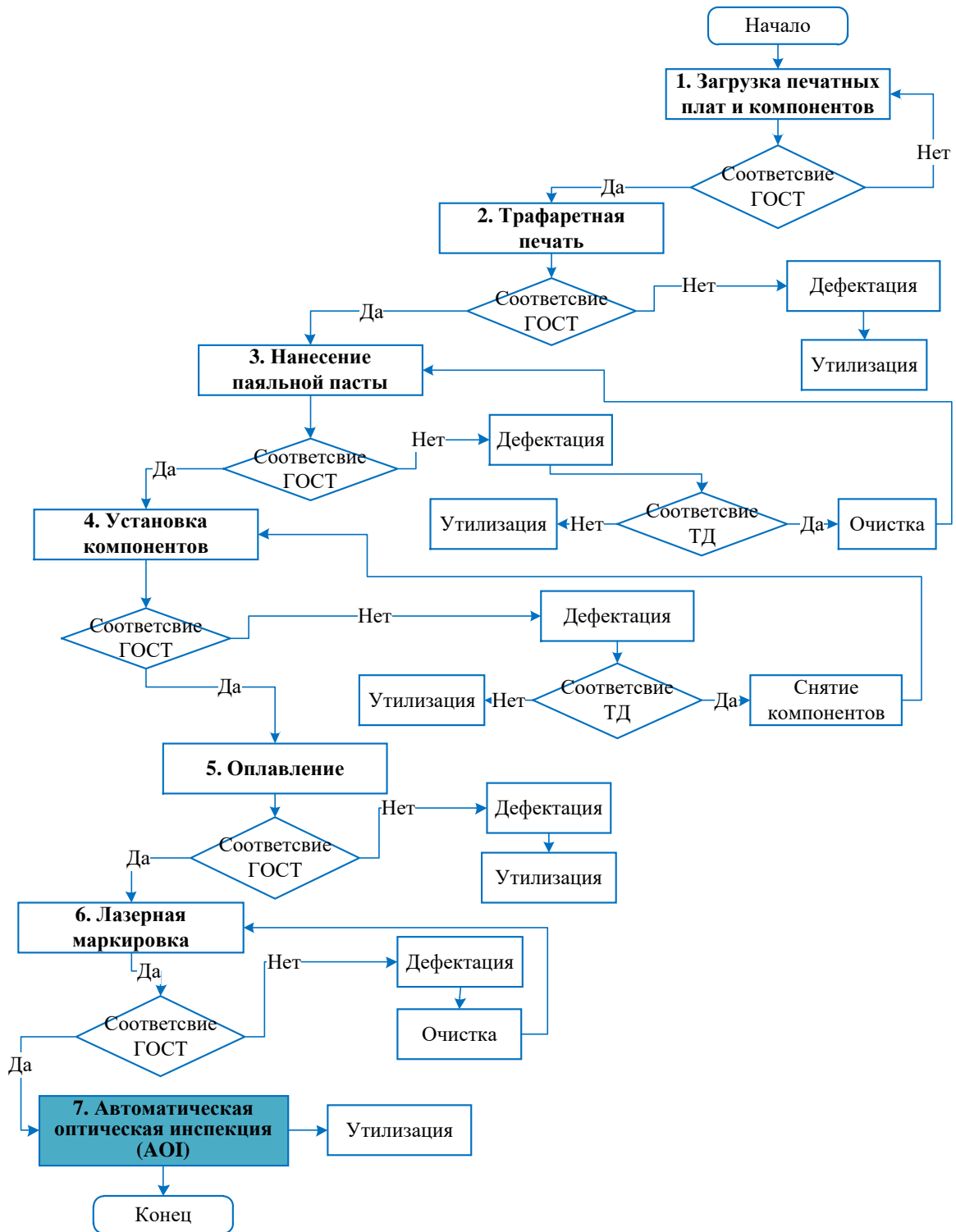


Рисунок 68 – Алгоритм выполнения ПП радиоэлектроники с внедрением устройства автоматической оптической инспекции (АОИ) после операции нанесения лазерной маркировки

Одним из обязательных условий применения такого метода являются одновременный учет и отслеживание дискретной и непрерывной частей технологической линии. Смешанная задача при нелинейности системы будет выглядеть следующим образом (48):

$$\left\{ \begin{array}{l} Q(x, y) \Rightarrow \min \\ J(x, y) \leq 0 \\ x \in X \\ y \in Y, y \subset Z \end{array} \right. , \quad (48)$$

где $Q(x, y)$ – выпуклая функция максимально допустимых ресурсов y для производства изделий x ,

$J(x, y)$ – выпуклая функция потребления ресурсов y для производства x ,

X – множественные значения ресурсов,

Y – множественные значения изделий.

Смешанная задача оптимизации при линейности системы будет выглядеть следующим образом (49):

$$\left\{ \begin{array}{l} Q(x, y) \Rightarrow \min \\ J(x) = 0; i = 1, \dots, 1 \\ Y_i(x) \leq 0; i = n + 1, \dots, p \\ x \in C_i, C_i(c_{i1}, \dots, c_{ig1}) \\ x_{ig} \leq x_i \leq x_{if}; i = 1, m_c + 1, \dots, m \end{array} \right. . \quad (49)$$

С целью упрощения системы введены дополнительные ограничения (50):

$$\left\{ \begin{array}{l} x_i = R_{i1}C_{i1} + \dots + R_{ig1}C_{ig1} \\ R_{ij} \in \{0;1\}, j = 1, \dots, q_i \\ R_{i1} + \dots + R_{ig1} = 1 \end{array} \right. , \quad (50)$$

где C_i – множественные значения потребности на изделие i по заказу c_{ig} в количестве g .

Планирование ПП осуществляется в результате решения задачи линейного программирования, определяющей целевой (51):

$$\min \sum_{i \in M} \sum_{k \in K} I_{ik} \leq x_{ik} \leq y_{ik}. \quad (51)$$

Для корректного использования функции введены следующие дополнительные условия (52):

$$\left\{ \begin{array}{l} I_{ik} = I_{ik-1} + x_{ik} \sum_{j \in L} J_{ij} x_{ik} - c_{ik} \\ \sum_{j \in L} Z_{ai} x_{ik} \leq U_{ai} \\ x_{ik} \leq SH_{ik} \\ I_{ik-1} \geq 0 \\ x_{ik} \geq 0 \\ y_{ik} \in \{0;1\} \end{array} \right. \quad (52)$$

В свою очередь, мониторинг ПП как задача целочисленного линейного программирования задается целевой функцией (53):

$$R = \sum_{i=0}^M \left(\sum_{k=1}^K D_i y_{ik} + P_i I_{ik} + V_{ik} x_{ik} \right), \quad (53)$$

где R – множество производственных ТИ,

M – количество изделий,

K – количество интервалов времени,

i – изделие,

k – период времени,

D – фиксированная цена изделия,

y – множество ресурсов,

P – стоимость компонентов в изделии,

I – количество производственных ресурсов,

V_{ik} – переменные издержки при производстве изделий i в период k ,

x – множество изделий [87].

Система ограничений данной задачи линейного программирования имеет вид (54):

$$\left\{ \begin{array}{l} I_{ik-1} + x_{ik} - E_i - C_{ik} - \sum_{j < i} J_{ij} x_{jk} = I_{ik} \\ \sum_{Z_w} (G_{ik} y_{ik} + Z_{iw} x_{ik}) \leq C_{wk} \\ x_{ik} \leq H y_{ik}; i = 1, \dots, M; k = 1, \dots, F \\ x_{ik} I_{ik} \geq 0; i = 1, \dots, M; k = 1, \dots, F \\ x_{ik} \in \{0; 1\}; i = 1, \dots, M; k = 1, \dots, F \end{array} \right. , \quad (54)$$

где k – период времени,

x – множество изделий,

i – изделие 1,

E – временные интервалы при изготовлении изделий i (простои),

C – потребность в продукции (спрос),

j – изделие 2,

J_{ik} – количество единиц изделий i , требующихся при производстве единиц изделий j ,

Z – скорость производства изделия,

G_i – установленное время выпуска изделия i ,

y – множество ресурсов,

M – количество изделий,

K – количество интервалов времени

w – объем производственных ресурсов,

H – мощность производственных ресурсов (объем производительной базы предприятия),

F – переменные ТИ, внедряемые в ПП.

Использование одновременного учета и отслеживания дискретной и непрерывной частей технологической линии позволит решить задачу повышения результативности при линейности и нелинейности СУ, обеспечивая сквозное цифровое планирование процесса производства [88].

Результативность работы СУ достигается за счет внедрения технологии МИВ компонентов оборудования. Последовательное внедрение

интеллектуальной самообучающейся системы в виде СУ большими массивами данных осуществляется за счет внедрения указанных ТИ на операциях:

- после нанесения паяльной пасты (applying solder paste) – (SPI SP) (рисунок 56);
- после установки компонентов (component placement) – (SPI CP) (рисунок 60);
- после печи оплавления и нанесения лазерной маркировки (automatic optical inspection) –(AOI) (рисунок 58);
- рентгеновский контроль монтажа (x-ray inspection of installation) – (AXI) (рисунок 56).

Замена операторов представляет собой решение смешанной задачи оптимизации при линейности и нелинейности модели производства, а также возможной замены контролирующего воздействия на многопараметрические нечеткие классификаторы с обучением.

Иллюстрация ТП при внедрении интеллектуальных систем после нанесения паяльной пасты и нанесения лазерной маркировки представлена на рисунке 69.

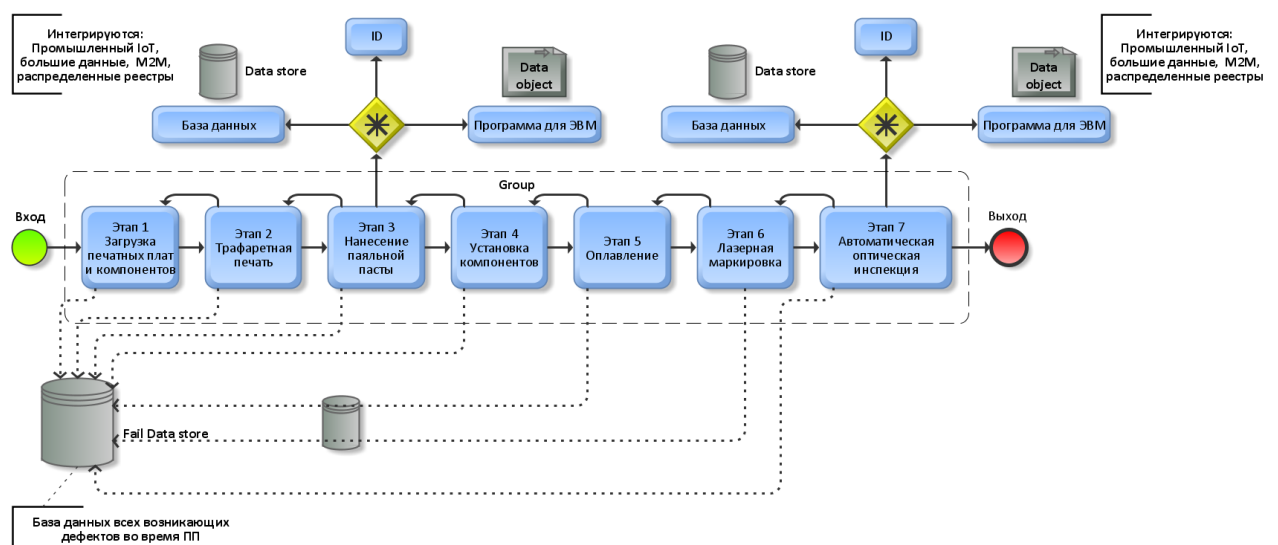


Рисунок 69 – Иллюстрация ТП при внедрении интеллектуальных систем после нанесения паяльной пасты и автоматической оптической инспекции

Данная иллюстрация ТП соответствует процессной модели, представленной на рисунке 70.

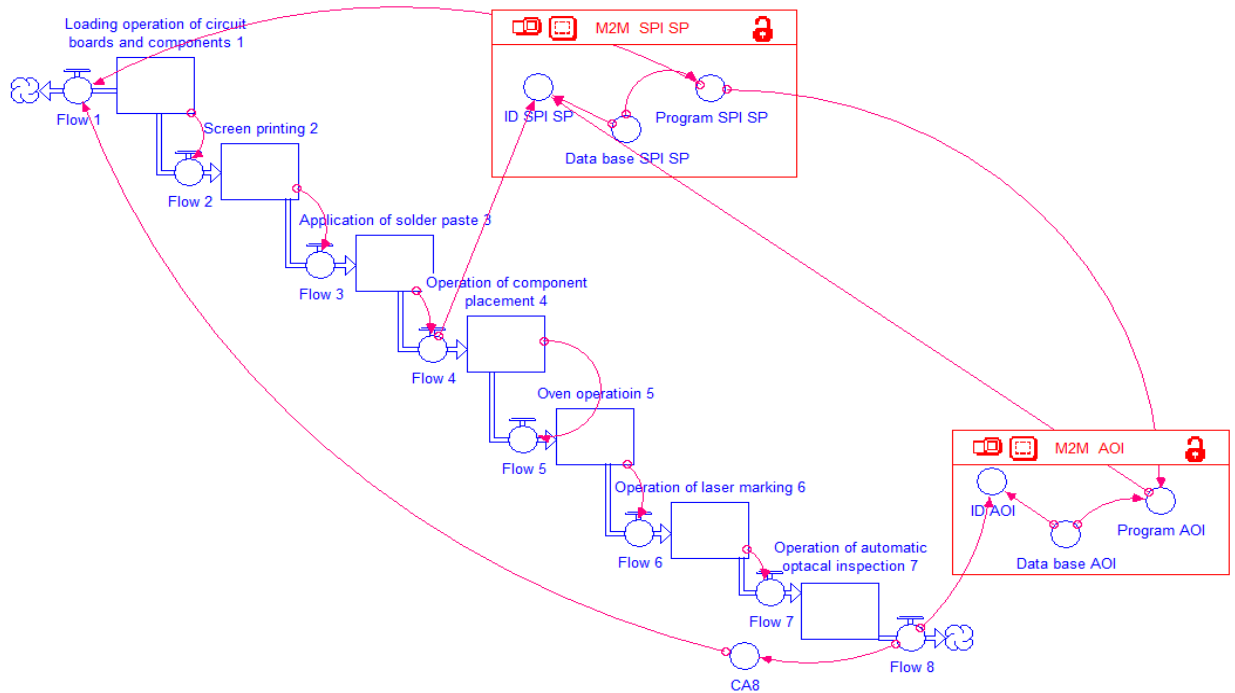


Рисунок 70 – Процессная модель АМ с внедрением интеллектуальной системы межмашинного взаимодействия на этапах проверки паяльной пасты и автоматической оптической инспекции

База данных SPI обеспечивает двумерный или трехмерный контроль нанесения пасты. База данных AOI обеспечивает хранение моделей эталонов и процессов идентификации дефектов, а также позволяет хранить параметры дефектов и подтверждать их перед изменением рабочей программы. При противоречивых результатах контроля спорные параметры отображаются на экране оператора.

Алгоритм выполнения ПП радиоэлектроники с внедрением устройств инспекции паяльной пасты (SPI SP) после нанесения паяльной пасты и автоматической оптической инспекции (АОИ) после нанесения лазерной маркировки, соответствующий процессной модели (рисунок 70), приведен на рисунке 71.

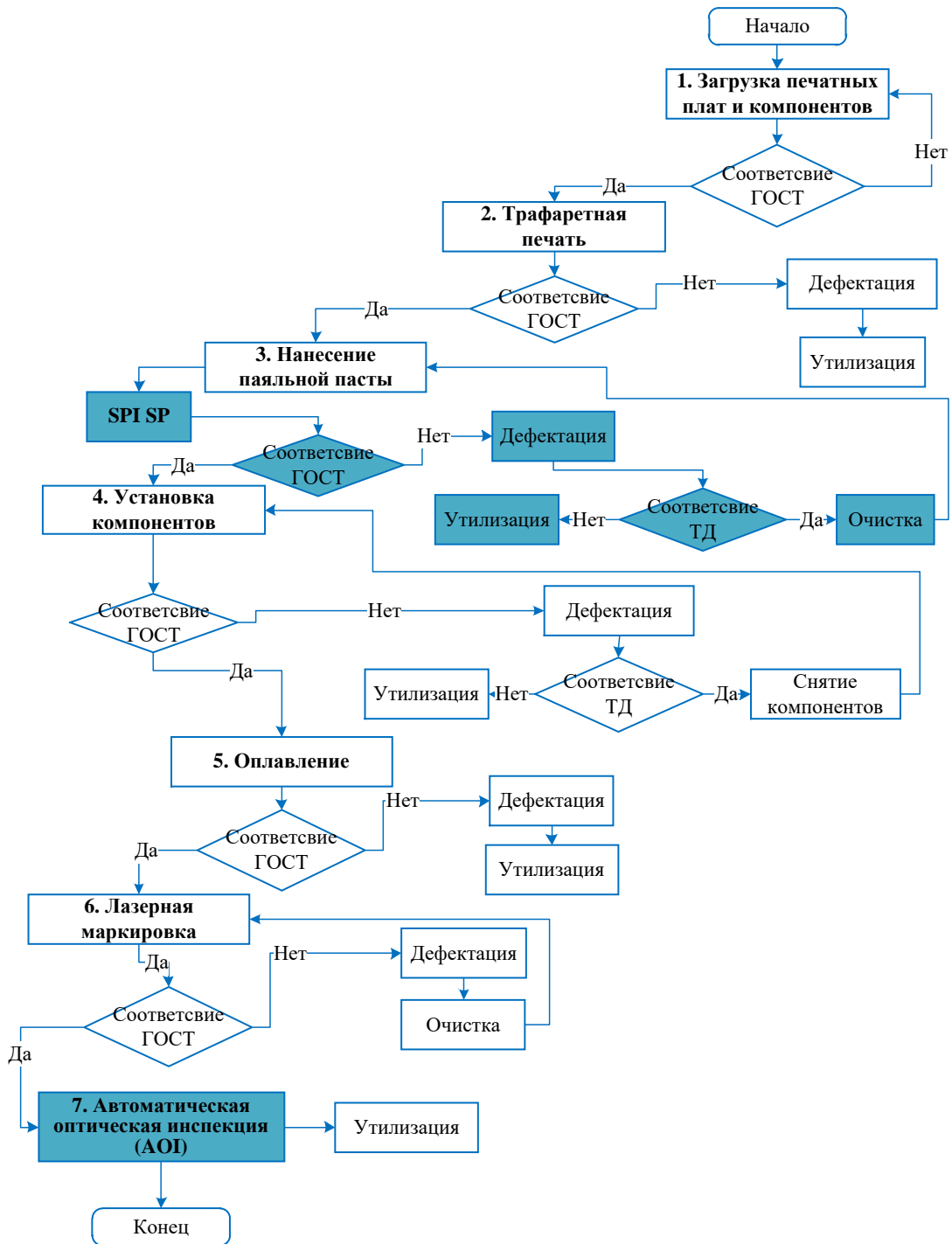


Рисунок 71 – Алгоритм выполнения ПП радиоэлектроники с внедрением устройств инспекции паяльной пасты (SPI SP) и автоматической оптической инспекции (АОИ)

Иллюстрация ТП при внедрении интеллектуальных систем после нанесения паяльной пасты и установки компонентов представлена на рисунке 72.

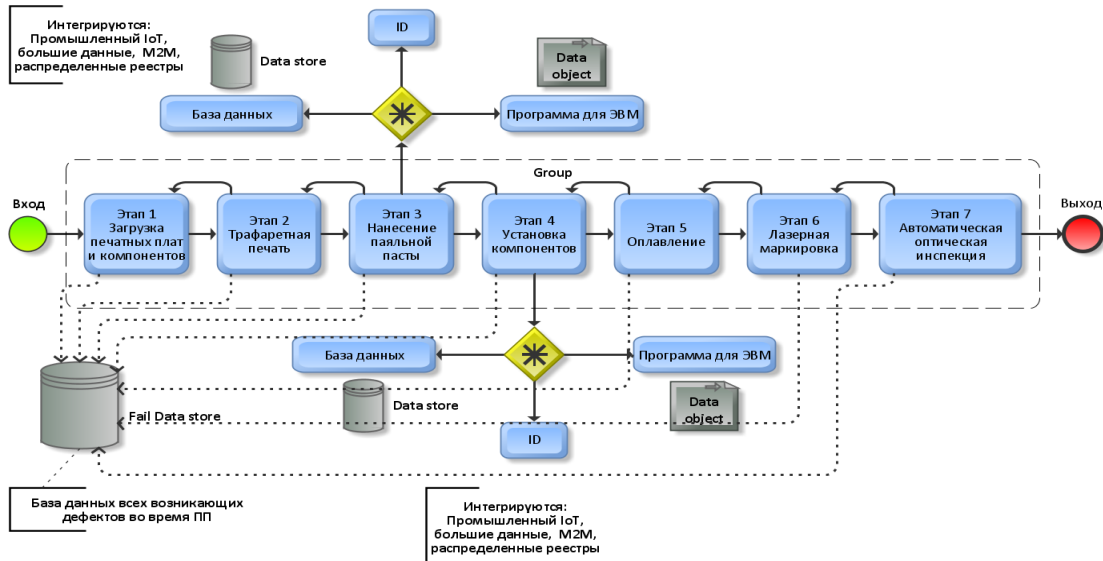


Рисунок 72 – Иллюстрация ТП при внедрении интеллектуальных систем после нанесения паяльной пасты и установки компонентов

Данная иллюстрация ТП соответствует процессной модели, представленной на рисунке 73.

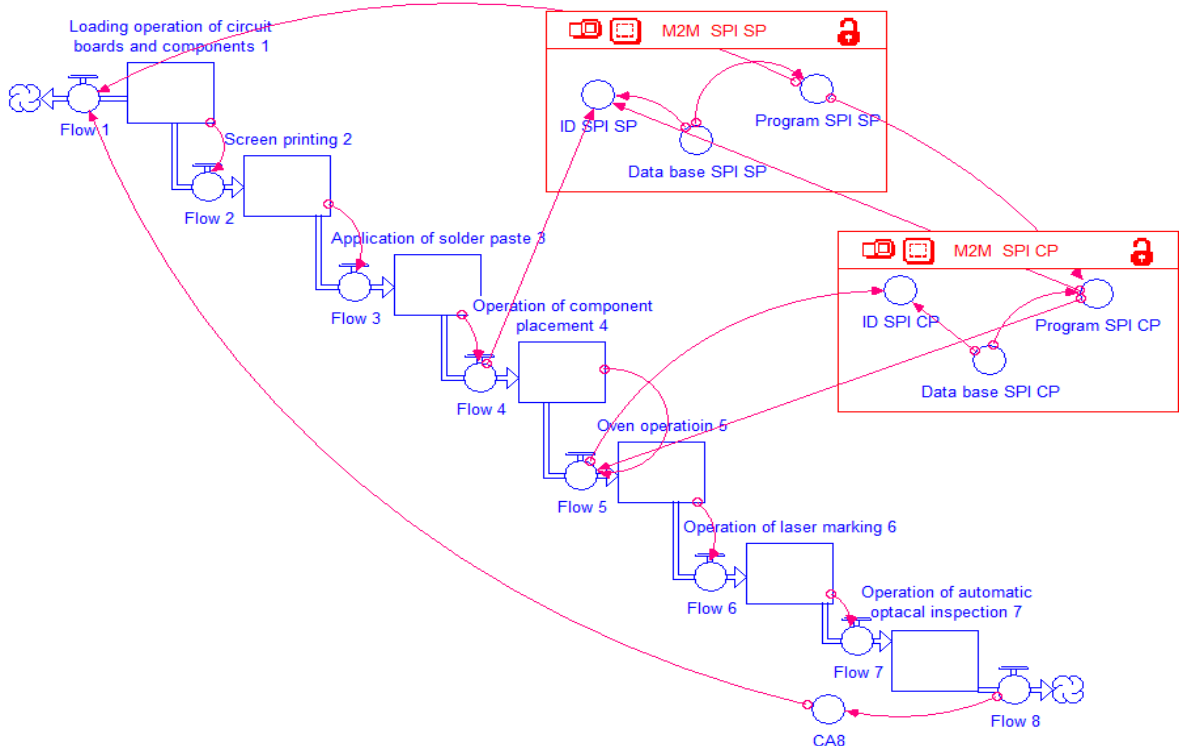


Рисунок 73 – Процессная модель АМ с внедрением интеллектуальной системы межмашинного взаимодействия на этапах проверки паяльной пасты и установки компонентов

Алгоритм выполнения ПП радиоэлектроники с внедрением устройств инспекции паяльной пасты (SPI SP) после нанесения паяльной пасты и инспекции установки компонентов (SPI CP) после нанесения установки компонентов, соответствующий процессной модели (рисунок 73), приведен на рисунке 74.

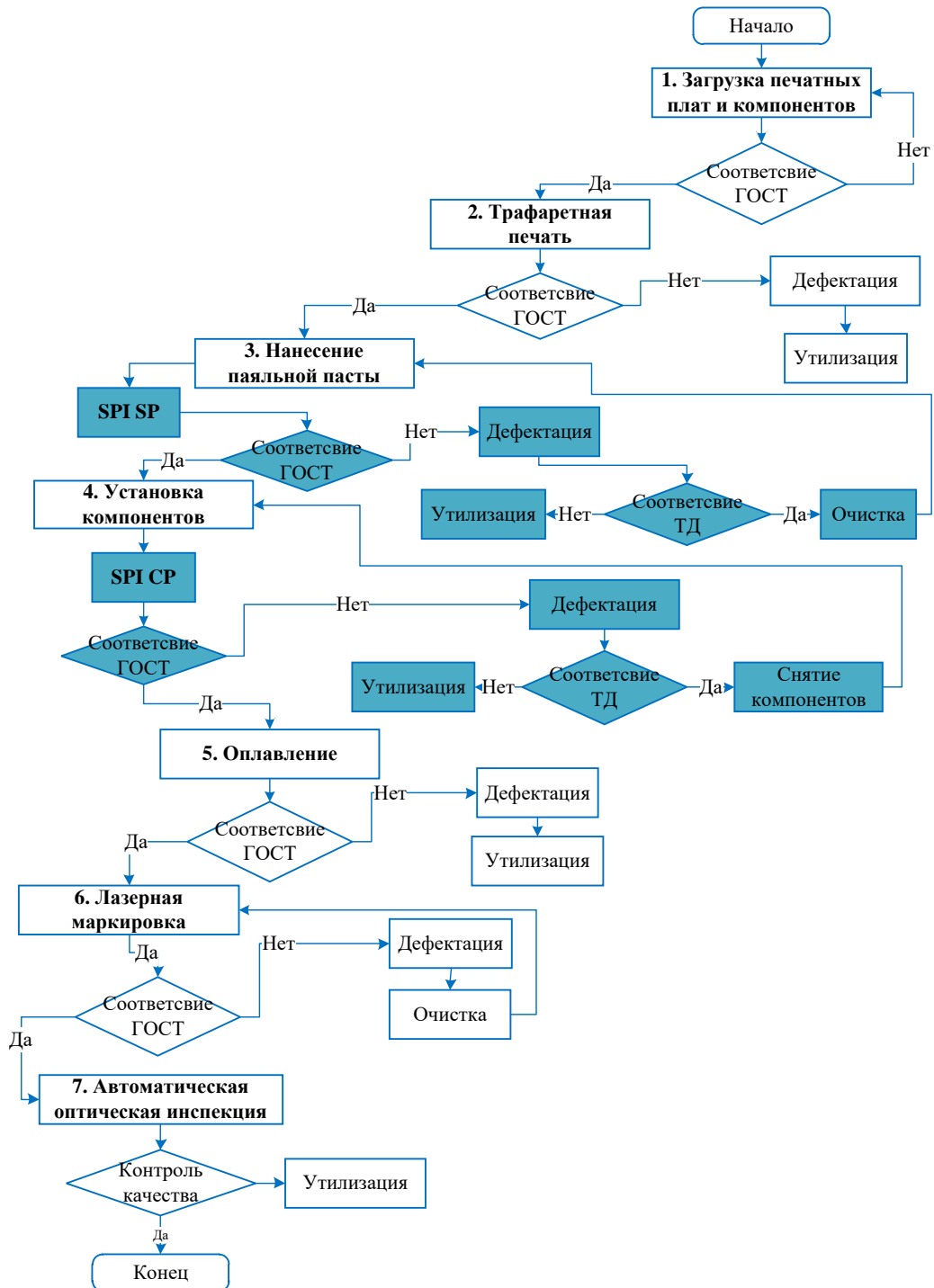


Рисунок 74 – Алгоритм выполнения ПП радиоэлектроники с внедрением устройств инспекции паяльной пасты (SPI SP) инспекции установки компонентов (SPI CP)

Иллюстрация ТП при внедрении интеллектуальных систем после нанесения паяльной пасты и дополнительного контроля монтажа BGA представлена на рисунке 75.

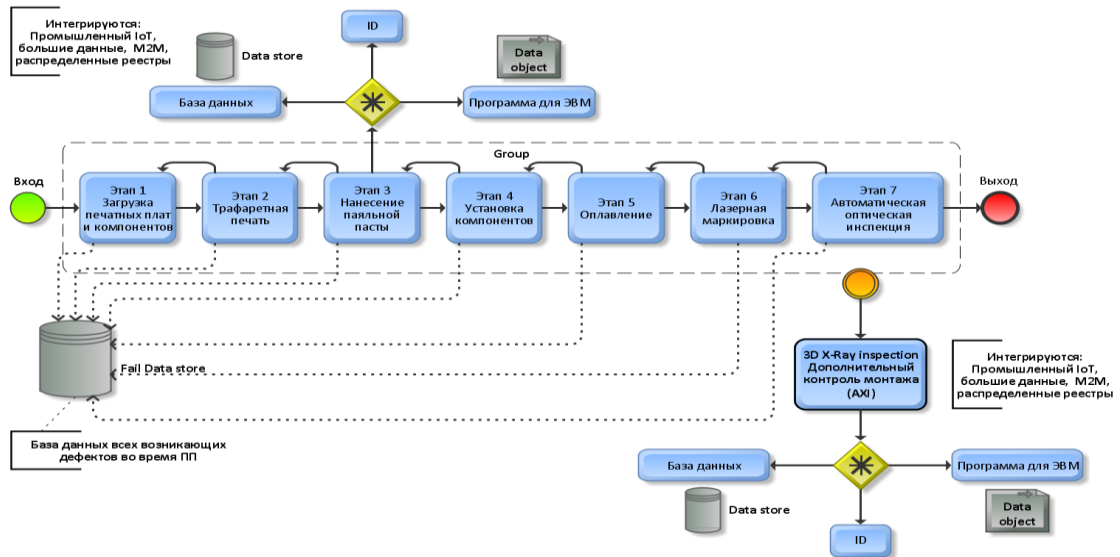


Рисунок 75 – Иллюстрация ТП при внедрении интеллектуальных систем после нанесения паяльной пасты и дополнительного контроля монтажа BGA

Данная иллюстрация ТП соответствует процессной модели, представленной на рисунке 76.

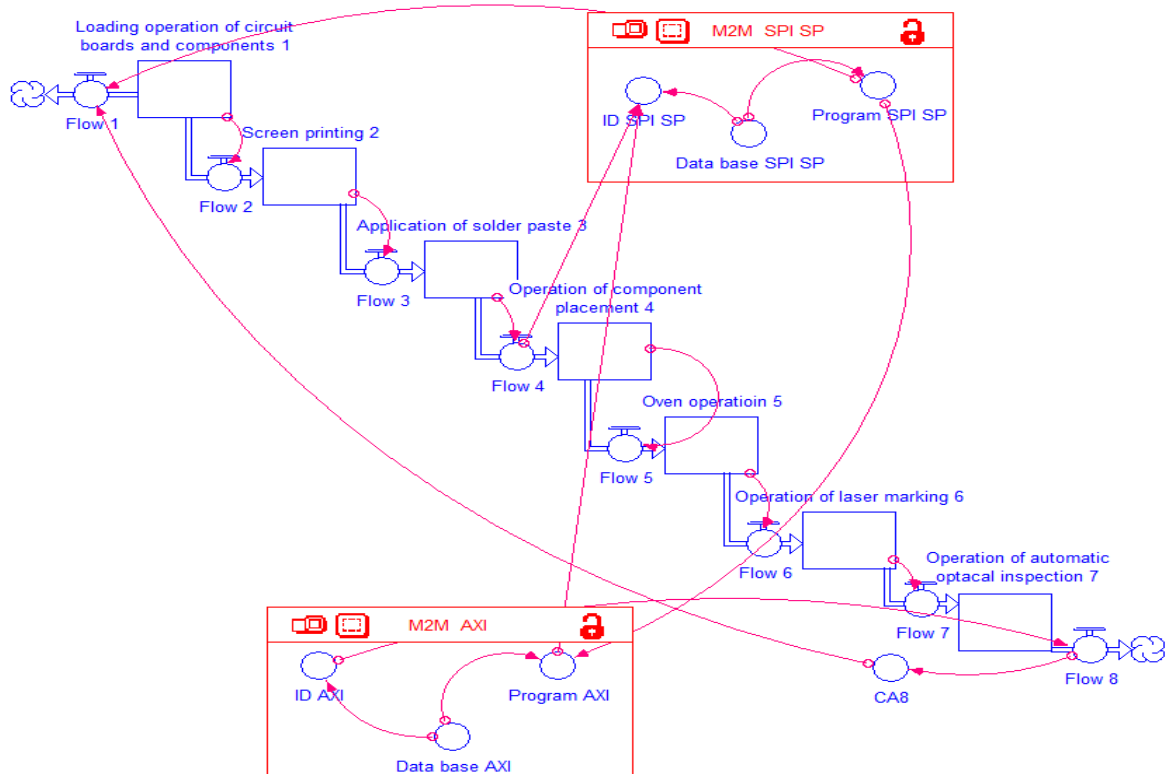


Рисунок 76 – Процессная модель AM с внедрением интеллектуальной системой межмашинного взаимодействия после нанесения паяльной пасты и дополнительного контроля монтажа BGA

Алгоритм выполнения ПП радиоэлектроники с внедрением устройств инспекции паяльной пасты (SPI SP) после нанесения паяльной пасты и инспекции рентгеновского контроля монтажа (AXI), соответствующий процессной модели (рисунок 76), приведен на рисунке 77.

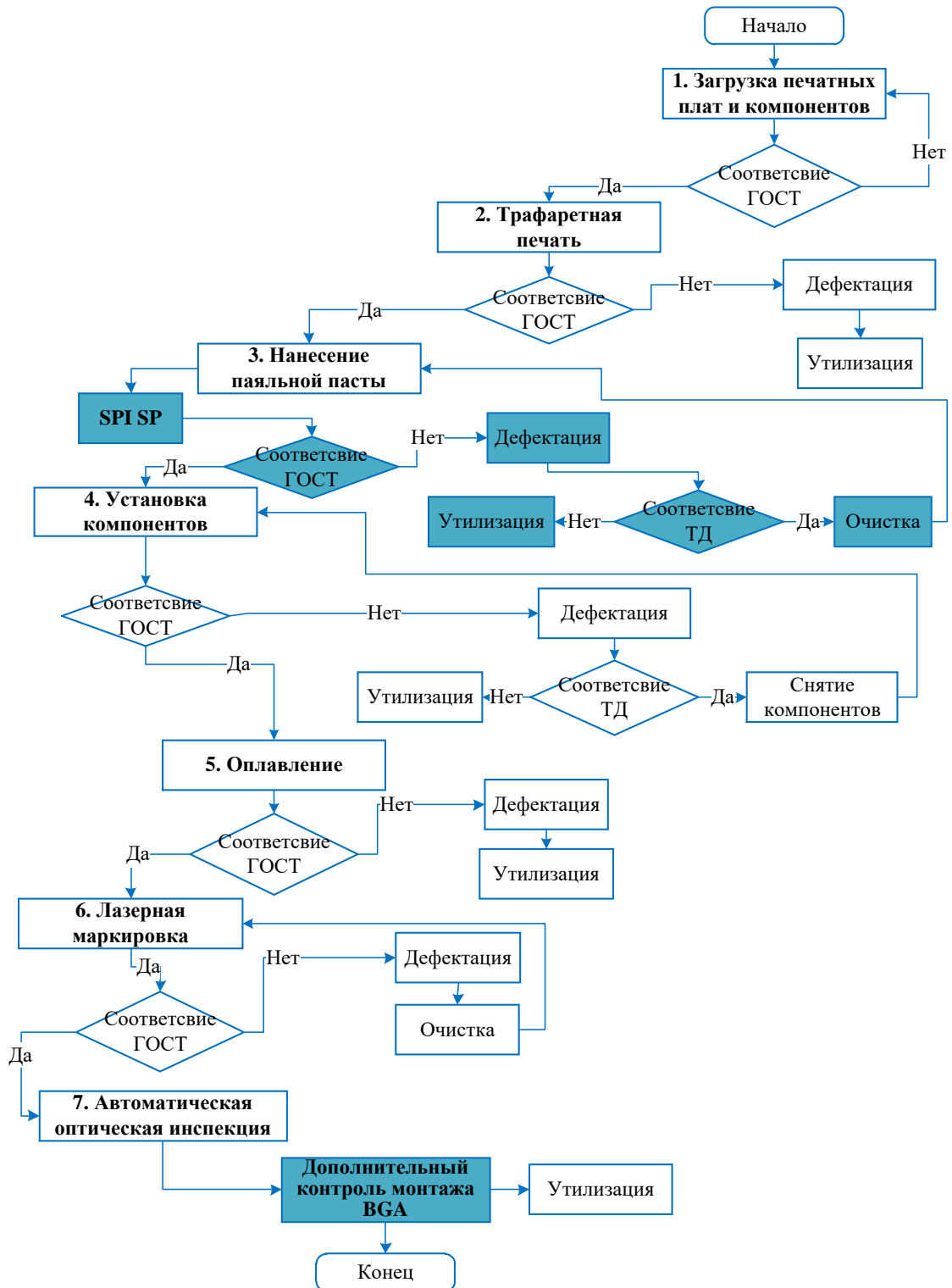


Рисунок 77 – Алгоритм выполнения ПП радиоэлектроники с внедрением устройств инспекции паяльной пасты (SPI SP) и инспекции рентгеновского контроля монтажа (AXI)

Процедуру управления ПП и взаимодействия оборудования предложено заменить интеллектуальной системой межмашинного взаимодействия, построенной на основе аппарата нечеткой логики. Интеллектуальная система представляет собой нечеткие регуляторы с возможностью введения или исключения необходимых условий функционирования ПП.

Методика мониторинга процессов производства радиоэлектроники и введения технологии МИВ компонентов оборудования содержит новые модели, обеспечивающие описание простых структур ПП и переход к внедренным в этих системах ТИ.

Разработанная методика способствует созданию детализированной процессной модели ПП изготовления радиоэлектроники с внедрением элементов КФС в технологическую линию для разных видов и технологической готовности производств, имеющей открытую архитектуру. Данная особенность позволяет расширять модель для решения новых задач и использовать единое интеллектуальное, самообучающееся информационное обеспечение, построенное на основе аппарата нечеткой логики, формирующее базу знаний предприятия, в которой сохраняются все результаты и знания, что позволит спрогнозировать и уменьшить возможные производственные риски, связанные с человеческим фактором и сократить количество бракованной продукции.

Иллюстрация ТП при внедрении интеллектуальных систем после нанесения паяльной пасты, установки компонентов и нанесения лазерной маркировки представлена на рисунке 78.

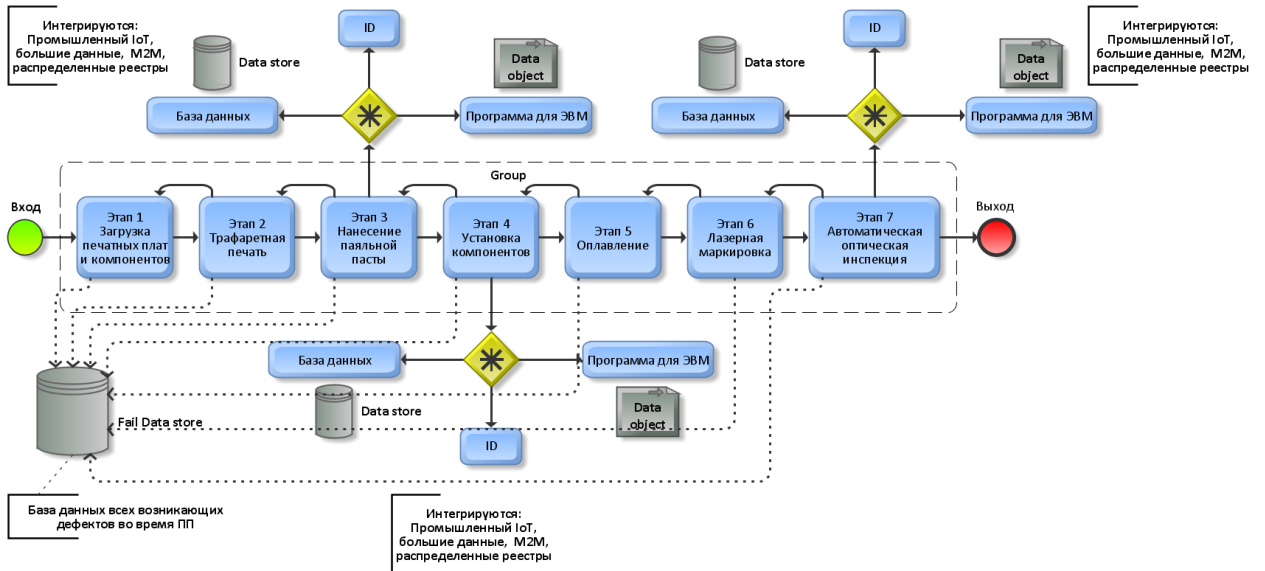


Рисунок 78 – Иллюстрация технологического процесса при внедрении интеллектуальных систем после нанесения паяльной пасты, установки компонентов и нанесения лазерной маркировки

Данная иллюстрация ТП соответствует процессной модели, представленной на рисунке 79.

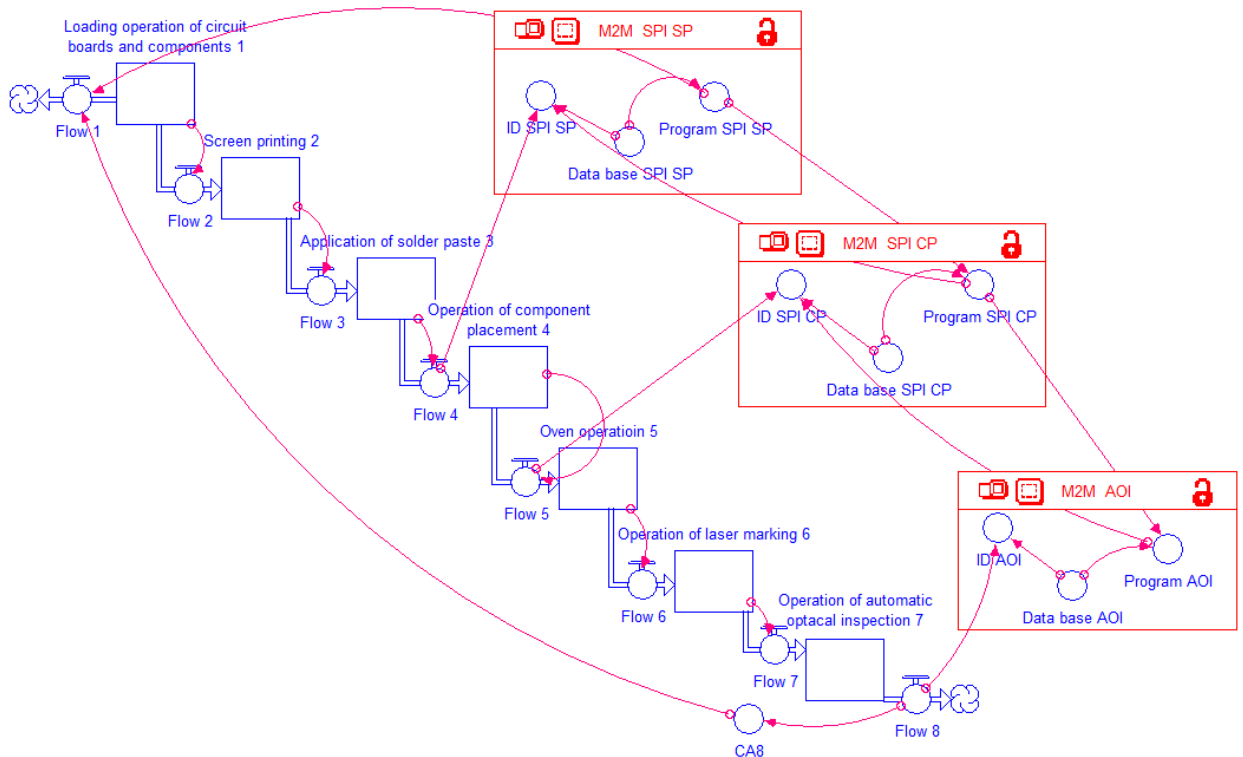


Рисунок 79 – Процессная модель АМ с внедрением интеллектуальной системой межмашинного взаимодействия после нанесения паяльной пасты, установки компонентов и нанесения лазерной маркировки

Алгоритм выполнения ПП радиоэлектроники с внедрением устройств инспекции паяльной пасты (SPI SP) после нанесения паяльной пасты, инспекции установки компонентов (SPI CP) после нанесения установки компонентов и автоматической оптической инспекции (AOI) после нанесения лазерной маркировки, соответствующий процессной модели (рисунок 79), приведен на рисунке 80.

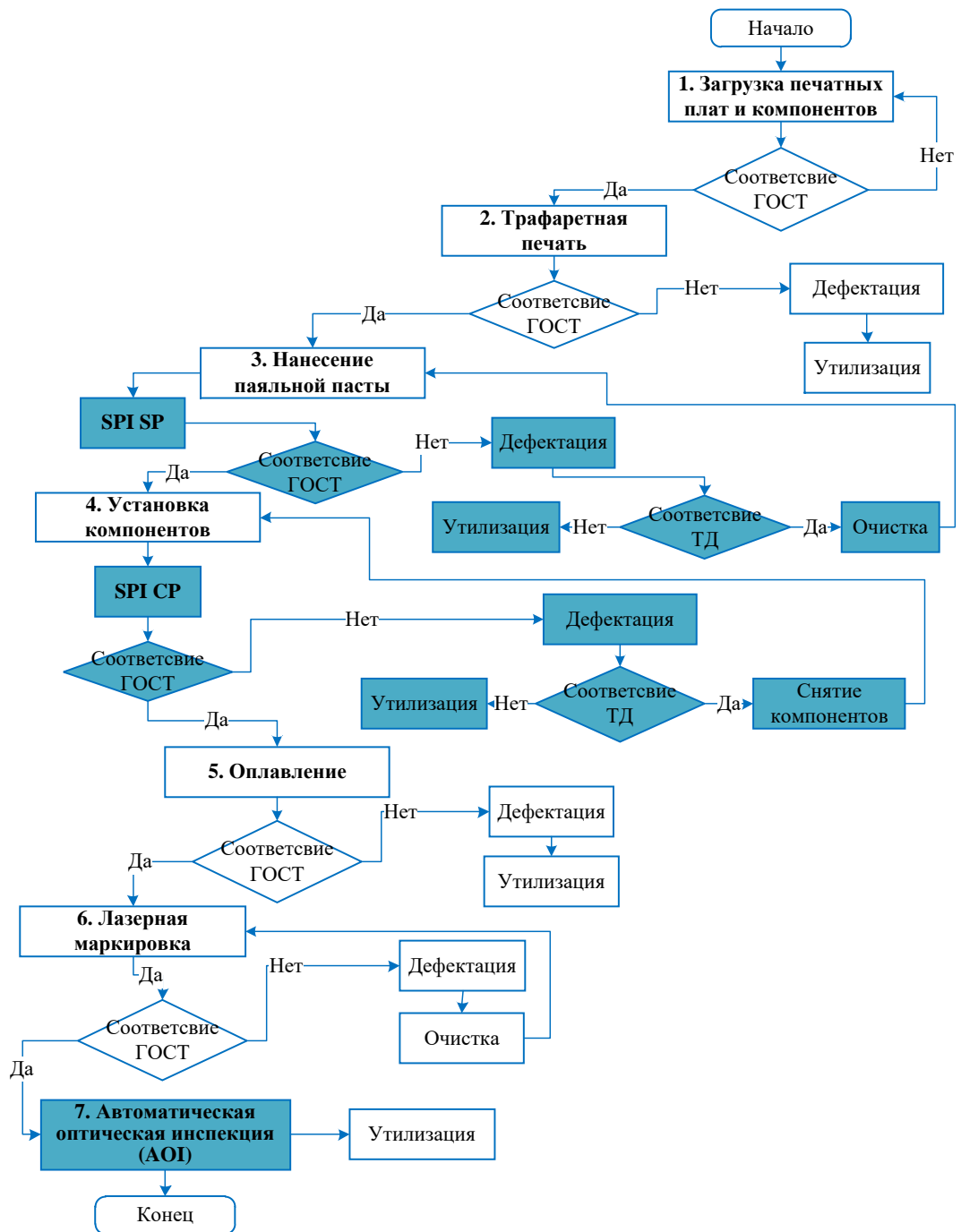


Рисунок 80 – Алгоритм выполнения ПП радиоэлектроники с внедрением устройств инспекции паяльной пасты (SPI SP), инспекции установки компонентов (SPI CP) и автоматической оптической инспекции (AOI)

Иллюстрация ТП при внедрении интеллектуальных систем после нанесения паяльной пасты, нанесения лазерной маркировки и дополнительного контроля монтажа BGA представлена на рисунке 81.

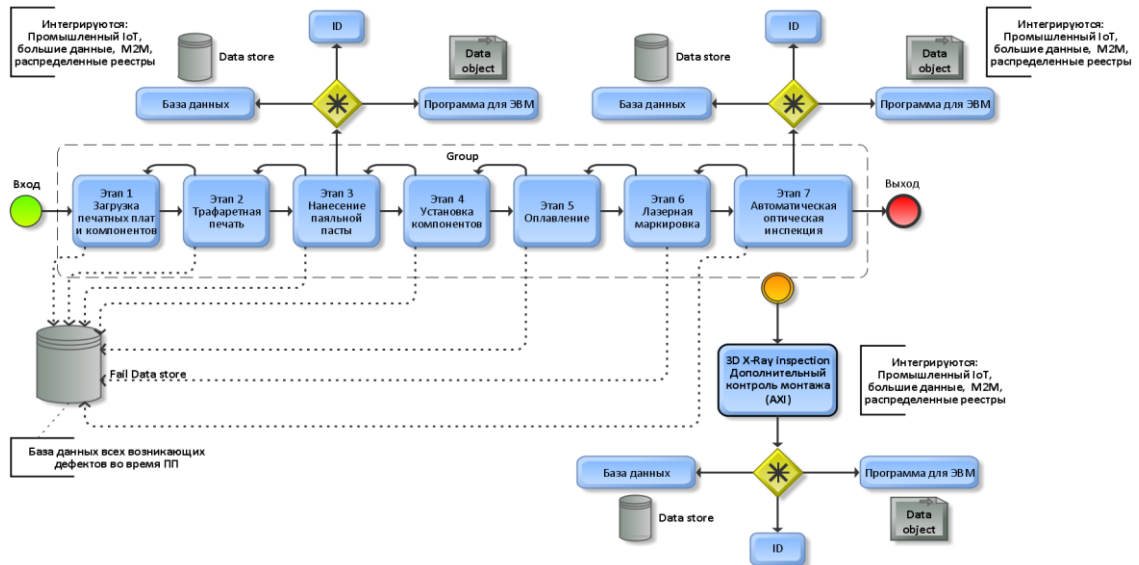


Рисунок 81 – Иллюстрация ТП при внедрении интеллектуальных систем после нанесения паяльной пасты, нанесения лазерной маркировки и дополнительного контроля монтажа BGA

Данная иллюстрация ТП соответствует процессной модели, представленной на рисунке 82.

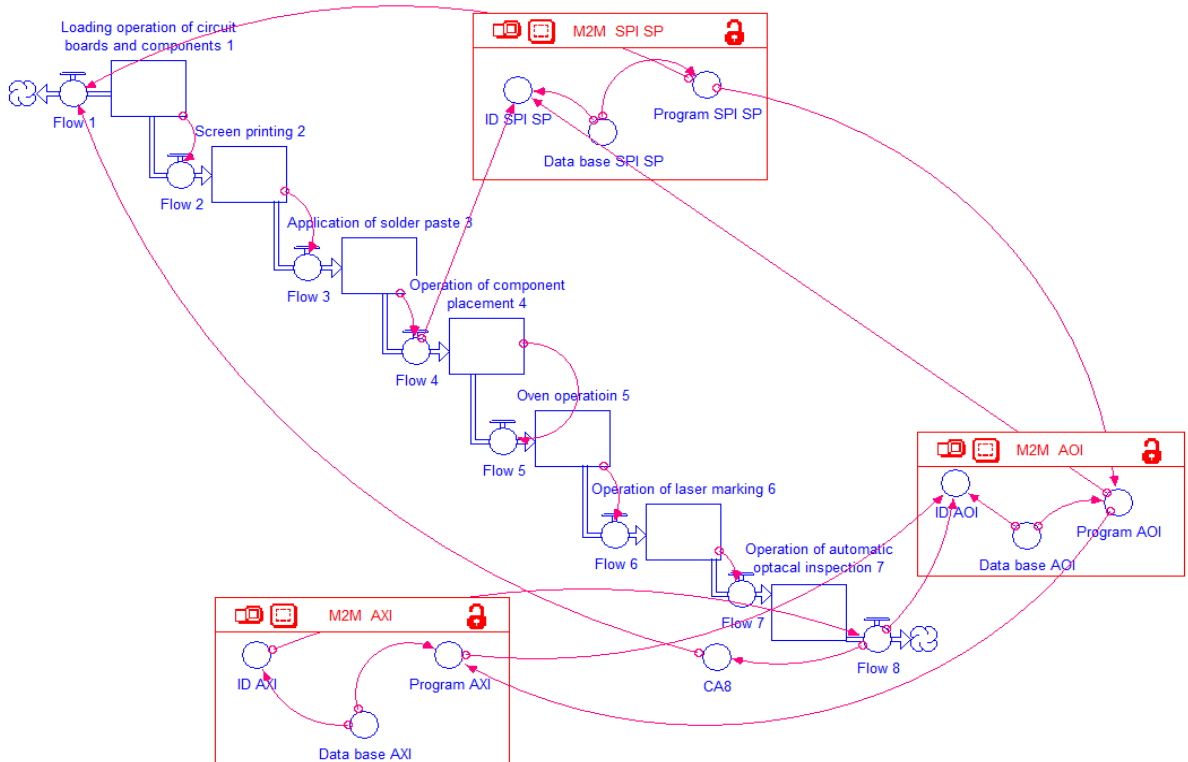


Рисунок 82 – Процессная модель AM с внедрением интеллектуальной системой межмашинного взаимодействия после нанесения паяльной пасты, нанесения лазерной маркировки и дополнительного контроля монтажа BGA

Алгоритм выполнения ПП радиоэлектроники с внедрением устройств инспекции паяльной пасты (SPI SP) после нанесения паяльной пасты, автоматической оптической инспекции (АОИ) после нанесения лазерной маркировки и инспекции рентгеновского контроля монтажа (АХИ), соответствующий процессной модели (рисунок 82), приведен на рисунке 83.

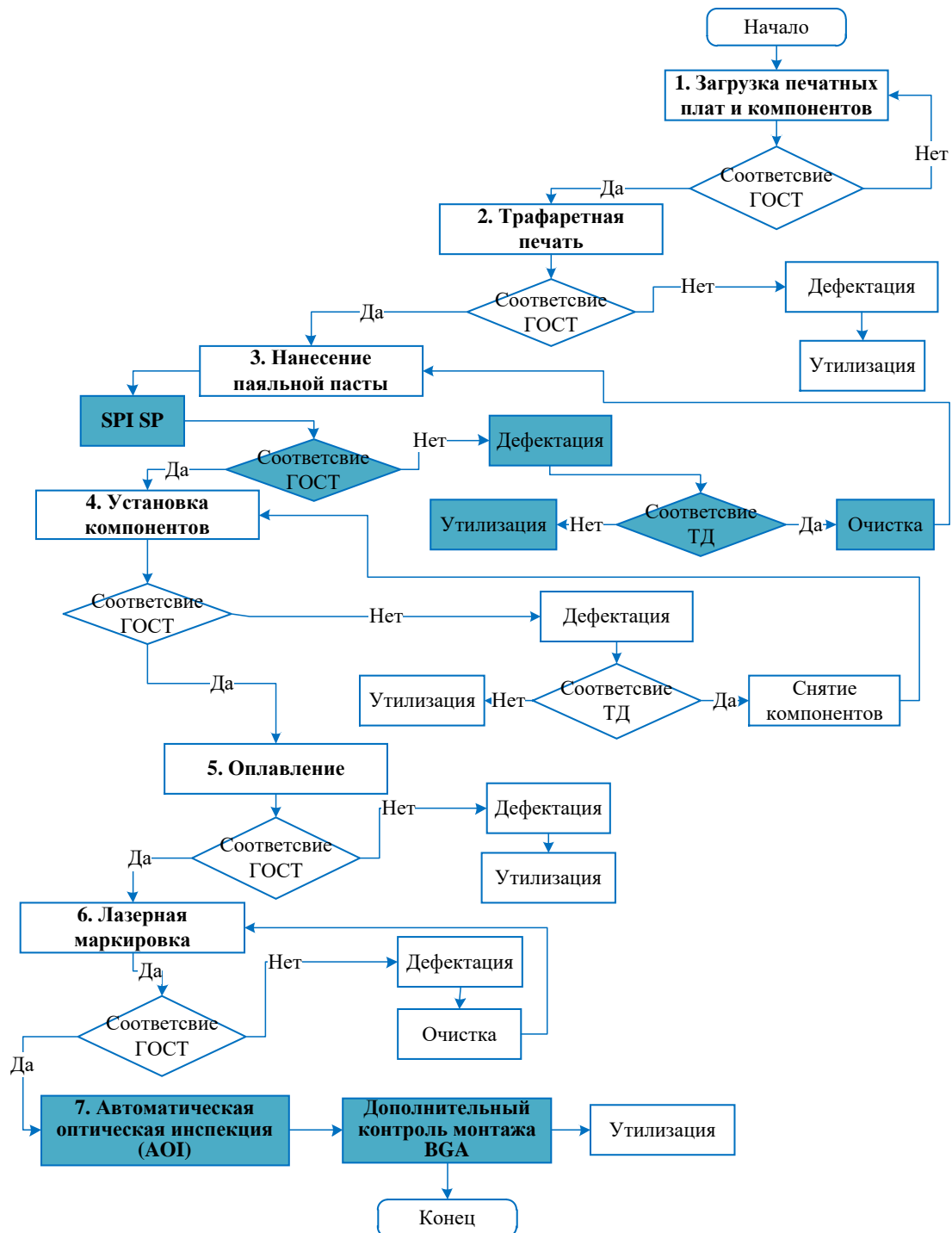


Рисунок 83 – Алгоритм выполнения ПП радиоэлектроники с внедрением устройств инспекции паяльной пасты (SPI SP), автоматической оптической инспекции (АОИ) и инспекции рентгеновского контроля монтажа (АХИ)

Иллюстрация ТП при внедрении интеллектуальных систем после нанесения паяльной пасты, нанесения лазерной маркировки и дополнительного контроля монтажа BGA представлена на рисунке 84.

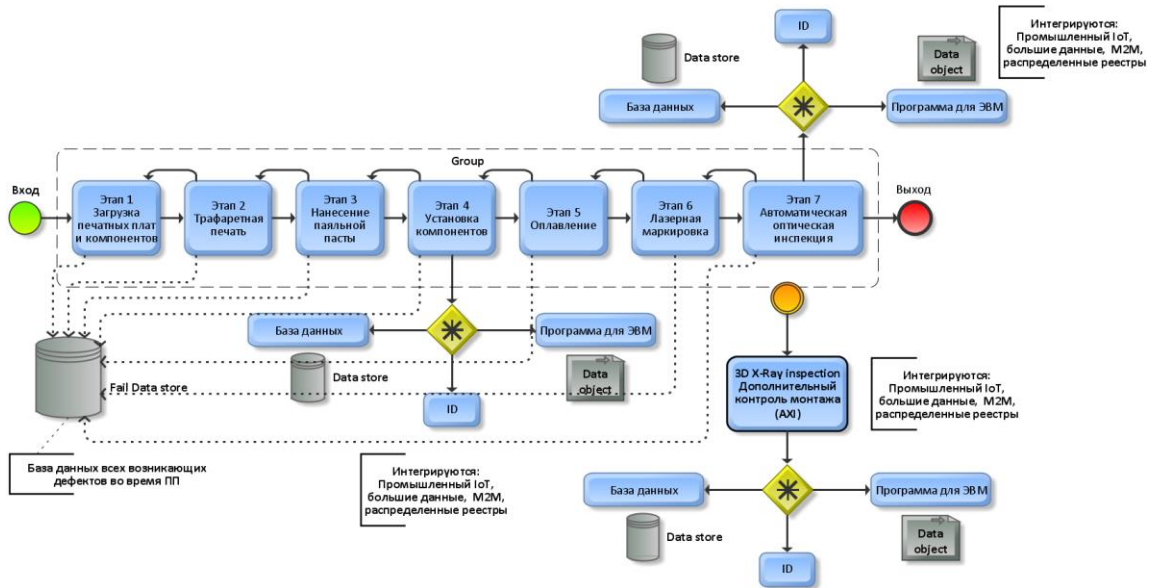


Рисунок 84 – Иллюстрация ТП при внедрении интеллектуальных систем после установки компонентов, нанесения лазерной маркировки и дополнительного контроля монтажа BGA

Данная иллюстрация ТП соответствует процессной модели, представленной на рисунке 85.

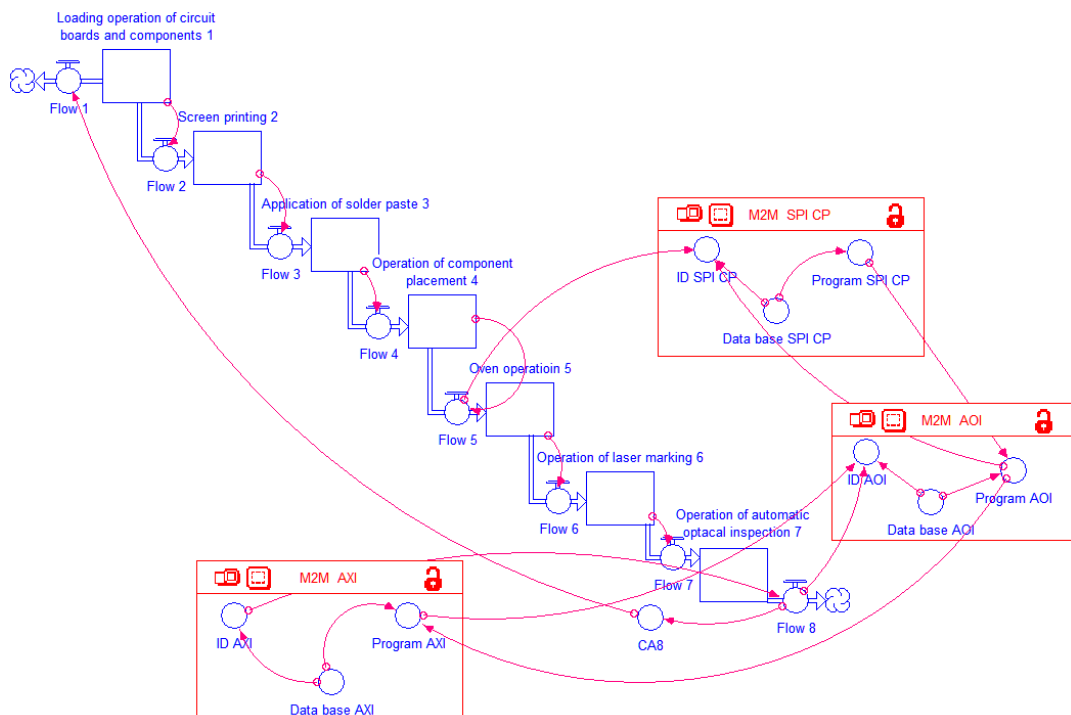


Рисунок 85 – Процессная модель AM с внедрением интеллектуальной системой межмашинного взаимодействия после установки компонентов, нанесения лазерной маркировки и дополнительного контроля монтажа BGA

Алгоритм выполнения ПП радиоэлектроники с внедрением устройств инспекции установки компонентов (SPI CP) после нанесения установки компонентов, автоматической оптической инспекции (АОИ) после нанесения лазерной маркировки и инспекции рентгеновского контроля монтажа (АХИ), соответствующий процессной модели (рисунок 85), приведен на рисунке 86.

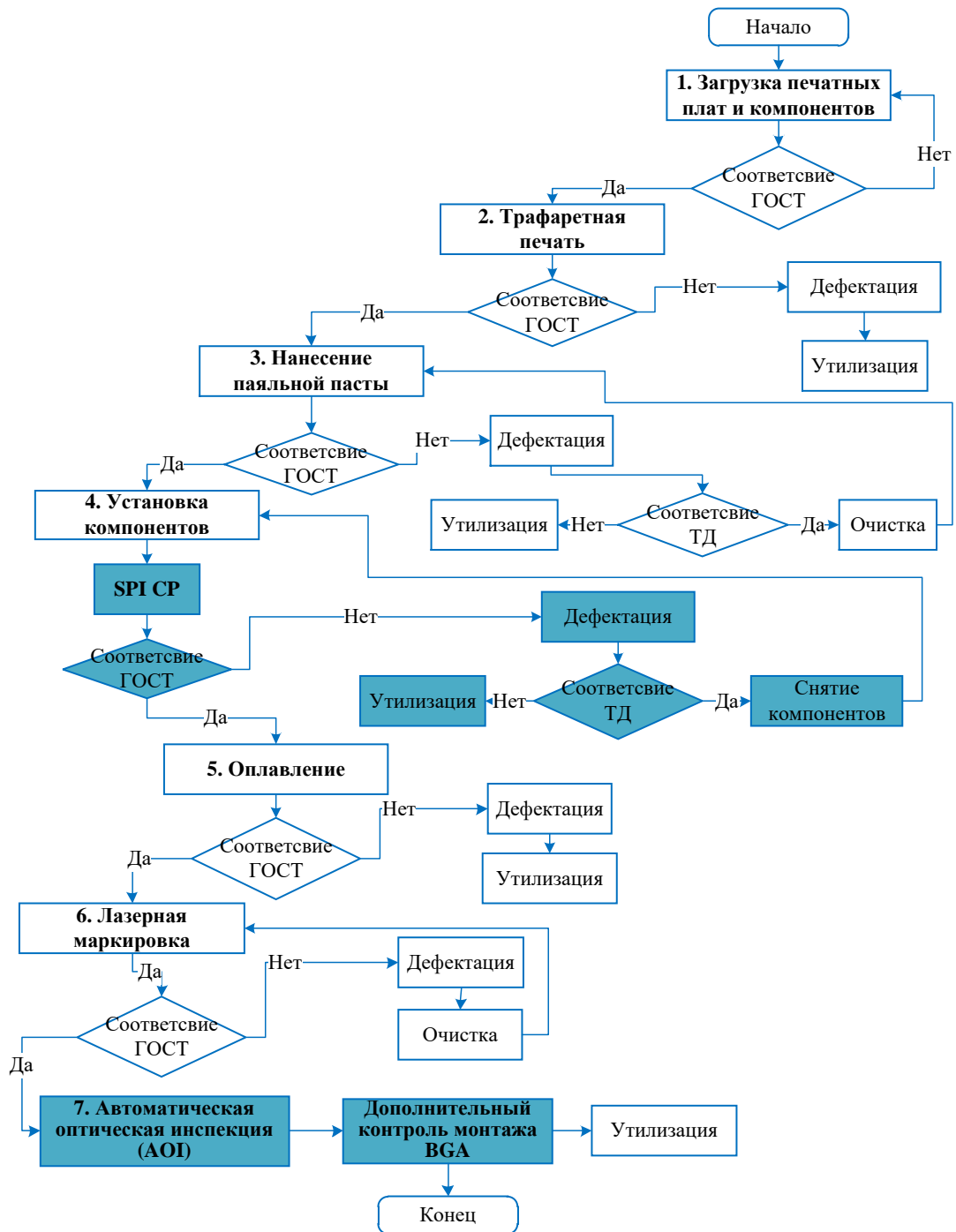


Рисунок 86 – Алгоритм выполнения ПП радиоэлектроники с внедрением устройств инспекции установки компонентов (SPI CP), автоматической оптической инспекции (АОИ) и инспекции рентгеновского контроля монтажа (АХИ)

Оператор M2M SPI-OAI-AXI представляет собой автономный контролирующий ПК, выполняющий функцию отслеживания состояния ТП и мгновенного реагирования в случае возникновения не соответствующей заданным критериям качества продукции. Модель АМ печатных плат с M2M представлена на рисунке 87.

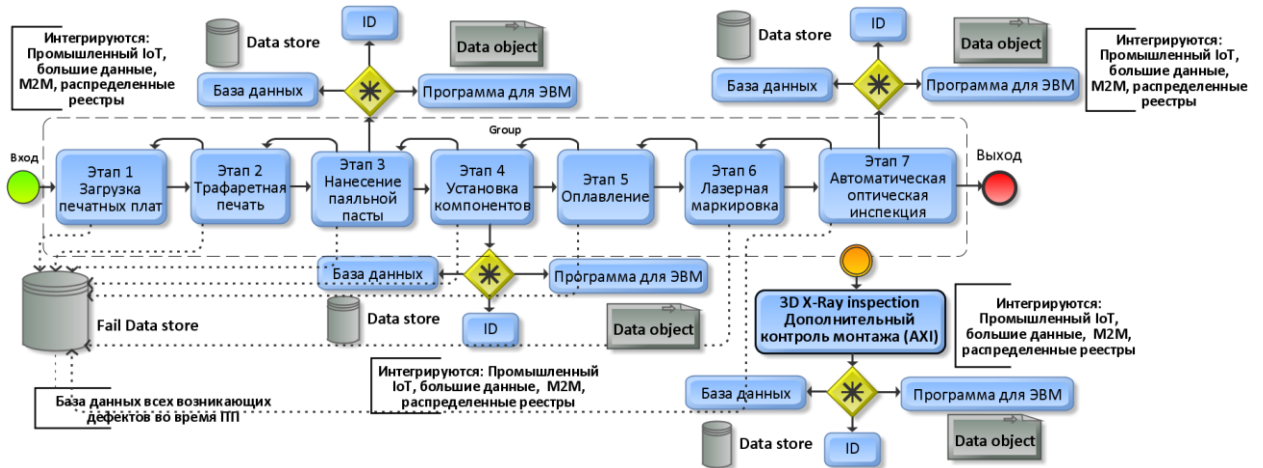


Рисунок 87 – Структурная схема реализации ТП при внедрении интеллектуальных систем на всех этапах изготовления радиоэлектроники

Имитационная модель АМ печатных плат при внедрении межмашинного взаимодействия оборудования и инспекций на всех этапах представлена на рисунке 88.

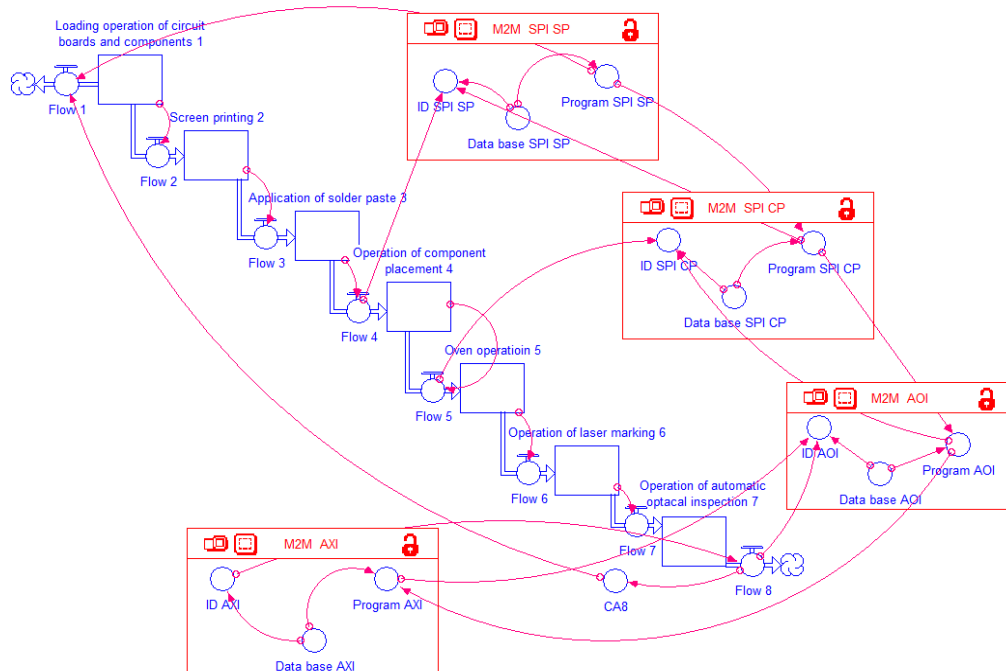


Рисунок 88 – Процессная модель АМ с внедрением интеллектуальной системой межмашинного взаимодействия на всех этапах ПП

Алгоритм выполнения ПП радиоэлектроники с внедрением устройств инспекции паяльной пасты (SPI SP) после нанесения паяльной пасты, инспекции установки компонентов (SPI CP) после нанесения установки компонентов, автоматической оптической инспекции (АОИ) после нанесения лазерной маркировки и инспекции рентгеновского контроля монтажа (АХИ), соответствующий процессной модели (рисунок 88), приведен на рисунке 89.

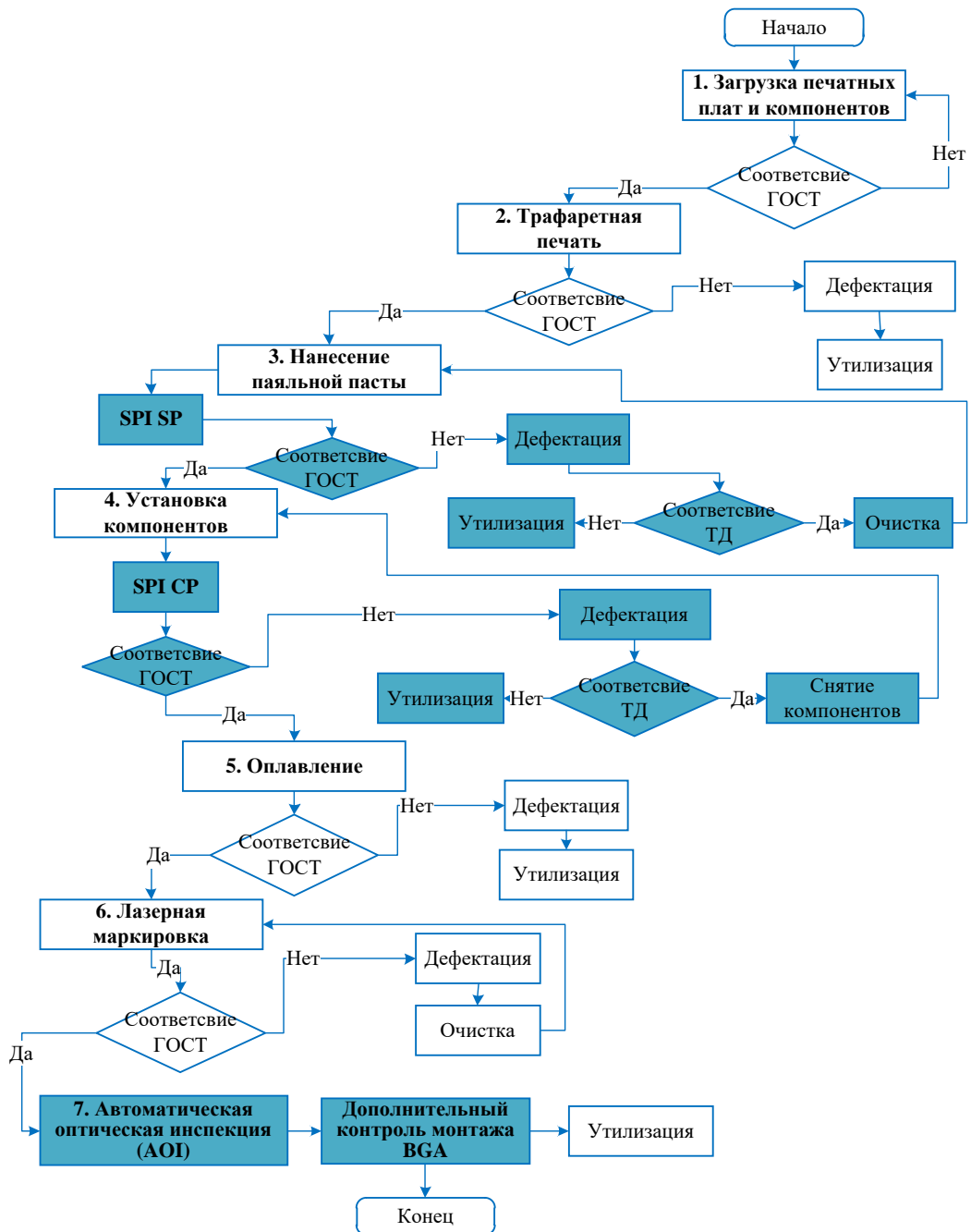


Рисунок 89 – Алгоритм выполнения ПП радиоэлектроники с внедрением устройств инспекции паяльной пасты (SPI SP), инспекции установки компонентов (SPI CP), автоматической оптической инспекции (АОИ) и инспекции рентгеновского контроля монтажа (АХИ)

В результате проведенного в диссертационном исследовании анализа выявлено 10 ситуаций, требующих внедрения одной или нескольких указанных выше ТИ. Для каждой выявленной ситуации разработаны структурная схема ПП, процессная модель АМ и алгоритм выполнения ПП после внедрения соответствующей ТИ.

Суть методики состоит в порядке выбора схемы межмашинного взаимодействия и замены человека машиной для организации разных видов монтажа радиоэлектронных изделий. Другими словами, методика отвечает на вопрос, на каких этапах и как результативно заменить человека машиной для организации разных видов производственной линии [89].

Инновации M2M-SPI SP, M2M-SPI CP, M2M SPI-AOI и M2M SPI-AOI-AXI являются элементами ЦП, которые позволяют организовать ТП изготовления радиоэлектроники за счет сокращения времени технологического цикла, численности производственного персонала, а также минимизировать технические риски и количество бракованной продукции. Внедрение ТИ SPI-AOI-AXI, баз данных (знаний), IoT в процессную структуру АМ снижает процентную долю бракованной продукции с 2% до 0,5%.

Имитационная модель содержит библиотеки, представляющие собой основные этапы ПП изготовления радиоэлектроники, которые посредством применения технологий интернета вещей и облачных вычислений позволяют осуществлять передачу данных о состоянии технологической линии [90].

Реализация методики способствует повышению результативности ПП за счет создания комплекса открытой архитектуры с внедрением элементов концепции киберфизических систем в технологическую линию. Методика предназначена для обеспечения интеллектуального M2M компонентов оборудования и создания алгоритмов функционирования СУ процессом АМ печатных плат, а также своевременного детального мониторинга, позволяющего выявлять продукцию несоответствующего качества и своевременно диагностировать ненормативные эксплуатационные характеристики оборудования.

В процессе разработки методики были написаны и зарегистрированы в Роспатенте:

– программа для ЭВМ: «Программа мониторинга процессов производства радиоэлектроники на основе межмашинного интеллектуального взаимодействия компонентов оборудования» рег.№ 2020610583 от 16.01.2020 г. (№ заявки 2019667519 от 25.12.2019 г.) [91].

– программа для ЭВМ: «Программа управления процессом автоматического монтажа печатных плат на основе введения средств интеллектуального межмашинного взаимодействия компонентов оборудования» рег.№ 2019619203 от 12.07.2019 г. (№ заявки 2019617956 от 01.07.2019 г.) [92].

– программа для ЭВМ: «Программа моделирования этапов цифрового производства электроники для систем мониторинга» рег. № 2018616699 от 06.06.2018 г. (№ заявки 2018613933 от 20.04.2018 г.) [93].

– программа для ЭВМ: «Программа интеллектуальной системы управления производственным процессом изготовления электронной продукции на этапе Solder Paste Inspection» рег. № 2018663527 от 30.10.2018 г. (№ заявки 2018660521 от 01.10.2018 г.) [94]. Программа для ЭВМ предназначена для описания, быстрого поиска с целью контроля интеллектуальной системы управления ПП изготовления радиоэлектронной продукции на этапе SPI.

– база данных: «Элементная база для изготовления модулей устройств беспроводной передачи данных», рег. № 2018622062 от 17.12.2018 г. (№ заявки 2018621770 от 30.10.2018 г.) [95]. База данных содержит данные об элементной базе, используемой в ПП изготовления макетов модулей устройств беспроводной передачи данных. База данных предназначена для контроля и отслеживания материально-технического обеспечения изготовления модулей устройства. При реализации модулей устройства с необходимыми техническими характеристиками целесообразно детализировано описывать компоненты ТП. С помощью базы данных

облегчаются поиск и выбор необходимых средств для разработки радиоэлектронной продукции, а также фиксируются предполагаемые сроки реализации продукции. База данных обеспечивает повышение результативности ПП изготовления модулей устройства беспроводной передачи различного вида данных.

Программы для ЭВМ написаны в пакете имитационного моделирования iThink на языке программирования C++ для удобного использования программного кода в других интегрированных средах создания моделей организации производства, разработанных в дальнейшем и описанных в пп. 3.4, 3.5.

Внедрение ТИ SPI-AOI-AXI, баз данных (знаний), интернета вещей в процессную структуру автоматического монтажа существенно снижает процентную долю бракованной продукции (с 2% до 0,5%).

Модель АМ печатных плат при внедрении межмашинного взаимодействия 2D- и 3D-инспекций не обеспечивает полного всестороннего реагирования при контроле качества ПП. В качестве направления модернизации разработанной модели SPI-AOI-AXI могут быть представлены с учетом установки AOI перед нанесением лазерной маркировки, а интернет вещей может охватывать и этап DFA-анализа. Это обусловлено встречающимися случаями несовместимости паяльной пасты и материала выводов компонентов. В общем виде задача поэтапного внедрения технологических инноваций может быть поставлена и решена на основе многокритериальной модели при заданных ограничениях на конкретном производстве.

С целью недопущения повышения уровня брака производимой продукции и обеспечения качества изделий выявлена необходимость разработки моделей и методик поэтапной организации цифрового производства с раскрытием высокого уровня детализации моделируемого объекта за счет разработки программного комплекса управления производственным процессом (далее – ПК УПП).

3.3 Модель организации производственного процесса монтажа радиоэлектронных изделий на основе многопараметрических нечетких регуляторов с возможностью формирования базы данных

В условиях создания ЦП обеспечение концепции непрерывной поддержки жизненного цикла изделия и использование СУ большими данными способствуют созданию постоянной взаимосвязи между всеми реализуемыми на предприятии системами автоматизированного проектирования. Одной из связующих задач создания непрерывного производства является обеспечение его гибкости, непротиворечивости используемых систем и целостности использования информационных систем на производстве. Таким образом, проблема сквозного цифрового процесса проектирования радиоэлектроники и, следовательно, разработка методов программного сопряжения СУ большими данными и современных системам автоматизированного проектирования имеют высокий уровень актуальности и практической значимости при организации цифрового производства радиоэлектроники.

Внедрение ТИ подразумевает применение интеллектуальных решений, новых методов и оборудования, предусмотренных концепцией ЦП в виде проектирования для производства (DFM), межмашинного взаимодействия (M2M), идентификаторов (ID), интернета вещей (IoT), 2D- и 3D-инспекций. Техническое переоснащение направлено на улучшение потребительских свойств производимой продукции, которые, в совокупности, определяют ее качество, а также на повышение технологической гибкости ПП [96-99].

С этой целью в ПП необходимо встраивать логические или нечеткие операции, выполняемые производственным оборудованием на основании заранее сформулированных баз знаний и правил. Последовательность действий при разработке модели оптимизации и управлении производством при внедрении ТИ представлена на рисунке 90.

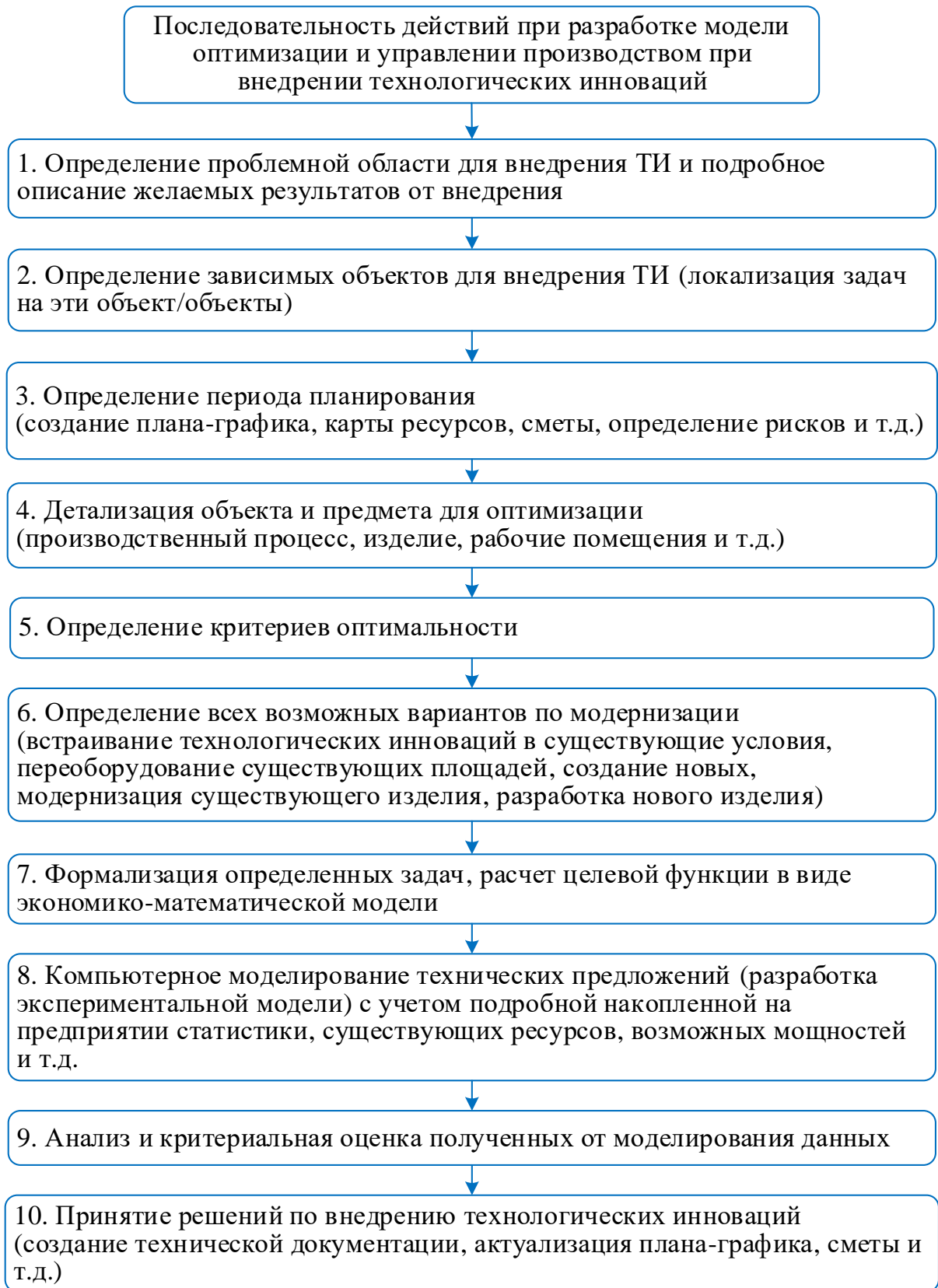


Рисунок 90 – Последовательность действий при разработке модели оптимизации и управлении производством при внедрении технологических инноваций

Модель организации ПП монтажа радиоэлектронных изделий на основе многопараметрических нечетких регуляторов разработана с использованием пакета расширения среды компьютерного моделирования MatLab, содержащего инструменты для проектирования систем нечеткой логики Fuzzy Logic Toolbox.

В процессе использования Fuzzy Logic Toolbox был воспроизведен ПП, представляющий собой Simulink-модель, которая позволяет контролировать исполнение всех ранее заданных алгоритмов, изменять исходный код, обеспечивающий гибкость линии и обучаемость оборудования, а также создавать дополнительные функции и процедуры [100].

Адаптивная модель Simulink представляет собой трехканальную управляющую систему SPI, SPI-AOI и SPI-AOI-AXI (рисунок 91), входы которой оборудованы датчиками, способными считывать информацию (глубину, длину, ширину и т.д.) по видам возможных возникающих дефектов. Нечеткие регуляторы на этапах 3 (M2M-SPI SP) и 4 (M2M-SPI CP) объединены в один ПК.

С учетом накопленных данных и разработанных предложений о введении в технологическую линию элементов межмашинного взаимодействия M2M-SPI SP, M2M-SPI CP, M2M SPI-AOI и M2M SPI-AOI-AXI создавалась экспертная система на основе нечеткой логики, которая представлена функциями для нечеткой кластеризации с обучением, а также базами правил четырех типов кластеризации по обнаруженным в процессе производства печатных плат видам брака [101].

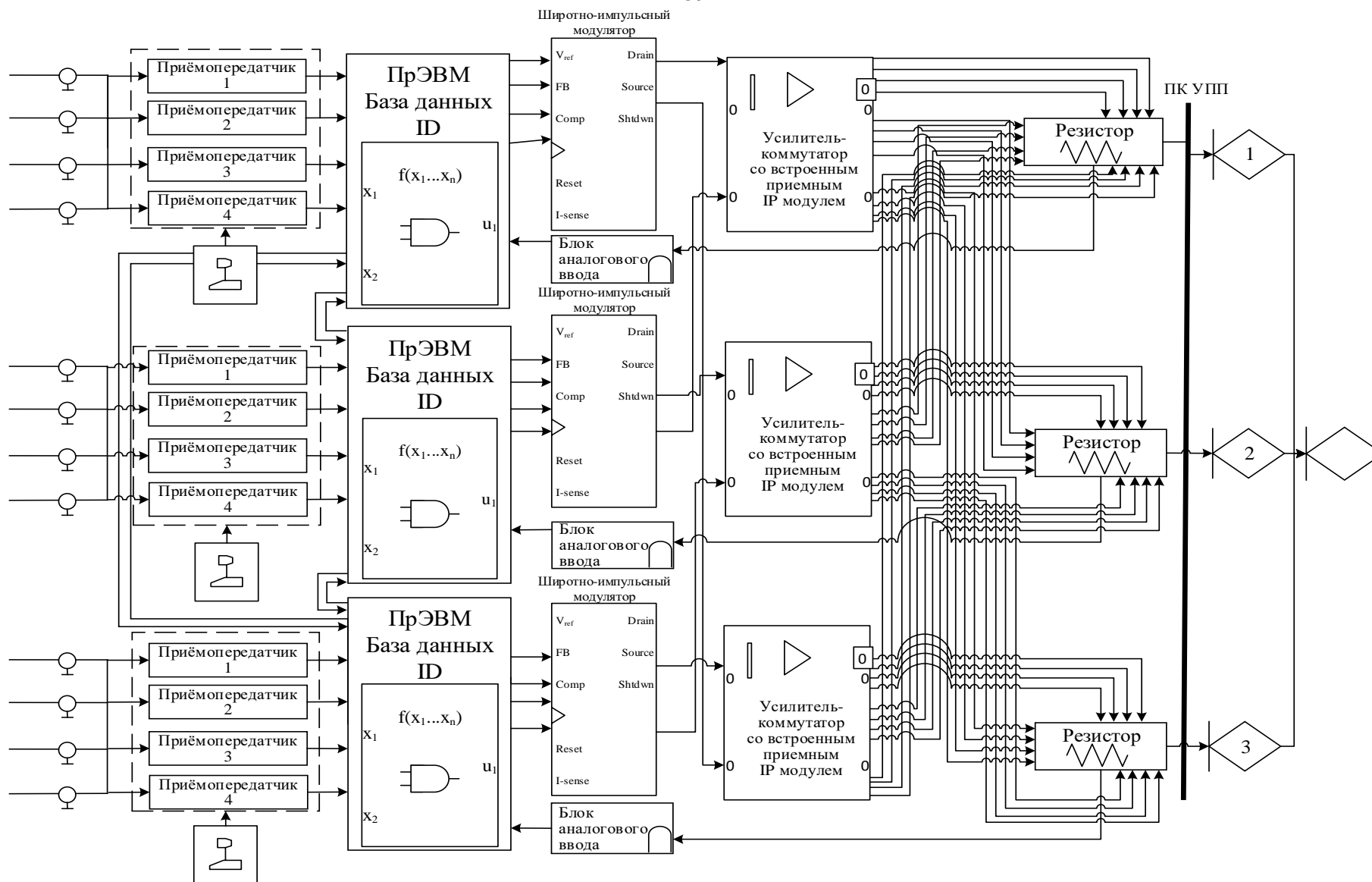


Рисунок 91 – Трехканальная управляющая система производственным процессом монтажа радиоэлектронных изделий

Ключевой особенностью использования данного программного пакета для достижения цели диссертационного исследования является возможность генерации С-кода. Тем самым обеспечивается возможность интеграции с существующими базами правил и данных и программными решениями, а также их дополнения. Таким образом, был создан расширенный интегрированный ПК УПП, представляющий собой программную реализацию моделей и методик поэтапной организации цифрового производства радиоэлектроники.

Встраивание аппарата нечёткой логики направлено на обеспечение гибкости и обучаемости оборудования производственной линии за счет формирования базы знаний возмущений в процессе монтажа радиоэлектронных изделий. Интеллектуальное управление ПП достигается за счет применения НР [100, 102].

Функциональная схема нечеткого регулирования (далее – НР) представлена на рисунке 92. Стабилизация выходного сигнала обеспечивается двумя входными переменными в блок нормализации, а именно значениями ошибки и скорости изменения ошибки (55, 56).

$$f(n) = q - g, \quad (55)$$

$$\frac{df(n)}{dt} = f(n) - f(n-1). \quad (56)$$

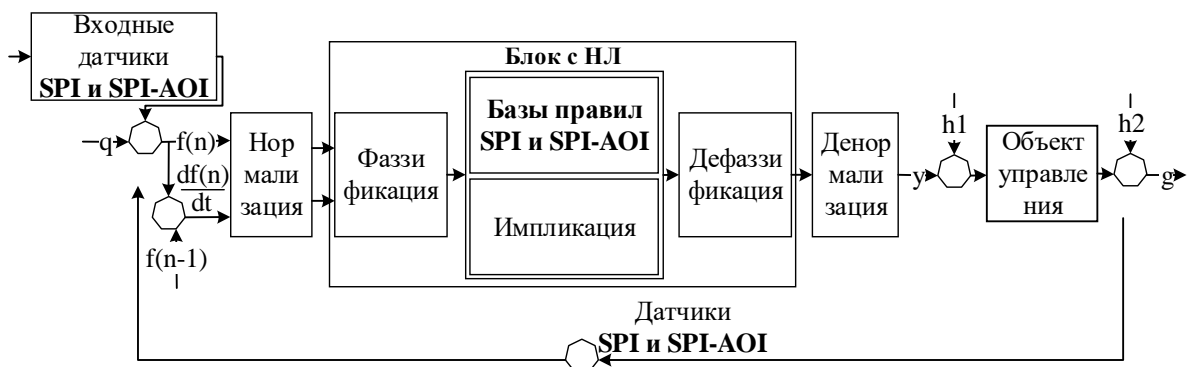


Рисунок 92 – Функциональная схема НР

Система управления с применением аппарата нечеткой логики состоит из входных переменных, содержащих значения возможных видов дефектов. В

качестве входных переменных используются значения возможных уровней несоответствия (Н – низкое, У – умеренное, В – высокое качество изделия), а выходных переменных – параметры с заданными критериями в соответствии с ГОСТ [46, 47, 54, 65, 69, 70, 71, 107-117].

Окна выводов одной из 4 СУ представлены на рисунках 93–95.

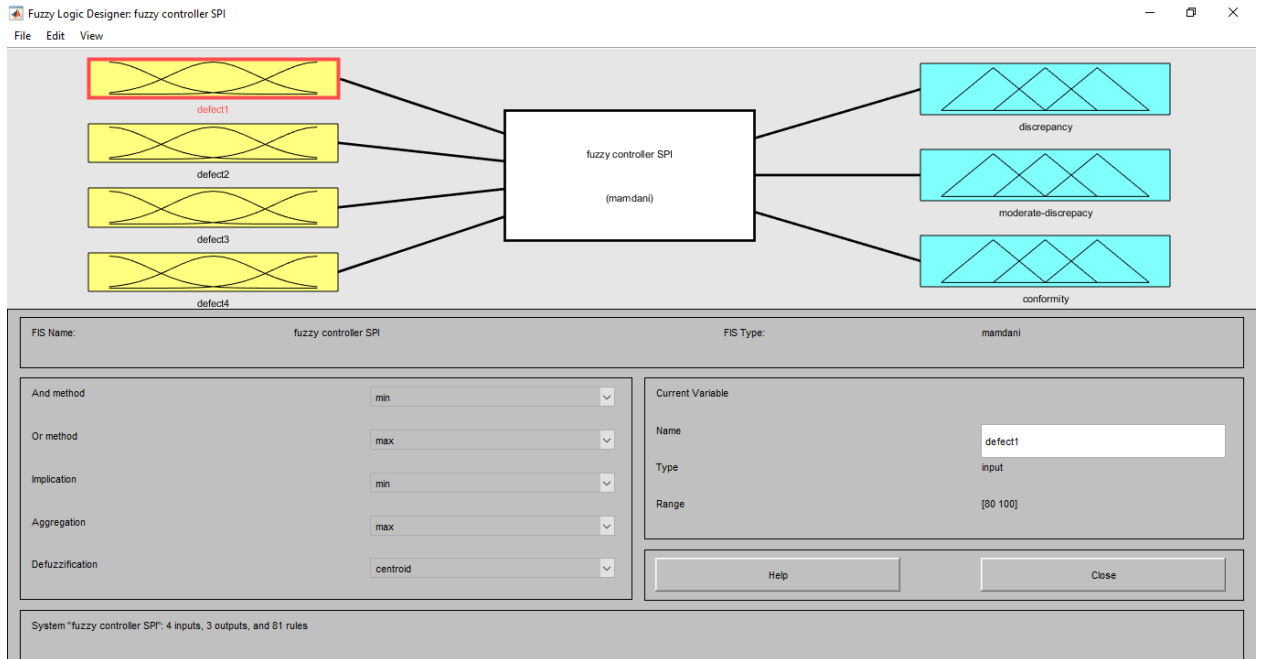


Рисунок 93 – Окно редактора системы нечеткого вывода

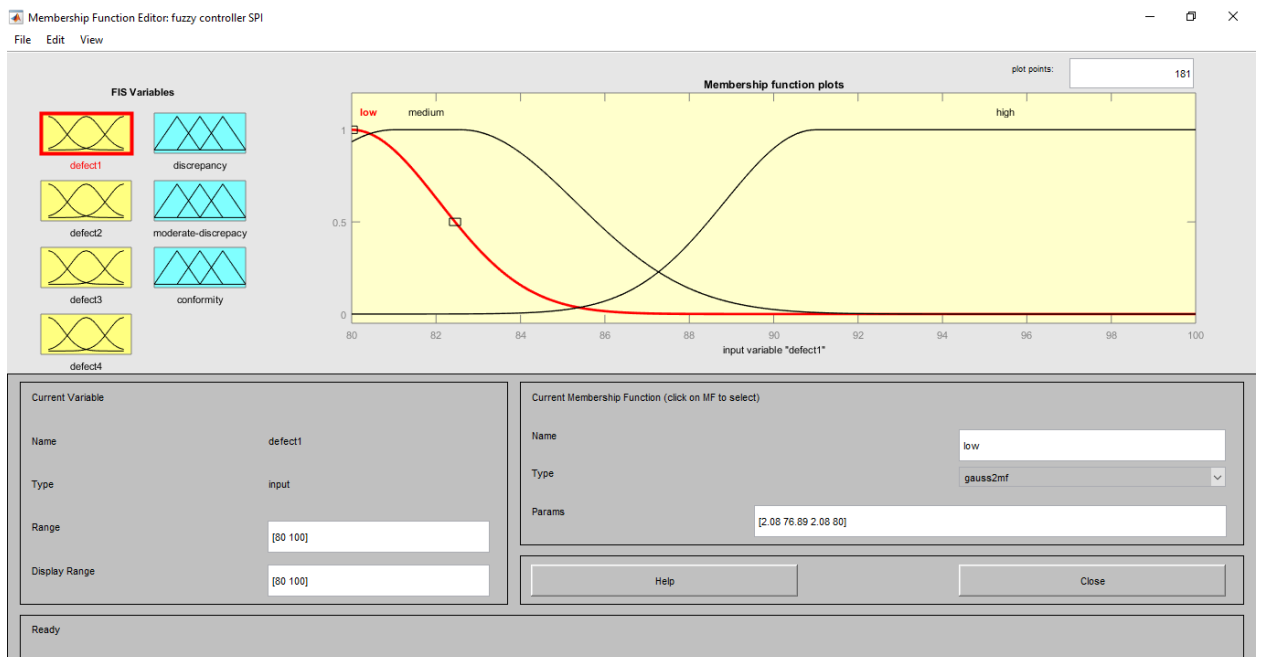


Рисунок 94 – Окно редактора ФП входной переменной

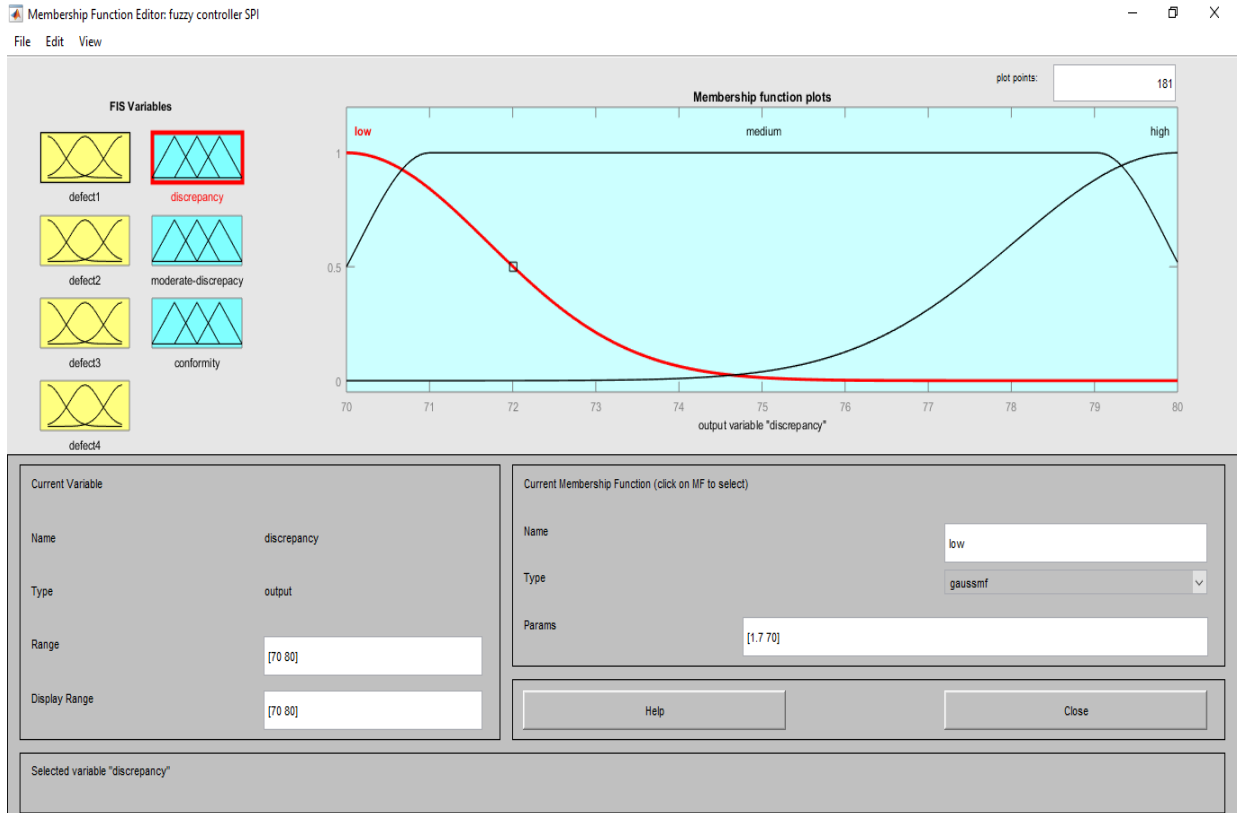


Рисунок 95 – Окно редактора ФП выходной переменной

В случае отклонения одного из показателей от заранее заданных пределов система переводит монтируемую печатную плату в состояние несоответствия и самостоятельно принимает решение о принятии корректирующих мероприятий по устранению несоответствия.

С учетом накопленных данных и разработанных предложений о введении в технологическую линию элементов M2M SPI CP, SPI SP, SPI-AOI и SPI-AOI-AXI создана экспертная система на основе нечеткой логики, которая представлена функциями для нечеткой кластеризации с обучением, а также базами правил четырех типов кластеризации по обнаруженным в ПП видам дефектов.

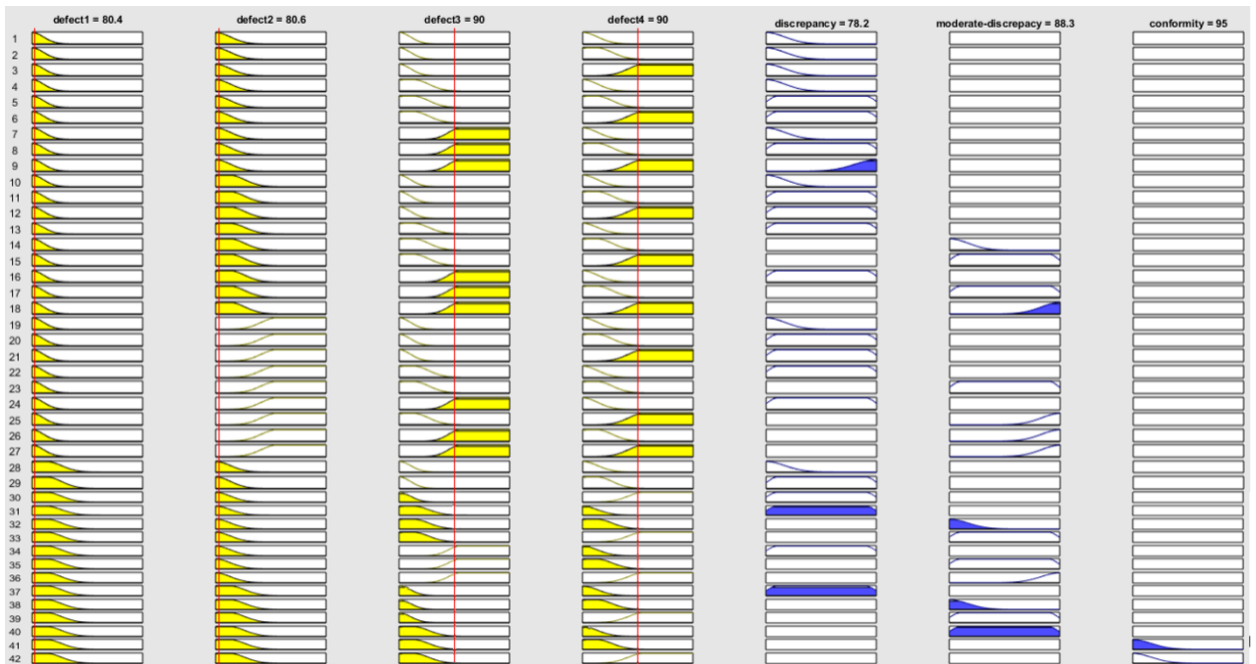


Рисунок 96 – Окно средства просмотра правил вывода

Базы правил создавались на основе анализа накопленной информации, полученной от оборудования последних поколений предприятий контрактного монтажа радиоэлектронных изделий, входящего в состав комплекса производственной линии с возможностью обнаружения видов бракованной продукции [81].

База правил первого типа составлена с учетом четырех идентифицируемых оборудованием видов дефектов. Этот программный продукт состоит из 81 правила (рисунок 96).

Каждое правило рассматривает сочетание трех возможных уровней несоответствия для каждого вида дефекта. Далее, для пяти видов дефектов база данных содержит 243 правила, для 6 – 729, для 7 – 2 187 (рисунок 97).

	1	2	3	4
1	Н	Н	Н	Н
2	У	Н	Н	Н
3	В	Н	Н	Н
4	Н	У	Н	Н
5	У	У	Н	Н
...
79	Н	В	В	В
80	У	В	В	В
81	В	В	В	В

	1	2	3	4	5
1	Н	Н	Н	Н	Н
2	У	Н	Н	Н	Н
3	В	Н	Н	Н	Н
4	Н	У	Н	Н	Н
5	У	У	Н	Н	Н
...
241	Н	В	В	В	В
242	У	В	В	В	В
243	В	В	В	В	В

	1	2	3	4	5	6
1	Н	Н	Н	Н	Н	Н
2	У	Н	Н	Н	Н	Н
3	В	Н	Н	Н	Н	Н
4	Н	У	Н	Н	Н	Н
5	У	У	Н	Н	Н	Н
...
727	Н	В	В	В	В	В
728	У	В	В	В	В	В
729	В	В	В	В	В	В

	1	2	3	4	5	6	7
1	Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н
2	У	Н	Н	Н	Н	Н	Н
3	В	Н	Н	Н	Н	Н	Н
4	Н	У	Н	Н	Н	Н	Н
5	У	У	Н	Н	Н	Н	Н
...
2185	Н	В	В	В	В	В	В
2186	У	В	В	В	В	В	В
2187	В	В	В	В	В	В	В

Рисунок 97 – Базы данных для 4, 5, 6 и 7 выявленных видов дефектов

Для оборудования, способного идентифицировать 8 видов дефектов, разработана база данных, состоящая из 6 561 правила. В общем виде количество правил вычисляется как M^N , где M – количество уровней несоответствий (т.е. 3), N – количество видов дефектов (т.е. от 4 до 8). Чем больше правил содержит база данных, тем большее количество несоответствий выявляется, и, тем самым, более точным будет результат управления.

Динамика обеспечения качества за счет поэтапного применения модели управления технологическими операциями АМ печатных плат на основе многопараметрического НР с обучением представлена на рисунке 98.

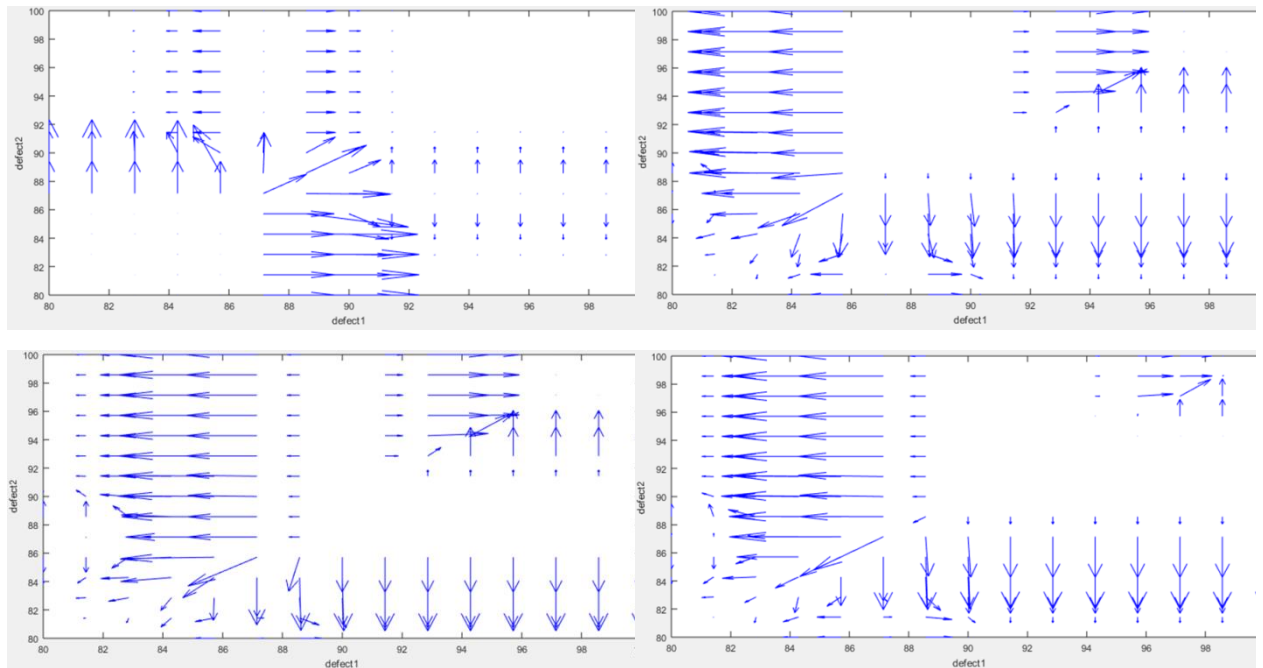


Рисунок 98 – Динамика обеспечения качества с использованием НР

Анализ представленных графиков подтверждает стабильный рост уровня надежности и устойчивости производственного процесса монтажа радиоэлектронных изделий.

Разработанная модель предназначена для организации ПП монтажа изделий радиоэлектроники на основе многопараметрических нечетких регуляторов, а именно учета, систематизации и анализа последствий возможных видов несоответствий с 98% до 99,5%. Управление процессом

производится на основании принятия решений на величину отклонения.

Также модель позволяет типизировать ПП и их элементы на различных предприятиях радиоэлектронной отрасли с использованием модели последовательности ПП, обеспечивающей поэтапное замещение человеческого фактора ТИ.

С помощью базы данных ведется учет дефектов по каждой партии, отслеживаются сочетания и кластеризация по типам дефектов на этапах проверки паяльной пасты (SPI SP), проверка установки компонентов (SPI CP) и автоматической оптической инспекции (AOI). Также в процессе введения дополнительного рентгеновского контроля монтажа BGA X-Ray inspection (AXI) облегчаются поиск и устранение дефекта на основе введенных в базу данных параметров многопараметрических НР [89].

Использование принципов автоматизированных систем контроля и цифрового проектирования на всем протяжении производственного цикла обеспечит сокращение временных характеристик ПП, и, соответственно, и эксплуатационных затрат на рабочие места.

Разработанные модели позволяют выполнять оценку доли несоответствующей продукции и окончательного брака и обеспечивать высокие качественные показатели при внедрении ТИ. Интеграция информации, полученной от элементов ЦП и операционных знаний в составе базы знаний, обеспечит повышение качества радиоэлектронной продукции и минимизацию человеческого фактора.

Таким образом, управление ПП может быть заменено интеллектуальной СУ, которая представляет собой НР с возможностью введения или исключения необходимых условий функционирования ТП с последующим самообучением.

Обозначения на рисунке 99: *e* – вход (entrance), *o* – выход (output), S_3 , S_4 , S_7 и S_8 – блоки управления и логические интеграторы систем SPI SP, SPI CP, SPI-AOI и SPI-AOI-AXI, соответственно (System 3, 4, 7 и 8).

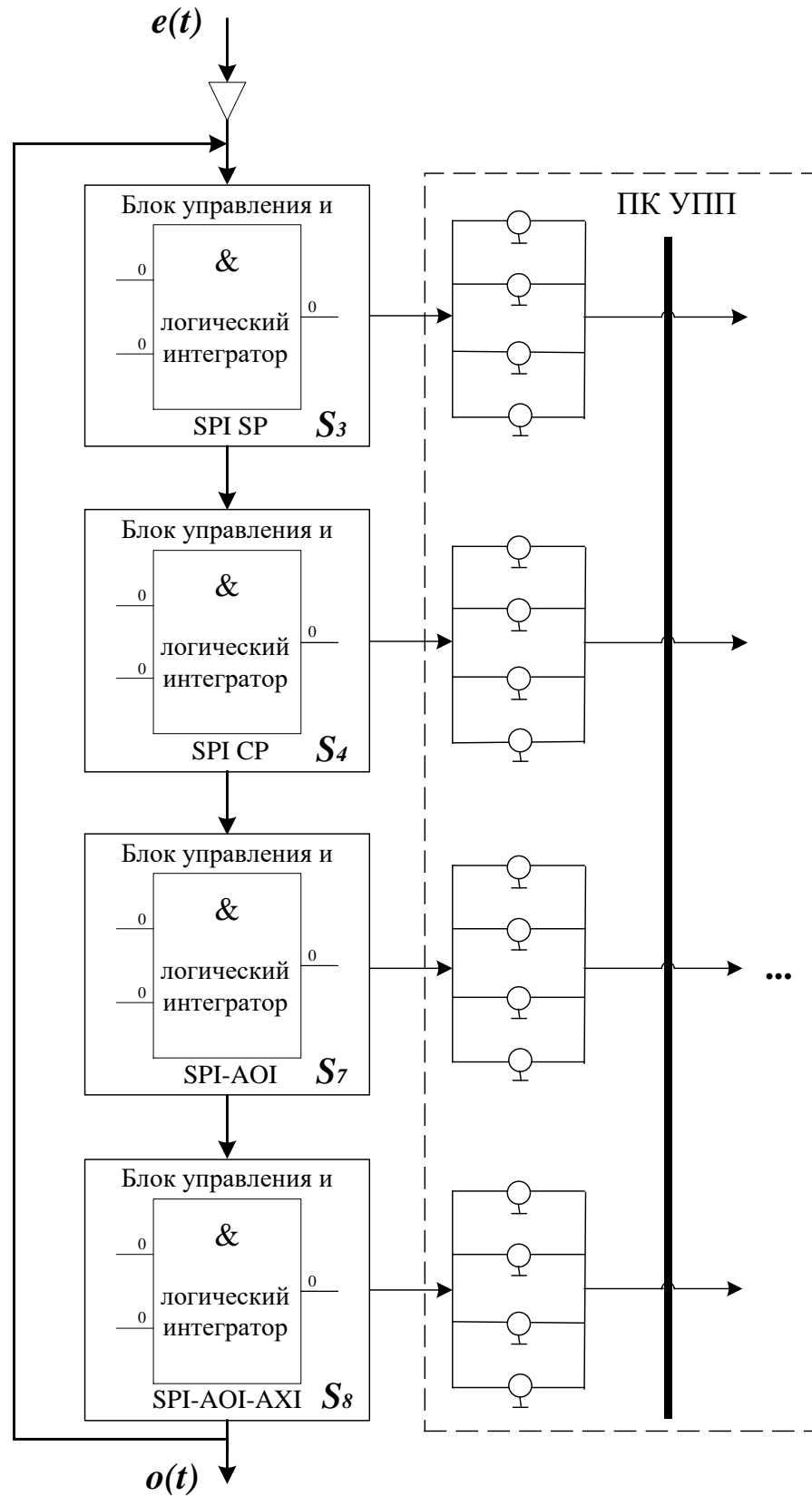


Рисунок 99 – Структурная схема системы автоматического регулирования
ПП

Устойчивость системы автоматического регулирования обеспечивается за счет поддержания конструкции при малых и стремящимся к 0 значениях погрешности. При соблюдении этого условия переходный процесс со временем затухает, а система переходит в устойчивое положение.

В этом случае переходный процесс равен (57):

$$\begin{aligned} a_n o^{(n)}(t) + a_{n-1} o^{(n-1)}(t) + \dots + a_1 o'(t) + a_0 o(t) = \\ = b_m e^{(m)}(t) + b_{m-1} e^{(m-1)}(t) + \dots + b_1 e'(t) + b_0 e(t) \end{aligned} \quad (57)$$

Таким образом, после окончания переходного процесса на выходе определяется значение устойчивости. В устойчивом положении все производные равны 0, а уравнение переходного процесса имеет вид (58, 59):

$$a_0 y_{уст} = b_0 e_0, \quad (58)$$

где (59):

$$y_{установ} = \frac{b_0 e_0}{a_0}. \quad (59)$$

Установившееся значение погрешности вычисляется как (60):

$$y_s = e_0 - y_{уст} = \left(1 - \frac{b_0}{a_0}\right) e_0. \quad (60)$$

На рисунке 99 логические операторы блоков управления представлены как (61-64):

$$S_3 = \frac{k_3}{1 + sT_3}, \quad (61)$$

$$S_4 = \frac{k_4}{1 + sT_4}, \quad (62)$$

$$S_7 = \frac{k_7}{1 + sT_7}, \quad (63)$$

$$S_8 = \frac{k_8}{1 + sT_8}. \quad (64)$$

Передаточная функция разомкнутой системы вычисляется как (65):

$$S_{\text{разомкнутой системы}} = \frac{k_3}{1+sT_3} * \frac{k_4}{1+sT_4} * \frac{k_7}{1+sT_7} * \frac{k_8}{1+sT_8} =$$

$$= \frac{K}{(1+sT_3)(1+sT_4)(1+sT_7)(1+sT_8)} \quad (65)$$

где коэффициент усиления всей системы (K) рассчитывается как (66):

$$K = k_3 * k_4 * k_7 * k_8. \quad (66)$$

Уравнение установившегося состояния вычисляется как (67):

$$(K+1) * y_{\text{установ}} = Kx_0, \quad (67)$$

откуда (68):

$$o_{\text{установ}} = K(e_0 / (1+K)). \quad (68)$$

В статическом состоянии система представлена (69):

$$o_s = \frac{e_0}{1+K}, \quad S = 1 / (1+K). \quad (69)$$

Характеристическое уравнение всей системы имеет вид (70):

$$T_3T_4T_7T_8 * s^3 + (T_3T_4 + T_7T_8 + T_3T_7 + T_3T_8 + T_4T_7) * s^2 +$$

$$+ (T_3 + T_4 + T_7 + T_8) * s + (1+K) = 0. \quad (70)$$

Так как все коэффициенты характеристического уравнения третьего порядка положительны, то, согласно критерию устойчивости Гурвица, система будет устойчива, если выполняется неравенство (71):

$$(T_3T_4 + T_7T_8 + T_3T_7 + T_3T_8 + T_4T_7)(T_3 + T_4 + T_7 + T_8) -$$

$$- (T_3 + T_4 + T_7 + T_8) * (1+K) > 0, \quad (71)$$

из которого определен коэффициент усиления (72):

$$K < \frac{(T_3T_4 + T_7T_8 + T_3T_7 + T_3T_8 + T_4T_7)(T_3 + T_4 + T_7 + T_8)}{T_3T_4T_7T_8} - 1. \quad (72)$$

Для достижения устойчивости и корректной работы системы коэффициент усиления системы должен быть меньше предельного коэффициента системы (73, 74):

$$K < K_{\text{предельный}}, \quad (73)$$

$$K_{\text{предельный}} < \frac{(T_3T_4 + T_7T_8 + T_3T_7 + T_3T_8 + T_4T_7)(T_3 + T_4 + T_7 + T_8)}{T_3T_4T_7T_8} - 1. \quad (74)$$

В частном случае, когда временные интервалы перехода из одной системы в другую равны между собой, предельный коэффициент системы равен 8, то есть $K < 8$. Для определения устойчивости предложенной модели управления технологическими операциями автоматического монтажа печатных плат и получения малой погрешности системы определим максимально допустимый коэффициент статического состояния. Предположим, что коэффициент будет равен 0,97 (минимально допустимый процент выхода годных изделий). Тогда $K > 97$. Согласно условиям, $K < K_{\text{предельный}}$, это означает, что систему удалось вывести из состояния устойчивости. Разрешение такого конфликта системы возможно с помощью изменения временных интервалов переходных процессов и введения дополнительных звеньев системы [100].

Достижение определенных показателей возможно за счет введения многопараметрического нечеткого классификатора с обучением, позволяющего заранее прогнозировать возмущения и самостоятельно принимать решение в процессе производства, дополняя существующую базу новыми правилами.

Оценка работоспособности предложенных в рамках исследования решений проводилась с использованием ПО компании ALD – RAM Commander. Выбранное ПО – это система методологии RAMS (Reliability Availability Maintenance Safety), ПК технических и математических инструментов, охватывающих весь спектр задач оценки качества работы системы.

Использование пакета имитационного моделирования позволило построить «дерево» отказов (рисунок 100), определить условия отказа системы, сроки наступления рисков и провести оценку возможных неисправностей на каждом этапе ПП (рисунки 101-106). Объектом испытаний,

согласно пп. 1,2 ГОСТ 27.002-2015, выступает СУ ПП изготовления радиоэлектроники, включающая в себя ПО.

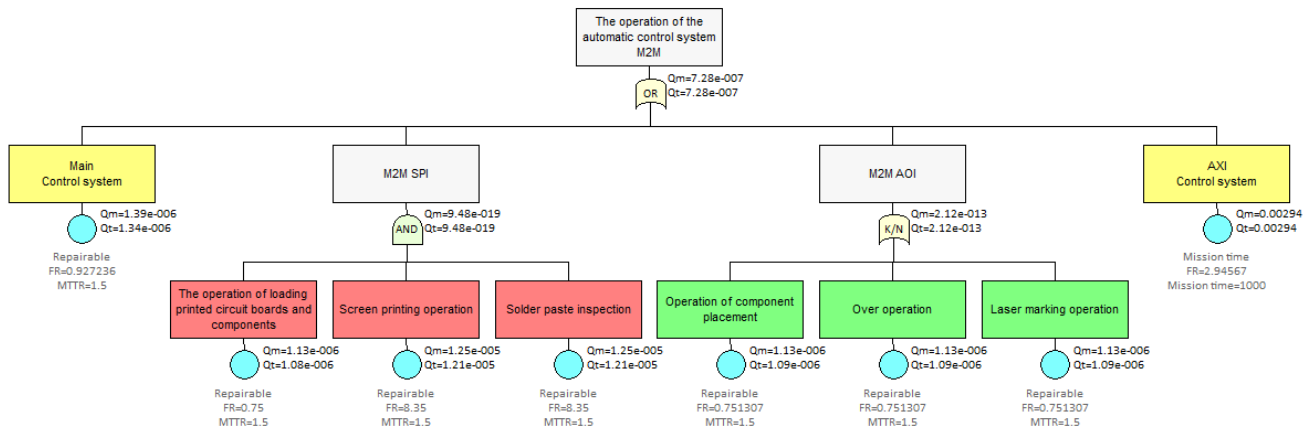


Рисунок 100 – Анализ «дерева» отказов (неисправностей)

Одной из ключевых особенностей использования программного пакета RAM Commander являлась возможность импортирования данных и встраивания уже существующего программного кода, содержащего экспертные системы в организации производственных процессов, методы и средства мониторинга производственных и сопутствующих процессов. Определение численных значений показателей надежности объекта проводились расчетно-экспериментальным методом.

Показателями надежности, согласно ГОСТ 27.002-2015, является количественная характеристика одного или нескольких свойств, составляющих надежность объекта [103].

Испытание предложенных решений и анализ возможных неисправностей проводились по следующим критериям: безотказность, ремонтпригодность и восстанавливаемость. Испытания приводились как для группы событий, так и для каждого события в отдельности (единичный показатель надежности) [104].

Анализируемые в модели показатели безотказности:

- средняя наработка до отказа;
- гамма-процентная наработка до отказа;

- средняя наработка между отказами;
- гамма-процентная наработка между отказами;
- интенсивность отказов;
- параметр потока отказов.

Анализируемые в модели показатели ремонтпригодности и восстанавливаемости:

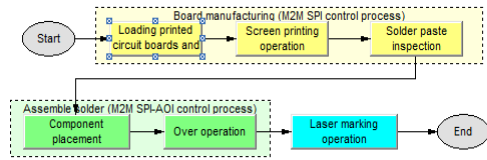
- вероятность восстановления;
- среднее время восстановления;
- среднее время до восстановления;
- гамма-процентное время восстановления;
- гамма-процентное время до восстановления;
- интенсивность восстановления.

Критерии выполнения требуемых функций были установлены для каждой функции набора параметров, характеризующих способность ее выполнения, и допустимых пределов изменения значений этих параметров.

В данном случае надежность определяется как свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих его способность выполнять требуемые функции в заданных режимах применения [105, 106].

В программном пакете RAM Commander построены 6 моделей, имитирующих порядок проведения и демонстрирующих текущее состояние ПП, а также результаты анализа возможных несоответствий ГОСТ [107-117] на каждом рассмотренном этапе ПП. Во всех 6 имитационных моделях используются описанные выше многопараметрические нечеткие регуляторы.

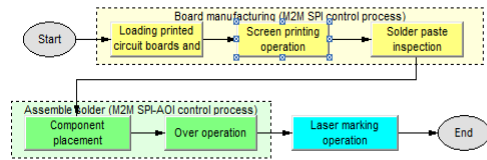
Порядок проведения и результаты анализа возможных неисправностей на этапе загрузки печатных плат представлены на рисунке 101. Красным цветом на рисунке отмечены наименование и количество выявленных с помощью модели и нечеткого регулятора несоответствий ГОСТ [46, 47, 54, 65, 69, 70, 71].



#	Potential FM	End Effect of Failure	Severity	Cause	Occurrence	Controls	Detection	RPN	Recommended Actions	Taken Actions	Result Sev.	Result Occ.	Result Det.	Result RPN
1	Board not usable	Product is unstable	7	Designers error	4	Visual inspection	6	168			7	8	2	112
				Bad materials	6	Visual inspection, X-rays analysis	6	252	> different size-differ color > surfaces clean before welding	Mark different sizes with differ7 colors. Always clean surfaces before welding	3	2	3	42
2	Bad assembly	Product is unusable	3	Designers error	3	Visual inspection	1	9	> Inspection before release		3	2	1	6
3	Undefined failure	Product is unstable	7	Bad materials	5		4	140			7	-	-	-
4	Wrong component - incompatible	Product is unusable	4	Designers error	4		1	16			4	-	-	-
				Unqualified worker	4		1	16			4	-	-	-
5	Bad air	Users avoid to use products with the failure - will have to decrease prices	7											

Рисунок 101– Порядок проведения и результаты анализа возможных неисправностей на этапе загрузки печатных плат

Рисунок 102 демонстрирует порядок проведения и результаты анализа возможных неисправностей на этапе трафаретной печати. Красным цветом отмечены наименования и количество выявленных с помощью модели и нечеткого регулятора несоответствий ГОСТ [46, 47, 54, 65, 69, 70, 71].



#	Potential FM	End Effect of Failure	Severity	Cause	Occurrence	Controls	Detection	RPN	Recommended Actions	Taken Actions	Result Sev.	Result Occ.	Result Det.	Result RPN
1	Bad assembly	Product is unusable	4	Lack of material	8	Computerized stock control + prediction option	9	288	> polarity marking > soldering instruction 221		4	8	1	32
				Climat disaster	3	Switch of the AC	10	210			7	9	9	567
2	Excessive heating	Product is unstable	7	Design error	2	Voltage measurement	3	42			7	-	-	-
				Power loss	3	Obligiate inspection of the project + inspection mark on each scheme	6	126	Designers inspector hired, every designer is informed about his duty to pass through an inspection.	7	8	5	280	
3		Product is unstable	7	Poor cleaning	2	Visual inspection	8	112			7	-	-	-
				Bad materials	8	Quality control before production line	6	336			7	-	-	-
4	Short circuit	Unstable	5	Design error	5	X-Rays expectation	7	175	Increase wages, Kill all employees		5	2	9	90
5	Wrong component	Product is unstable	7	Bad materials	3	Visual inspection	6	126			7	-	-	-

Рисунок 102 – Порядок проведения и результаты анализа возможных неисправностей на этапе трафаретной печати

На рисунке 103 приведены порядок проведения и результаты анализа надежности на этапе проверки паяльной пасты.

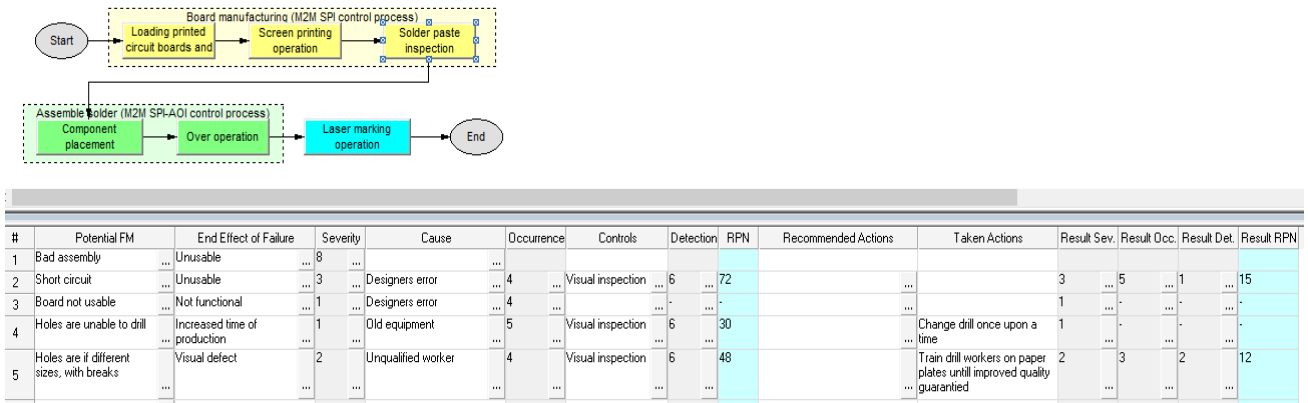


Рисунок 103 – Порядок проведения и результаты анализа надежности на этапе проверки паяльной пасты

Порядок проведения и результаты анализа возможных неисправностей на этапах загрузки и установки компонентов, оплавления и лазерной маркировки представлены на рисунках 104-106 соответственно.

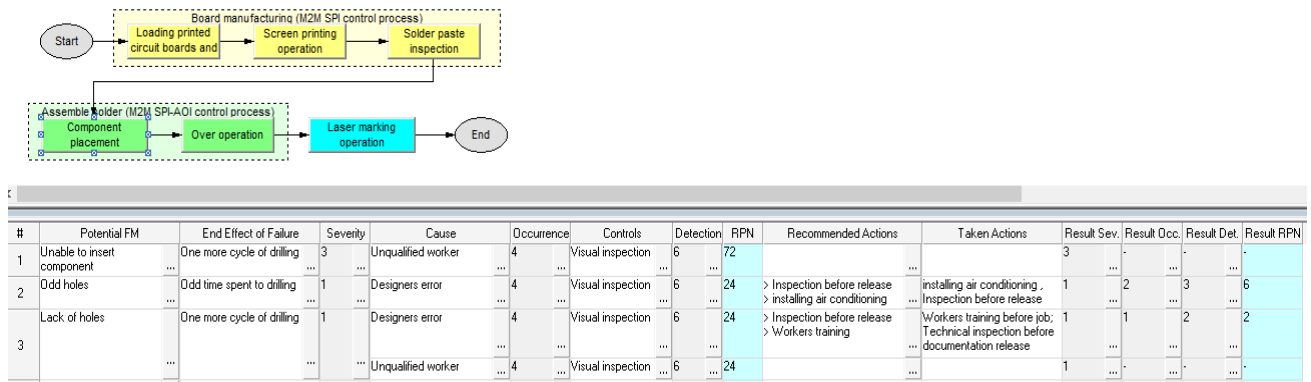


Рисунок 104 – Порядок проведения и результаты анализа возможных неисправностей на этапе загрузки и установки компонентов

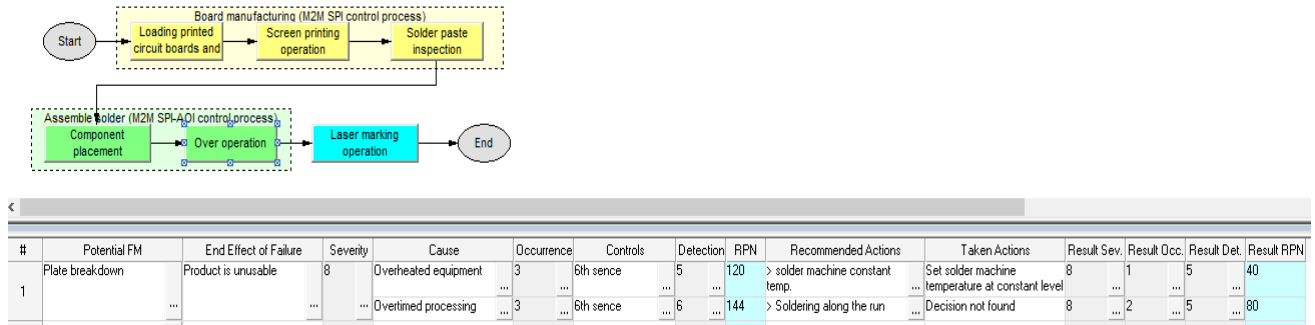


Рисунок 105 – Порядок проведения и результаты анализа возможных неисправностей на этапе оплавления

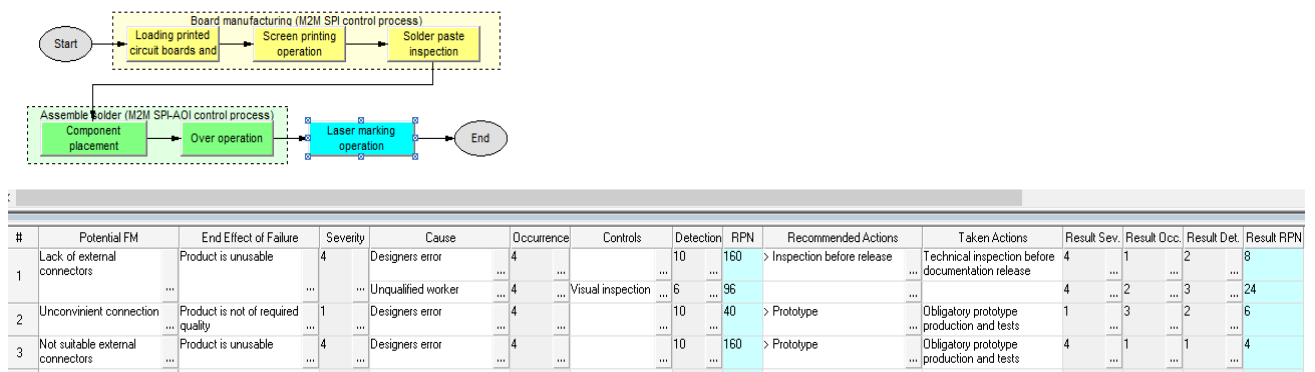


Рисунок 106 – Порядок проведения и результаты анализа возможных неисправностей на этапе лазерной маркировки

Проведенное моделирование позволило выявить возможные виды и последствия отказов, определить влияние различных событий на критичность отказов, проранжировать числа приоритетности риска (п. 2.2 диссертации) и критичности отказа, а также существенно дополнить разработанную интегрированную базу данных всех ПП.

Использование рекомендаций системы RAMS позволило перенести созданный ПК УПП в начало ПП и тем самым снизить нагрузку на системы энергопотребления на 13,5 %.

Адаптивная модель Simulink представляет собой модель, состоящую из четырех этапов: SPI SP, SPI CP, SPI-AOI и SPI-AOI-AXI (рисунок 107).

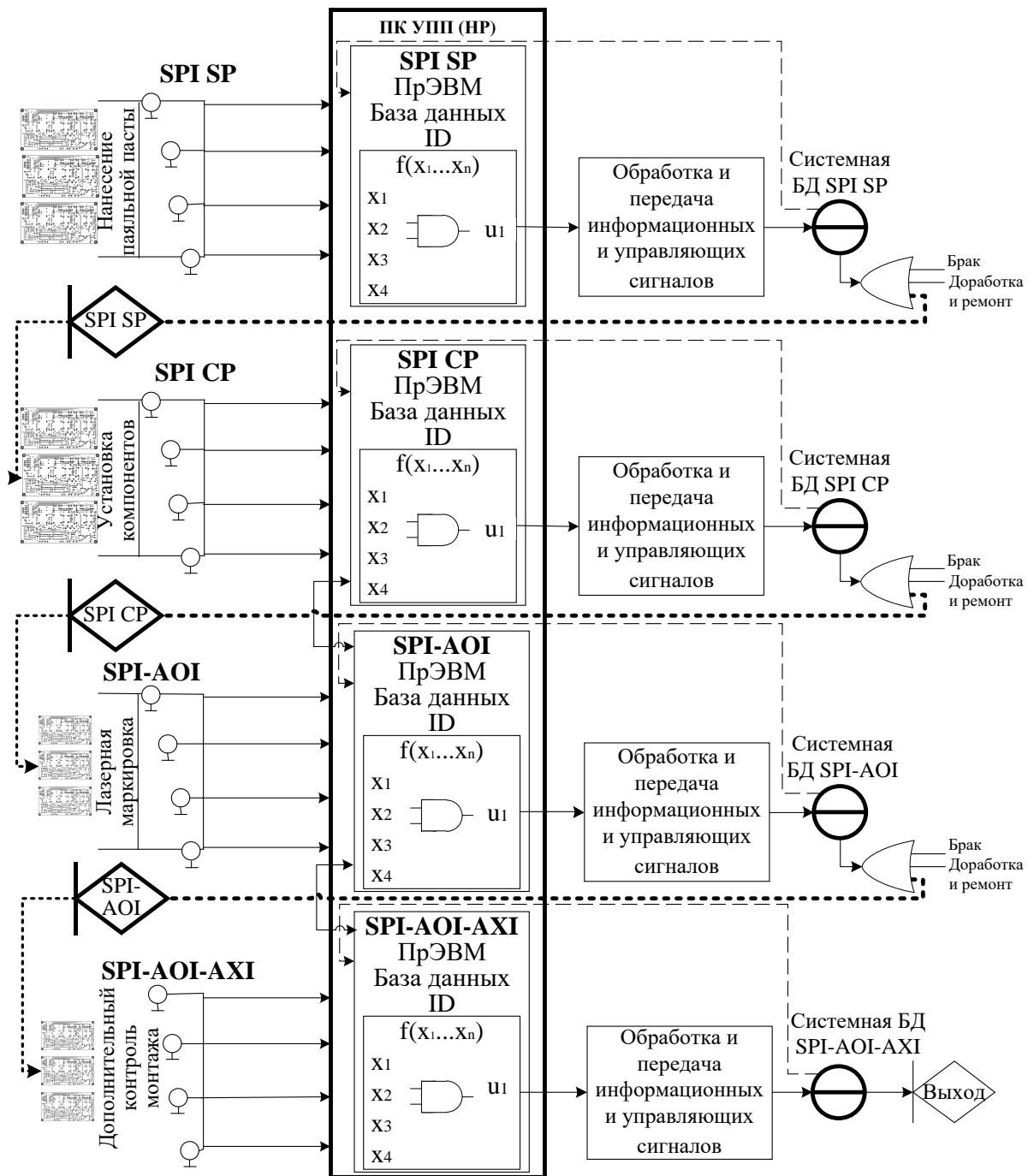


Рисунок 107 – Модель организации процессов АМ изделий радиоэлектроники для четырех идентифицируемых видов брака

Модель имитирует работу датчиков, считывающих информацию о видах возникающих несоответствий: смещение паяльной пасты относительно контактных площадок, недостатке или избытке пасты на контактных площадках печатной платы, смазывания пасты, наличие перемычек и т.д. Количество входов нечеткого регулятора на каждом из трех этапов ТП соответствует числу идентифицируемых видов дефектов, а сам регулятор

содержит базу данных с количеством правил в зависимости от числа выявляемых несоответствий для каждого вида дефекта.

Спецификой изготовления радиоэлектроники являются постоянно возрастающие требования к качеству. Необходимое повышение качественных показателей электронной продукции связано с эксплуатацией производимой продукции в условиях внешних воздействующих факторов, в первую очередь, механических и климатических. Высокий уровень качества монтажа изделий обеспечивается реализацией все большего числа этапов цифрового ЖЦ и внедрением в ПП технологических инноваций.

Определяющие функции реализованы в виде электронных программируемых средств и СУ. Одной из важнейших задач внедрения предложенных ТИ являются повышение результативности ПП, а также оценка работоспособности производства.

Интеграция информации, полученной от элементов ЦП и операционных знаний в составе базы знаний, обеспечило снижение доли бракованных изделий с 2% до 0,5%, а также поэтапное сокращение влияния человеческого фактора на ТП и временных затрат на работу персонала от 1,2 до 3,5 раз.

Для реализации модели на производственном предприятии изготовления радиоэлектроники созданы и зарегистрированы в Роспатенте:

– программа для ЭВМ: «Комплекс моделирования оптимизации и управления производственным процессом монтажа радиоэлектронных изделий на основе многопараметрических нечетких регуляторов» рег.№ 2020610584 от 16.01.2020 г. (№ заявки 2019667521 от 25.12.2019 г.) [115],

– база данных: «База данных управления процессом автоматического монтажа электроники с применением многопараметрического нечеткого регулятора» рег. №2018621926 от 03.12.2018 г. (№ заявки 2018621562 от 01.11.2018 г.) [116].

3.4 Экспериментальная модель производственной цифровой линии с применением программного пакета Plant Simulation Siemens

С целью апробации представленных в диссертационном исследовании моделей и методик поэтапной организации цифрового производства в ПО Tecnomatix Plant Simulation (Siemens PLM Software) разработана цифровая модель производственной линии промышленного предприятия изготовления радиоэлектроники, приближенная к реальному производству.

Разработанная цифровая модель позволяет проводить эксперименты, связанные с загруженностью линий и количеством выпускаемых изделий, с целью сокращения времени, энергетических и финансовых затрат на проверку внедряемых технологических инноваций и различных моделей производства в реальных условиях, оценивать варианты планирования производственных линий и мощностей, оптимизировать материальные потоки и использование ресурсов с максимальным уровнем детализации.

Визуализация цифрового производства представлена в программной среде имитационного моделирования систем и процессов Plant Simulation для организации материалопотоков, загрузки ресурсов, логистики, метода управления для всех уровней планирования, от полноценного производства и сети производств до отдельных линий и участков, а также детализированного отслеживания технологии на протяжении всего ЖЦ КФС.

Эксперимент производился на всех стадиях разработки предложений по модернизации технологической линии изготовления радиоэлектроники. Детализированно воспроизведен ТП до введения средств МИВ (рисунки 108, 109), в процессе введения каждого из компонентов: M2M SPI, M2M SPI-AOI, M2M SPI-AOI-AXI (рисунки 110, 111) и после введения средств МИВ на всех этапах производственной линии (рисунки 112, 113).

На рисунках 95 и 96 представлена имитационная модель производственной линии монтажа радиоэлектронных изделий с участием человека на всех этапах ПП до введения технологии M2M перед началом моделирования и после его окончания.

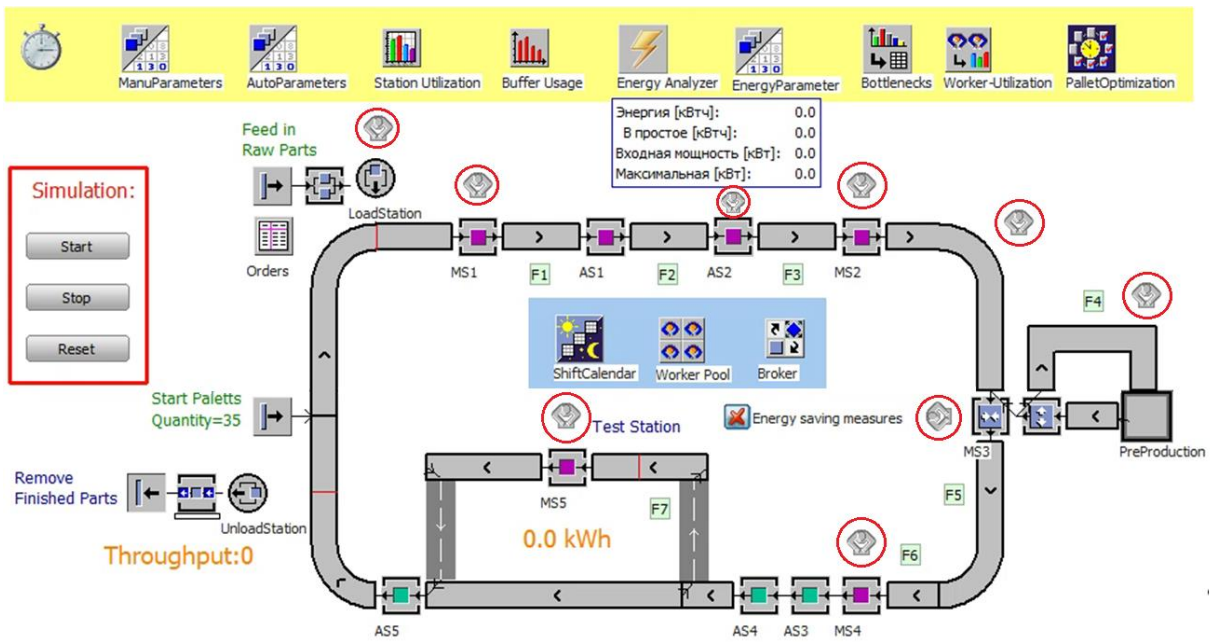


Рисунок 108 – Имитационная модель монтажа радиоэлектронных изделий с участием человека на всех этапах производственного процесса до введения технологии M2M (перед началом моделирования)

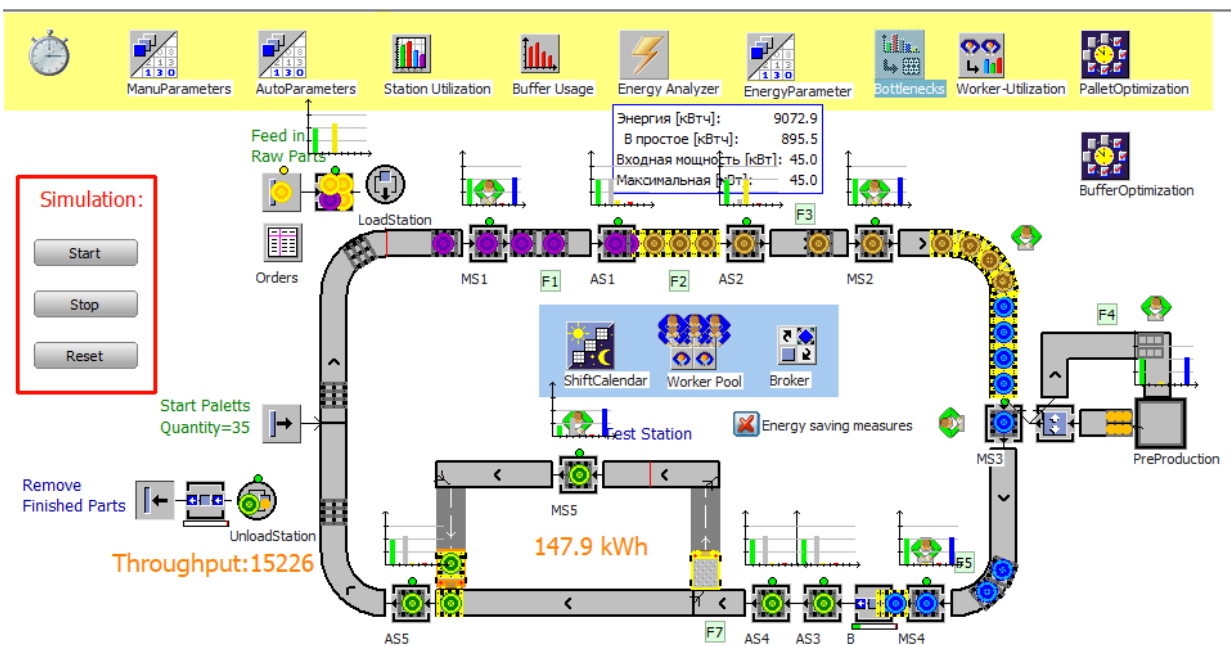


Рисунок 109 – Имитационная модель монтажа радиоэлектронных изделий с участием человека на всех этапах производственного процесса до введения технологии M2M (после окончания моделирования)

Создание детализированной процессной модели ТП изготовления радиоэлектроники, имеющей открытую архитектуру, восприимчивую к расширению для решения новых задач, и использующей единое интеллектуальное, информационное обеспечение, построенное на основе аппарата нечеткой логики, позволит уменьшить возможные производственные риски, связанные с человеческим фактором и сократить количество брака.

На рисунках 110 и 111 представлена имитационная модель производственной линии радиоэлектроники с участием человека на этапах 3, 4 и 7 ПП перед началом моделирования и после его окончания.

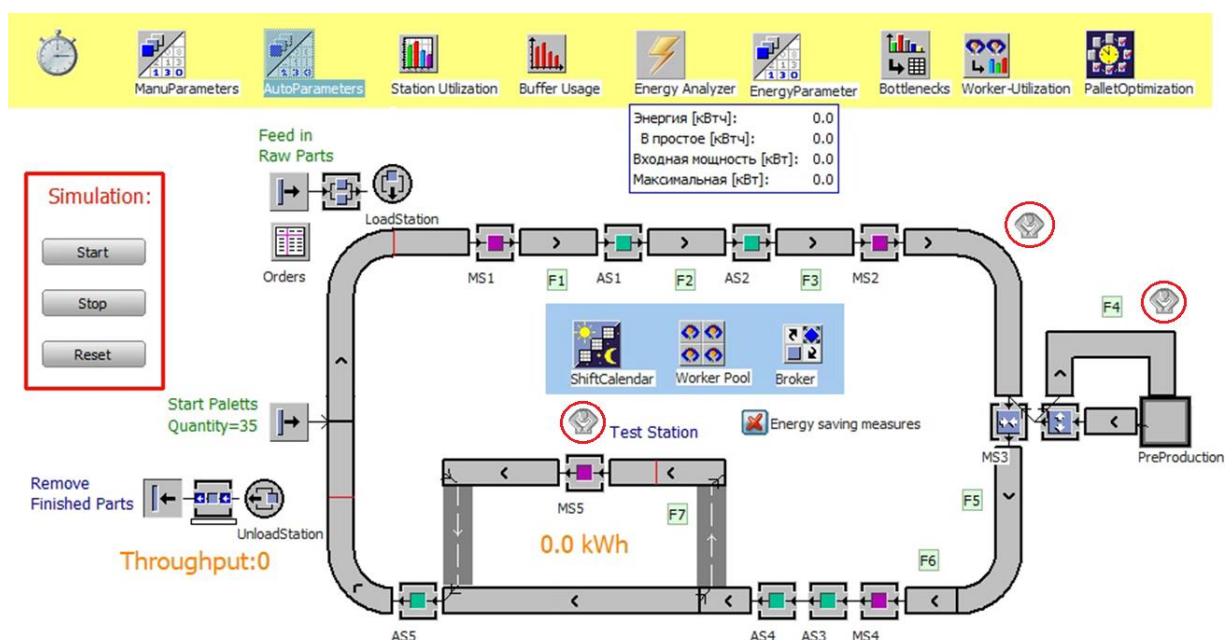


Рисунок 110 – Имитационная модель введения технологии M2M на этапах 3 и 7 (перед началом моделирования)

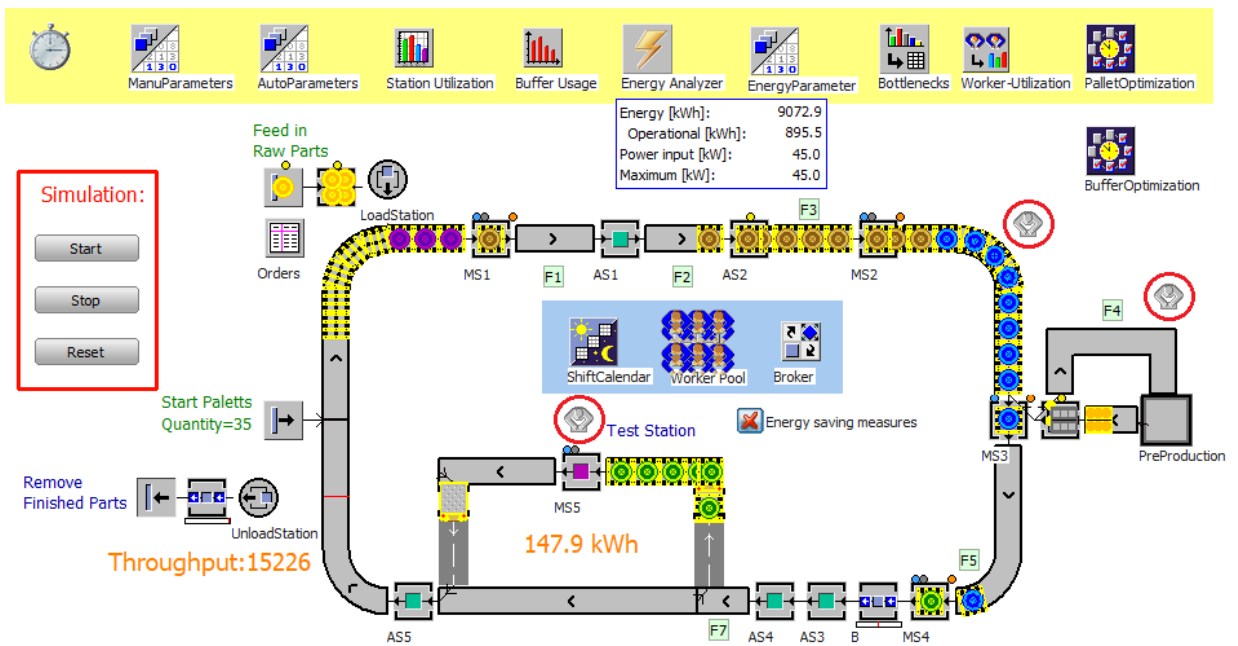


Рисунок 111 – Имитационная модель введения технологии M2M на этапах 3 и 7 производственного процесса (после окончания моделирования)

На рисунках 112 и 113 представлена имитационная модель производственной линии радиоэлектроники при введении технологии M2M перед началом моделирования и после его окончания.

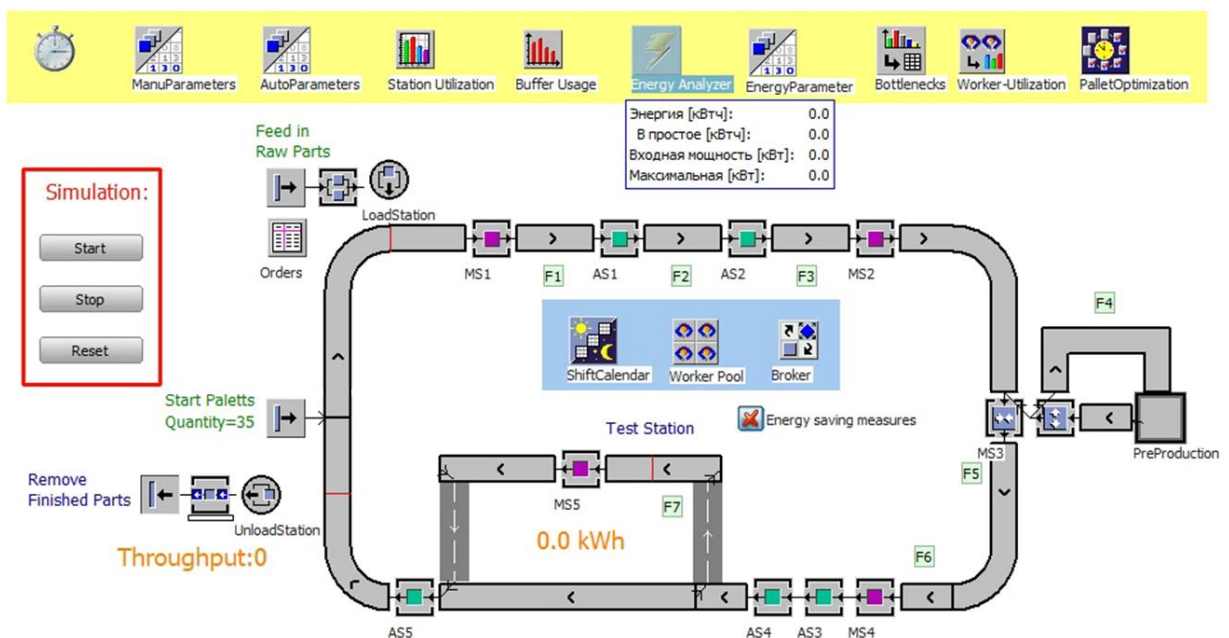


Рисунок 112 – Имитационная модель введения технологии M2M на всех этапах производственного процесса (перед началом моделирования)

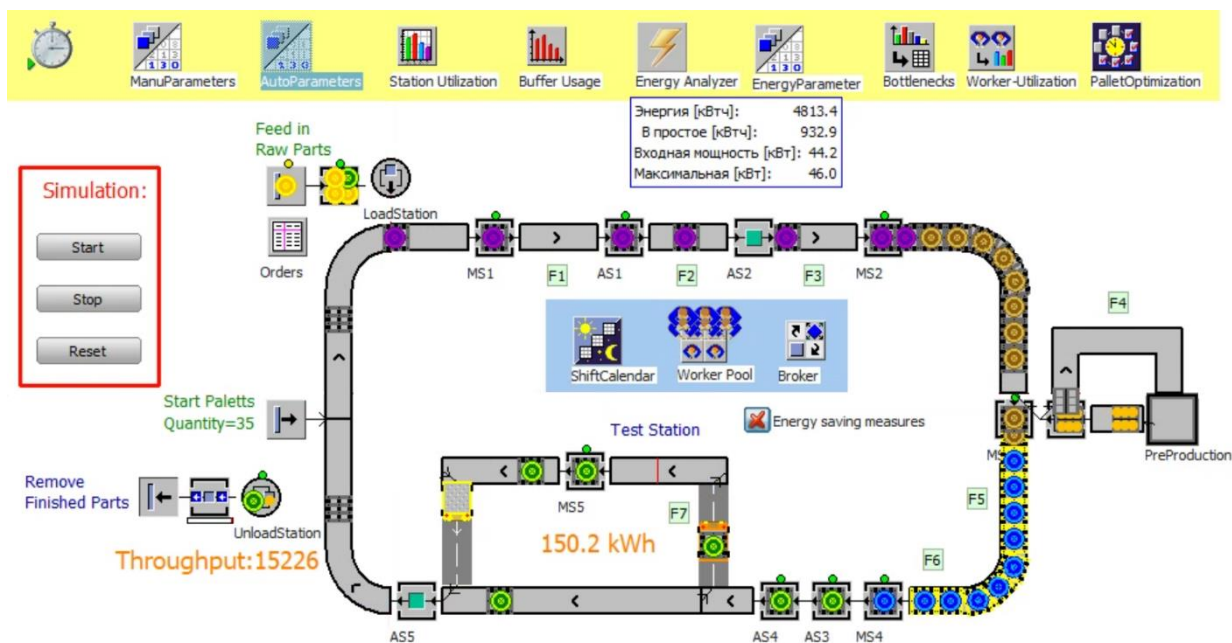


Рисунок 113 – Имитационная модель введения технологии M2M на всех этапах производственного процесса (после окончания моделирования)

С помощью среды имитационного моделирования Plant Simulation была произведена сортировка по сумме времени работы оборудования на линии переналадки, поломок и перерывов, а также количество затраченного времени на проведение каждой операции. Данные представлены в таблице 10.

Таблица 10 – Анализ времени работы и устранения неисправностей на производственной линии до и после введения полного M2M

Ожидание		Блокировка		Поломка		Остановка		Пауза	
До	После	До	После	До	После	До	После	До	После
2,80	0,00	0,08	0,00	1,07	0,00	0,00	0,00	49,57	0,00
2,36	0,27	0,62	0,00	0,86	0,00	0,00	0,00	49,57	0,31
1,21	0,00	2,01	0,00	0,68	0,00	0,00	0,00	49,57	0,00
0,35	0,18	2,91	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	49,57	0,00
32,01	0,00	0,00	0,00	0,30	0,00	0,00	0,00	49,57	0,00
46,80	0,00	6,15	0,00	1,29	0,00	0,00	0,00	0,00	0,73
8,58	0,62	44,59	0,00	1,11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
53,37	0,00	0,01	0,00	0,99	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
53,41	0,00	0,19	0,00	0,83	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
52,64	0,63	1,02	0,00	0,72	0,00	0,00	0,75	0,00	0,00
0,00	0,00	54,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,30	0,00	0,00
54,28	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,67
52,59	0,00	1,70	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,00	0,67	55,60	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
92,39	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,56
452,79	2,37	169,13	0,00	7,85	0,00	0,00	1,05	247,85	2,27
191,0506329		169,13		7,85		1,05		109,185022	

На основе этих данных был поставлен эксперимент функционирования технических специалистов на производственной линии до (рисунки 114, 115 и после (рисунки 116, 117) введения полного M2M.

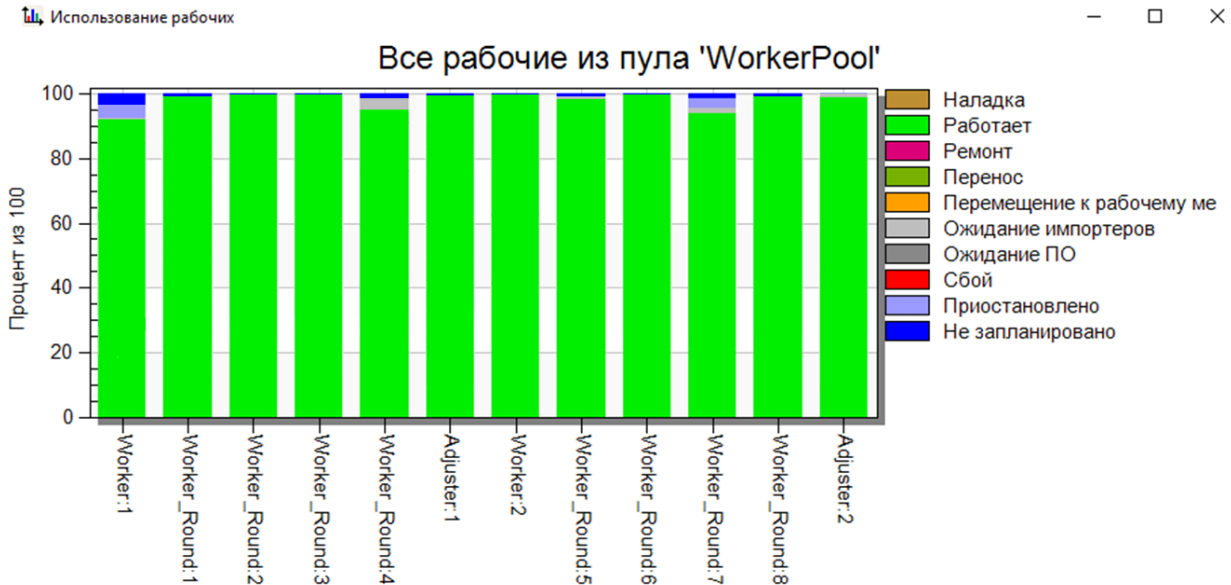


Рисунок 114 – Время работы технических специалистов на производственной линии до введения полного M2M

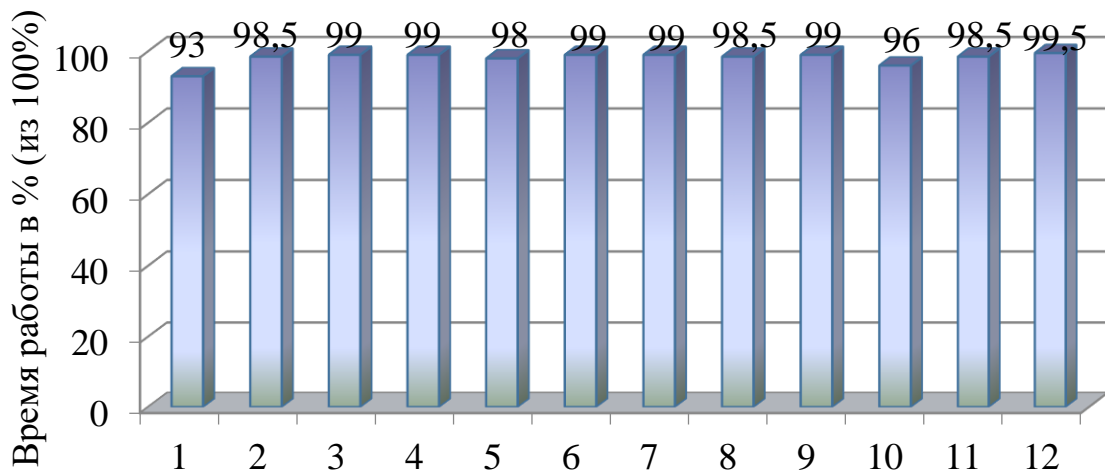


Рисунок 115 – Время работы технических специалистов на производственной линии до введения полного M2M

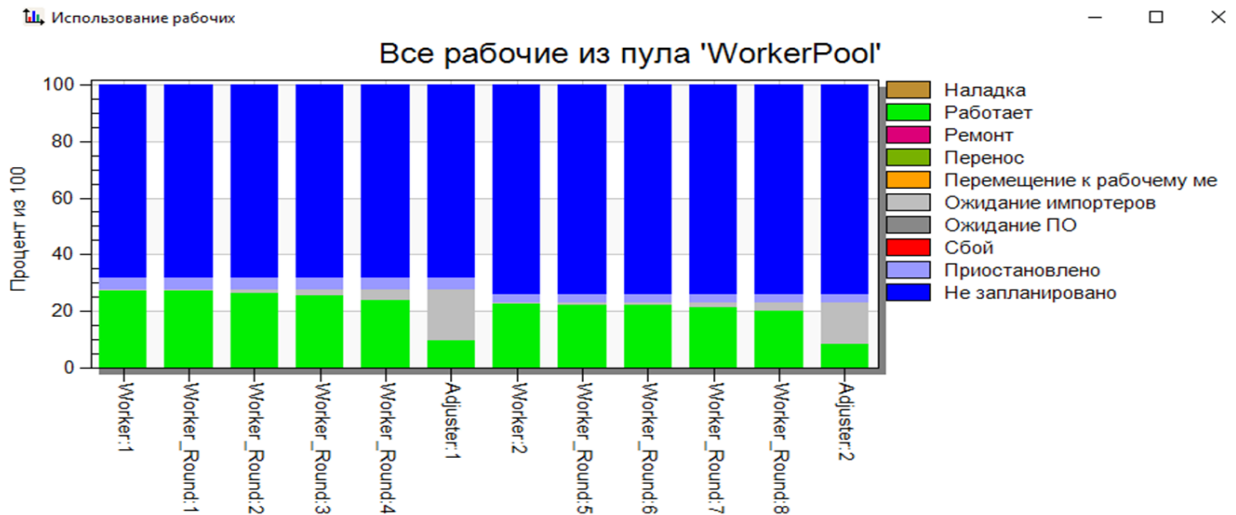


Рисунок 116 – Время работы технических специалистов на производственной линии после введения полного M2M



Рисунок 117 – Время работы технических специалистов на производственной линии после введения полного M2M

В программе Plant Simulation выполнено моделирование всех этапов ПП на основании накопленных статистических данных, а также апробирована методика внедрения технологии M2M оборудования на этапах SPI SP-SPI CP-AOI-AXI. В процессе проведения эксперимента установлено, что при введении межмашинного взаимодействия на всех этапах ТП среднее время работы персонала на производственной линии сокращено на 21,25% от 100%, т.е. до 78,75% (рисунке 117). Результаты эксперимента подтверждают возможность сокращения численности производственного персонала за счет сокращения времени технологического цикла.

Внедрение предложенных в диссертационном исследовании ТИ предоставляет возможность сокращения трудовых ресурсов. Соответствующие специалисты могут участвовать в ПП в качестве операторов или администраторов цифровой производственной линии, что, в частности, полностью соответствует социально-экономической и культурной стратегии развития общества «Общество 5.0», основанной на использовании цифровых технологий во всех сферах жизни.

Предложенные в диссертационном исследовании технологические инновации M2M SPI SP, M2M SPI CP, M2M SPI-OAI и M2M SPI-AOI-AXI являются элементами ЦП, позволяющими уменьшить возможные производственные риски, связанные с человеческим фактором и сократить количество бракованной продукции. Накопление экспериментальных данных в базах данных и последующее создание базы знаний создают условия для раскрытия неопределенностей, оценки рисков, определенных нормативной и технологической документацией.

Для этого используются мягкие вычисления и системы нечеткой логики в составе онтологической базы знаний с фреймовой структурой. Соответствие качества требованиям первоначально описывается в нечетких категориях с помощью кусочно-линейных функций принадлежности в поле допуска, вид которых уточняется в процессе обучения. Интеграция информации от элементов ЦП и операционных знаний в составе базы знаний обеспечит качество продукции радиоэлектроники и минимизацию человеческого фактора.

Таким образом, модернизация ТП изготовления и автоматического монтажа радиоэлектроники с использованием средств МИВ позволит спрогнозировать долю несоответствующей продукции и окончательного брака, обеспечить достижение качественных показателей изготавливаемой продукции, за счет реализации комплекса превентивных мероприятий при внедрении технологических инноваций, а также сократить нагрузку на персонал.

3.5 Выводы и результаты по главе 3

В результате исследования разработаны модели и методики обеспечения результативности ТП изготовления печатных плат на основе поэтапного внедрения ТИ.

1. Выполнен анализ функционирования технологической линии АМ печатных плат с использованием киберфизических систем. Представлена схема взаимодействия автоматического технологического оборудования, КФС и специалистов на ЦП. Описаны примеры функционального и информационного обеспечения ТИ.

2. Разработана методика мониторинга монтажа радиоэлектронных изделий и внедрения технологии межмашинного интеллектуального взаимодействия компонентов оборудования, обеспечивающая поэтапное сокращение влияния человеческого фактора на ТП и временных затрат на работу персонала от 1,2 до 3,5 раз.

Методика предназначена для обеспечения интеллектуального М2М компонентов оборудования и создания алгоритмов функционирования комплексов СУ процессом АМ печатных плат, а также своевременного детального мониторинга, позволяющего выявлять продукцию несоответствующего качества и своевременно диагностировать ненормативные эксплуатационные характеристики оборудования.

В процессе разработки методики были созданы и зарегистрированы в Роспатенте программы для ЭВМ:

– Программа мониторинга процессов производства радиоэлектроники на основе межмашинного интеллектуального взаимодействия компонентов оборудования рег.№ 2020610583 от 16.01.2020 г. [91].

– Программа управления процессом АМ печатных плат на основе введения средств интеллектуального межмашинного взаимодействия компонентов оборудования рег.№ 2019619203 от 12.07.2019 г. [92].

– Программа моделирования этапов цифрового производства электроники для систем мониторинга рег. № 2018616699 от 06.06.2018 г. [93].

– Программа интеллектуальной системы управления производственным процессом изготовления электронной продукции на этапе Solder Paste Inspection» рег. № 2018663527 от 30.10.2018 г. [94].

– База данных: «Элементная база для изготовления модулей устройств беспроводной передачи данных», рег. № 2018622062 от 17.12.2018 г. [95].

Программы для ЭВМ написаны в пакете имитационного моделирования iThink на языке программирования C++ для удобного использования программного кода в других интегрированных средах создания моделей организации цифрового производства. Внедрение ТИ SPI-AOI-AXI, баз данных (знаний), интернета вещей в процессную структуру АМ снижает процентную долю бракованной продукции (с 2% до 0,5%).

3. Разработана модель организации ПП монтажа радиоэлектронных изделий на основе многопараметрических НР с использованием среды компьютерного моделирования MatLab, содержащей инструменты для проектирования систем нечеткой логики Fuzzy Logic Toolbox. С учетом накопленных данных и разработанных предложений о введении в технологическую линию элементов межмашинного взаимодействия M2M-SPI SP, M2M-SPI CP, M2M SPI-AOI и M2M SPI-AOI-AXI создана экспертная система на основе нечеткой логики, которая представлена функциями для нечеткой кластеризации с обучением, а также базами правил четырех типов кластеризации по обнаруженным в процессе производства печатных плат видам брака. Созданы базы данных для 4, 5, 6 и 7 выявленных видов дефектов. База правил для четырёх видов дефектов содержит 81 правила, для 5 – 243, для 6 – 729, для 7 – 2 187.

С помощью баз данных ведется учет дефектов по каждой партии, отслеживаются сочетания и кластеризация по типам дефектов на этапах проверки паяльной пасты (SPI SP), проверки установки компонентов (SPI CP) и автоматической оптической инспекции (AOI). Также в процессе введения дополнительного контроля монтажа BGA X-Ray inspection (AXI) облегчаются

поиск и устранение дефекта на основе введенных в базу данных параметров многопараметрического НР.

Использование принципов автоматизированных систем контроля и цифрового проектирования на всем протяжении производственного цикла обеспечит сокращение временных затрат ПП от 1,2 до 3,5 раз в зависимости от числа этапов с применением разработанных моделей и методик.

Для реализации модели на производственном предприятии изготовления радиоэлектроники созданы и зарегистрированы в Роспатенте:

– программа для ЭВМ: «Комплекс моделирования оптимизации и управления производственным процессом монтажа радиоэлектронных изделий на основе многопараметрических нечетких регуляторов» рег. № 2020610584 от 16.01.2020 г.,

– база данных: «База данных управления процессом автоматического монтажа электроники с применением многопараметрического нечеткого регулятора» рег. №2018621926 от 03.12.2018 г.

4. С целью апробации представленных в диссертационном исследовании моделей и методик поэтапной организации ЦП в ПО Tecnomatix Plant Simulation (Siemens PLM Software) была разработана цифровая модель производственной линии промышленного предприятия изготовления радиоэлектроники, приближенная к реальному производству.

В процессе проведения эксперимента установлено, что при введении межмашинного взаимодействия на всех этапах ТП среднее время работы персонала на производственной линии сокращено на 21,25% от 100%, т.е. до 78,75%.

Заключение

Результаты диссертационного исследования обеспечивают повышение результативности процесса цифрового производства радиоэлектронных изделий на основе разработки моделей и методик поэтапного внедрения межмашинного взаимодействия. Изложены новые научно-обоснованные технические решения и разработки, имеющие значение для развития радиоэлектронной отрасли.

В диссертационной работе получены следующие результаты, имеющие научную новизну и практическое значение:

1. Разработана математическая модель структуризации и типизации ПП монтажа радиоэлектронных изделий, отличающаяся от существующих сокращением числа операций при вычислении вероятностей выпуска годных изделий и последующей корректировкой требований к минимальным вероятностям перехода состояний.

2. Разработана методика планирования ПП монтажа радиоэлектронных изделий при внедрении ТИ, отличающаяся от известных проведением анализа параметров ТП и формированием критериальной оценки работоспособности производственной линии.

3. Методика мониторинга монтажа радиоэлектронных изделий, отличающаяся от известных внедрением новых программно-аппаратных технологий межмашинного интеллектуального взаимодействия компонентов оборудования и адаптируемая в соответствии с характеристиками ПП.

4. Внедрение математической модели повышения результативности монтажа радиоэлектронных изделий позволило уменьшить долю бракованной продукции с 2% до 0,5%.

5. Математическая модель ПП монтажа радиоэлектронных изделий, обеспечивающая определение вероятностей выполнения технологических операций при заданных объемах производимой партии и интенсивности загрузки оборудования для формирования критериальной оценки с целью принятия решения об изменении заданных характеристик работы

оборудования.

6. Методика мониторинга монтажа радиоэлектронных изделий и внедрения технологии межмашинного интеллектуального взаимодействия компонентов оборудования, обеспечивающая поэтапное уменьшения временных затрат на работу персонала от 1,2 до 3,5 раз за счет сокращения влияния человеческого фактора на ТП.

7. Модель организации процесса АМ изделий радиоэлектроники и принятия решений посредством применения многопараметрических нечетких регуляторов и базы данных, реализованных в программном комплексе управления.

8. Разработанные модели и методики использованы при техническом обосновании проекта по созданию завода по производству радиоэлектроники ООО ПФ «ЭЛКОН» на территории Особой экономической зоны «Новоорловская».

9. Семь разработанных и зарегистрированных в Роспатенте программ для ЭВМ и три базы данных, формирующие интегрированный ПК УПП.

Разработанные модели позволяют выполнять оценку доли несоответствующей продукции и окончательного брака (0,9951) и обеспечивать высокие качественные показатели при внедрении ТИ: интеграцию информации, полученной от элементов ЦП и операционных знаний в составе базы знаний, обеспечило снижение доли бракованных изделий с 2% до 0,5%, а также поэтапное уменьшения временных затрат на работу персонала от 1,2 до 3,5 раз за счет сокращения влияния человеческого фактора на ТП.

По результатам исследований разработаны и зарегистрированы в Роспатенте следующие программы для ЭВМ и базы данных:

1. Петрушевская, А.А. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ: «Комплекс моделирования оптимизации и управления производственным процессом монтажа радиоэлектронных изделий на основе многопараметрических нечетких регуляторов» / А.А. Петрушевская //

рег.№ 2020610584 от 16.01.2020 г. [116].

2. Петрушевская, А.А. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ: «Программа мониторинга процессов производства радиоэлектроники на основе межмашинного интеллектуального взаимодействия компонентов оборудования» / А.А. Петрушевская // рег.№ 2020610583 от 16.01.2020 г. [91].

3. Петрушевская, А.А. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ: «Программа адаптации структуры цифровой линии монтажа электроники компонентами технологических инноваций на основе анализа вероятностей состояний процессов, обеспечивающая оценку результативности производства и качества продукции» / А.А. Петрушевская // рег.№ 2019661707 от 05.09.2019 г. [78].

4. Петрушевская, А.А. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ: «Программа интеллектуализации производственных процессов изготовления электроники, обеспечивающая критериальную оценку качества продукции» / А.А. Петрушевская // рег.№ 2019661474 от 02.09.2019 г. [83].

5. Петрушевская, А.А. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ: «Программа управления процессом автоматического монтажа печатных плат на основе введения средств интеллектуального межмашинного взаимодействия компонентов оборудования» / А.А. Петрушевская // рег.№ 2019619203 от 12.07.2019 г. [92].

6. Петрушевская, А.А. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ: «Программа моделирования этапов цифрового производства электроники для систем мониторинга» / А.А. Петрушевская, Г.И. Коршунов // рег. № 2018616699 от 06.06.2018 г. [93].

7. Петрушевская, А.А. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ: «Программа интеллектуальной системы управления производственным процессом изготовления электронной продукции на этапе Solder Paste Inspection» / А.А. Петрушевская, Г.И. Коршунов // рег. № 2018663527 от 30.10.2018 г. [94].

8. Петрушевская, А.А. Свидетельство о гос. регистрации базы данных:

«Компоненты обеспечения качества технологических процессов изготовления электроники в условиях цифрового производства» / А.А. Петрушевская, Г.И. Коршунов // рег. №2018620790 от 01.06.2018 г. [77].

9. Петрушевская, А.А. Свидетельство о гос. регистрации базы данных: «База данных управления процессом автоматического монтажа электроники с применением многопараметрического нечеткого регулятора» / А.А. Петрушевская // рег. №2018621926 от 03.12.2018 г. [76].

На основе проведенного исследования можно сделать вывод о том, что решение задач, связанных с цифровизацией производственных систем, созданием программно-аппаратных средств, основанных на принципах концепции «Индустрия 4.0» в производственном процессе монтажа радиоэлектронных изделий, является одной из приоритетных задач для отечественной промышленности.

Таким образом, решены все задачи, поставленные для достижения сформулированной в работе цели, и цель диссертационного исследования достигнута.

Список сокращений и условных обозначений

- AOI – automatic optical inspection (автоматическая оптическая инспекция)
- AXI – автоматическая рентгеновская инспекция
- CAD – система – computer aided design (компьютерная поддержка проектирования)
- CPS (КФС) – cyber physical system (киберфизические системы)
- CP – component placement (установка компонентов)
- DFM – design for manufacturing
- DFF – design for fabrication (проектирование для производства)
- DFA – design for assembly
- ERP – enterprise resource planning (система планирования ресурсов предприятия)
- FMEA – failure modes and effects analysis (анализ причин и последствий отказов)
- ID – идентификатор
- IoT – internet of things (интернет вещей)
- IPC – Association connecting electronics industries (международная ассоциация производителей электроники) бывш. Институт печатных плат (Institute of Printed Circuits)
- M2M – machine-to-machine (межмашинное взаимодействие)
- PCB – printed circuit board (редактор топологии печатных плат в составе пакета программ gEDA)
- P-CAD – система автоматизированного проектирования электроники (EDA)
- PLM – product lifecycle management (система управления данными об изделии)
- RFID – Radio Frequency IDentification (радиочастотная идентификация)
- SMT – surface mount technology (технология поверхностного монтажа)
- SPI – solder paste inspection (проверка паяльной пасты)
- SP – solder paste (паяльная паста)
- AM – автоматический монтаж

БД – база данных

БЗ – база знаний

ЖЦ – жизненный цикл

МИВ – межмашинное интеллектуальное взаимодействие

МЦ – марковские цепи

НИОКР – научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы

НИР – научно-исследовательские работы

НР – нечеткий регулятор

РКД – рабочая конструкторская документация

ПК – программный комплекс

ПК УПП – программный комплекс управления производственным процессом

ПО – программное обеспечение

ПП – производственный процесс

ПРД – предупреждающие действия

ПЧР – приоритетное число рисков

СМК – системы менеджмента качества

СУ – система управления

ТД – техническая документация

ТЗ – техническое задание

ТИ – технологические инновации

ТП – технологический процесс

ЦП – цифровое производство

ЭВМ – электронно-вычислительная машина

ЭП – эскизный проект

Список литературы

1. Стратегия развития электронной промышленности Российской Федерации на период до 2030 года. Утв. распоряжением правительства Российской Федерации от 17 января 2020 года №20-р.
2. Указ Президента Российской Федерации от 07.05.2018 г. № 204 О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года. URL: <http://static.kremlin.ru/media/acts/files/0001201805070038.pdf>.
3. Указ Президента Российской Федерации от 01.12.2016 г. № 642 «О Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации». 25 с. URL: <http://static.kremlin.ru/media/acts/files/0001201612010007.pdf>.
4. Предварительные национальные стандарты в области Умного производства. Технический комитет 194 «Кибер-физические системы» совместно со Всероссийским институтом сертификации при поддержке Министерства промышленности и торговли РФ. 29.01.2020. URL: http://tc194.ru/industrial_public.
5. Национальная технологическая инициатива. Дорожная карта «Технет». URL: <https://nti2035.ru/technology/technet>.
6. Рот, Армин. Мир станкостроения. Внедрение и развитие Индустрии 4.0. Основы, моделирование и примеры из практики. Техносфера. 2017. 294 с.
7. Пуха, Ю. Индустриальная революция 4.0. PWC. 2017. 18 с.
8. Цифровое производство. Управление производством. №1. 117 с. URL: http://up-pro.ru/imgs/specprojects/digital-pro/Digital_production.pdf.
9. Дженкинс, Э Влияние IoT на условия и среду производственного процесса. Control Engineering Россия. 2017. URL: <https://controleng.ru/wp-content/uploads/6956.pdf>.
10. Томас Майкл Д. Цифровизация реальности для сотрудников современного производства. Control Engineering Россия. 2019. 5 с. URL: <https://controleng.ru/wp-content/uploads/8042-1.pdf>.

11. Аддитивные технологии. Цифровое производство быстрое прототипирование. URL: https://top3dshop.ru/additivnye_tehnologii.html.

12. База данных Федерального института промышленной собственности (ФИПС Роспатент). URL: <http://1.fips.ru>.

13. База данных патентного ведомства США (USA). URL: <http://uspto.gov>.

14. База данных патентного ведомства Китая (CN). URL: <http://english.cnipa.gov.cn/>.

15. База данных патентного ведомства Германии (DE). URL: <http://www.dpma.de/>.

16. База данных патентного ведомства Кореи (KR). URL: <http://www.kipo.go.kr/>.

17. База данных патентного ведомства Франции (FR). URL: <http://www.inpi.fr/>.

18. База данных патентного ведомства Японии (JP). URL: <http://www.jpo.go.jp/>.

19. База данных патентного ведомства Нидерландов (NL). URL: <http://english.rvo.nl/>

20. База данных патентного ведомства Австралии (AU). URL: <http://www.ipaustralia.gov.au/>.

21. База данных патентного ведомства Тайваня (TW). URL: <http://www.tipo.gov.tw/mp.asp?mp=2>.

22. База данных Всемирной организации интеллектуальной собственности. URL: (ВОИС, WO): <http://www.wipo.int/>.

23. База данных Европейской патентной организации URL: <http://ep.espacenet.com>.

24. Петрушевская, А.А. Проектирование и производство киберфизических систем геомониторинга объектов транспорта / Г.И. Коршунов, А.А. Петрушевская // Евразийское Научное Объединение. 2018. Т. 1. № 3 (37). С. 64-68.

25. Петрушевская, А.А. Модернизация производственного процесса изготовления устройства мониторинга мобильных объектов / Н.А. Алёшкин, А.А. Петрушевская // Моделирование и ситуационное управление качеством сложных систем 2017. С. 146-149.

26. Петрушевская, А.А. Разработка и производство электронных технических средств автоматизации электропривода в условиях цифрового развития / Г.И. Коршунов, Е.Г. Семенова, А.А. Петрушевская, М.С. Смирнова // Вопросы радиоэлектроники. 2018. № 10. С. 44-49.

27. Петрушевская, А.А. Моделирование технологических процессов в производство электроники при внедрении концепции цифрового производства I Международная научно-практическая конференция «САПР и моделирование в современной электронике» / А.А. Петрушевская // 2017. С. 189-194.

28. ГОСТ Р ИСО 9000:2015. Системы менеджмента качества. Требования. М.: Стандартинформ, 2015. 87 с. 27.

29. ГОСТ Р ИСО 9001:2015. Основные положения и словарь. М.: Стандартинформ, 2015. 92 с.

30. ГОСТ Р 51901–2002. Управление надежностью. Анализ риска технологических систем. М.: Изд-во стандартов, 2002. 22 с.

31. ГОСТ Р 51901.3–2007. Менеджмент риска. Руководство по менеджменту надежности. М.: Стандартинформ, 2008. 45 с.

32. ГОСТ Р 51901.6–2005. Менеджмент риска. Программа повышения надежности. М.: Стандартинформ, 2005. 31 с.

33. ГОСТ Р 51901.11–2005. Менеджмент риска. Исследование опасности и работоспособности. М.: Стандартинформ, 2006. 41 с.

34. ГОСТ Р 51901.12–2007. Менеджмент риска. Метод анализа видов и последствий отказов. М.: Стандартинформ, 2008. 35 с.

35. ГОСТ Р 51901.14–2007. Менеджмент риска. Структурная схема надежности и булевы методы. М.: Стандартинформ, 2008. 23 с.

36. ГОСТ Р 51901.16–2017. Менеджмент риска. Повышение надежности. Статистические критерии и методы оценки. М.: Стандартинформ, 2017. 40 с.

37. Варжапетян А.Г., Коршунов Г.И. Обеспечение качества технических средств автоматизации. Ленинград. Машиностроение. 1981. 192 с.

38. Гнеденко Б.В., Беляев В.К., Соколов А.Д. Математические методы в теории надежности. М.: Наука. 1965. 524 с.

39. Петрушевская, А.А. Обеспечение качества монтажа печатных плат на основе организации межмашинного взаимодействия и 3D-инспекций / Г.И. Коршунов, А.А. Петрушевская, П.С. Зайцев // Вопросы радиоэлектроники. 2019. № 7. С. 35-41.

40. Бойкова Л. Преимущества 3D-измерения в системах контроля нанесения паяльной пасты. URL: <https://www.dipaul.ru/pressroom/preimushchestva-3d-izmereniya-v-sistemakh-kontrolya-naneseniya-payalnoy-pasty/>.

41. IPC-Hermes-9852. The Hermes Standard for vendor independent machine-to-machine communication in SMT Assembly Version 1.1. 2018.

42. IPC-Smema-9851. Mechanical Equipment Interfase Standard. Bannockburn. 20 pp. 2007.

43. Satoshi O. and Y. Watabe Saki Self-Programming Software Accelerates 3D Inspection and M2M Communication. Manufacturing / Production Technology, Hardware & Services. 2018.

44. IPC-TA-722. «Технологическое руководство по пайке» (Technology Assessment Handbook on Soldering).

45. IPC-TA-723. «Технологическое руководство по поверхностному монтажу» (Technology Assessment Handbook on Surface Mounting).

46. IPC-TR-460A. «Контрольные таблицы дефектов, возникающих при пайке волной припоя» (Trouble-Shooting Checklist for Wave Soldering Printed Wiring Boards).

47. IPC-S-816. «Руководящие указания и контрольные таблицы по процессам технологии поверхностного монтажа» (SMT Process Guideline & Checklist).

48. IPC-PE-740. «Локализация дефектов при производстве и сборке печатных плат» (Troubleshooting for Printed Board Manufacture and assembly).

49. IPC-CM-770E. «Руководящие указания по монтажу компонентов на печатные платы» (Component Mounting Guidelines for Printed Boards).

50. IPC-CM-770E. «Руководящие указания по монтажу компонентов на печатные платы» (Component Mounting Guidelines for Printed Boards).

51. IPC-SM-780. «Корпуса электронных компонентов и требования к монтажу с применением технологии поверхностного монтажа» (Component Packaging and Interconnecting with Emphasis on Surface Mounting).

52. IPC-AJ-820. «Руководство по сборке и монтажу» (Assembly & Joining Handbook).

53. IPC-SM-785. «Руководящие указания по ускоренным методам испытаний на надежность паяных соединений технологии поверхностного монтажа» (Guidelines for Accelerated Reliability Testing of Surface Mount Attachments).

54. ГОСТ Р 56251-2014. «Платы печатные. Классификация дефектов». М.: ООО «Техномаш», 2015. 116 с.

55. ООО «ПАНТЕС групп» URL: <https://www.pantes.ru/>.

56. ГОСТ Р МЭК 61165–2019. Надежность в технике. Применение Марковских методов. М.: Стандартиформ, 2019. 26 с.

57. Петрушевская, А.А. Повышение результативности производства электроники для инновационных автомобильных систем на принципах «Индустрии 4.0» / Г.И. Коршунов, А.А. Петрушевская // Инновации. 2017. № 11 (229). С. 97-100.

58. Петрушевская, А.А. Совершенствование технологических процессов при производстве и испытаниях инновационной электроники / Г.И.

Коршунов, А.А. Петрушевская, А.Е. Чуписов // Вопросы радиоэлектроники. 2017. № 10. С. 15-19.

59. ГОСТ Р 51901.21–2012. Менеджмент риска. Реестр риска. Общие положения. М.: Стандартинформ, 2014. 11 с.

60. ГОСТ Р 51901.22–2012. Менеджмент риска. Реестр риска. Правила построения. М.: Стандартинформ, 2014. 15 с.

61. ГОСТ Р 51901.23–2012. Менеджмент риска. Реестр риска. Руководство по оценке риска опасных событий для включения в реестр риска. М.: Стандартинформ, 2014. 30 с.

62. ГОСТ Р МЭК 62198–2015. Проектный менеджмент. Руководство по применению менеджмента риска при проектировании. М.: Стандартинформ, 2016. 34 с.

63. ГОСТ Р 51901.7–2017. Менеджмент риска. Руководство по внедрению ИСО 31000. М.: Стандартинформ, 2017. 30 с.

64. ГОСТ Р 51901.5–2005. Менеджмент риска. Руководство по применению методов анализа надежности. М.: Стандартинформ, 2005. 43 с.

65. ГОСТ Р 51814.2-2001 Системы качества в автомобилестроении. Метод анализа видов и последствий потенциальных дефектов. М.: Стандартинформ, 2002. 28 с.

66. Контрактная разработка и производство электроники. Promwad. URL: <https://habr.com/ru/company/promwad/blog/211975/>.

67. Алёшкин, А. А. Модели и методики мониторинга микроклимата в производстве изделий бортовой микроэлектроники: дис. ... канд. тех. наук : защищена 16.03.2017 : утв. 24.08.2017 / Алёшкин Никита Андреевич. СПб., 2017. 210 с.

68. Петрушевская, А.А. Методика поэтапной организации цифрового производства для обеспечения качества электроники с применением концепции DFM / А.А. Петрушевская // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. 2019. № 1 (3). С. 34-40.

69. ГОСТ Р 55693-2013 Платы печатные жесткие. Технические требования. М.: ООО «Техномаш», 2014. 84 с.

70. ГОСТ Р 55490-2013 «Платы печатные. Общие технические требования к изготовлению и приёмке». М.: ООО «Техномаш», 2014. 44 с.

71. Р 50-60-88 Рекомендации. Единая система технологической документации. Правила оформления документов на технологические процессы ремонта. М.: Изд-во стандартов, 1988. 16 с.

72. Petrushevskaya, A.A. Digital production management methods of radioelectronic industry / A.A. Petrushenskaya, G.I. Korshunov, S.A. Smirnov // International Workshop «Advanced Technologies in Material Science, Mechanical and Automation Engineering» (MIP: Engineering-2019). IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 537 (2019) 032037. doi:10.1088/1757-899X/537/3/032037.

73. Petrushevskaya, A.A. Modeling of digital manufacturing of electronics production and product quality assurance / G.I. Korshunov A.A. Petrushevskaya // Fuzzy Technologies in the Industry (FTI 2018) Proceedings of the II International Scientific and Practical Conference. 2018. P. 150-159.

74. Petrushevskaya, A.A. Development strategy and process models for the phased automation of design and digital manufacturing electronics / G.I. Korshunov, A.A. Petrushevskaya, V.A. Lipatnikov, M.S. Smirnova // 11th International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems, MEACS. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 327 (2018) 022062. Tomsk. DOI: 10.1088/1757-899X/327/2/022062.

75. Петрушевская, А.А. Разработка цифрового жизненного цикла при производстве электронных технических средств автоматизации / Г.И. Коршунов, А.А. Петрушевская, Е.Г. Семенова, М.С. Смирнова // Научно-технические проблемы в промышленности: будущее сильной России в высоких технологиях. С. 240-249.

76. Петрушевская, А.А. Свидетельство о гос. регистрации базы данных: «Компоненты обеспечения качества технологических процессов изготовления

электроники в условиях цифрового производства» / А.А. Петрушевская, Г.И. Коршунов // рег. №2018620790 от 01.06.2018 г. (№ заявки2018620449 от 16.04.2018 г.).

77. Петрушевская, А.А. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ: «Программа адаптации структуры цифровой линии монтажа электроники компонентами технологических инноваций на основе анализа вероятностей состояний процессов, обеспечивающая оценку результативности производства и качества продукции» / А.А. Петрушевская // рег.№ 2019661707 от 05.09.2019 г.

78. Петрушевская, А.А. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ: «Программа адаптации структуры цифровой линии монтажа электроники компонентами технологических инноваций на основе анализа вероятностей состояний процессов, обеспечивающая оценку результативности производства и качества продукции» / А.А. Петрушевская // рег.№ 2019661707 от 05.09.2019 г.

79. Технология радиоэлектронных устройств и автоматизации производства / А.П. Достанко, В.Л. Ланин, А.А. Хмыль, Л.П. Ануфриев // 391 с. URL: https://www.bsuir.by/m/12_100229_1_75816.pdf.

80. Киберфизические системы в экологической безопасности и геомониторинге автотранспорта / Р.И. Сольнищев, Г.И. Коршунов, А.А. Петрушевская, А.В. Параничев // СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2019. 148 с.

81. Петрушевская, А.А. Модель управления технологическими операциями автоматического монтажа печатных плат на основе многопараметрического нечеткого классификатора с обучением / А.А. Петрушевская // Наука и бизнес: пути развития. 2019. № 12. С. 106-111.

82. Петрушевская, А.А. Оптимизация производственных процессов промышленного предприятия в условиях реализации концепции бережливого производства / Н.А. Алёшкин, А.А. Петрушевская // Передовые инновационные разработки. Перспективы и опыт использования, проблемы внедрения в производство. Казань: ООО «Конверт». 2019. С. 8-10.

83. Петрушевская, А.А. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ: «Программа интеллектуализации производственных процессов изготовления электроники, обеспечивающая критериальную оценку качества продукции» / А.А. Петрушевская // рег.№ 2019661474 от 02.09.2019 г.

84. Petrushevskaya, A.A. Methods and algorithms of technological preparation for organizing automatic surface mount of printed circuit boards / G.I. Korshunov, P.S. Zaicev, A.A. Petrushevskaya // Conference on Applied Physics, Information Technologies and Engineering» (APITECH-2019). Journal of Physics: Conference Series (JPCS) 1399 (2019) 033076. Krasnoyarsk. DOI:10.1088/1742-6596/1399/3/033076.

85. Петрушевская, А.А. Организация жизненного цикла электронной и приборной продукции в условиях технологических инноваций / Г.И. Коршунов, А.А. Петрушевская, М.С. Смирнова // СПб.: Изд-во: ГУАП, 2019. С. 125.

86. Петрушевская, А.А. Совершенствование процесса изготовления и монтажа электроники в условиях организации цифрового производства / Н.А. Алёшкин, А.А. Петрушевская // Наука и бизнес: пути развития. 2019. № 8. С. 27-30.

87. Petrushevskaya, A.A. Methodology for ensuring sustainable automatic control of the manufacturing process of manufacturing electronics using the fuzzy logic apparatus / A.A. Petrushevskaya, N.A. Aleshkin // Conference on Applied Physics, Information Technologies and Engineering» (APITECH-2019). Journal of Physics: Conference Series (JPCS) 1399 (2019) 022015. Krasnoyarsk. DOI:10.1088/1742-6596/1399/2/022015.

88. Petrushevskaya, A.A. Control model of technological operations of mounting automatic printed circuit boards based on a multiparameter fuzzy classifier / A.A. Petrushevskaya // International Conference on Industrial Engineering Transport, Building Design and Information Technology (ITBI-2018). Novosibirsk. Journal of Physics Conference Series (JPCS) 1333 (2019) 042026. DOI: 10.1088/1742-6596/1333/4/042026.

89. Петрушевская, А.А. Модель организации технологического процесса изготовления электроники с использованием принципов цифрового производства / А.А. Петрушевская // Вопросы радиоэлектроники. 2019. № 1. С. 46-50.

90. Петрушевская А.А. Модель оптимизации процесса управления производством радиоэлектронных изделий / Петрушевская А.А., Алешкин Н.А. // Вопросы радиоэлектроники. 2020. № 2. С. 38-42.

91. Петрушевская, А.А. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ: «Программа мониторинга процессов производства радиоэлектроники на основе межмашинного интеллектуального взаимодействия компонентов оборудования» / А.А. Петрушевская // рег.№ 2020610583 от 16.01.2020 г.

92. Петрушевская, А.А. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ: «Программа управления процессом автоматического монтажа печатных плат на основе введения средств интеллектуального межмашинного взаимодействия компонентов оборудования» / А.А. Петрушевская // рег.№ 2019619203 от 12.07.2019 г.

93. Петрушевская, А.А. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ: «Программа моделирования этапов цифрового производства электроники для систем мониторинга» / А.А. Петрушевская, Г.И. Коршунов // рег. № 2018616699 от 06.06.2018 г.

94. Петрушевская, А.А. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ: «Программа интеллектуальной системы управления производственным процессом изготовления электронной продукции на этапе Solder Paste Inspection» / А.А. Петрушевская, Г.И. Коршунов // рег. № 2018663527 от 30.10.2018 г.

95. Петрушевская, А.А. Свидетельство о гос. регистрации баз данных: «Элементная база для изготовления модулей устройств беспроводной передачи данных» / А.А. Петрушевская, М.А. Меркова, А.В. Рабин // рег. № 2018622062 от 17.12.2018 г. (№ заявки 2018621770 от 30.10.2018 г.)

96. Четвертая промышленная революция К. Шваб. Бомбора. 2016. 230 с.

97. Технологии индустрии 4.0: влияние на повышение производительности промышленных компаний Тарасов И.В. Стратегические решения и риск-менеджмент. 2018 С. 62-69.

98. Индустрия 4.0 диктует новые подходы к автоматизации производства. URL: <https://cosmetic-industry.com/industriya-4-0-diktuet-novye-podhody-k-avtomatizatsii-proizvodstva.html>

99. Индустрия 4.0: понятие, концепции, тенденции развития. Тарасов И.В. Издательский дом «Реальная экономика».2018. № 6. С. 57-63.

100. Петрушевская, А.А. Обеспечение устойчивости модели управления технологическим процессом монтажа печатных плат с применением нечеткой логики / А.А. Петрушевская // Наука и бизнес: пути развития. 2019. № 9. С. 36-39.

101. Петрушевская, А.А. Адаптивная методика управления производственным процессом изготовления электроники с применением рекуррентного оценивания и нечеткого регулирования / Н.А. Алёшкин, А.А. Петрушевская // Наука и бизнес: пути развития. 2019. № 8. С. 23-26.

102. Aleshkin, N.A. The formation of control actions in the automatic climate control system in the production of electronics based on the inclusion of a fuzzy controller in the recurrence algorithm/ N.A. Aleshkin, A.P. Aleshkin, A.A. Petrushevskaya // International Scientific Conference ICMSIT-2020: Metrological Support of Innovative Technologies.

103. ГОСТ Р 53432-2009. Надежность в технике. Термины и определению. М.: Стандартинформ, 2016. 28 с.

104. Шкляр В.Н. Надежность систем управления. Томск ТПУ. 2011. 126 с.

105. ГОСТ 18322-78 Система технического обслуживания и ремонта техники. Термины и определения (с изменениями № 1, 2). М.: Стандартинформ, 1980. 35 с.

106. ГОСТ 27.002-2015 Надежность в технике (ССНТ). Термины и определения. М.: Стандартиформ, 2017. 63 с.

107. ГОСТ 26228-90. Системы производственные гибкие. Термины и определения, номенклатура показателей. М.: Стандартиформ, 2015. 13 с.

108. ГОСТ 3.1109-82. Единая система технологической документации. Термины и определения основных понятий. М.: Стандартиформ, 2019. 98 с.

109. ГОСТ 2.123-93. Единая система конструкторской документации. Комплектность конструкторских документов на печатные платы при автоматизированном проектировании. М.: Стандартиформ, 2019. 6 с.

110. ГОСТ 3.1428-91. Единая система технологической документации. Правила оформления документов на технологические процессы (операции) изготовления печатных плат. М.: Стандартиформ, 2019. 83 с.

111. ГОСТ Р 50626-93. Платы печатные. Основные положения построения технических условий. М.: Стандартиформ, 2015. 8 с.

112. ГОСТ 23752-79. Платы печатные. Общие технические условия (с Изменениями N 1-5). М.: Стандартиформ, 2017. 37 с.

113. ГОСТ 10317-79 «Платы печатные. Основные размеры». М.: Стандартиформ, 2020. 4 с.

114. ГОСТ Р 53432-2009 «Платы печатные. Общие технические требования к производству». М.: Стандартиформ, 2010. 32 с.

115. Петрушевская, А.А. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ: «Комплекс моделирования оптимизации и управления производственным процессом монтажа радиоэлектронных изделий на основе многопараметрических нечетких регуляторов» / А.А. Петрушевская // рег.№ 2020610584 от 16.01.2020 г.

116. Петрушевская, А.А. Свидетельство о гос. регистрации базы данных: «База данных управления процессом автоматического монтажа электроники с применением многопараметрического нечеткого регулятора» / А.А. Петрушевская // рег. №2018621926 от 03.12.2018 г.

**КОНТРАКТНОЕ
ПРОИЗВОДСТВО И
РАЗРАБОТКА
ЭЛЕКТРОНИКИ**



Тел./Ф.: +7 (812) 740-7199, 740-7198
Тел./Ф.: +7 (495) 229-31-43
E-mail: pantes@pantes.ru
www.pantes.ru; www.pantes-group.ru
СПб, Ириновский пр., 2, офис 309

ИНН 5406562761 КПП 780601001

Юридический адрес: 195248, Санкт-Петербург г, Ириновский пр-кт, дом № 2 литер А

Почтовый адрес для финансовых документов: 195248, Санкт-Петербург, а/я 57

УТВЕРЖДАЮ

Директор по производству

Кандидат технических наук


«24» 12 2018 г.



АКТ

**о внедрении результатов диссертационной работы
ПЕТРУШЕВСКОЙ Анастасии Андреевны, представленной на соискание учёной
степени кандидата технических наук по специальности 05.02.22 – Организация
производства (радиоэлектроника и приборостроение)**

Комиссия в составе:

Председатель: Брусенцов Кирилл Аркадьевич, к.т.н., директор по производству

Члены комиссии:

1. Пестова Анна Александровна, менеджере по управлению качеством
2. Паюсов Алексей Сергеевич, инженер-метролог

назначенная приказом Генерального директора от 02.ноября.2018 года № 69, настоящим подтверждает, что в рамках системы менеджмента качества ООО «ПАНТЕС груп» внедрены следующие результаты диссертационной работы «Модели и методики организации цифрового производства радиоэлектронных изделий на основе внедрения межмашинного взаимодействия»:

1. Математическая модель структуризации и типизации производственного процесса на основе оценки вероятностей переходов состояний технологической линии при монтаже радиоэлектронных изделий.

2. Методика мониторинга процессов монтажа радиоэлектронных изделий и внедрения технологии межмашинного интеллектуального взаимодействия компонентов оборудования.

Внедрением представленных результатов предусмотрено:

**КОНТРАКТНОЕ
ПРОИЗВОДСТВО И
РАЗРАБОТКА
ЭЛЕКТРОНИКИ**



Тел./Ф.: +7 (812) 740-7199, 740-7198
Тел./Ф.: +7 (495) 229-31-43
E-mail: pantes@pantes.ru
www.pantes.ru; www.pantes-group.ru
СПб, Ириновский пр., 2, офис 309

ИНН 5406562761 КПП 780601001

Юридический адрес: 195248, Санкт-Петербург г, Ириновский пр-кт, дом № 2 литер А
Почтовый адрес для финансовых документов: 195248, Санкт-Петербург, а/я 57

1. Уменьшить долю бракованной продукции с 2% до 0,5%.
2. Уменьшить временные затраты на работу персонала от 1,2 до 3,5 раз посредством сокращения влияния человеческого фактора на технологический процесс за счет внедрения технологии межмашинного интеллектуального взаимодействия компонентов оборудования.

Председатель:

Брусенцов Кирилл Аркадьевич

Члены комиссии:

1. Пестова Анна Александровна

2. Паюсов Алексей Сергеевич

Three handwritten signatures in blue ink are visible. The top signature is the most prominent, followed by two smaller ones below it.

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ АЭРОКОСМИЧЕСКОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ»
(ГИАП)

Большая Морская ул., д. 67, лит. А, Санкт-Петербург, 190000, Тел. (812) 710-6510, факс (812) 494-7057,
E-mail: common@aanet.ru; http://www.giap.ru; ОКПО 02068462; ОГРН 1027810232680; ИНН/КПП 7812003110/783801001

№ _____
На № _____ от _____



АКТ О ВНЕДРЕНИИ

результатов диссертационной работы
Петрушевой Анастасии Андреевны

«Модели и методики организации цифрового производства радиоэлектронных изделий на
основе внедрения межмашинного взаимодействия»

Комиссия в составе:

Председатель: заместитель директора института ФПТИ А.Ю. Гулевитский

Члены комиссии:

доцент кафедры инноватики и интегрированных систем качества С.А. Назаревич

доцент кафедры инноватики и интегрированных систем качества В.В. Курлов

составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы «Модели и методики организации цифрового производства радиоэлектронных изделий на основе внедрения межмашинного взаимодействия», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук:

– математическая модель структуризации и типизации производственного процесса на основе оценки вероятностей переходов состояний технологической линии при монтаже радиоэлектронных изделий;

– методика планирования производственного процесса монтажа радиоэлектронных изделий при их поэтапном совершенствовании, формирующая критериальную оценку состояния работоспособности производственной линии;

– методика мониторинга процессов монтажа радиоэлектронных изделий и внедрения технологии межмашинного интеллектуального взаимодействия компонентов оборудования;

– модель организации производственного процесса монтажа радиоэлектронных изделий на основе многопараметрических нечетких регуляторов с возможностью формирования базы данных.

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

Материалы диссертационной работы Петрушевой Анастасии Андреевны были использованы в учебном процессе в дисциплинах «Методология инновационной деятельности», «Технологии нововведений», «Автоматизированные производственные системы», «Управление инновационной деятельностью», читаемых на кафедре № 5 Инноватики и интегрированных систем качества для студентов направлений «Управление качеством» и «Инноватика» уровня бакалавриата.

Председатель комиссии:

Заместитель директора института ФПТИ,
канд.техн. наук, доцент

А.Ю. Гулевитский

Члены комиссии:

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

В.В. Курлов

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

Я.А. Щеников



УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор

ООО «ПФ ЭЛкон»

И.Г. Коршунов

« 30 » 08 2019 г.

**АКТ****О ВНЕДРЕНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ**

ассистента кафедры инноватики и интегрированных систем качества

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

Петрушевской Анастасии Андреевны

Комиссия в составе:

Председатель: Игорь Геннадьевич Коршунов, к.т.н., Генеральный директор

Члены комиссии:

Начальник производства Смолин Дмитрий Валерьевич

Инженер-технолог Алексеенко Екатерина Валерьевна,

составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы ассистента кафедры инноватики и интегрированных систем качества Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» на тему: «Модели и методики организации цифрового производства радиоэлектронных изделий на основе внедрения межмашинного взаимодействия», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук:



1. Математическая модель структуризации и типизации производственного процесса на основе оценки вероятностей переходов состояний технологической линии при монтаже радиоэлектронных изделий.
2. Методика планирования производственного процесса монтажа радиоэлектронных изделий при их поэтапном совершенствовании, формирующая критериальную оценку состояния работоспособности производственной линии.
3. Методика мониторинга процессов монтажа радиоэлектронных изделий и внедрения технологии межмашинного интеллектуального взаимодействия компонентов оборудования.
4. Модель организации производственного процесса монтажа радиоэлектронных изделий на основе многопараметрических нечетких регуляторов с возможностью формирования базы данных.

использованы при обосновании технического проекта по проектированию линии автоматического монтажа изделий радиоэлектроники общества с ограниченной ответственностью «ПФ Элкон».

Председатель комиссии:

Генеральный директор


И.Г. Коршунов

Члены комиссии:

Начальник производства


Д.В. Смолин

Инженер-технолог


Е.В. Алексеенко

Общество с ограниченной ответственностью «Альт-Комплект»

УТВЕРЖДАЮ



Генеральный директор

ООО «Альт-Комплект»

Чашкина А.В. Чашкина

«09» 12 2019 г.

АКТ О ВНЕДРЕНИИ

результатов диссертационной работы

Петрушевской Анастасии Андреевны

«Модели и методики организации цифрового производства радиоэлектронных изделий и на основе внедрения межмашинного взаимодействия»
в разработках ООО «Альт-Комплект»

Комиссия в составе начальника технического отдела О.А. Башкирова, заместителя начальника технического отдела С.А. Шарапова, инженера технического отдела Е.М. Глуховского, подтверждает, что результаты диссертационной работы А.А. Петрушевской на тему: «Модели и методики организации цифрового производства радиоэлектронных изделий на основе внедрения межмашинного взаимодействия», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.22 – Организация производства (радиоэлектроника и приборостроение), использованы при выполнении прикладных научных исследований по соглашению о предоставлении субсидии от 26 сентября 2017 г. № 14.578.21.0233 в рамках Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы» по теме: «Разработка экспериментального образца устройства для обеспечения беспроводной подзарядки аккумуляторов имплантатов» с целью формирования технических требований и предложений по разработке, производству и эксплуатации устройств для обеспечения беспроводной подзарядки аккумуляторов имплантатов и беспроводного питания

безаккумуляторных имплантатов» с учетом технологических возможностей и особенностей индустриального партнера – организации реального сектора экономики.

Проведен анализ ручного изготовления экспериментальных образцов Устройств в количестве, требуемом ТЗ, а также организации полуавтоматического и автоматического монтажа при переходе к производству малых серий устройств (до 5000 изделий).

Разработаны обладающие практической значимостью предложения по организации производства серий устройств по итогам последующего выполнения ОКР на тему: «Разработка опытного образца устройства для обеспечения беспроводной подзарядки аккумуляторов имплантатов и беспроводного питания безаккумуляторных имплантатов». Обеспечение результативности технологического процесса производства изделий радиоэлектронной продукции (в частности, печатных плат устройств) возможно как за счет модернизации технологического оборудования, так и за счет поэтапной организации производства.

Основным предложением является внедрение мониторинга процесса производства на основе межмашинного интеллектуального взаимодействия компонентов оборудования производственной линии, обеспечивающего поэтапное сокращение влияния человеческого фактора, сокращение временных затрат от 1,2 до 3,5 раза и уменьшение доли бракованной продукции с 2% до 0,5%.

Председатель комиссии:

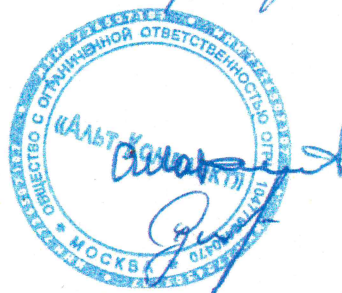
Начальник технического отдела

О.А. Башкиров

Члены комиссии:

Заместитель начальника
технического отдела

Инженер технического отдела



С.А. Шарапов
Е.М. Глуховской

РБС КОНСАЛТИНГ

**Общество с ограниченной ответственностью
«РБС: Консалтинг»**

191124, Санкт-Петербург,
Синопская наб., д. 52, лит. А, пом. 208
Тел/факс +7 (966) 751-74-76
ИНН 7811358858 / КПП 784201001
ОГРН 5067847525059

УТВЕРЖДАЮ



Генеральный директор

ООО «РБС: Консалтинг»

_____ О.В. Сеницын

_____ 2019 г.

АКТ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ

результатов диссертационной работы Петрушевской Анастасии Андреевны
«Модели и методики организации цифрового производства радиоэлектронных изделий на
основе внедрения межмашинного взаимодействия», представленной на соискание ученой
степени кандидата технических наук по специальности 05.02.22 – Организация производства
(радиоэлектроника и приборостроение)

Настоящий акт составлен о том, что новые научные результаты, сформулированные
Петрушевской Анастасией Андреевной в диссертационной работе «Модели и методики
организации цифрового производства радиоэлектронных изделий на основе внедрения
межмашинного взаимодействия»:

1. Математическая модель структуризации и типизации производственного процесса на
основе оценки вероятностей переходов состояний технологической линии при монтаже
радиоэлектронных изделий;

2. Методика планирования производственного процесса монтажа радиоэлектронных
изделий при их поэтапном совершенствовании, формирующая критериальную оценку
состояния работоспособности производственной линии;

3. Методика мониторинга процессов монтажа радиоэлектронных изделий и внедрения
технологии межмашинного интеллектуального взаимодействия компонентов оборудования;

4. Модель организации производственного процесса монтажа радиоэлектронных
изделий на основе многопараметрических нечетких регуляторов с возможностью
формирования базы данных

использованы при выполнении опытно-конструкторских и технологических работ в
рамках реализации комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства
по теме: «Комплексный проект по созданию высокотехнологичного производства
программных средств автоматического анализа документации на бумажных и цифровых
носителях с применением семантико-когнитивных технологий для целей каталогизации

слабоструктурированной информации», проводившегося в соответствии с соглашением № 075-11-2019-055 от 27 ноября 2019 г. согласно Постановлению Правительства РФ №218 «Развитие кооперации Российских образовательных организаций высшего образования, государственных научных учреждений и организаций реального сектора экономики в целях реализации комплексных проектов по созданию высокотехнологичных производств» от 9 апреля 2010 г.

Председатель комиссии:

Зам. генерального директора

Д.И. Лашкин

Члены комиссии:

Ведущий специалист

С.Ю. Солоха

Специалист

В.П. Гаталай

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2020610584

**Комплекс моделирования оптимизации и управления
производственным процессом монтажа радиоэлектронных
изделий на основе многопараметрических нечетких
регуляторов**

Правообладатель: *Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения» (RU)*

Автор: *Петрушевская Анастасия Андреевна (RU)*

Заявка № 2019667521

Дата поступления 25 декабря 2019 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 16 января 2020 г.



*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

Г.П. Ивлиев



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2020610583

**Программа мониторинга процессов производства
радиоэлектроники на основе межмашинного
интеллектуального взаимодействия компонентов
оборудования**

Правообладатель: *Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения» (RU)*

Автор: *Петрушевская Анастасия Андреевна (RU)*

Заявка № **2019667519**

Дата поступления **25 декабря 2019 г.**

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ **16 января 2020 г.**

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

Г.П. Ивлиев



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2019661707

Программа адаптации структуры цифровой линии монтажа электроники компонентами технологических инноваций на основе анализа вероятностей состояний процессов, обеспечивающая оценку результативности производства и качества продукции

Правообладатель: *Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» (RU)*

Автор: *Петрушевская Анастасия Андреевна (RU)*

Заявка № 2019660444

Дата поступления 21 августа 2019 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 05 сентября 2019 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев





СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2019661474

Программа интеллектуализации производственных процессов изготовления электроники, обеспечивающая критериальную оценку качества продукции

Правообладатель: *Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» (RU)*

Автор: *Петрушевская Анастасия Андреевна (RU)*

Заявка № **2019660357**

Дата поступления **20 августа 2019 г.**

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ **02 сентября 2019 г.**

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

Г.П. Ивлиев





СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2019619203

**Программа управления процессом автоматического
монтажа печатных плат на основе введения средств
интеллектуального межмашинного взаимодействия
компонентов оборудования**

Правообладатель: **Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения» (RU)**

Автор: **Петрушевская Анастасия Андреевна (RU)**

Заявка № **2019617956**

Дата поступления **01 июля 2019 г.**

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ **12 июля 2019 г.**

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2018616699

«Программа моделирования этапов цифрового производства
электроники для систем мониторинга»

Правообладатель: *Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения» (RU)*

Авторы: *Петрушевская Анастасия Андреевна (RU),
Коришунов Геннадий Иванович (RU)*

Заявка № 2018613933

Дата поступления 20 апреля 2018 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 06 июня 2018 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2018663527

**«Программа интеллектуальной системы управления
производственным процессом изготовления электронной
продукции на этапе Solder Paste Inspection»**

Правообладатель: *Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения» (RU)*

Авторы: *Петрушевская Анастасия Андреевна (RU),
Коршунов Геннадий Иванович (RU)*

Заявка № 2018660521

Дата поступления 01 октября 2018 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 30 октября 2018 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

 Г.П. Ивлиев





СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации базы данных

№ 2018620790

«Компоненты обеспечения качества технологических процессов изготовления электроники в условиях цифрового производства»

Правообладатель: *Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» (RU)*

Авторы: *Петрушевская Анастасия Андреевна (RU),
Коришунов Геннадий Иванович (RU)*

Заявка № **2018620449**

Дата поступления **16 апреля 2018 г.**

Дата государственной регистрации
в Реестре баз данных **01 июня 2018 г.**

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации базы данных

№ 2018621926

**«База данных управления процессом автоматического
монтажа электроники с применением
многопараметрического нечеткого регулятора»**

Правообладатель: *Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения» (RU)*

Автор: *Петрушевская Анастасия Андреевна (RU)*

Заявка № 2018621562

Дата поступления 01 ноября 2018 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре баз данных 03 декабря 2018 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации базы данных

№ 2018622062

**«Элементная база для изготовления модулей устройств
беспроводной передачи данных»**

Правообладатель: *Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения» (RU)*

Авторы: *Петрушевская Анастасия Андреевна (RU), Меркова Мария
Алексеевна (RU), Рабин Алексей Владимирович (RU)*

Заявка № 2018621770

Дата поступления 30 ноября 2018 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре баз данных 17 декабря 2018 г.

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

Г.П. Ивлиев

