



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)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2020

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

Научный руководитель

Коршунов Геннадий Иванович
доктор технических наук, профессор
профессор кафедры инноватики и
интегрированных систем качества ФГАОУ
ВО «Санкт-Петербургский государственный
университет аэрокосмического
приборостроения»

Официальные оппоненты

Юрков Николай Кондратьевич
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Конструирование и
производство радиоаппаратуры» ФГБУ ВО
«Пензенский государственный университет»
Заслуженный деятель науки Российской
Федерации

Дзюбаненко Сергей Владимирович
кандидат технических наук
руководитель направления «Системы-в-
корпусе» дирекции по развитию
АО «ДжиЭс-Нанотех»

Ведущая организация

ФГБОУ ВО «Балтийский государственный
технический университет «ВОЕНМЕХ» им.
Д.Ф. Устинова», 190005, г. Санкт-Петербург,
ул. 1 –я Красноармейская, д. 1

Защита состоится «29» октября 2020 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета Д 212.233.04 при Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» по адресу: 190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А.

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

Автореферат разослан «03» сентября 2020 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.233.04
канд. техн. наук, доцент



Фролова Е.А.

I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования.

Реализация концепции цифровизации производства на предприятиях отечественной промышленности неизбежно ведет к взаимодействию современных интернет-технологий с производственным оборудованием и средствами автоматизированного управления производственными процессами (ПП). Тенденции интеллектуализации производств характерны для различных отраслей промышленности и, в особенности, радиоэлектроники и приборостроения. Актуальность совершенствования существующих и создания перспективных средств управления процессами изготовления радиоэлектронных изделий обусловлена 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. 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.

Существующие технологии автоматического монтажа (АМ) 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 технологическому процессу (ТП). 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.

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 ТП и надежности производственного оборудования невозможно без решения задач контроля, мониторинга, оценки вероятностей переходов состояний ПП. Для этого требуется корректное отображение статистической информации в интеллектуальных системах, созданных на основе элементов концепции «Индустрия 4.0».

Наиболее сложными задачами повышения результативности производства изделий радиоэлектроники являются встраивание технологий в производственные системы, подготовка и переоборудование производственной базы для увеличения объемов и номенклатуры производимой продукции, повышения ее качества. Для повышения результативности функционирования цифрового производства на основе внедрения технологических инноваций (ТИ) необходимо детализировать процессы изготовления продукции и подвергнуть ее анализу на всех этапах жизненного цикла (ЖЦ): от этапа закупки комплектующих до отгрузки клиентам и последующего. Обеспечение результативности ТП 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.

Степень научной разработанности темы.

Вопросы организации производства получили развитие в работах Г.И. Коршунова, Е.Г. Семеновой, А.В. Кивелева, А.В. Сидорина, З.М. Селивановой, Б.В. Гнеденко, В.К. Беляева, А.Д. Соколова, М.Г. Миронова, Е.Ф. Розмировича, М.В. Радлевского. Этапы развития организации производства в промышленности отражены в трудах М.И. Бухалкова, В.М. Балашова, А.Н. Ильиченко, И.Н. Иванова, О.Г. Туровец, В.Б. Родионова, Н.И. Новицкого, О.В. Девяткиной. Способы проектирования систем цифрового управления представлены в

работах В.А. Фетисова, Г.А. Сапожников, С.В. Богословского, В.Ф. Шишлакова, С.М. Вертешева, В.А. Коневцова, И.С. Павловского, 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, А.И. Боровкова, О.И. Клявина, А.Е. Радаева, Н.Н. Николаевского, А.Р. Ингеманссона, М.А. Чернышева, Ян Лю.

Тенденции интеллектуализации и цифровизации ТП в определяющей степени проявляются в развитии исследований по росту мощности производства, анализу элементов концепции «Индустрия 4.0», обеспечению результативности ПП, по разработке математических моделей, обеспечивающих интеллектуализацию ПП, программного обеспечения (ПО). Известные результаты исследований в недостаточной степени обеспечивают решение данных задач при организации цифрового производства радиоэлектроники, что подтверждает актуальность выбранной темы исследования.

Цель диссертационного исследования – повышение результативности процесса цифрового производства радиоэлектронных изделий на основе разработки моделей и методик поэтапного внедрения межмашинного взаимодействия.

Исходя из сформулированной цели, в работе были поставлены и решены следующие **научные задачи**:

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

2. Разработка методики планирования ПП 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 ПП монтажа радиоэлектронных изделий на основе многопараметрических нечетких регуляторов с возможностью формирования базы данных.

Предмет исследования – модели и методики управления ТП цифрового производства радиоэлектронных изделий.

Объект исследования – ТП при производстве радиоэлектронных изделий.

Теоретической и методологической базой исследования послужили научные труды отечественных и зарубежных ученых в области теории организации производства, моделирования и управления ПП и системами, мониторинга производственных и сопутствующих процессов. Методологическую основу составляют методы математического анализа, теории вероятности, системного анализа, математического моделирования, методы управления качеством.

Тематика работы соответствует областям исследования пп. 4, 5, 7, 10, 11 паспорта специальности 05.02.22 – «Организация производства».

На защиту выносятся следующие результаты исследования:

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

2. Методика планирования ПП 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 ПП 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 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. 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. Модель организации ПП 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 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.

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 ТП.

4. Модель организации процесса АМ 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 АМ 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 МК «Conference on Applied Physics, Information Technologies and Engineering» APITECH-2019 (г. Красноярск, 2019 г.), МК «Conference on Information Technologies in Business and Production» ITBI-2019 (г. Новосибирск, 2019 г.), VI МНК «Передовые инновационные разработки. Перспективы и опыт использования, проблемы внедрения в производство» (г. Казань, 2019 г.), XIII ВНК «Научно-технические проблемы в промышленности: будущее сильной России в высоких технологиях» (г. Санкт-Петербург, 2019 г.), XXXVII МНК «Перспективные направления развития современной науки» (г. Москва, 2018 г.), XI International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS Tomsk, 2017), II МНПК «Нечеткие системы и мягкие вычисления. Промышленные применения-2018» (Fuzzy Technologies in the Industry – FTI (г. Ульяновск, 2018 г.), МНПК «САПР и моделирование в современной электронике» (г. Брянск, 2017 г.), «Моделирование и ситуационное управление качеством сложных систем 2017» (г. Санкт-Петербург, 2017 г.), 70-й МСНК ГУАП (г. Санкт-Петербург, 2017 г.), МНПК «Новейшие достижения в науке и образовании» (г. Смоленск, 2016 г.), Всероссийской научно-практической конференции «Решение» (г. Березники, 2016 г.).

Публикации: по результатам исследований, выполненных в диссертации, опубликовано 24 статьи, в том числе 10 в ведущих рецензируемых научных изданиях, 7 статей, индексируемых в реферативной базе Scopus, получено 7 свидетельств о государственной

регистрации программ для ЭВМ и 3 баз данных.

Внедрение результатов исследования: повышение результативности процесса цифрового производства радиоэлектронных изделий на основе разработки моделей и методик поэтапного внедрения межмашинного взаимодействия подтверждено актами об использовании, полученными автором от ООО «ПАНТЕС груп», ООО ПФ «ЭЛКОН», ООО «Альт-Комплект», ООО «РБС:Консалтинг», ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения».

Структура диссертационной работы: диссертация состоит из введения, трех разделов, заключения, списка использованной литературы из 116 наименований. Текст диссертации изложен на 228 страницах, содержит 117 рисунков и 10 таблиц.

II. ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы, сформулированы цель, задачи, объект и предмет исследования, отражены научная новизна и практическая значимость, приведены основные результаты, выносимые на защиту.

В первом разделе проанализировано текущее состояние и перспективы развития интеграции ТИ в ПП 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 ПП изготовления радиоэлектронных изделий за счет внедрения ТИ, выделены особенности организации ТП 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 систем управления (СУ) ТП к цифровым производствам. Технологии цифрового производства, в отличие от автоматизированного, предоставляют за счет межмашинного взаимодействия оборудования единые форматы данных на всех этапах ПП и жизненного цикла продукта. Данное отличие позволяет на каждом этапе ПП оперативно идентифицировать сбой в функционировании оборудования, сократить энергопотребление, своевременно реагировать на отклонения от заданных значений параметров.

Внедрение элементов цифрового производства открыло новые возможности для обеспечения качества радиоэлектронной продукции. Современное производственное оборудование идентифицирует до 8 видов несоответствий, однако, как правило, не способно самостоятельно принимать решение по корректировке выявленного дефекта. Использование межмашинного взаимодействия на линии АМ позволяет своевременно корректировать ПП в соответствии с возможными изменениями. Задача повышения результативности процесса производства радиоэлектронных изделий и увеличения вероятности выхода годных 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.

В задачах управления ПП сборки изделий радиоэлектроники и перехода от 2D- к 3D-инспекциям цифровое представление данных и разработка соответствующего ПО становятся 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. Организация межмашинного взаимодействия (M2M) повышает результативность ПП и устраняет негативные последствия от влияния человеческого фактора, в результате чего ускоряется процесс производства и снижается вероятность возникновения ошибочных действий, приводящих к несоответствиям изделий стандартам: ГОСТ Р 56427-2015 «Пайка электронных модулей радиоэлектронных средств. Автоматизированный смешанный и поверхностный монтаж...», ГОСТ 23592-96 «Монтаж

электрический радиоэлектронной аппаратуры и приборов...», ГОСТ Р 56251-2014 «Платы печатные. Классификация дефектов», ГОСТ Р 55693-2013 «Платы печатные жесткие. Технические требования», ГОСТ ИЕС 61188-1-2-2013 «Печатные платы и печатные узлы. Проектирование и применение», ИРС-6010 «Серия стандартов, посвященных техническим характеристикам печатных плат», ИРС-2581 «Общие требования к изготовлению печатных плат. Описание производства продукции ...», ИРС-2615:2010 «Размеры печатной платы и допуски», ИЕС 60194 «Проектирование печатной платы, изготовление и сборка» и т.д.

В результате анализа текущего состояния и перспектив интеграции ТИ в ПП сборки и монтажа изделий радиоэлектроники выявлено, что основным направлением обеспечения качества продукции является поэтапная организация цифрового производства посредством внедрения элементов концепции «Индустрия 4.0».

Во втором разделе представлены модели и методика повышения результативности ТП изготовления изделий радиоэлектроники в условиях цифровизации производства. Проведена детализация этапов процесса АМ радиоэлектроники за счет внедрения ТИ с использованием аппарата марковских цепей. Разработаны: модель повышения вероятности выхода годных изделий радиоэлектроники в ТП при заданных требуемых значениях, математическая модель структуризации и типизации ПП на основе оценки вероятностей переходов состояний технологической линии при монтаже радиоэлектронных изделий и методика планирования ПП монтажа радиоэлектронных изделий при их поэтапном совершенствовании, формирующая критериальную оценку состояния работоспособности производственной линии.

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 преобладающей степени будут определяться результативностью управления ТП.

С целью уменьшения доли бракованных изделий разработана **математическая модель структуризации и типизации ПП на основе оценки вероятностей переходов состояний технологической линии при монтаже радиоэлектронных изделий**, реализованная в среде компьютерного имитационного моделирования Matlab. В таблице 1 представлены основные этапы ПП монтажа радиоэлектронных изделий и обозначены вероятности достижения этапов (состояний процессов), требования к которым заданы технологической и нормативной документацией.

Таблица 1 – Описание графа переходов состояний при монтаже радиоэлектронных изделий

Этапы (состояния)	Описание этапов ПП	Вероятность наступления этапа
S_1	Операция загрузки печатных плат	P_1
S_2	Операция трафаретной печати	P_2
S_3	Операция нанесения 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

Граф переходов для семи состояний при монтаже радиоэлектронных изделий представлен на рисунке 1. Теория графов использована в связи с возможностью детализации моделируемого объекта с целью повышения качества изготавливаемой продукции.

В случае выявления несоответствия при выполнении операции загрузки печатных плат и компонентов (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 монтажа радиоэлектронных изделий.

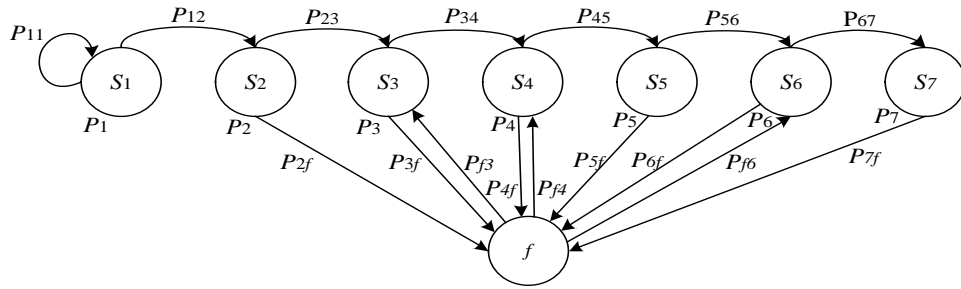


Рисунок 1 – Граф состояний ПП монтажа радиоэлектронных изделий для семи этапов

Для достижения цели исследования определим повышение результативности процесса как уменьшение значений вероятностей перехода в состояние несоответствия. Начальный вектор состояний отражает распределение вероятностей в начале процесса $[P_1(0), P_2(0), \dots, P_i(0), \dots, P_7(0)]$ и задается на основе накопленных статистик. Вероятность нахождения ПП на i -том этапе в k -тый момент времени $P_i(k)$ определяется в соответствии с полученной в исследовании формулой (1):

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

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, *nChainUnits* – число звеньев производственной цепочки, *nIterations* – количество повторений вычислений вероятности выхода годных изделий одной цепочки. Функция вычисляется как (2):

$$\text{functionAvgProb} = \text{QualityProbability}(\text{reqProb}, \text{nChainUnits}, \text{nIterations}). \quad (2)$$

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 $[0,98^{(1/7)}, 1]$ (3):

$$\text{QualityProb} = \text{QualityProb} * (\text{realpow}(\text{reqProb}, 1 / (\text{nChainUnits} - 1))) + \text{rand}(1, 1) * (1 - \text{realpow}(\text{reqProb}, 1 / (\text{nChainUnits} - 1))). \quad (3)$$

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 2 для одного изделия и партий из 10, 50 и 100 изделий соответственно. В результате использования компонента DFM – design for assembly (DFA), «проектирование монтажа», и при строгом учете требований ГОСТ были выполнены программные структуризация и типизация ПП на основе оценки вероятностей переходов состояний технологической линии при монтаже радиоэлектронных изделий.

Таблица 2 – 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 =	ans =	ans =	ans =
0,9804	0,9820	0,9836	0,9856

На рисунке 2 приведен график 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.

Разработанная математическая модель структуризации и типизации ПП на основе оценки вероятностей переходов состояний позволила выявить тренд роста вероятности выхода годных изделий при использовании подхода DFA. Из графиков зависимостей следует, что при применении DFA в процессе монтажа радиоэлектронных изделий процент выхода годных изделий с каждой партией увеличивается, что доказывает целесообразность использования данного аппарата в ПП. 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.

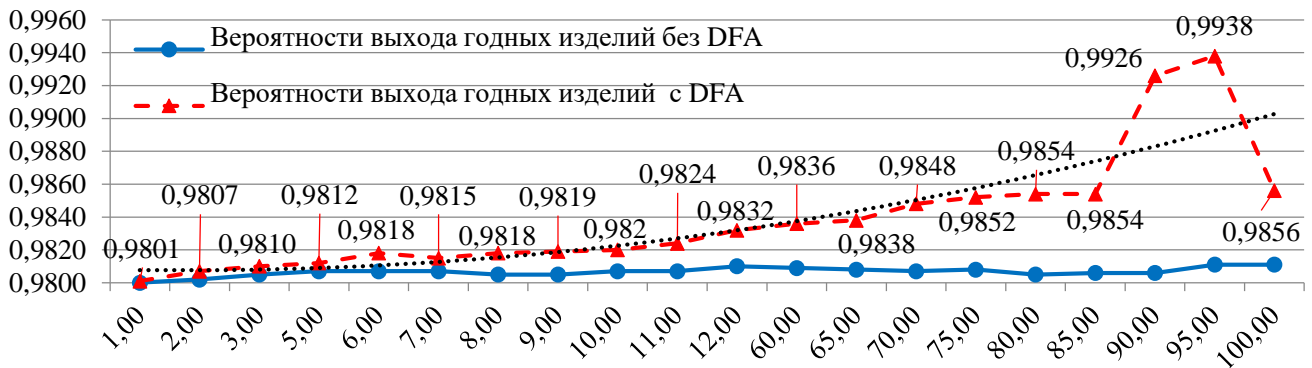


Рисунок 2 – Вероятности выхода годных изделий для технологической линии из 7 звеньев с использованием и без использования подхода DFA (100 изделий)

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 монтажа радиоэлектронных изделий на каждом этапе и качества выпускаемой продукции.

С целью анализа и доработки ТП при поэтапном совершенствовании процессов предприятия радиоэлектронной промышленности разработана **методика планирования ПП монтажа радиоэлектронных изделий при их поэтапном совершенствовании, формирующая критериальную оценку состояния работоспособности производственной линии.**

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. Для детального представления ПП и последующей интерпретации операций в формализованном виде выполнено моделирование в программе iThink. Управляемый ПП монтажа радиоэлектронных изделий в пакете математического моделирования представлен на рисунке 3.

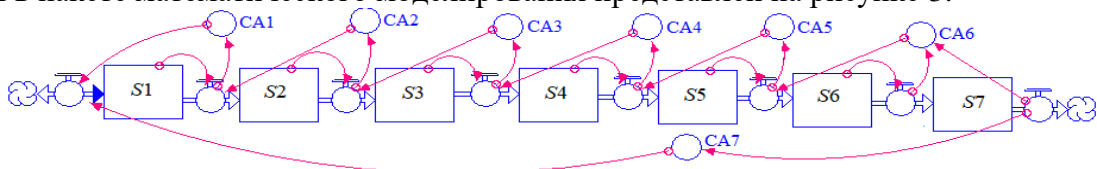


Рисунок 3 – Процессная модель монтажа радиоэлектронных изделий

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. Система уравнений для критериальной оценки работоспособности состояния линии представлена формулами (4). Использование системы позволяет рассчитать критерии работоспособности линии АМ такие как: показатель простоя линии, интенсивность загрузки оборудования, вероятность нагрузки на одну операцию, вероятность появления несоответствия на каждом этапе ПП.

$$\begin{cases} -\lambda p_0 + \gamma p_1 = 0 \\ \dots \\ \lambda p_{k-1} - (\lambda + \gamma) p_k + (k+1) \gamma p_{k+1} = 0, k = \overline{2, n-1} \\ \dots \\ \lambda p_{n-1} - (i + \gamma) p_n + \gamma p_{n+1} = 0 \\ \dots \\ \lambda p_{n+k-1} - (\lambda + \gamma) p_{n+k} + \gamma p_{n+k+1} = 0, k = \overline{1, m-1} \\ \dots \\ \lambda p_{n+m-1} - \gamma p_{n+m} = 0 \end{cases} \quad (4)$$

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).

Алгоритм ПП монтажа изделий радиоэлектроники, состоящего из семи этапов, представлен на рисунке 4. Отличительной особенностью разработанного алгоритма является введение дополнительных проверок после проведения этапов нанесения паяльной пасты, установки компонентов и лазерной маркировки с целью предоставления возможности возобновления ПП непосредственно на указанных этапах без отправки изделия на утилизацию. 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 осуществляется прогнозирование вероятности простоя системы, вероятное время завершения определенных операций работы, интенсивность загрузки оборудования, степень близости параметра к полю допуска.

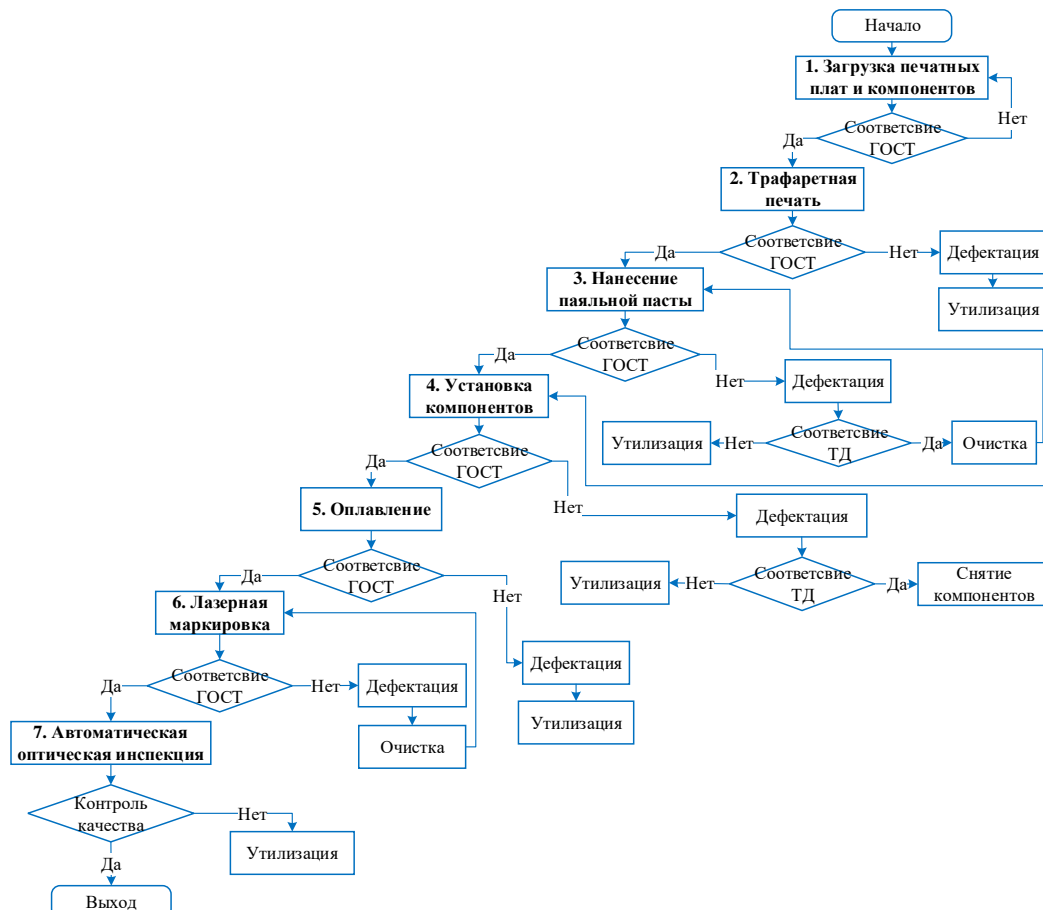


Рисунок 4 – Алгоритм поэтапного выполнения ПП радиоэлектроники из семи этапов

Методика способствует интеллектуализации ПП монтажа радиоэлектронных изделий и формирует критериальную оценку работоспособности состояния линии АМ. Для поэтапного внедрения ТИ в модель линии АМ введены значения параметров этапов для конкретного производства. Разработана новая методика планирования ПП монтажа радиоэлектронных изделий при внедрении ТИ, отличающаяся от известных проведением анализа параметров ТП и формированием критериальной оценки работоспособности производственной линии.

В третьем разделе разработаны модели и методика обеспечения результативности ТП изготовления изделий радиоэлектроники на основе поэтапного внедрения ТИ. Проведен анализ функционирования технологической линии АМ изделий радиоэлектроники при использовании КФС. Разработаны: методика мониторинга процессов монтажа радиоэлектронных изделий и внедрения технологии межмашинного интеллектуального взаимодействия компонентов оборудования, модель организации ПП монтажа радиоэлектронных изделий на основе многопараметрических нечетких регуляторов и экспериментальная модель производственной цифровой линии с применением программного пакета Plant Simulation Siemens.

Разработанная **методика мониторинга процессов монтажа радиоэлектронных изделий и внедрения технологии межмашинного интеллектуального взаимодействия компонентов оборудования** содержит методы и средства контроля, анализа и оценки, обеспечивающие описание простых структур ТП и переход к внедренным в этих системах ТИ.

Методика предназначена для обеспечения интеллектуального М2М 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. Для реализации методики разработаны 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.

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.

Поэтапное внедрение ТИ представляет собой последовательный перевод операторов производственной линии (СА) в дистанционную рабочую зону (work pool). Операторы на этапах 3 и 7 после нанесения паяльной пасты, а также после нанесения лазерной маркировки (рисунок 5) отслеживают корректность выполнения операций и дополняют базу знаний возможных несоответствий.

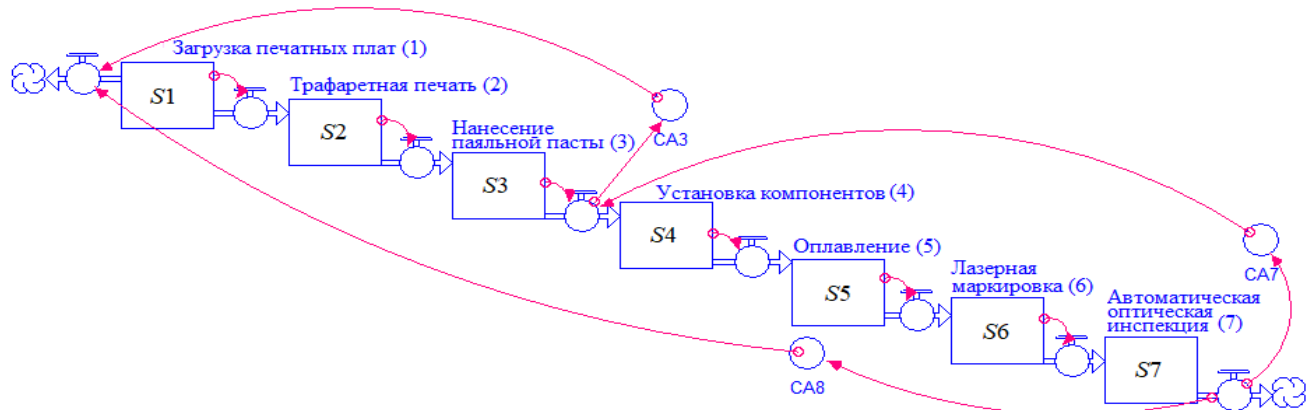


Рисунок 5 – Поэтапная реализация цифровой производственной линии с участием оператора

Использование логических операций на этапах проверки паяльной пасты (S3) и автоматической оптической инспекции (S7) осуществляется за счет программных средств, исключающих негативное влияние человеческого фактора. Планирование ПП осуществляется в результате решения задачи линейного программирования, определяющей целевой функцией (5):

$$\min \sum_{i \in M} \sum_{k \in K} I_{ik} \leq x_{ik} \leq y_{ik}, \quad (5)$$

где: M – количество изделий i , I – количество производственных ресурсов, k – период времени, x – множество изделий, y – множество ресурсов.

В свою очередь, мониторинг возможных ТИ в ПП как задача целочисленного линейного программирования задается целевой функцией (6):

$$R = \sum_{i=0}^M \left(\sum_{k=1}^K D_i y_{ik} + P_i I_{ik} + V_{ik} x_{ik} \right), \quad (6)$$

где: R – множество производственных ТИ, K – количество интервалов времени, D – фиксированная цена изделия, P – стоимость компонентов в изделии, V_{ik} – переменные издержки при производстве изделий i в период k , x – множество изделий.

Система ограничений данной задачи линейного программирования имеет вид (7):

$$\left\{ \begin{array}{l} I_{ik-1} + x_{ik} - E_i - C_{ik} - \sum_{j < i} J_{ij} x_{jk} = I_{ik} \\ \sum_w (G_{ik} y_{ik} + Z_{iw} x_{ik}) \leq C_{wk} \\ x_{ik} \leq H y_{ik}; i = 1, \dots, M; k = 1, \dots, F \\ x_{ik} I_{ik} \geq 0; i = 1, \dots, M; k = 1, \dots, F \\ x_{ik} \in \{0; 1\}; i = 1, \dots, M; k = 1, \dots, F \end{array} \right. , \quad (7)$$

где: E – временные интервалы при изготовлении изделий i (простои), C – потребность в продукции (спрос), J_{ij} – количество единиц изделий i , требующихся при производстве единиц изделий j , G_i – установленное время выпуска изделия i , w – объем производственных ресурсов, H – мощность производственных ресурсов (объем производительной базы предприятия), F – переменные ТИ, внедряемые в ПП.

Результативность работы СУ достигается за счет внедрения технологии межмашинного интеллектуального взаимодействия 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);
- после установки компонентов (component placement, SPI CP);
- после нанесения лазерной маркировки (automatic optical inspection, AOI);
- рентгеновского контроля монтажа (x-ray inspection of installation, AXI).

В случае несоответствия результатов контроля требуемым ГОСТ значениям данные результаты отображаются на экране ПК оператора, что позволило внести выявленное несоответствие в базу данных для его дальнейшей автоматической идентификации без участия оператора. Необходимость внедрения ТИ в виде многопараметрических нечетких регуляторов (НР) на каждом из рассматриваемых этапов определяется в результате статистического анализа вероятностей наступления этапа, следующего за рассматриваемым.

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. 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 (AOI), реализованных в рамках данного исследования в виде специальных датчиков

и НР с программным управлением. Также предложенный алгоритм предполагает внедрение аналогично реализованного устройства рентгеновского контроля монтажа (АХИ) в случае, если предварительный статистический анализ покажет, что доля соответствий произведённых изделий ГОСТ и ТД ниже требуемого значения.

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. Так, при выявленной в результате статистического анализа вероятности необходимости внедрения всех четырех описанных выше ТИ структурная схема ПП реализована следующим образом (рисунок 6).

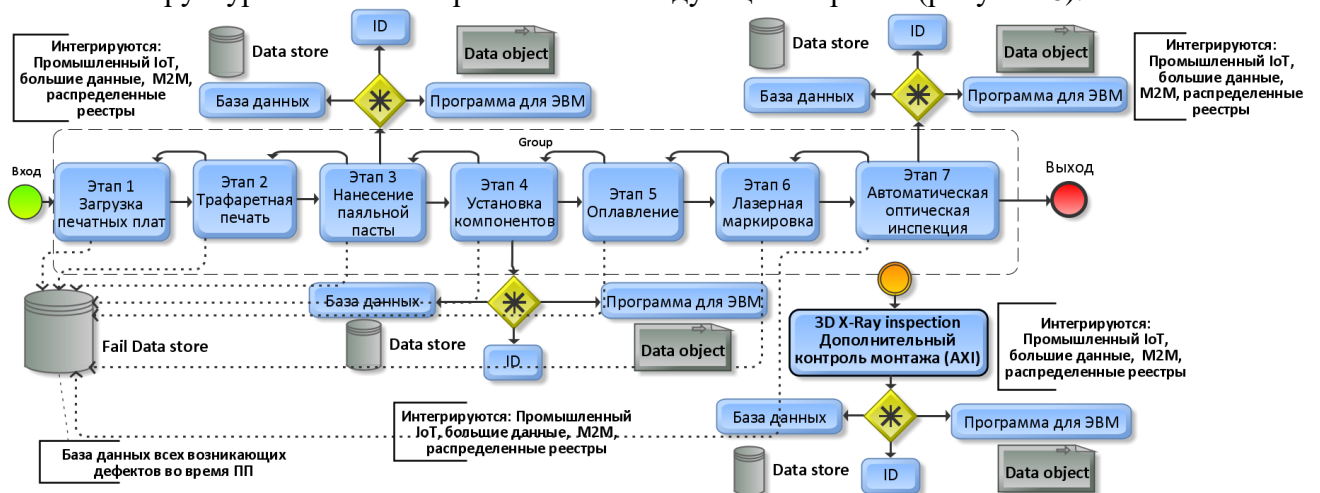


Рисунок 6 – Структурная схема внедрения на всех этапах монтажа радиоэлектронных изделий

Оператор M2M SPI-OAI-AXI представляет собой автономный контролирующий программный комплекс, выполняющий функцию отслеживания состояния ТП и мгновенного реагирования в случае возникновения не соответствующей заданным критериям качества продукции в соответствии со стандартами ИРС. Процессная модель АМ печатных плат с M2M представлена на рисунке 7.

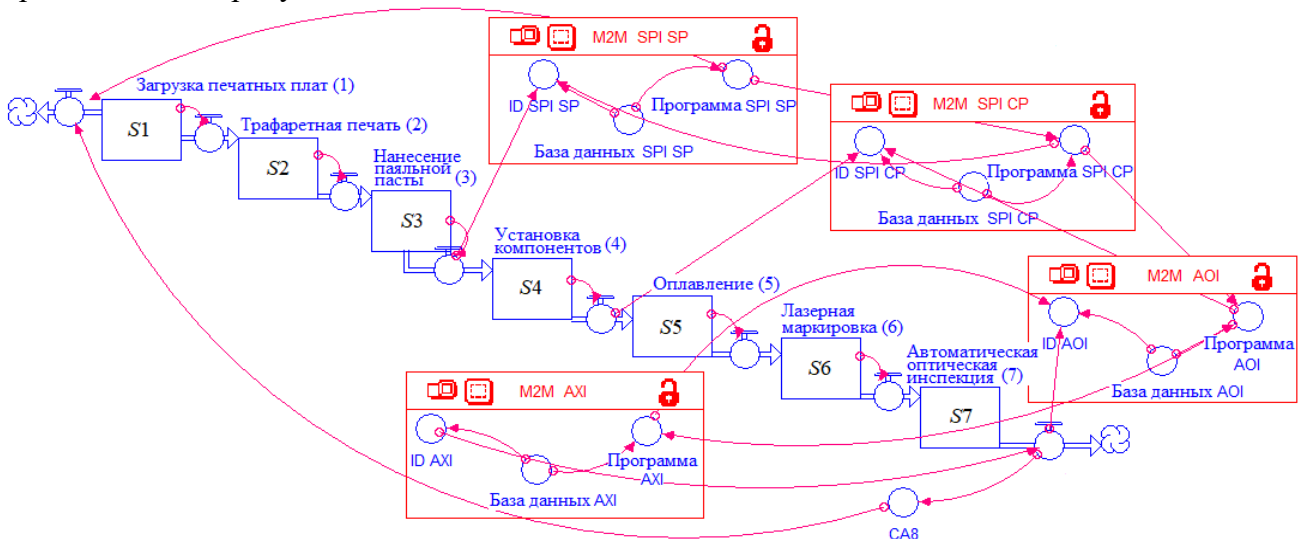


Рисунок 7 – Процессная модель АМ с внедрением ТИ M2M SPI-AOI-AXI

Разработанная методика способствует созданию детализированной процессной модели ПП монтажа изделий 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. Инновации M2M-SPI SP, M2M-SPI CP, M2M SPI-AOI и M2M SPI-AOI-AXI являются элементами цифрового производства, которые позволяют организовать ПП монтажа радиоэлектронных изделий 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%.

С целью обеспечения качества переходных процессов разработана **модель организации ПП монтажа радиоэлектронных изделий на основе многопараметрических нечетких регуляторов с возможностью формирования базы данных**. Внедрение ТИ включает применение цифровых решений, новых методов и оборудования, в виде проектирования для производства (DFM), межмашинного взаимодействия (M2M), идентификаторов (ID), интернета вещей (IoT), 2D- и 3D-инспекций. При неполных статистиках в ПП необходимо встраивать логические или нечеткие операции, выполняемые производственным оборудованием на основании заранее сформулированных баз знаний и правил. Модель организации ПП монтажа радиоэлектронных изделий на основе многопараметрических НР разработана с использованием пакета расширения среды компьютерного моделирования MatLab, содержащего инструменты для проектирования систем нечеткой логики Fuzzy Logic Toolbox.

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 управления ПП (ПК УПП), представляющий собой программную реализацию моделей и методик поэтапной организации производства радиоэлектроники.

Встраивание аппарата нечеткой 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. 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. 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. База правил первого типа состоит из 81 правила. 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 8).

	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 8 – 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 (в нашем случае, 3), N – количество видов дефектов (в нашем случае, от 4 до 8). Чем больше правил содержит база данных, тем большее количество несоответствий выявляется, и, тем самым, более точным будет результат управления. Адаптивная модель Simulink представляет собой модель, состоящую из четырех этапов: SPI SP, SPI CP, SPI-AOI и SPI-AOI-AXI (рисунок 9).

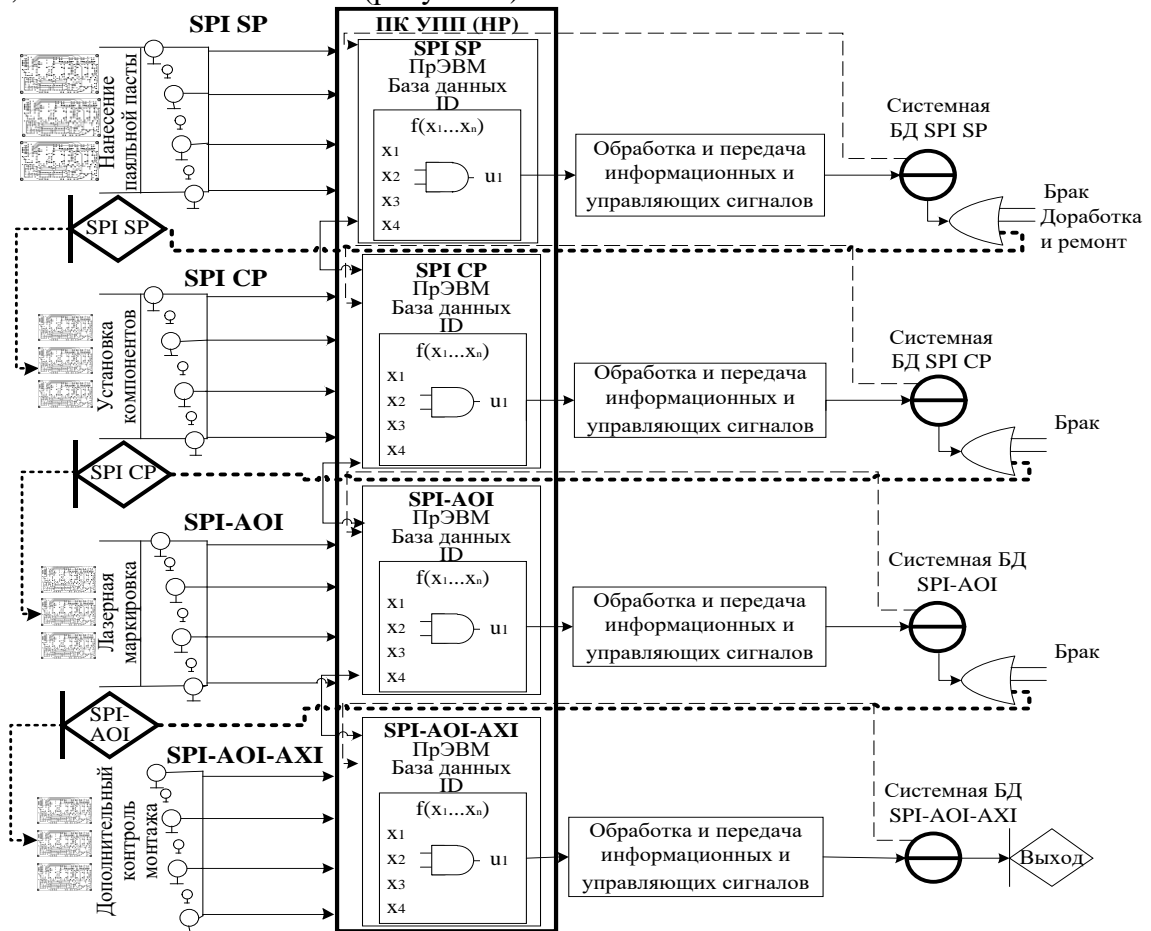


Рисунок 9 – Модель организации ПП монтажа радиоэлектронных изделий для четырех идентифицируемых видов брака

Модель имитирует работу датчиков, считывающих информацию о видах возникающих несоответствий: недостатке/избытке пасты на контактных площадках, смещении пасты относительно контактных площадок, перемычке, смазывании пасты и т.д. Количество входов НР 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. Модель предназначена для организации ПП монтажа изделий радиоэлектроники на основе многопараметрических НР, 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.

С помощью базы 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 при введении рентгеновского контроля монтажа BGA элементов X-Ray inspection (AXI) обеспечиваются локализация и устранение дефектов на основе введенных в базу данных параметров многопараметрических НР в соответствии с ГОСТ Р 56251-2014 «Платы печатные. Классификация дефектов».

Оценка работоспособности предложенных в рамках исследования решений проводилась с использованием ПО компании ALD – RAM Commander. Одной из ключевых особенностей использования программы являлась возможность импортирования данных и встраивания уже существующего программного кода, содержащего экспертные системы в организации ПП,

методы и средства мониторинга производственных и сопутствующих процессов. Использование рекомендаций системы RAMS позволило перенести созданный ПК УПП в начало ПП, тем самым снизив нагрузку на системы энергопотребления на 13,5 %.

Результаты моделирования обеспечили классификацию отказов (низкое качество сборки, чрезмерный нагрев платы, установка неверного компонента и т.д.) и их последствия (невозможность использования изделия и др.), выявили влияние конструкторско-технологических факторов (низкое качество или ошибка в выборе материала, нарушение параметров производственной среды и т.п.) на критичность отказов, проранжировали число приоритетности риска и критичности отказа, а также позволило существенно дополнить разработанную интегрированную базу данных ПП.

III. 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 страны. 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. Разработка математической модели 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.

Разработанные модели позволяют выполнять оценку доли несоответствующей продукции и окончательного брака (0,9951) и обеспечивать высокие качественные показатели при внедрении ТИ. Интеграция информации, полученной за счет использования элементов цифрового производства и операционных знаний в составе базы знаний, 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.

Внедрение основных научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертационной работе, подтверждено актами, полученными автором от ООО «ПАНТЕС групп», ООО «ПФ «Элкон», ООО «Альт-Комплект», ООО «РБС:Консалтинг», ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения».

IV. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ ОТРАЖЕНЫ В СЛЕДУЮЩИХ НАУЧНЫХ ПУБЛИКАЦИЯХ

Статьи в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях

1. 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.
2. 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.
3. 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.
4. Петрушевская, А.А. Адаптивная методика управления ПП 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.
5. 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.
6. Петрушевская, А.А. Модель организации ТП изготовления электроники с использованием принципов ЦП / А.А. Петрушевская // Вопросы радиоэлектроники. 2019. № 1. С. 46-50.
7. Петрушевская, А.А. Методика повышения результативности ПП изготовления электроники с применением концепции DFM / Н.А. Алешкин, А.А. Петрушевская, И.Р. Карпова // Вопросы радиоэлектроники. 2019. № 1. С. 51-56.
8. 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.
9. 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.
10. Петрушевская, А.А. Совершенствование ТП при производстве и испытаниях инновационной электроники / Г.И. Коршунов, А.А. Петрушевская, А.Е. Чуписов // Вопросы радиоэлектроники. 2017. № 10. С. 15-19.

Статьи в рецензируемых журналах, входящих в системы цитирования WoS и Scopus

11. Petrushevskaya, A.A. Control model of technological operations of mounting automatic printed circuit boards based on a multiparameter fuzzy classifier / A.A. Petrushevskaya // ITBI-2019. Novosibirsk. JPCS 1333 (2019) 042026. DOI: 10.1088/1742-6596/1333/4/042026.
12. Petrushevskaya, A.A. Methodology for ensuring sustainable automatic control of the manufacturing process of electronics using the FL apparatus / A.A. Petrushevskaya, N.A. Aleshkin // APITECH-2019. JPCS 1399 (2019) 022015. Krasnoyarsk. DOI:10.1088/1742-6596/1399/2/022015.
13. 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 // APITECH-2019. JPCS 1399 (2019) 033076. Krasnoyarsk. DOI:10.1088/1742-6596/1399/3/033076.
14. Petrushevskaya, A.A. Digital production management methods of radioelectronic industry / A.A. Petrushevskaya, G.I. Korshunov, S.A. Smirnov // MIP: Engineering-2019. IOP: MSE. 537 (2019) 032037. doi:10.1088/1757-899X/537/3/032037.
15. Petrushevskaya, A.A. Modeling of digital manufacturing of electronics production and product quality assurance / G.I. Korshunov A.A. Petrushevskaya // FTI 2018 Proc. of Conf. 2018. P. 150-159.
16. 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 // MEACS. IOP. 327(2018) 022062. Tomsk. DOI: 10.1088/1757-899X/327/2/022062.

Учебно-методические издания

17. Петрушевская, А.А. Организация ЖЦ электронной и приборной продукции в условиях ТИ / Г.И. Коршунов, А.А. Петрушевская, М.С. Смирнова // СПб.: Изд-во: ГУАП, 2019. С. 125.

Статьи и материалы конференций

18. Петрушевская, А.А. Оптимизация ПП промышленного предприятия в условиях реализации концепции бережливого производства / Н.А. Алёшкин, А.А. Петрушевская // Перспективы и опыт использования, проблемы внедрения в производство. Казань. 2019. С. 8-10.
19. 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.
20. 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. С. 240-249.
21. Петрушевская, А.А. Проектирование и производство КФС геомониторинга объектов транспорта / Г.И. Коршунов, А.А. Петрушевская // Евраз. Науч.О. 2018. Т. 1. № 3 (37). С. 64-68.
22. Петрушевская, А.А. Моделирование технологических процессов в производство электроники при внедрении концепции ЦП / А.А. Петрушевская // МНПК «САПР и моделирование в современной электронике» 2017. С. 189-194.
23. Петрушевская, А.А. Модернизация ПП изготовления устройства мониторинга мобильных объектов / Н.А. Алёшкин, А.А. Петрушевская // Моделирование и ситуационное управление качеством сложных систем 2017. С. 146-149.

Свидетельства о государственной регистрации

24. Петрушевская, А.А. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ: «Комплекс моделирования оптимизации и управления ПП монтажа радиоэлектронных изделий на основе многопараметрических НР» / А.А. Петрушевская // рег.№ 2020610584 от 16.01.2020 г.
25. Петрушевская, А.А. Свидетельство о гос. рег.пр. ЭВМ: «Программа мониторинга процессов производства радиоэлектроники на основе межмашинного интеллектуального взаимодействия компонентов оборудования» / А.А. Петрушевская // рег.№ 2020610583 от 16.01.2020 г.
26. Петрушевская, А.А. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ: «Программа адаптации структуры цифровой линии монтажа электроники компонентами ТИ на основе анализа вероятностей состояний процессов, обеспечивающая оценку результативности производства и качества продукции» / А.А. Петрушевская // рег.№ 2019661707 от 05.09.2019 г.
27. Петрушевская, А.А. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ: «Программа интеллектуализации ПП изготовления электроники, обеспечивающая критериальную оценку качества продукции» / А.А. Петрушевская // рег.№ 2019661474 от 02.09.2019 г.
28. Петрушевская, А.А. Свидетельство о гос. рег.пр. ЭВМ: «Программа управления процессом АМ печатных плат на основе введения средств интеллектуального межмашин. взаимодействия компонентов оборудования» / А.А. Петрушевская // рег.№ 2019619203 от 12.07.2019 г.
29. Петрушевская, А.А. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ: «Программа моделирования этапов ЦП электроники для систем мониторинга» / А.А. Петрушевская, Г.И. Коршунов // рег. № 2018616699 от 06.06.2018 г.
30. Петрушевская, А.А. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ: «Программа интеллектуальной системы управления ПП изготовления электронной продукции на этапе SPI» / А.А. Петрушевская, Г.И. Коршунов // рег. № 2018663527 от 30.10.2018 г.
31. Петрушевская, А.А. Свидетельство о гос. регистрации базы данных: «Компоненты обеспечения качества ТП изготовления электроники в условиях ЦП» / А.А. Петрушевская, Г.И. Коршунов // рег. №2018620790 от 01.06.2018 г.
32. Петрушевская, А.А. Свидетельство о гос. регистрации базы данных: «База данных управления процессом АМ электроники с применением многопараметрического НР» / А.А. Петрушевская // рег. №2018621926 от 03.12.2018 г.

Печатается в авторской редакции

Печать офсетная	Формат 60×84 1/16 Тираж 100 экз.	Бумага офсетная Заказ №
-----------------	-------------------------------------	----------------------------

Редакционно-издательский центр ГУАП
190000, Санкт-Петербург, Б. Морская улица, д.67, лит. А